TESIS DEFENDIDA POR

Ramiro Tapia Herrera

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

C. Huerta

Dr. Carlos Isidro Huerta López Director del Comité

Dr. Pedro Gilberto López Mariscal MC. José Guadalupe Acosta Chang Miembro del Comité Miembro del Comité HIM MC. Franciscø Suárez Vidal Miembro del Comité

K.

Dr. Thomas Günter Kretzschmar

Coordinador del programa de posgrado en Ciencias de la Tierra

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales Director de Estudios de Posgrado

31 de Agosto de 2009.

# CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA



# PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS EN CIENCIAS DE LA TIERRA

# ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS MÉTODOS SASW, SPAC Y HV-SPR PARA LA ESTIMACION *IN-SITU* DE PROPIEDADES DEL TERRENO

TESIS

Que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta: RAMIRO TAPIA HERRERA

Ensenada, Baja California, México, Agosto de 2009.

**RESUMEN** de la tesis de **Ramiro Tapia Herrera**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en CIENCIAS DE LA TIERRA con orientación en SISMOLOGÍA. Ensenada, Baja California. Agosto de 2009.

# ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS MÉTODO SASW, SPAC, Y HV-SPR PARA LA ESTIMACION *IN-SITU* DE PROPIEDADES DEL TERRENO

Resumen aprobado por:

C. Huerta

Dr. Carlos Isidro Huerta López Director de Tesis

Se estudiaron tanto los conceptos y procedimientos fundamentales involucrados en la aplicación de los métodos de análisis espectral de ondas superficiales (SASW, por sus siglas en inglés), de autocorrelación espacial (SPAC, por sus siglas en inglés) y cocientes espectrales H/V (HV-SPR, por sus siglas en inglés), en sus aspectos generales de sus aplicaciones para la estimación de propiedades mecánicas de geomateriales, comportamiento y análisis del fenómeno de propagación de ondas, análisis y procesamiento digital de señales e identificación de sistemas, así como los métodos de inversión de datos.

Se presentan resultados e interpretación de los datos obtenidos para estas metodologías aplicando ruido ambiental (para los métodos SASW, SPAC y HV-SPR) e impulsos inducidos (para el método SASW), en cuatro sitios de estudio con características diferentes entre sí. Los sitios elegidos son los casos del arroyo ubicado en la calle segunda en la ciudad de Ensenada B.C., México, el sitio llamado Campo Ángel, ubicado en el kilometro 64 de la carretera Tijuana Ensenada, el sitio La Salina, ubicado en la población de La Salina B.C. y el sitio denominado Rancho Ignacio Zaragoza (que será abreviado como RIZ), ubicado en predio de una zona rural entre la ciudad de Ensenada y Tecate B.C.

Se obtuvo buena correlación entre los métodos SASW, SPAC y HV-SPR en los primeros tres sitios, de los cuales, en el caso La Salina, se observó una limitada pero consistente correlación entre los tres métodos empleados y el estudio de mecánica de suelos (SPT), puesto a nuestra disposición. En el caso de estudio Campo Ángel, se observaron perfiles de velocidad de ondas de corte distintos al sitio La Salina. En el sitio Calle Segunda, se obtuvo una buena correlación entre los tres métodos empleados. En el caso de estudio RIZ, solo se obtuvo el perfil de velocidades de onda de corte con el método SASW, no fue posible obtener curvas de autocorrelación. En los primeros tres sitios se calculó su frecuencia fundamental mediante el método HVSPR.

**Palabras clave:** Método SASW, método SPAC, método HV-SPR, ruido ambiental, frecuencia fundamental, curvas de dispersión, velocidad de fase, perfil de velocidades de ondas de corte, microtremores, microsismos, algoritmos genéticos, algoritmo de fuerza bruta.

**ABSTRACT** of the thesis presented by **Ramiro Tapia Herrera** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree In EARTH SCIENCES with mayor in SEISMOLOGY. Ensenada, Baja California, México, August 2009.

# COMPARATIVE STUDY OF SASW, SPAC, AND HV-SPR METHODS FOR *IN-SITU* SOIL PROPERTIES ESTIMATION

The involved fundamental concepts and procedures in the application of the spectral analysis of surface waves (SASW), spatial auto-correlation (SPAC) and spectral ratios H/V method, were studied in their general aspects for the in-situ estimation of mechanical properties of geo-materials, the seismic waves analysis, the digital signal processing and systems identification, as well as the data inversion. Results and interpretation are presented of the collected data (induced and ambient vibrations) using these methodologies (SASW, SPAC and HV-SPR), in four studied sites with different characteristics between each other. The chosen sites are the following study cases: (i) site Calle Segunda, which is located in the stream of Arroyo Ensenada and the second street in the city of Ensenada, B.C., Mexico, (ii) the site Campo Ángel, located in kilometer 64 of the Ensenada-Tijuana road, (iii) the site La Salina, located in the Salina Port, at Km 70 of Tijuana-Ensenada road in the community of La Salina, and (iv) the site Rancho I. Zaragoza (RIZ), located in a countryside between the city of Ensenada and Tecate B.C.

Good correlation between methods SASW, SPAC and HV-SPR were found in the first three sites but La Salina, in which limited but good correlation between the three used methods was found between the results of our study and results of an available standard penetration test (SPT). In the study case of Campo Angel, velocity profiles were observed being different from La Salina site. The Calle Segunda site, showed good correlation between the three methods. In the study case of RIZ, only the shear wave velocity profile was obtained by means of SASW method; no autocorrelation curves were obtained. In the first three sites the fundamental frequency was found by means of HV-SPR method.

**Keywords:** SASW Method, SPAC method, HVSPR method, environmental noise, induced transients, fundamental frequency, Rayleigh waves, dispersion curve, phase velocity, shear wave velocity profiles, microtremors, microearthquakes, genetic algorithms, brute force algorithm.

#### DEDICATIORIA

Dedico este trabajo a mis padres Jesús Tapia y Ana María Herrera, por su constante apoyo incondicional desde mi infancia, así como por sus valiosos consejos para ser un hombre de bien.

También dedico esta tesis a mi hijo Aleem, ya que él es mi motor para seguir adelante.

Por último quiero dedicar este trabajo de todo corazón a mi gran amiga y esposa del alma Isyary Carballo, que me ha apoyado en todo momento para lograr concluir esta tesis.

#### AGRADECIMIENTOS

A Dios por hacerme lograr esta meta, a mi familia por su constante apoyo y esfuerzo.

Quiero agradecer especialmente a mi asesor y amigo Dr. Carlos Isidro Huerta López, por brindarme la oportunidad de trabajar a su lado, y por todo su empeño en darme herramientas sólidas para mi vida profesional y humana, ya que ha sido como un padre que se preocupa por enseñar y formar a su hijo.

Agradezco a CICESE por facilitarme la realización de mis estudios de maestría, con todos mis maestros, que con mucho esfuerzo se preocuparon por darme una formación integral en el ámbito profesional.

A todos los técnicos de Ciencias de la Tierra por haberme brindado su ayuda a lo largo de la maestría: Gustavo Arellano y Susana Álvarez. Especial reconocimiento a los técnicos Oscar Gálvez, y Luis Orozco del grupo RESNOM por su apoyo en los preparativos de la instrumentación para los trabajos de campo.

Al personal administrativo de Ciencias de la Tierra por haberme ayudado siempre, especialmente a: Martha Elva Barrera y Silvia Cruz.

A mis compañeros y amigos de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Baja California, Campus Ensenada: Dr. Fortunato Espinoza Barreras, Ing. Francisco Damián Díaz Guzmán, América Reynaga Márquez, y Esmeralda Ramírez González por acompañarme y apoyarme en puntos importantes del trayecto de mi tesis.

A mi compañero y amigo LCC. Francisco Pérez Moguel por apoyarme en la adquisición de datos.

Gracias a mis maestros de licenciatura la Dra. Selene Solorza Calderón y al Dr. Claudio Valencia Yavez, ex maestros de la facultad de ciencias de la UABC por verme brindado las principales herramientas fundamentales para lograr concluir esta maestría y por ser puntos clave en la mejor elección de mi vida profesional, que es haber ingresado al programa de maestría en Ciencias de la Tierra de CICESE, en especial en el área de sismología.

Por último y no menos importante, agradezco infinitamente a mi País, en especial al CONACYT por otorgarme una beca para realizar y concluir mis estudios de maestría en CICESE.

	Página
Resumen español	i
Resumen inglés	iii
Dedicatorias	iv
Agradecimientos	V
Contenido	vi
Lista de figuras	ix
Lista de tablas	xxiii
Capítulo I. Introducción	1
I.1 Importancia de la estimación de las propiedades mecánicas del suelo	3
I.2 Aspectos generales de los métodos <i>in-situ</i>	5
I.3 Objetivos y organización de esta tesis	6
Capítulo II. Marco teórico	8
II.1 Propiedades mecánicas de los materiales	8
II.2 Propiedades de las ondas sísmicas en un medio elástico	11
II.3 Velocidad de las ondas sísmicas	13
II.4 Energía de las ondas sísmicas	15
II.5 Ruido ambiental	17
II.6 Métodos exploratorios para la caracterización de suelos	19
II.7 Prueba de penetración estándar (SPT)	20
II.8 Reseña de la técnica de Cross-Hole	21
II.9 Reseña de las técnicas de Down-Hole y Up-Hole	22
II.10 Reseña del método de refracción de microtremores (Remi)	24
II.11 Reseña del método de onda estacionaria de Rayleigh	26
II.12 Reseña del método SASW	27
II.13 Reseña del método SPAC	28
II.14 Reseña del método HV-SPR	29

## CONTENIDO

# **CONTENIDO** (continuación)

Capítulo III. Antecedentes y principios generales de los métodos: SASW, SPAC y cocientes espectrales H/V (HV-SPR)	30
III.1 Descripción del método de análisis espectral de ondas superficiales (SASW)	32
III.2 Procedimiento para el método SASW	33
III.3 Marco conceptual y teórico del método SASW	38
III.4 Descripción del procesamiento para el método SASW	39
III.5 Descripción del método de autocorrelación espacial (SPAC)	42
III.6 Marco teórico y conceptual del método SPAC	46
III.7 Descripción del procesamiento para el método SPAC	49
III.8 Descripción del método de cocientes espectrales H/V (HV-SPR)	54
III.9 Método de inversión mediante algoritmos genéticos	57
III.10 Descripción de los algoritmos genéticos para los métodos SASW y SPAC	61
III.11 Descripción de la inversión paso a paso mediante el método de matrices de	
rigidez	64
Capítulo IV. Caracterización y estimación de propiedades dinámicas de varios sitios de estudio	67
IV 1 Sitio Campo Ángel	68
IV.2 Análisis mediante el método SASW: Sitio Campo Ángel	71
IV.3 Análisis espectral de fuente activa: Sitio Campo Ángel	75
IV.4 Construcción de la curva de dispersión por el método SASW: Sitio Campo	
Ángel	78
IV.5 Análisis mediante el método SPAC: Sitio Campo Ángel	82
IV.6 Análisis mediante el método HV-SPR: Sitio Campo Ángel	90
IV.7 Sitio Calle Segunda.	93
IV.8 Análisis mediante el método SASW: Sitio Calle Segunda	96
IV.9 Análisis espectral de fuentes: Sitio Calle Segunda	99
IV.10 Construcción de la curva de dispersión por el método SASW: Sitio Calle	
Segunda	105
IV.11 Análisis mediante el método SPAC: Sitio Calle Segunda	108
IV.12 Análisis mediante el método HVSPR: Sitio Calle Segunda	117
IV.13 Sitio La Salina	120
IV.14 Análisis mediante el método SASW: Sitio La Salina	124
IV.15 Análisis espectral de fuentes: Sitio La Salina	128
IV.16 Construcción de la curva de dispersión por el método SASW: Sitio La	
Salina	133
IV.17 Análisis mediante el método SPAC: Sitio La Salina	136
IV.18 Análisis mediante el método HVSPR: Sitio La Salina	143
IV.19 Sitio Ejido Zaragoza (RIZ)	146
IV.20 Análisis mediante el método SASW: Sitio Ejido Zaragoza	148
IV.21 Análisis espectral de fuentes: Sitio Ejido Zaragoza	150
IV.22 Construcción de la curva de dispersión por el método SASW: Sitio Ejido	
Zaragoza	153

IV.23 Análisis mediante el método SPAC: Sitio Ejido Zaragoza	157
Capítulo V. Discusiones y conclusiones de los sitios de estudio	161
V.1 Conclusiones del sitio Campo Ángel	161
V.2 Conclusiones del sitio La Salina.	163
V.3 Conclusiones del sitio Calle Segunda	165
V.4 Conclusiones del sitio Ejido Zaragoza	166
V.5 Conclusiones y discusiones generales	167
Referencias	170
Apéndice A. Ondas y procesamiento digital de señales y sistemas	181
A.1 Aspectos generales de las ondas	181
A.2 Ondas sísmicas	182
A.3 Ondas superficiales	185
A.4 Procesamiento de señales	188
A.5 Análisis de Fourier	188
A.6 Conversión analógica-digital	190
A.7 Análisis espectral	194
A.8 Análisis de un sistema	194
A.9 Espectro lineal	196
A.10 Autoespectro	197
A.11 Espectro cruzado	197
A.12 Función de coherencia	199
Apéndice B. Características de la instrumentación	201

#### LISTA DE FIGURAS

Figura

- 1 Ilustración de un modelo bidimensional de estratos horizontales del suelo con diferentes parámetros físicos (los subíndices indican el número del estrato al que pertenecen), descansando sobre un semiespacio.
- 2 Ciclo de histéresis como modelo del esfuerzo  $\tau$  en función de la 9 deformación  $\gamma$ , para determinar el módulo al esfuerzo cortante tangente (G<sub>tan</sub>) y secante (G<sub>sec</sub>).
- 3 Gráfica del comportamiento el módulo de cortante (G) 10 normalizado por el módulo al esfuerzo cortante máximo ( $G_{max}$ ), mostrando el decremento respecto de la deformación de cortante  $\gamma$ .
- 4 Variación de la velocidad de las ondas P (Vp), ondas Rayleigh 15 (Vr) y ondas S (Vs), normalizadas por las ondas S, en función de la razón de Poisson. Modificada de Bennett (2005).
- 5 Esquema de la distribución del desplazamiento (de las ondas 16 Rayleigh, ondas de corte y ondas compresionales) generado por una fuente puntual vertical a través de un medio homogéneo, isotrópico y elástico. Modificada de Ritchart et al. (1970).
- 6 Esquema de implementación de la técnica de cross-hole. 21 Modificado de Luna y Jadi (2000).
- 7 Esquema de implementación de la técnica de: a) up-hole y b) 23 down-hole. Modificado de Luna y Jadi (2000).
- 8 Esquema del procesado de registros de ruido mediante el método 25 Remi. Modificado de Linares (2005).
- 9 Esquema de implementación del método de ondas estacionaria 26 de Rayleigh. Modificado de Luna y Jadi (2000).
- 10 Ejemplos de una curva de dispersión en función de la longitud de 33 onda (derecha), esquema de la penetración de ondas cortas y largas en términos de la longitud de onda, en un medio estratificado de tres capas.

#### Página

4

### Figura

С.

### Página

11	Esquema de la configuración típica del método SASW. La notación "x" representa la distancia entre sensores, "Df" representa la distancia de la fuente respecto al sensor más cercano.	34
12	Esquema de la ejecución del método SASW, para distancias distintas y que utilizan distintas distancias de fuente, realizadas en diferentes tiempos (pruebas).	36
13	Arreglo típico para la aplicación del método SPAC, formando un triángulo equilátero, ilustrando un sensor común al centro y en sus vértices, simultáneamente.	44
14	Gráfica de la función Bessel de orden cero, de primera clase, en el intervalo [0, 12].	47
15	Diagrama de flujo para la inversión de los coeficientes de correlación para estimar la curva de dispersión mediante el método SPAC.	52
16	Ejemplo simple de la mutación en algoritmos genéticos.	59
17	Diagrama de flujo que ilustra el funcionamiento del algoritmo genético, empleado para modelar las curvas de dispersión para los métodos SASW y SPAC.	62
18	Onda SH viajando a través de un estrato homogéneo. Figura tomada de Huerta-López et al. (2003).	65
19	Imagen digital del sitio Campo Ángel, ubicado a 32 02' 56.70" latitud Norte y longitud 116° 52' 46.68" oeste. El triángulo blanco esquematiza la orientación de los sensores para los métodos SASW y SPAC. Modificada de Google Earth 2009 pro.	70
20	El dibujo izquierdo representa la distribución de la geología superficial del área en los alrededores del sitio Campo Ángel (rectángulo verde), así como los principales trazos de fallas regionales. El dibujo derecho muestra la zona de estudio con un rectángulo verde. Los colores amarillos corresponden a sedimentos de aluvión, los rojos a rocas ígneas. Tomadas de	71

INEGI, carta geología superficial escala 1:50000. Carta: I11D81-

#### Figura

- Esquema de las configuraciones de sensores, utilizados tanto para el método SASW como SPAC para el sitio Campo Ángel, donde solo el arreglo A-B es utilizado por el método SASW, con una orientación N70°E. El Lado A del arreglo indica el lado más cercano al océano y B el lado más cercano a la carretera Tijuana-Ensenada. Los círculos azules (y números negros) corresponden a la configuración para el método SPAC. Los triángulos negros son los sensores y sus distancias (números verdes) de para el método SASW.
- 22 Esquema de la configuración fuente-sensores para el método 74 SASW del sitio Campo Ángel, donde el lado A indica el lado del arreglo más cercano al océano y el lado B el más cercano a la carretera Tijuana-Ensenada. Los asteriscos indican las fuentes empleadas así como su distancia respecto del centro.
- 23 Análisis espectral con el método SASW, para una separación 76 entre sensores de 16 m y una fuente a 36 m respecto del censor cercano. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 8 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.
- 24 Análisis espectral con el método SASW, para una separación 77 entre sensores de 20 m y una fuente a 45 m respecto del censor cercano. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 8 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda

#### Figura

- 25 Curva de dispersión compuesta de las curvas de dispersión cuyas separaciones entre sensores (respecto del centro del arreglo) son: 6 m, 10 m, 16 m y 20 m con sus respectivas distancias de fuente, siendo: 15 m, 15 m, 36 m y 45 m, con respecto al centro del arreglo de la figura 21. La curva de color rojo es la curva suavizada de las curvas de dispersión individual, provenientes del método SASW. Curvas pertenecientes al sitio Campo Ángel. Las letras "c" y "m" indican el lado aplicado de la fuente, siendo carretera y océano, respectivamente.
- 26 Modelo del perfil de velocidades de ondas de corte mediante el 81 método SASW para el sitio Campo Ángel, calculado por razón de algoritmos genéticos. Las líneas horizontales color marrón indican la desviación estándar de los modelos iterados. La gráfica se obtuvo después de ocho iteraciones, con un criterio de variación del 1%.
- 27 Ejemplos del barrido aplicado por el algoritmo de fuerza bruta, 84 donde se calcula la desviación estándar de las ventanas (rectángulos rojos).
- 28 Gráficas de los coeficientes de correlación a una separación de 85 13m. La gráfica de la izquierda corresponde a los coeficientes de correlación obtenidos, promediando 15 ventanas de 1 minuto de ruido ambiental, aplicando un suavizado móvil con 10 puntos. La gráfica de la derecha, corresponde a los coeficientes de correlación, obtenidos a partir del algoritmo de fuerza bruta, con 38 ventanas de 17 segundos, con un tiempo total de 11 minutos.
- 29 Gráficas de los coeficientes de correlación (líneas azules) 86 obtenidas a partir de ruido ambiental con su respectivo valor de varianza. Las líneas rojas son los ajustes obtenidos a partir del algoritmo modificado por Herrmann y Ammon (2004). Las gráfica superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, corresponden a distancias radiales de 5 m, 8 m, 13 m, 20 m, 25 m y 30 m, respectivamente.

#### Página

80

#### Figura

- 30 Curva de dispersión compuesta de las curvas de dispersión cuyas 88 distancias radiales entre sensores son: 5 m, 10 m, 13 m, 20 m, 25 m y 30 m. La linea de color negro es la curva suavizada con splines cúbicos de las curvas de dispersión individual, provenientes del método SPAC. La letra "b" indica un segundo registro de 15 minutos respecto a su correspondiente distancia "a". Curvas pertencecientes al sitio Campo Ángel.
- 31 Modelo del perfil de velocidades de ondas de corte obtenido 89 mediante el método SPAC para el sitio Campo Ángel, calculado por razón de algoritmos genéticos. Las líneas horizontales color marrón indican la desviación estándar de los modelos iterados. La gráfica se obtuvo después de 17 iteraciones, con un criterio de variación del 1%.
- 32 Gráfica de los cocientes espectrales H/V calculados para el sitio Campo Ángel, obtenidos a partir de la media cuadrática de sus componentes horizontales. La línea negra representa la gráfica del cociente espectral H/V obtenido del ruido ambiental. Las líneas magenta y verde indican los márgenes superior e inferior de la desviación estándar experimental. La línea azul es la gráfica de la respuesta del terreno obtenida por la técnica de matrices de rigidez. La flecha roja indica la posición de la frecuencia fundamental  $f_0$ .
- Imagen digital del sitio Calle Segunda, ubicado a 31° 51' 39.46"
  latitud Norte y longitud 116° 37' 5.12" oeste. El triángulo blanco esquematiza la orientación de los sensores para los métodos SASW y SPAC. Modificada de Google Earth 2009 pro. La letra A en azul, indica el Boulevard Costero. La letra B en azul, indica la Calle Primera. La letra C en azul indica el puente de la Calle Segunda.
- 34 El dibujo izquierdo representa la distribución de la geología 95 superficial del área en los alrededores del sitio Calle Segunda (rectángulo verde), así como los principales trazos de fallas regionales. El dibujo derecho muestra la zona de estudio con un triangulo verde. Los colores amarillos corresponden a sedimentos de aluvión, los rojos a rocas ígneas. Tomadas de INEGI, carta geología superficial escala 1:50000. Carta: H11B12-C.

#### Figura

- 35 Esquema de la configuración de sensores utilizados tanto para el 96 método SASW como SPAC, ubicado en el cauce del arroyo en la zona de la calle segunda. La letra "c" indica la posición del sensor central. Las letras "x", "y" y "z" indican las posiciones de los vértices. Los círculos azules indican las posiciones de los sensores para el método SPAC. Los triángulos negros indican las posiciones para el método SASW.
- 36 Esquematización de la configuración fuente-sensor para el 98 método SASW en el sitio Calle Segunda.
- 37 Análisis espectral con el método SASW, para una separación 101 entre sensores de 10 m y una fuente a 15 m respecto del censor cercano. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 8 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.
- 38 Análisis espectral con el método SASW, para una separación 102 entre sensores de 10 m y una fuente a 20 m respecto del censor cercano. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 8 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.

#### Figura

- 39 Análisis espectral con el método SASW, para una separación 103 entre sensores de 40 m y una fuente a 40 m respecto del censor cercano. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 8 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.
- 40 Las gráficas de los incisos A al F, se encuentran en función de la 104 frecuencia, obtenidas a partir del espectro de potencia cruzado utilizando ventanas de 3 segundos con un traslape del 98%. La gráfica A es la curva de fase para la combinación "c-x". La gráfica B es la fase desdoblada de la gráfica A. La gráfica C es la curva de fase para la combinación "c-y". La gráfica D es la fase desdoblada de la gráfica E es la curva de fase para la combinación "c-z". La gráfica E es la curva de fase para la combinación "c-y". La gráfica D es la fase desdoblada de la gráfica F es la fase desdoblada de la gráfica E. Donde "c-x", "c-y" y "c-z" son las parejas entre sensores del centro con los vértices de la figura 35.
- 41 Curva de dispersión compuesta de las curvas de dispersión 106 provenientes del método SASW para el sitio Calle Segunda, cuyas separaciones entre sensores son: 10 m, 10 m y 20 m con sus respectivas distancias de fuente, siendo: 15 m, 20 m y 40 m, con respecto al centro del arreglo de la figura 35. La curva de color rojo es la curva suavizada por splines, obtenida a partir del promedio móvil (línea azul). La línea negra es la curva de dispersión teórica obtenida por algoritmos genéticos. La curva de la variación después de 10 iteraciones.
- 42 Modelo del perfil de velocidades de ondas de corte mediante el 107 método SASW para el sitio Calle Segunda, calculado por razón de algoritmos genéticos. Las líneas horizontales color marrón indican la desviación estándar de los modelos iterados. La gráfica se obtuvo después de 10 iteraciones, con un criterio de variación del 1%.

#### Figura

- 43 Gráficas de los coeficientes de correlación (líneas azules) 110 obtenidas a partir de ruido ambiental, con su respectivo valor de varianza. Las líneas rojas son los ajustes obtenidos a partir del algoritmo modificado por Herrmann y Ammon (2004). Las gráfica superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha e inferior izquierda, corresponden a distancias radiales de 2 m, 5 m, 10 m, 15 m y 20 m, respectivamente.
- 44 Gráficas de los coeficientes de correlación obtenidos a partir de 112 ruido ambiental. Las curvas fueron obtenidas a partir del algoritmo modificado por Herrmann y Ammon (2004). La curva azul, roja y verde, representan los coeficientes de correlación experimentales entre los sensores "c-z", "c-x" y "c-z", respectivamente de la figura 35. La curva negra es el promedio de las tres antes mencionadas. Las gráfica superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha e inferior izquierda, corresponden a distancias radiales de 2 m, 5 m, 10 m, 15 m y 20 m, respectivamente.
- 45 Curva de dispersión compuesta para el método SPAC, de las 114 curvas de dispersión cuyas distancias radiales entre sensores son: 5 m, 10 m, 15 m y 20 m. La linea de color azul es la curva suavizada con splines cúbicos de las curvas de dispersión individual despues del promedio móvil. La curva roja es la curva de dispersión teórica, obtenida mendiante algoritmos genéticos. Curvas pertencecientes al sitio Calle Segunda.
- 46 Modelo del perfil de velocidades de ondas de corte obtenido 115 mediante el método SPAC para el sitio Calle Segunda, calculado por razón de algoritmos genéticos. Las líneas horizontales color marrón indican la desviación estándar de los modelos iterados. La gráfica se obtuvo después de 37 iteraciones, con un criterio de variación del 1%.
- 47 Gráfica de los cocientes espectrales H/V calculados para el sitio 118 Calle Segunda, obtenidos a partir de la media cuadrática de sus componentes horizontales. La línea negra representa la gráfica del cociente espectral H/V obtenido del ruido ambiental. Las líneas magenta y verde indican los márgenes superior e inferior de la desviación estándar experimental. La línea azul es la gráfica de la respuesta del terreno obtenida por la técnica de matrices de rigidez. La flecha roja indica la posición de la frecuencia fundamental f<sub>0</sub>.

#### Figura

- Imagen digital del sitio La Salina, ubicado a 32° 03' 23.71" 121
  latitud Norte y longitud 116° 52' 47.15" oeste. Modificada de Google Earth 2009 pro.
- 49 El dibujo izquierdo representa la distribución de la geología 122 superficial del área en los alrededores del sitio La Salina (rectángulo verde), así como los principales trazos de fallas regionales. El dibujo derecho muestra la zona de estudio con un rectángulo verde. Los colores amarillos corresponden a sedimentos de aluvión, los rojos a rocas ígneas. Tomadas de INEGI, carta geología superficial escala 1:50000. Carta: I11D81-C.
- 50 Esquematización del predio en estudio ubicado junto a La 123 Marina del desarrollo Puerto Salina. El punto verde indica la ubicación aproximada donde se realizó un ensayo de penetración estándar (IIGSA, 2007).
- 51 Esquema de la configuración de sensores utilizados tanto para el 125 método SASW como SPAC, ubicado en el sitio La Salina con orientación Norte-Sur. El círculo rojo indica el sensor central para el método SPAC. Las letras "x", "y" y "z" indican las posiciones de los vértices. Los círculos azules indican las posiciones de los sensores para el método SPAC. Los triángulos negros indican las posiciones de los sensores de los sensores para el método SASW.
- 52 Esquema de la configuración fuente-sensores para el método 127 SASW en el sitio La Salina. Las letras A y B, corresponden a la posición norte y sur, respectivamente, respecto de centro.
- 53 Análisis espectral con el método SASW, para una separación 130 entre sensores de 20 m y una fuente a 20 m respecto del censor cercano. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 4 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.

#### Figura

- 54 Análisis espectral con el método SASW, para una separación 131 entre sensores de 20 m y una fuente a 32 m respecto del censor cercano. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 4 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.
- 55 Análisis espectral con el método SASW, para una separación 132 entre sensores de 10 m y una fuente a 7.5 m respecto del censor cercano. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 4 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.
- 56 Curva de dispersión compuesta de las curvas de dispersión 134 provenientes del método SASW, cuyas separaciones entre sensores son: 10 m, y 20 m con sus respectivas distancias de fuente, siendo: 15 m, 2.5 m, 22 m, y 10 m, con respecto al sensor mas cercano. Las letras "a" y "b" al final de la leyenda, significan las direcciones este y oeste, respectivamente. La curva de color azul es la curva suavizada por splines, obtenida a partir del promedio móvil. La línea negra es la curva de dispersión teórica se calculó con un error RMS de 1.8713 m/s después de 23 iteraciones. Curvas pertencecientes al sitio La Salina.
- 57 Modelo del perfil de velocidades de ondas de corte mediante el 135 método SASW para el sitio La Salina, calculado por razón de algoritmos genéticos. Las líneas horizontales color marrón indican la desviación estándar de los modelos iterados. La gráfica se obtuvo después de 23 iteraciones, con un criterio de variación del 1%.

#### Figura

- 58 Gráficas de los coeficientes de correlacion promedio, obtenidos a 138 partir de ruido ambiental. Las gráfica superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha e inferior izquierda, corresponden a distancias radiales de 2.5 m, 5 m, 10 m, 15 m y 20 m, respectivamente.
- 59 Gráficas de los coeficientes de correlación promedio (líneas 140 azules) obtenidos a partir de ruido ambiental entre los vértices de la figura 51. Las gráfica superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha e inferior izquierda, corresponden a distancias radiales de 4.062 m, 8.66 m, 17.32 m, 25.98 m y 34.641 m, respectivamente. Las líneas rojas indican el ajuste mediante el algoritmo modificado de Herrmann y Ammon (2004).
- 60 Curva de dispersión compuesta para el método SPAC del sitio La 141 Salina, con curvas de dispersión cuyas distancias entre vertices son: 4.062 m, 8.66 m, 17.32 m, 25.98 m y 34.64 m. La curva de color negro es la curva de dispersion teórica, obtenida mendiante algoritmos genéticos.
- 61 Modelo del perfil de velocidades de ondas de corte obtenido 142 mediante el método SPAC para el sitio La Salina, calculado por razón de algoritmos genéticos. Las líneas horizontales color marrón indican la desviación estándar de los modelos iterados. La gráfica se obtuvo después de 52 iteraciones, con un criterio de variación del 1%.
- 62 Gráfica de los cocientes espectrales H/V calculados para el sitio 144 La Salina, obtenidos a partir de la media cuadrática de sus componentes horizontales. La línea negra representa la gráfica del cociente espectral H/V obtenido del ruido ambiental. Las líneas magenta y verde indican los márgenes superior e inferior de la desviación estándar experimental. La línea azul es la gráfica de la respuesta del terreno obtenida por la técnica de matrices de rigidez.
- Imagen digital del sitio RIZ, ubicado a 32° 11' 44.85" latitud 147
   Norte y longitud 116° 28' 31.16" oeste. El círculo azul indica la configuración de los sensores para los métodos SASW y SPAC.
   Modificada de Google Earth 2009 pro.

#### Figura

- 64 El dibujo izquierdo representa la distribución de la geología 148 superficial del área en los alrededores del sitio RIZ (rectángulo verde), así como los principales trazos de fallas regionales. El dibujo derecho muestra la zona de estudio con un triangulo verde. Los colores amarillos corresponden a sedimentos de aluvión, los morados y rojos a rocas metamórficas e ígneas, respectivamente. Tomadas de INEGI, carta geología superficial escala 1:50000. Carta: I11D82-C.
- 65 Esquema de la configuración utilizada para los métodos SASW y 149 SPAC, en el sitio RIZ. Los círculos azules indican sensores colocados en los vértices y a posiciones equidistantes de 5 m y 10 m, respecto del sensor central (círculo rojo). Los asteriscos color morado indican fuentes impulsivas a distancias de 10 m y 20 m (con referencia al centro), respectivamente. Las letras A, B y C son marcas para las posiciones de los sensores de los vértices. El vértice centro-A se orienta al norte.
- 66 Análisis espectral con el método SASW, para una separación 151 entre sensores de 10 m y una fuente a 10 m respecto del censor cercano, en la dirección centro-vértice A. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 10 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.
- 67 Análisis espectral con el método SASW, para una separación 152 entre sensores de 10 m y una fuente a 10 m respecto del censor cercano, en la dirección centro-vértice C. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha. respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 10 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.

#### Figura

- 68 Análisis espectral con el método SASW, para una separación 153 entre sensores de 10 m, en la dirección centro-vértice C. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo del registro de ruido ambiental por 15 minutos, en muestras, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor en vértice, rojo sensor en el centro), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.
- 69 Curva de dispersión compuesta de las curvas de dispersión 155 obtenidas mediante el método SASW, cuyas separaciones entre sensores fuerón de: 5 m y 10 m con sus respectivas distancias de fuente, siendo: 10 m y 20 m, con respecto al centro del arreglo.Las letras "B" y "C" indican la combinación de sensores utilizados en el triángulo de la figura 65. La curva de color azul es la curva obtenida mediante un promedio móvil. La linea roja es la curva suavizada por splines, a partir del promedio móvil. La línea negra es la curva de dispersión teórica obtenida por algoritmos genéticos. La curva de dispersión teórica se calculó con un error RMS de 0.671 m/s después de 8 iteraciones. Curvas pertencecientes al sitio RIZ.
- 70 Modelo del perfil de velocidades de ondas de corte mediante el 156 método SASW en el sitio RIZ, calculado por razón de algoritmos genéticos. Las líneas horizontales color marrón indican la desviación estándar de los modelos iterados. La gráfica se obtuvo después de 8 iteraciones, con un criterio de variación del 1%.
- 71 Gráficas de espectros de autopotencia para el sitio RIZ. Las 159 gráficas superior e inferior corresponden a las distancias radiales de 5 m y 10 m, respectivamente. La curva azul, roja y verde, representan los espectros de autopotencia de los sensores centro, A, B y C, respectivamente de la figura 65.
- 72 Gráficas de los coeficientes de correlación promedio obtenidos a 160 partir de ruido ambiental. La gráfica izquierda y derecha, corresponden a distancias radiales de 5 m y 10 m, respectivamente. La curva azul, roja y verde, representan los coeficientes de correlación experimentales entre los sensores centro con A, B y C, respectivamente de la figura 65.

#### Figura

- 73 Perfiles de velocidades de ondas de corte mediante los métodos 161 SASW (líneas rojas), SPAC (líneas azules) y HV-SPR (líneas verdes) en el sitio Campo Ángel. Las sombras de colores muestran la variabilidad entre los tres métodos. La leyenda en la parte derecha, indica el rango de variación de la velocidad de ondas de corte entre los métodos. Los paréntesis indican la variabilidad entre los métodos. Las líneas moradas muestran el tipo de suelo a profundidad según IBC 2003.
- 74 Perfiles de velocidades de ondas de corte mediante los métodos 163 SASW (líneas rojas), SPAC (líneas azules) y HV-SPR (líneas verdes) en el sitio La Salina. La leyendas SPT1 y SPT2 indican el perfil de velocidades de ondas de corte con las relaciones de Ohta y Goto (1978) y la Japan Road Association (2002), respectivamente. Las sombras de colores muestran la variabilidad entre los tres métodos. La leyenda en la parte derecha, indica el rango de variación de la velocidad de ondas de corte entre los métodos. Los paréntesis indican la variabilidad entre los métodos. Las líneas moradas muestran el tipo de suelo a profundidad según IBC 2003.
- 75 Perfiles de velocidades de ondas de corte mediante los métodos 165 SASW (líneas rojas), SPAC (líneas azules) y HV-SPR (líneas verdes) en el sitio Calle Segunda. Las sombras de colores muestran la variabilidad entre los tres métodos. La leyenda en la parte derecha, indica el rango de variación de la velocidad de ondas de corte entre los métodos. Los paréntesis indican la variabilidad entre los métodos. Las líneas moradas muestran el tipo de suelo a profundidad según IBC 2003.
- 76 Esquema de la propagación de las ondas P. Modificado de 183 Bennett (2005).
- 77 Esquema de la propagación de las ondas S. Modificado de 184 Bennett (2005).
- Amplitud de la onda Rayleigh en función de la profundidad para 186 varios valores de la razón de Poisson v. Modificado de Richart et al. (1970).
- 79 Esquema de la propagación de las ondas Rayleigh (izquierda) y 187 ondas Love (derecha). Modificado de Bennett (2005).

# xxiii

# LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
80	Representación de una forma de onda y sus componentes. (a) Representación de una forma de onda en el dominio del tiempo. (b) Representación tridimensional de las ondas. (c) Representación de las ondas en el dominio de frecuencias. Modificada de Benett (2005).	189
81	Filtro pasa bajas (Antialias), a) filtro ideal, b) filtro real.	192
82	Ejemplo de la gráfica de la función de peso (Hanning), para una cierta cantidad de muestras.	193
83	Modelo de un sistema lineal ideal (a), Modelo de un sistema lineal real (b).	196
84	Respuesta del sensor EpiSensor FBA ES-T, en amplitud y fase Modificada del manual de usuario Kinemetrics, Inc. (2005).	203
85	Función de transferencia del sensor Ranger WR-1 de Kinemetrics modificada del manual de usuario Kinemetrics, Inc. (1994).	203

#### xxiv

#### LISTA DE TABLAS

#### Tabla

- I Relación entre las constantes elásticas. " $\lambda$ " y " $\mu$ " son las 13 constantes de Lamé. "G" es el módulo de cortante. "E" es el módulo de Young. "K" es el módulo de compresibilidad. "v" es la razón de Poisson. "M" es el módulo volumétrico. Modificado de Mavko *et al.* (2003).
- II Se muestra la clasificación de ruido ambiental producido por fuentes naturales y por actividad humana. <sup>G</sup>:Gutemberg (1931 y 1957), <sup>A</sup>:Asten y Henstridge (1984), <sup>N</sup> :Roberts y Asten (2004). Modificada de SESAME (2004).
- III Duración de registro de ruido ambiental recomendado para 55 determinar la frecuencia fundamental del suelo (periodo dominante). Modificada de SESAME (2004).
- IV Resumen de las actividades cercanas al área de estudio en un 68 radio aproximado de 1 km.
- V Tabla comparativa del contenido de las frecuencias del espectro 75 de potencia cruzado para distancias utilizadas fuente-sensor respeto del criterio de Ganji *et al.* (1998).
- VI Se muestra el modelo de seis capas (estratos) obtenido mediante 82 el método SASW para el sitio Campo Ángel, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson y velocidad de ondas de corte (con su error calculado).
- VII Se muestra el modelo de cuatro capas (estratos) obtenido para el 90 método SPAC en el sitio Campo Ángel, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson y velocidad de ondas de corte (con su error calculado). La abreviación SE indica semiespacio.
- VIII Se muestra el modelo de cuatro capas (estratos) obtenido 93 mediante el método de cocientes espectrales, para el sitio Campo Ángel, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson, porcentaje de amortiguamiento y velocidad de ondas de corte, obtenidas mediante modelado directo con la técnica de matrices de rigidez. La abreviación SE indica semiespacio.
- IX Tabla comparativa del contenido de las frecuencias del espectro 100 de potencia cruzado para distancias utilizadas fuente-sensor respeto del criterio de Ganji *et al.* (1998). Los asteriscos (\*) indican que se observó una coherencia inferior a 0.8 o una curva de fase inestable.

#### LISTA DE TABLAS (Continuación)

#### Tabla

- X Se muestra el modelo de cinco capas (estratos) obtenido 108 mediante el método SASW para el sitio Calle Segunda, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson y velocidad de ondas de corte (con su error calculado).
- XI Se muestra el modelo de cuatro capas (estratos) obtenido para el 116 método SPAC en el sitio Calle Segunda, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson y velocidad de ondas de corte (con su error calculado). La abreviación SE indica semiespacio.
- XII Se muestra el modelo de cuatro capas (estratos) obtenido 119 mediante el método de cocientes espectrales, para el sitio Calle Segunda, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson, porcentaje de amortiguamiento y velocidad de ondas de corte, obtenidas mediante modelado directo con la técnica de matrices de rigidez. La abreviación SE indica semiespacio.
- XIII Se muestran las fuentes presentes en el momento de los registros 124 utilizados para los métodos SASW, SPAC y HV-SPR. Las distancias son aproximadas, respecto del centro de los arreglos.
- XIV Tabla comparativa del contenido de las frecuencias del espectro 129 de potencia cruzado para distancias utilizadas fuente-sensor respeto del criterio de Ganji *et al.* (1998). Los asteriscos (\*) indican que se observó una coherencia inferior a 0.8 o una curva de fase inestable.
- XV Se muestra el modelo de ocho capas (estratos) obtenido mediante 136 el método SASW para el sitio La Salina, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson y velocidad de ondas de corte (con su error calculado).
- XVI Se indica el porcentaje máximo del tamaño de ventana a utilizar 139 para registrar eficientemente ondas estacionarias, basado en el algoritmo de fuerza bruta.
- XVII Se muestra el modelo de siete capas (estratos) obtenido para el 143 método SPAC en el sitio La Salina, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson y velocidad de ondas de corte (con su error calculado). La abreviación SE indica semiespacio.

#### LISTA DE TABLAS (Continuación)

#### Tabla

- XVIII Se muestra el modelo de cinco capas (estratos) obtenido 145 mediante el método de cocientes espectrales, para el sitio La Salina, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson, porcentaje de amortiguamiento y velocidad de ondas de corte, obtenidas mediante modelado directo con la técnica de matrices de rigidez. La abreviación SE indica semiespacio.
- XIX Tabla comparativa del contenido de las frecuencias del espectro 150 de potencia cruzado para distancias utilizadas fuente-sensor respeto del criterio de Ganji *et al.* (1998). Los asteriscos (\*) indican que se observó una coherencia inferior a 0.8 o una curva de fase inestable.
- XX Se muestra el modelo de seis capas (estratos) obtenido mediante 157 el método SASW para el sitio RIZ, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson y velocidad de ondas de corte (con su error calculado).
- XXI Se indica el porcentaje máximo del tamaño de ventana a utilizar 158 para registrar eficientemente ondas estacionarias, basado en el algoritmo de fuerza bruta.
- XXII Tabla de especificaciones de la grabadora SSR-1, los sensores 202 Episensor FBA ES-T y Ranger WR-1, todos de Kinemetrics.

#### INTRODUCCIÓN

La investigación de la distribución del tipo, y de las propiedades físicas de los materiales del subsuelo, son requeridas para el diseño apropiado de las estructuras civiles. Estas investigaciones se llevan a cabo para obtener soluciones a diferentes tipos de situaciones como por ejemplo, para el análisis de cimentaciones, que requiere de la determinación de la estabilidad y las deformaciones de los materiales del subsuelo bajo cargas estáticas y/o dinámicas.

Las condiciones locales de sitio influyen fuertemente en la respuesta del suelo durante la ocurrencia de un sismo (cargas dinámicas). Las condiciones geológicas locales, la naturaleza del basamento, así como las características físicas de los depósitos superficiales son factores predominantes para evaluar la respuesta dinámica del suelo.

La respuesta dinámica del suelo consiste en un conjunto de efectos cinemáticos e inerciales producidos en el suelo como resultado de la deformación de éste ante alguna excitación sísmica. Se considera que los principales parámetros que controlan la respuesta dinámica del suelo son: la velocidad de propagación de ondas de corte (relacionada con el módulo de corte), el amortiguamiento material y el periodo dominante de vibración. En particular, las amplificaciones dinámicas del movimiento del suelo pueden adquirir valores elevados cuando los periodos predominantes de la excitación y el suelo son similares.

A través del tiempo, se ha evidenciado que los efectos y daños causados por la ocurrencia de sismos de magnitudes grandes e inclusive moderadas es significativo, sobre todo en zonas donde los sedimentos superficiales tienen espesores considerables y en la gran mayoría de los casos son sedimentos blandos, a diferencia de los casos en que afloran

rocas competentes (en el mejor de los casos) o en suelos competentes (rígidos bien compactados). Observaciones en el movimiento de suelo, han mostrado que los efectos causados por los depósitos superficiales pobremente consolidados pueden llevar a incrementos en la intensidad del movimiento del terreno en determinadas bandas de frecuencia; por ello, es importante estudiar los suelos y rocas que se encuentran por debajo de la superficie para determinar sus propiedades y proveer información útil para el diseño de cimentaciones, así como la superestructura de obras civiles estratégicas.

Para poder diseñar apropiadamente las diferentes estructuras civiles, con el fin de minimizar los riesgos de daños ocasionados por terremotos, es necesario determinar los módulos elásticos de los diferentes estratos por debajo de la superficie, preferentemente a 30 m de profundidad para la caracterización de suelos, según normas internacionales, para después realizar un análisis de su respuesta sísmica y evaluar la respuesta estructural de la edificación, para encontrar el diseño de ingeniería óptimo.

En ingeniería civil, una de las principales propiedades de los materiales del suelo es el módulo elástico al esfuerzo cortante, el cual puede ser determinado por diferentes metodologías, algunas de ellas propias de ingeniería civil como son los estudios de mecánica de suelos y de geotecnia, así como técnicas desarrolladas dentro del campo de la geofísica, en particular resultan ser de especial interés aquellas basadas en los métodos sísmicos. De las metodologías antes brevemente referidas, existe actualmente gran debate sobre las ventajas y desventajas que tienen unas sobre otras.

El módulo elástico al esfuerzo cortante domina la velocidad de propagación de ondas de corte. Esta propiedad puede ser medida en el laboratorio, como típicamente se ha realizado en ingeniería civil a través del tiempo; sin embargo, las pruebas de laboratorio tienen ciertas limitantes, como es la perturbación de la muestra desde su recolección y traslado al laboratorio, así por esta y otras razones se han implementado diferentes metodologías no invasivas, para estimar *in-situ* las propiedades del suelo.

Diversas metodologías basadas en métodos sísmicos utilizan los principios de propagación de ondas elásticas. Algunas de estas metodologías se han desarrollado basadas en el estudio del fenómeno de propagación de ondas superficiales. En términos generales, las metodologías basadas en el análisis de ondas superficiales, se pueden clasificar en dos grupos: (i) métodos de fuente activa y (ii) métodos de fuente pasiva. El primero, utiliza una fuente artificial para crear el campo de ondas, generada típicamente por impactos al suelo; y el segundo consiste en el uso de microtremores, también conocidos como ruido ambiental o ruido sísmico, cuyo contenido son principalmente ondas superficiales, mismas que preferencialmente restringen su propagación por las capas superficiales del terreno, causados por la actividad humana y fenómenos naturales; tales como, el choque de las olas del mar en la superficie, cambios en las condiciones meteorológicas y la acción del viento sobre obstáculos o estructuras, entre otras. Estos dos tipos de fuentes de energía poseen diferentes tipos de información para la estimación de las propiedades del terreno. El objetivo de estas metodologías es estimar la distribución de la velocidad de ondas de corte en función de la profundidad, a partir de las cuales se puedan obtener estimaciones confiables de los módulos elásticos

# I.1 IMPORTANCIA DE LA ESTIMACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SUELO

Una de las áreas de especial importancia en ingeniería geotécnica, es la caracterización de modelos constitutivos de los suelos. Diferentes metodologías (pruebas de penetración, métodos geofísicos, ensayos de laboratorio: cargas cíclicas, cámara triaxial, etc., etc.) han sido utilizadas para dar información relevante en la formulación de estos modelos. En diferentes materiales (suelos, concreto, roca, asfalto, etc.), el módulo elástico ante el esfuerzo cortante es un parámetro importante para la caracterización del comportamiento mecánico de estos materiales bajo diferentes tipos de cargas. Es por eso que la estimación del módulo elástico al esfuerzo cortante, relacionado a su vez directamente con la velocidad de propagación de las ondas de corte, determina

substancialmente el movimiento de la superficie del suelo provocado por la propagación de ondas sísmicas generadas por una fuente dada.

En la figura 1 se muestra un modelo ideal de un suelo estratificado, el cual es considerado en diferentes metodologías. Este modelo consiste en *n* estratos homogéneos, que se encuentran por encima de un semiespacio. Diferentes parámetros físicos como son: la densidad ( $\rho$ ), las constantes elásticas de Lamé ( $\lambda$  y  $\mu$ ) el amortiguamiento ( $\xi$ ), la razón de Poisson (v), así como la geometría, caracterizan a cada estrato. Estos son parámetros que influyen fuertemente en la respuesta del material ante cargas dinámicas. La caracterización de los suelos es particularmente compleja *per se*, al a ser materiales inherentes en la naturaleza, aún cuando estos hayan sido modificados por el hombre, a diferencia de otros materiales como el concreto y asfalto.



Figura 1. Ilustración de un modelo bidimensional de estratos horizontales del suelo con diferentes parámetros físicos (los subíndices indican el número del estrato al que pertenecen), descansando sobre un semiespacio.

#### I.2 ASPECTOS GENERALES DE LOS MÉTODOS IN-SITU

Existen metodologías *in-situ* que son utilizadas para la estimación del módulo de cortante a través de la estimación de las velocidades de propagación de las ondas de corte, como lo son: cross-hole, down-hole, up-hole, entre otros; sin embargo, requieren fuentes mecánicas, sensores con un perfecto acoplamiento en la superficie de contacto, control en la orientación del sensor y su respuesta en frecuencia. Generalmente se requiere de más de un canal de registro y sistemas de activación muy precisos. Además se necesita una perforación del suelo, en otras palabras, estos métodos aunque son *in-situ*, son invasivos/destructivos y su implementación es costosa y complicada, inclusive hay situaciones donde no se pueden realizar.

Los métodos mencionados en el párrafo anterior son métodos sísmicos. Sin embargo, existen métodos in-situ claramente empíricos en su inferencia de las propiedades del subsuelo, como lo es la prueba de penetración estándar (SPT), que a su vez requiere de equipo mecánico muy costoso. De igual forma como en lo antes descrito, hay situaciones donde no se pueden realizar. Algunas de las ventajas más importantes de los métodos insitu no destructivos y/o no invasivos, como son los métodos que utilizan ondas superficiales en su análisis, por ejemplo: SASW, SPAC, HV-SPR y otros; que no requieren de la extracción de muestras para su posterior análisis en laboratorio. Además, las pruebas se realizan en el estado natural de esfuerzos, sin modificar ningún parámetro del sitio, es decir, son métodos no destructivos y no invasivos, teniendo la ventaja de ser más económicos que los métodos invasivos, que en comparación con estos últimos, toda la operación de campo puede realizarse en la superficie del terreno. Otra ventaja es que pueden utilizarse para estimar las propiedades de suelos donde es difícil tomar muestras o perforar, como lo pueden ser materiales muy sueltos o de boleo, así como en zonas donde resulta inoperable maquinaria pesada, como en la cercanía de estructuras importantes. Los métodos in-situ no invasivos y no destructivos, adicionalmente pueden permitir la implementación de una combinación de métodos para complementarse el uno al otro en el proceso de la estimación de propiedades físicas del terreno.

#### I.3 OBJETIVOS Y ORGANIZACIÓN DE ESTA TESIS

Esta tesis tiene como objetivo estudiar y analizar las ventajas, desventajas y la forma en que se pueden complementar (en sus características practico-técnicas) los métodos: Análisis Espectral de Ondas Superficiales (SASW, por sus siglas en inglés), el método de Autocorrelación Espacial (SPAC, por sus siglas en inglés) y el método de cocientes espectrales H/V (o también llamado método de Nakamura, que será abreviado como HV-SPR), para estimar *in-situ* las propiedades físicas y geométricas que constituyen al suelo, principalmente para el interés de la geotecnia.

La organización de esta tesis estará dada como sigue. En el capítulo I, se introducen aspectos generales básicos de metodologías empleadas en el ambiente de la ingeniería civil, en especial, en la geotecnia, con el fin de motivar y contrastar las virtudes integrales de los métodos a estudiar en esta tesis.

El capítulo II establece el estado actual (general) de las metodologías afines a esta tesis, en ámbito conceptual, procedimental y referencial, que permitan sustentar, construir y aplicar las metodologías propias a este tema de tesis, así como referenciar los resultados finales con uno o varios métodos aquí descritos.

En el capítulo III, se presenta una revisión bibliográfica de los métodos centrales de esta tesis (SASW, SPAC Y HV-SRP), que describe los criterios generales para la recolección de datos en campo, el procesamiento y obtención de resultados.

En el capítulo IV se presenta un análisis desde el punto de vista del ensayo en campo, del procesamiento e interpretación de datos y resultados, respectivamente, en cuatro sitios de estudio con características diferentes entre sí aplicando las metodologías SASW, SPAC y HV-SPR en los cuatro sitios de estudio, mostrando las variantes implementadas en contribución a estos métodos así como los resultados obtenidos.

Los sitios elegidos son el caso del arroyo ubicado en la calle segunda en la ciudad de Ensenada B.C., México, el sitio llamado Campo Ángel, ubicado en el kilometro 64 de la carretera Tijuana Ensenada, el sitio ubicado en el Puerto Salina, ubicado en la población de La Salina B.C. y el sitio denominado Ignacio Zaragoza (que será abreviado como RIZ), ubicado en predio de una zona rural entre la ciudad de Ensenada y Tecate B.C.

Por último, en el capitulo V se encuentra la construcción de las conclusiones considerando las evidencias, el análisis y las discusiones realizadas en el capítulo IV.

#### MARCO TEÓRICO

#### II.1 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES.

Métodos sísmicos con fines de prospección y caracterización del subsuelo así como su respuesta ante la aplicación de esfuerzos, como el Análisis Espectral de Ondas Superficiales (SASW), Autocorrelación espacial (SPAC), la técnica de cocientes espectrales H/V (HV-SPR), entre otros; están sustentados en conceptos básicos de la teoría de propagación de ondas.

Cuando se aplica la teoría de propagación de ondas en geo-materiales, es común asumir simplificaciones con el fin de emplear modelos sencillos que permitan comprender en forma más completa el comportamiento de estos ante la aplicación de cargas. Estas suposiciones se describen a continuación.

Uno de los factores más importantes que gobiernan el comportamiento del suelo es la magnitud de los esfuerzos que se aplican en los materiales. Existe una variedad de metodologías que evalúan el comportamiento de los materiales del subsuelo ante diferentes niveles de esfuerzos y en base a estos resultados, han sido desarrollados diferentes modelos para estudiar y explicar el comportamiento de la respuesta del terreno. Algunos de estos modelos son: elástico lineal, visco elásticos, elástico no lineal, elásto plástico no lineal y puramente plásticos (Foti, 2000). Debido a que diversos modelos describen el comportamiento del suelo, es necesario elegir un modelo apropiado. A continuación se describen los aspectos generales de dos esquemas para explicar el comportamiento de los materiales del suelo (geo-materiales).
En una gran mayoría de materiales, como en los suelos, la deformación al esfuerzo cortante como función de diferentes niveles de esfuerzos describe una función curvilínea (Das, 1992). La figura 2 muestra un diagrama típico de la curva esfuerzo-deformación para suelos, siendo esta de tipo histerético. En esta curva, la deformación es función del esfuerzo (esfuerzo de cortante en este caso) aplicado. Cada ciclo de histéresis representa el comportamiento del suelo bajo diferentes condiciones de carga. El módulo al esfuerzo cortante del suelo se obtiene conectando las extremidades de un solo ciclo de histéresis, el cual es llamado módulo al esfuerzo secante (Luna y Jadi, 2000).



Figura 2. Ciclo de histéresis como modelo del esfuerzo  $\tau$  en función de la deformación  $\gamma$ , para determinar el módulo al esfuerzo cortante tangente ( $G_{tan}$ ) y secante ( $G_{sec}$ ).

Hasta un determinado punto, la deformación se produce en forma proporcional (zona cuasi lineal) y se puede considerar que la deformación es reversible (el material puede llegar a su estado normal).



Figura 3. Gráfica del comportamiento el módulo de cortante (G) normalizado por el módulo al esfuerzo cortante máximo ( $G_{max}$ ), mostrando el decremento respecto de la deformación de cortante  $\gamma$ .

El efecto del módulo de corte respecto de la deformación se muestra en la curva módulo-deformación, mostrada en la figura 3. Ésta figura muestra los valores normalizados del módulo de cortante respecto de su valor máximo, en función de la deformación de cortante, donde se observa que el módulo de cortante normalizado se mantiene prácticamente constante hasta valores de deformación de 10<sup>-3</sup> (dada en porcentaje), región donde se considera como un comportamiento elástico, sin introducir un error considerable en este modelo (Luna y Jadi, 2000).

Los métodos geofísicos, incluyendo los métodos SASW, SPAC y HV-SPR, son ejecutados a niveles muy bajos de deformaciones, por lo general porcentajes menores a 10<sup>-4</sup> (Luna y Jadi, 2000). Por esto, el módulo al esfuerzo cortante en estos niveles de deformación puede modelarse mediante un modelo lineal elástico; dicho de otra forma, este modelo relaciona al esfuerzo y la deformación en forma lineal (Ley de Hooke). Este modelo es utilizado comúnmente cuando el suelo se encuentra bajo cargas dinámicas, pero debe mencionarse que este modelo no puede describir algunos aspectos del comportamiento del suelo bajo cargas cíclicas (Luna y Jadi, 2000). Esta última suposición

de considerar un comportamiento lineal elástico del suelo será utilizada a lo largo de este trabajo. Sin embargo es conocido en la literatura que es posible obtener información de los materiales del subsuelo a deformaciones superiores al rango lineal elástico en métodos sísmicos (Huerta-López, 2002).

Los materiales del subsuelo pueden ser distintos en diferentes direcciones, tanto horizontalmente como verticalmente; entonces, una de las principales suposiciones es considerar que las propiedades del subsuelo son aproximadamente constantes en la dirección horizontal (isotrópico), pero que puede variar en forma vertical (capas horizontales), donde se puede considerar que cada capa (estrato) es lateralmente homogéneo (ver figura 1).

#### II.2 PROPIEDADES DE LAS ONDAS SISMICAS EN UN MEDIO ELÁSTICO.

Las propiedades mecánicas de los materiales son características intrínsecas que permiten diferenciar un material de otro. Un factor a considerar es el comportamiento que puede tener un material en su respuesta ante diferentes procesos de solicitaciones externas y/o cargas. Entre las características mecánicas destacan: la resistencia a los esfuerzos de cortante y compresión, a la flexión y la torsión, así como la dureza, plasticidad, porosidad, etc.

Para caracterizar y analizar el comportamiento de los diferentes tipos de materiales, se han diseñado pruebas experimentales donde las propiedades mecánicas más comunes que se miden son los módulos elásticos, como: el módulo de Young (E), el módulo de compresibilidad (K) y la razón de Poisson (v).

En el concreto por ejemplo, la propiedad mecánica más relevante es su resistencia a la compresión. Donde, para su estimación se utilizan probetas normalizadas, las estimaciones son tabuladas y posteriormente comparadas con valores de referencia a los que se les denomina resistencia característica o fuerza de compresión, que es usualmente la reportada en los ensayos de laboratorio de resistencia de materiales.

Un sólido elástico lineal e isótropo (homogéneo) queda caracterizado mediante dos constantes elásticas: el módulo de Young y la razón de Poisson (o bien el módulo de compresibilidad). Materiales con las características antes mencionadas son los que presentan el mismo comportamiento mecánico para cualquier dirección de estiramiento alrededor de un punto.

El módulo de Young (E) es una medida de la rigidez de un material elástico e isotrópico; también es conocido como módulo de elasticidad. El módulo de Young establece una relación entre el esfuerzo y la deformación para un material sujeto a compresión o extensión axial.

La razón de Poisson ( $\upsilon$ ) proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento. Para un material isótropo elástico perfectamente incompresible, este es igual a 0.5, pero la mayor parte de los materiales prácticos en la ingeniería se encuentran con valores entre 0.0 y menor a 0.5 (Nazarian, 1984).

En el caso de tener una deformación transversal, entonces el módulo de corte o también llamado módulo de elasticidad transversal (G), caracteriza la deformación de un material elástico cuando se aplican tensiones cortantes o de cizalla. A su vez es uno de los parámetros más importantes, ya que los movimientos más fuertes (en sismos o vibraciones) están compuestos por este tipo de movimientos. La relación que existe entre los parámetros antes descritos, se resume en la tabla I.

Tabla I. Relación entre las constantes elásticas. " $\lambda$ " y " $\mu$ " son las constantes de Lamé. "G" es el módulo de cortante. "E" es el módulo de Young. "K" es el módulo de compresibilidad. " $\upsilon$ " es la razón de Poisson. "M" es el módulo volumétrico. Modificado de Mavko *et al.* (2003).

Relación	λ, υ	<i>v</i> , G	Ε, υ	K, G
con:				
λ	λ	2Gv	υΕ	$V^{2}$
		$1-2\upsilon$	$\overline{(1+\upsilon)(1-2\upsilon)}$	$K = \frac{1}{3}G$
G	μ	G	E	G
			$\overline{2(1+\upsilon)}$	
K	$3\lambda + 2\mu$	2G(1+v)	Е	K
	3	3(1-2v)	$\overline{3(1-2v)}$	
Е	$\mu(3\lambda + 2\mu)$	2G(1 + v)	Е	9KG
	$\lambda + \mu$			3K + G
υ	λ	υ	υ	3K – 2G
	$\overline{2(\lambda + \mu)}$			2(3K + G)
М	$\lambda \frac{1-\upsilon}{\upsilon}$	$G\frac{2-2\upsilon}{1-2\upsilon}$	$E\frac{1-\upsilon}{(1+\upsilon)(1-2\upsilon)}$	$K + \frac{4}{3}G$

#### **II.3 VELOCIDAD DE LAS ONDAS SISMICAS.**

La teoría de la elasticidad establece que la velocidad a la cual se propaga una onda sísmica a través de un material está directamente relacionada con sus propiedades mecánicas (rigidez). Lo anterior implica que si la velocidad de propagación de una onda sísmica es conocida, entonces puede ser calculado un módulo elástico a partir de ésta. Una de las relaciones más utilizadas y más importantes es la relación que existe entre la velocidad de ondas de corte, respecto del módulo de corte; más aún, si se es conocida la razón de Poisson, entonces se podrá conocer también el módulo de Young, mediante una de las relaciones de la tabla I.

Las ecuaciones 1 y 2, expresan las velocidades de propagación de la onda P y la onda S, en función de los parámetros de Lamé.

$$V_{\rm P} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}},\tag{1}$$

$$V_{\rm S} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}},\tag{2}$$

donde:

Vp: velocidad de las ondas P.
Vs: velocidad de las ondas S.
ρ: es la densidad del medio.
λ y μ: constantes de Lamé.

Sin embargo, las ecuaciones 1 y 2 pueden ser reescritas en términos de otras variables, para que estas relaciones se vuelvan más aplicables en el trabajo ingenieril, teniendo como resultado la ecuación 3.

$$G = \rho V_s^2 \tag{3}$$

En donde la densidad  $\rho$  es un parámetro que en muchas situaciones se asume como constante ya que se toma como la densidad promedio de un material. A su vez, la relación entre la velocidad de las ondas de compresión P y el módulo de compresibilidad dado por la ecuación 4.

$$M = \rho V_P^2, \tag{4}$$

donde:

M: módulo de compresibilidad.

De lo anterior se pueden concluir tres puntos importantes, en base a la figura 4, la cual muestra que la velocidad de la onda P es la mayor, seguida de la velocidad de la onda S y posteriormente la onda Rayleigh, donde además se puede observar que la velocidad de ondas Rayleigh y las ondas S son muy similares, donde la razón de Poisson tiene una contribución muy pequeña en la relación entre las velocidades de estas últimas.



Figura 4. Variación de la velocidad de las ondas P (Vp), ondas Rayleigh (Vr) y ondas S (Vs), normalizadas por las ondas S, en función de la razón de Poisson. Modificada de Bennett (2005).

#### II.4 ENERGÍA DE LAS ONDAS SÍSMICAS.

Cuando las ondas viajan a partir de su fuente, su energía se disipa en función de la distancia; esta disipación se conoce como atenuación geométrica (o dispersión geométrica) (Burger, 1992). El método SASW en su origen conceptual utiliza una fuente puntual de energía mecánica generada en la superficie; las ondas P y S generadas, se atenúan en forma distinta a las ondas Rayleigh resultantes. Las ondas de cuerpo se expandirán radialmente a

partir de la fuente, mientras que el frente de onda de las ondas Rayleigh será cilíndrico debido a que estas ondas viajan a través de la superficie.

Se ha encontrado que las ondas de cuerpo se atenúan inversamente proporcionales a  $r^2$ , donde r es la distancia radial respecto de su fuente. Las ondas Rayleigh se atenúan en la superficie más lentamente, proporcionalmente a  $1/r^{1/2}$  (Foti, 2000). Cuando se busca describir la forma en que la energía de una onda se transforma en otra se analiza en términos de la partición de energía. Miller y Pursey (1955) analizaron el caso de una fuente puntual armónica actuando verticalmente en un semiespacio ideal. Encontraron que el 67% de la energía suministrada por la fuente es transformada en ondas Rayleigh, el 26% en ondas de corte y el 7% en las ondas primarias (las ondas Love no son obtenidas dado que se trata de un semiespacio no estratificado). La figura 5 resume la importancia de las propiedades asociadas con la propagación de las ondas a partir de una fuente puntual vertical.



Figura 5. Esquema de la distribución del desplazamiento (de las ondas Rayleigh, ondas de corte y ondas compresionales) generado por una fuente puntual vertical a través de un medio homogéneo, isotrópico y elástico. Modificada de Ritchart et al. (1970).

#### **II.5 RUIDO AMBIENTAL.**

Es importante mencionar que el estudio de las características y la naturaleza del ruido ambiental es un tema abierto, todavía existen muchos cuestionamientos en cuanto a su naturaleza. Lo que se describe a continuación es un resumen de la revisión bibliográfica que se hizo al respecto sobre ruido ambiental (Roberts y Asten, 2004; Flores-Estrella *et al.* 2004 y SESAME, 2004).

De acuerdo con Aki (1957) y Aki (1965), las fuentes del ruido ambiental (también llamada vibración ambiental, ruido sísmico, microtremores, entre otros). Se pueden separar en dos categorías principales: aquellas producidas por fenómenos naturales y las antropogénicas. A frecuencias inferiores a 1 Hz se consideran de origen esencialmente natural, principalmente por el oleaje del océano (alrededor de los 0.2 Hz), el choque de las olas en la costa (alrededor de los 0.5 Hz) o cambios en la presión atmosférica (menor a 0.1 Hz). La energía de estas vibraciones como ha sido propuesta y aceptada por simplicidad por la comunidad académica, establece que están compuestas principalmente por ondas superficiales de tipo Rayleigh que son propagadas a través de la corteza terrestre y que interactúan con la estructura local (especialmente en el basamento). La energía de estas ondas decrece conforme se aleja de la costa. Actualmente, la naturaleza del tipo de ondas que conforman el ruido ambiental (Rayleigh, principalmente) se encuentra aceptada como una suposición (Okada, 2006), debido al tipo y distancias de los fenómenos que son considerados como generadores de microsismos. El ruido ambiental está compuesto por vibraciones de baja amplitud entre  $10^{-3}$  y  $10^{-4}$  mm (Roberts y Asten, 2004).

Por otro lado, la vibración ambiental asociada a la actividad humana (frecuencias superiores a 1 Hz), se encuentra relacionada con fuentes localizadas en la superficie de la tierra, tales como el tráfico y maquinarias, que en consecuencia, estas ondas están compuestas predominantemente por ondas superficiales. El tipo de ondas que conforman los microsismos, pueden depender de la naturaleza y la distancia de las posibles fuentes en

la localidad del sitio en estudio. La tabla II resume algunas características del ruido ambiental.

Tabla II. Se muestra la clasificación de ruido ambiental producido por fuentes naturales y por actividad humana. <sup>G</sup>:Gutemberg (1931 y 1957), <sup>A</sup>:Asten y Henstridge (1984), <sup>N</sup>:Roberts y Asten (2004). Modificada de SESAME (2004).

	Origen		Amplitud	Frecuencia (Hz)
	Natural	Inducido por la	(mm)	
	(Microsismos)	actividad del		
		hombre		
		(Microtremores)		
	Océano		Entre: <sup>N</sup>	0.1 a 1
		Tráfico/industria/	10 <sup>-4</sup> y 10 <sup>-3</sup>	0.5-25,
		Actividad		1-100 <sup>G</sup> , 1.4-30 <sup>A</sup>
		humana		
	Oleaje contra			0.05-0.1 <sup>G</sup> ,
	las costas			0.5-1.2 <sup>A</sup>
Fuente de energía	Perturbaciones			0.1-0.25 <sup>G</sup> 0.16-
	Meteorológicas			0.5 <sup>A</sup>
	de gran escala			
	Ciclones en los			$0.3-1.0^{\rm G}, 0.5-3.0^{\rm A}$
	océanos			
	Condiciones			1.4-5.0 <sup>G</sup>
	meteorológicas			
	locales			
	Tremores			2.0-10.0 <sup>G</sup>
	Volcánicos			
Ondec	Superficiales	Superficiales y		
dominantes	Supermetales	de querro		
Dopondoncio	Según los	Día/Noche		
do lo	ciclos del	Semana/Fin de		
A mplitud	fenómeno	Semana		
Tipo do ondos	Predomina el	Ravleigh y Love		
Tipo de ondas	tipo Ravleigh	Rayleigh y LOVC		
Modo de	Principalmente	Fundamental v		
Vibración	fundamental	posiblemente		
		superiores		

Existen tres factores principales que deben manejarse con mucho cuidado para asegurar la efectividad de las técnicas que utilizan vibración ambiental: (i) el acoplamiento de los sensores, (ii) la instrumentación utilizada, (iii) las características de los parámetros de adquisición del registro y (iv) el procesamiento de los registros.

Recientemente, el ruido ambiental ha sido procesado por diferentes técnicas (SPAC, HV-SPR, SASW, Remi, entre otras), para estimar diferentes parámetros físicos del subsuelo, como por ejemplo: la frecuencia natural y la velocidad de propagación de las ondas de corte a profundidades someras para el caso de aplicaciones en ingeniería o de hasta 20 km como es el caso de estudio de Flores-Estrella *et al.* (2004).

# II.6 MÉTODOS EXPLORATORIOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE SUELOS.

Existen diversas metodologías y técnicas, cuyo objetivo principal es estimar el perfil de velocidades del subsuelo, para calcular los módulos elásticos de los materiales del subsuelo.

Pruebas tradicionales consisten en perforar el suelo, para obtener sus propiedades, cuya eficacia de tales pruebas varia fuertemente dependiendo de las características del material a penetrar, del diámetro y la profundidad del pozo. Los estudios de caracterización del suelo mediante perforaciones son costosas e imprácticas en una gran mayoría de casos por: el tipo de equipo, localización del sitio, la profundidad a perforar, el diámetro del pozo, el tiempo de ejecución y el tipo de suelo. Es por lo anterior, que se realizan esfuerzos por utilizar, probar y desarrollar otros métodos y técnicas que sean de fácil aplicación, económicas y confiables, tales como las que serán estudiadas en este trabajo.

En lo que sigue se da una breve descripción de algunas de las metodologías invasivas (destructivas) para el estudio y caracterización *in-situ* de suelos.

#### II.7 PRUEBA DE PENETRACIÓN ESTÁNDAR (SPT)

Una técnica empleada comúnmente es la prueba de penetración estándar (SPT por sus siglas en inglés), es una prueba *in-situ*, diseñada para proveer información de las propiedades mecánicas del suelo. Es una prueba confiable para determinar la dureza de los materiales del suelo, y que a través de relaciones empíricas se pueden establecer otros parámetros como la densidad y/o capacidad de carga del suelo.

La prueba requiere de un tubo (cuchara) cuyo diámetro exterior es de 50 mm, de 35 mm de diámetro interior y una longitud de 650 mm. La prueba consiste en causar que la cuchara de muestreo penetre el suelo dejando caer un martillo con un peso de 650 N a una altura de 750 mm y contar el número de golpes necesarios para que la cuchara penetre 300 mm, obteniendo así el llamado valor N. El suelo es perforado 150 mm dejando caer una masa de 64 kg de una altura de 750 mm y posteriormente se cuenta el número de impactos necesarios para penetrar 450 mm en tres intervalos de 150 mm. Así la suma del número de golpes necesarios del segundo al tercer intervalo (los últimos 300 mm) es llamada la resistencia estándar de penetración. Los primeros 150 mm se desprecian ya que son considerados no representativos por la alteración inducida a causa de la perforación. En caso de que el tubo no logre avanzar 150 mm en 50 golpes, solo se registra la distancia recorrida con los 50 golpes. Este número de golpes es utilizado para inferir la densidad del suelo y es empleado en diversas relaciones empíricas para inferir las propiedades del suelo, tal como la velocidad de propagación de las ondas elásticas y los módulos elásticos. La efectividad de los resultados depende mucho del personal que se encuentre realizando la prueba, del equipo utilizado y de los materiales del sitio. La importancia de esta prueba es que, aún siendo una metodología empírica, las características de las cimentaciones están basadas en el valor N (Kurian, 2006).

### II.8 RESEÑA DE LA TÉCNICA DE CROSS-HOLE.

La técnica de cross-hole es una de las mejores metodologías para determinar la variación de las ondas de corte del suelo (Mok *et al.*, 1988; Luna y Jadi, 2000). La técnica consiste de una fuente de energía sísmica, generada dentro de un pozo, con el fin de medir el tiempo de viaje hacia otra perforación, y estimar la velocidad de las ondas sísmicas generadas, las cuales pueden ser ondas P u ondas S (Woods, 1978 y 1994). Lo anterior implica que sean requeridos al menos dos perforaciones, uno donde se generará una fuente impulsiva y otro(s), para colocar transductores, según la figura 6.



Figura 6. Esquema de implementación de la técnica de cross-hole. Modificado de Luna y Jadi (2000).

Así, la velocidad de ondas de corte es utilizada para calcular el módulo de cortante, mediante la ecuación 3.

Para llevar a cabo correctamente la técnica de cross-hole, deben tomarse en cuenta varios requerimientos:

- Un mínimo de dos perforaciones, pero tres o más perforaciones pueden mejorar los resultados del método.
- La energía de la fuente impulsiva debe estar rica en ondas de corte y pobre en ondas compresionales, pero de tal forma que las ondas S puedan ser detectadas con cierta facilidad.
- Los geófonos (transductores) utilizados deben tener una respuesta en frecuencia apropiada y orientada en la dirección del movimiento de partícula.
- El acoplamiento entre geófonos y la pared del suelo debe estar sujeto con aditamentos especiales que aseguren el sensor sin dañarlo.
- 5) El tiempo de viaje es calculado directa o indirectamente. La forma directa es referida al uso de dos canales en un osciloscopio o sistema de adquisición y visualización, mientras que la forma indirecta utiliza el espectro de potencia cruzado de dos transductores (Gazetas, 1991; Woods, 1994).

## II.9 RESEÑA DE LAS TÉCNICAS DEL DOWN-HOLE Y UP-HOLE.

Las técnicas de up-hole y down-hole, son técnicas más económicas en comparación con la técnica del cross-hole, ya que solo se requiere una perforación (ver figura 7).



Figura 7. Esquema de implementación de la técnica de: a) up-hole y b) down-hole. Modificado de Luna y Jadi (2000).

La técnica de down-hole utiliza una fuente impulsiva en la superficie a una distancia cercana a la perforación, mientras que uno o varios transductores son colocados a lo largo de la perforación a profundidades predeterminadas. Mientras que la técnica del uphole, considera la colocación de la fuente a lo largo de la perforación, y los transductores a diferentes distancias en la superficie. Se registra y grafica el tiempo de viaje de las ondas de cuerpo en cada geófono, respecto de la fuente a cada profundidad (localización del transductor). Las gráficas obtenidas son utilizadas para determinar velocidad máxima de corte y compresión (Woods, 1994; Gazetas, 1991), y así estimar los módulos a esfuerzo cortante y compresión utilizando las ecuaciones 3 y 4, respectivamente. En el caso de conocer ambas velocidades de propagación, puede ser calculada la razón de Poisson de cada estrado del suelo aplicando la tabla I.

Una ventaja importante de estas dos metodologías es que se pueden estimar las velocidades de estratos blandos, de entre medio de dos estratos con velocidad mayor (más duros).

Dependiendo de la profundidad del suelo a la que se pretende conocer sus propiedades, es el tipo de fuente que será utilizado, que va desde impactos (verticales) producidos con solenoides a equipo mecánico pesado. Sin embargo, resulta difícil detectar el primer arribo de las ondas de corte. El inconveniente principal para la aplicación de estas últimas técnicas es el hecho de requerir perforaciones, lo que es costoso, pero se tiene una excelente resolución hasta la profundidad a la que se pretendan realizar las perforaciones (Stokoe *et al.*, 1988).

En la siguiente sección se da una descripción sucinta de las metodologías noinvasivas (no-destructivas) para el estudio y caracterización *in-situ* de suelos.

## II.10 RESEÑA DEL MÉTODO DE REFRACCIÓN DE MICROTREMORES (REMI)

El método Remi, es un método sísmico desarrollado por Louie *et al.* (2001), utilizado para medir *in-situ*, la velocidad de ondas de corte del suelo. El método es de fuente pasiva, ya que procesa microtremores que se pueden encontrar presentes en las mediciones. Puede estimar la velocidad de ondas de corte del suelo, desde 40 m hasta 100 m, aproximadamente, dependiendo de las propiedades del suelo y de los registros de microtremores.

La técnica de refracción de microtremores (Remi) está basada en dos ideas principales: La primera es que el método puede aprovechar equipo de reflexión y refracción sísmica, que puede registrar ondas cuyo contenido en frecuencias sea de por lo menos 2 Hz (Louie *et al.*, 2001). La segunda idea es que el procesado permite separar el arribo de las ondas Rayleigh de otros arribos para estimar la velocidad de ondas Rayleigh.

La adquisición de datos consiste en obtener de cinco a diez registros de ruido ambiental, con una duración aproximada de unos veinte segundos, utilizando geófonos convencionales, dónde su análisis espectral está basado en la transformación *p-tau*, o también llamado "stacking" (apilado) que actúa como un filtro pasa bajas sobre las amplitudes de los datos (no afecta el contenido en frecuencia), descrito por Thorson y Claerbout (1985), y permite la separación de las ondas Rayleigh con la llegada de otras ondas (ondas P y ondas S), pudiendo así reconocer la velocidad de fase de las ondas Rayleigh. Al final, la curva de dispersión es la envolvente del espectro de energía en función de las frecuencias (ver figura 8).



Figura 8. Esquema del procesado de registros de ruido mediante el método Remi. Modificado de Linares (2005).

Finalmente, el método Remi es no invasivo y no destructivo (no requiere perforar ni aplicar una fuente en el suelo) y no implica mayor impacto ambiental. Sin embargo, una desventaja, que le da pie de estudio a los métodos SASW, SPAC y HV-SPR, es que el método no siempre puede resolver (con buena resolución) las velocidades del suelo a distancias menores de los 30 m (Pullammanappallil *et al.*, 2003 y Heat *et al.*, 2006), que son las profundidades de interés para la ingeniería civil, y difícilmente resuelve estratos de baja velocidad entremedio de dos capas de mayor velocidad.

#### II.11 RESEÑA DEL MÉTODO DE ONDA ESTACIONARIA DE RAYLEIGH

El método de onda estacionaria de Rayleigh, es un metodo *in-situ* no invasivo y no destructivo, que tiene como objetivo final estimar las velocidad de ondas de corte del subsuelo.

Esta prueba requiere de una maquina vibradora que genere frecuencias desde 30 Hz a 100 Hz o una maza rotatoria (similar a una biela) para generar ondas Rayleigh de frecuencias más bajas, menores a 30 Hz (Luna y Jadi, 2000), y se va colocando un sensor en la cercanía de la fuente alejándolo periódicamente hasta que se encuentre en fase con un cierto valor de frecuencia de la fuente, tal como lo muestra la figura 9.



Figura 9. Esquema de implementación del método de ondas estacionaria de Rayleigh. Modificado de Luna y Jadi (2000).

La distancia entre dos posiciones de los sensores adyacentes, se considera como la longitud de onda de Rayleigh. Posteriormente, se grafican las posiciones con respecto a la fuente como lo muestra la figura 9 y así determinar la longitud de onda promedio para cada valor discreto de frecuencia, estimando la velocidad de fase de la onda de Rayleigh ( $V_R$ ) mediante la ecuación 5.

$$V_R = f \cdot \lambda_R \tag{5}$$

Posteriormente se repite este procedimiento para diferentes valores de frecuencias discretas, hasta construir una curva de dispersión en un cierto rango de frecuencias. Esta técnica requiere equipo sofisticado para generar las ondas Rayleigh y consume mucho tiempo para ejecutar el trabajo de campo.

El método de onda estacionaria de Rayleigh fue propuesto por Jones en 1958 (Kramer, 1996), pero nunca fue aceptado por lo complicado de su procedimiento. Sin embargo, es el predecesor del método de Análisis Espectral de Ondas Superficiales (SASW).

### II.12 RESEÑA DEL MÉTODO SASW

El método de análisis espectral de ondas superficiales (SASW) es un método sísmico, no destructivo que se emplea para estimar *in-situ*, la velocidad de ondas de corte del subsuelo y por relaciones empíricas, inferir sobre los módulos elásticos.

Este método comenzó con la aplicación del método de onda estacionaria de Rayleigh, pero desarrollado por Nazarian y Stokoe (1986) tomando ventaja del análisis y procesamiento digital de señales a partir de impactos en el suelo, por este procesamiento el método se denominó análisis espectral de ondas superficiales (SASW). La introducción de equipo portátil en el mercado facilitó la implementación de este metodo. La característica dispersiva de las ondas superficiales del tipo Rayleigh, es el fundamento principal de ésta metodología. Se emplea la palabra dispersiva para referirse que la onda Rayleigh al viajar a través del medio, depende de la frecuencia y con ello determinar las propiedades del medio por la cual viaja. Por ello, al graficar la velocidad de fase de las ondas Rayleigh en función de la frecuencia o longitud de onda, se le llama curva de dispersión. Esta dispersión aparece debido a que diferentes longitudes de onda se propagan a diferentes profundidades del subsuelo, a mayor longitud de onda, mayor será la penetración de las ondas y por ende, información de las velocidades de ondas de Rayleigh a mayor profundidad.

Este método consiste en colocar dos sensores en la una superficie, conectados a algún equipo de adquisición y análisis de datos. Se aplican impactos en la superficie del suelo a cierta separación de los sensores para después por medio de un análisis espectral de los transcientes registrados, estimar las velocidades de las ondas Rayleigh en función de la frecuencia (curva de dispersión).

El método SASW parte de dos suposiciones básicas: La primera, es que únicamente las ondas superficiales planas son medidas en campo, donde el efecto de las ondas de cuerpo no es relevante si se mantiene cierta relación entre la distancia fuente-receptor. La segunda, es que solo la energía del modo fundamental de la onda superficial se toma en cuenta (Rix *et al.*, 1991).

## II.13 RESEÑA DEL MÉTODO SPAC

El método de autocorrelación espacial (SPAC) fue desarrollado por Aki (1957), el cual es un método pasivo (al emplear solo ruido ambiental), *in-situ* y no invasivo/destructivo. El ruido ambiental lo considera como un proceso estacionario en tiempo y en espacio, cuya teoría fue rigurosamente estudiada por Aki (1957) y discutida en aspectos prácticos por Aki (1965), entre otros autores como Okada (2006) y Chávez-García *et al.* (2006); por mencionar algunos.

Este método es empleado para estimar las velocidades de fase de las ondas Rayleigh, a partir de coeficientes de correlación obtenidos a partir del registro simultáneo de ruido ambiental, utilizando arreglos con cobertura azimutal (con sensores en registro vertical), calculando los coeficientes de correlación entre sensores equidistantes y posteriormente promediando los coeficientes de correlación para obtener la curva características de correlación para una cierta distancias. Con estos coeficientes de correlación se calcula la curva de dispersión de las velocidades de ondas Rayleigh a partir del ajuste de estos coeficientes de correlación, respecto a su modelo teórico (Aki, 1957), siendo este ultimo representado con una función de Bessel de orden cero de primera clase; la inversión se realiza típicamente con un algoritmo de inversión no lineal, el cual será descrito posteriormente.

### II.14 RESEÑA DEL MÉTODO HV-SPR

El método de cocientes espectrales H/V (HV-SPR, por sus siglas en inglés), fue desarrollado por Nakamura (1989). Es un método económico, rápido, in-situ y no invasivo, el cual propone estimar el período fundamental y, en algunos casos, una buena aproximación del factor de amplificación de depósitos de suelos blandos a partir de mediciones de ruido ambiental en las componentes vertical y horizontal, en la superficie. Teniendo en consideración que los depósitos del suelo están generalmente expuestos a vibraciones inducidas por fuentes naturales (mareas, fuerzas antropogénicas, etc.), las cuales producen una excitación dinámica aleatoria, permitiendo que el depósito vibre primordialmente en su frecuencia fundamental. El método considera que al realizar mediciones de ruido ambiental en afloramientos rocosos o en suelos muy rígidos, se presentan respuestas similares en las componentes vertical y horizontal, dando un cociente cercano a la unidad; con lo que se puede decir que no existe en este caso una dirección predominante en la propagación de las ondas, y que cualquier amplificación del movimiento en la superficie, está dada por capas de depósitos de sedimentos blandos. Como hipótesis fundamental, se acepta que la componente horizontal del ruido ambiental es amplificada por la múltiple reflexión de las ondas de corte, mientras que la componente vertical es amplificada por la múltiple reflexión de las ondas compresionales.

# ANTECEDENTES Y PRINCIPIOS GENERALES DE LOS MÉTODOS: SASW, SPAC Y COCIENTES ESPECTRALES H/V (HV-SPR)

En la actualidad se necesita del desarrollo y aplicación de métodos que resulten versátiles, económicos y que minimicen su impacto ambiental en sitios de interés (como lo son los métodos sísmicos estudiados en este trabajo), para estimar tanto el perfil de velocidades, como la geometría de los estratos del subsuelo. Estos estudios se hacen necesarios para cálculos posteriores en el diseño de estructuras civiles.

Los modelos del comportamiento dinámico de la respuesta del terreno ante la aplicación de cargas muestran que los peligros asociados a éste dependen de las características físicas de los materiales que lo constituyen (Boore y Joyner, 1997). Los suelos blandos se encuentran asociados a la amplificación del movimiento del suelo y por consecuencia con el daño a estructuras (Joyner *et al.*, 1981; Borcherdt y Gibbs, 1976; Borcherdt y Glassmoyer, 1992; Taber y Smith, 1992; Borcherdt y Glassmoyer, 1994 y Huang *et al.* 2007).

Dentro del campo de la ingeniería civil, la gran mayoría de las propiedades físicas del suelo son obtenidas mediante estudios que requieren de perforaciones, para conocer la velocidad de propagación de las ondas sísmicas, principalmente la de las ondas de cortante (Fumal y Tinsley, 1985; Gibbs *et al.*, 1992 y 1993; Kurian, 2006). Estos estudios requieren perforaciones y de la inferencia de las velocidades de los materiales del subsuelo, basadas primordialmente en observaciones empíricas.

Para aplicaciones prácticas en ingeniería, se considera que la amplificación del suelo ocurre en los primeros 30 m de profundidad (Borcherdt y Glassmoyer, 1994). También se ha documentado que la amplificación del movimiento del suelo depende del contenido en frecuencia de las ondas sísmicas, así como de las velocidades de los suelos más profundos, el amortiguamiento, efectos no lineales, profundidad y localización del suelo competente (Anderson *et al.* 1996; Huang *et al.*, 2007; *et al.*).

Las pruebas que requieren de perforaciones tienen un alto costo y tiempo de ejecución por lo que es necesario introducir activamente a la industria métodos geofísicos tales como SASW, SPAC, cocientes espectrales H/V (HV-SPR) o cualquier otra técnica con fuente activa y/o pasiva, que no requiera de tales perforaciones. Los registros de datos que requieren estos métodos tienen un contenido en frecuencia similar al de registros de sismos, lo que permite que los resultados obtenidos puedan utilizarse para inferir sobre las amplificaciones del movimiento del terreno en un amplio rango de frecuencias que la información obtenida en perforaciones (Brown, 1998).

Al estimar la amplificación de las ondas sísmicas a partir de mediciones hechas desde la superficie, se espera obtener resultados más consistentes que las inferencias empíricas obtenidas por reconocimientos geológicos o por perforaciones, debido a que de esta manera se considera en forma más completa la naturaleza del campo de ondas sísmicas (contenido de frecuencias y longitudes de onda) ya que en parte, estas dependen del promedio (vertical) de las propiedades del suelo.

Lo métodos SASW, SPAC y HV-SPR, incorporan un promediado espacial de las posibles heterogeneidades de las propiedades del suelo, mientras que métodos como por ejemplo, el down-hole, SPT, entre otros, están restringidos a proporcionar información puntual del subsuelo. Así, el promediado espacial puede ser más confiable y representativo para la estimación de los factores de amplificación del terreno. Sin embargo, este promediado puede resultar una desventaja de los métodos indirectos, ya que puede ocultar problemas puntuales del subsuelo, por ejemplo las que producen licuación diferencial en

las cimentaciones de los edificios (solo para algunos métodos, bajo condiciones especiales).

Mediante las técnicas de procesamiento de señales, y de modelado directo que se presentan en este estudio, están enfocadas al análisis de señales y la identificación de sistemas (suelos estratificados en este caso) para la caracterización del sitio en términos de su función de transferencia y la interpretación de ésta en términos de la geometría y propiedades físicas (velocidades, razón de Poisson, densidad y amortiguamiento) de los estratos que constituyen al terreno a profundidad.

# III.1 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE ANÁLISIS ESPECTRAL DE ONDAS SUPERFICIALES (SASW)

El método de análisis espectral de ondas superficiales (SASW por sus siglas en inglés) es un método sísmico que fue propuesto por Heisey *et al.* (1982) y desarrollado en el campo de la ingeniería sísmica por Nazarian y Stokoe (1986), como un mejoramiento del método de onda estacionaria de Rayleigh. Este método también ha sido estudiado tanto en sus aspectos teóricos como experimentales, por investigadores como Sánchez-Salinero *et al.* (1987), Rix *et al.* (1991), Foinquinos (1995), Foti (2000) y Brown *et al.* (2002), entre otros. Éste es un método *in-situ*, no invasivo, empleado para la estimación de la velocidad de propagación de ondas superficiales de tipo Rayleigh en medios tales como: (i) sedimentos, (ii) rocas, (iii) concreto, (iv) asfalto y en general, cualquier geo-material donde se requiera conocer sus propiedades físicas, la geometría y espesores.

El objetivo principal del método SASW es estimar la velocidad de propagación de las ondas Rayleigh, la cual se encuentra relacionada con las propiedades físicas del medio (principalmente con la velocidad de las ondas de corte, de compresión y la densidad). La profundidad aproximada de muestreo de las ondas Rayleigh es de entre 1/2 y 1/3 de  $\lambda$ (longitud de onda). En la figura 10 se esquematiza que a mayor longitud de onda, mayor será la penetración de las ondas Rayleigh que serán afectadas por las propiedades de los materiales de mayor profundidad.



Figura 10. Ejemplos de una curva de dispersión en función de la longitud de onda (derecha), esquema de la penetración de ondas cortas y largas en términos de la longitud de onda, en un medio estratificado de tres capas.

### III. 2 PROCEDIMIENTO PARA EL MÉTODO SASW

El método SASW consiste en la medición *in-situ* de toda una gama de ondas, principalmente ondas superficiales del tipo Rayleigh, para posteriormente procesar e interpretar estas mediciones y así obtener información de la velocidad de las ondas de corte para un medio estratificado. Este proceso consiste de tres etapas:

La primera etapa consiste en la toma de mediciones en campo, donde la intención es generar y/o utilizar señales ricas en ondas superficiales del tipo Rayleigh, las cuales pueden ser fuentes activas y/o pasivas.

Una fuente activa es utilizada para generar ondas superficiales con diferentes frecuencias (o longitudes de onda) que serán registradas por dos o más transductores colocados a distancias conocidas.

Las distancias entre la fuente utilizada y el sensor más cercano (ecuación 6) deberán ser al menos igual a la distancia entre los dos sensores (Ganji *et al.*, 1998), ver la figura 11, que muestra la configuración típica del método SASW.

$$D_f \ge x,$$
 (6)

donde:

 $D_f$ : la distancia de la fuente al sensor más cercano.

x: la distancia entre los sensores.



Figura 11. Esquema de la configuración típica del método SASW. La notación "x" representa la distancia entre sensores, "Df" representa la distancia de la fuente respecto al sensor más cercano.

Este criterio se emplea para minimizar los efectos de campo cercano, los cuales pueden corresponder a la interferencia con las ondas de cuerpo, ondas reflejadas y ondas refractadas, y así registrar preferentemente ondas superficiales de Rayleigh. Se realizan repeticiones de impactos (fuentes de ondas superficiales) para cada separación elegida de sensores y posteriormente en el procesamiento, promediar las ondas registradas con el propósito de minimizar el ruido incoherente que pudiera existir. La información que se le puede extraer a esta configuración se encuentra limitada primordialmente por el rango de frecuencias que pueda generar la fuente, así como la distancia entre los sensores y la fuente. Separaciones entre los sensores a distancias cortas (de 0.3 m a 5 m, aproximadamente) sirven para captar longitudes de onda cortas (frecuencias altas), donde estas ondas son producidas por fuentes con baja energía, mientras que a distancias más lejanas son requeridas para obtener información a mayor profundidad, aplicando fuentes de mayor energía con la finalidad de que las longitudes de onda más grandes no se atenúen significativamente.

Una descripción conceptual y sucinta del contenido de frecuencias y niveles de energía contenida en señales sísmicas o inducidas se da a continuación.

El primer grupo, lo constituyen los sismos que poseen frecuencias entre  $10^{-5}$  y  $10^{-4}$  Hz (Lay y Wallace, 1995), que bien pueden ser utilizadas para obtener información del subsuelo a grandes profundidades.

El segundo grupo, lo constituyen las explosiones, pues generan ondas con un amplio contenido en frecuencias, hasta del orden de kilo Hertz (Lay y Wallace, 1995), las cuales tienen el inconveniente de no poderse aplicar en zonas urbanizadas o en su defecto se requiere de permisos de autoridades competentes, donde a su vez se requiere de conocer su impacto ambiental, lo que vuelve a esta opción poco práctica o simplemente inoperable y aplicable solo en casos de exploración en zonas no urbanizadas.

En el tercer grupo se encuentran aquellas fuentes que generan señales de corta duración mediante impactos, bien sea con martillos, marros, caídas de peso o bien maquinas vibradoras (verticales), que generan ondas cuyo contenido de frecuencia están entre unos cuantos Hertz hasta del orden de kilo Hertz. Dependiendo de las características de las señales generadas se podrá resolver sistemas con dimensiones desde unos cuantos centímetros (0.2 m a 5 m) hasta del orden de 60 metros (en el caso de caídas de peso) (Foti, 2000).

Para obtener información del medio a profundidad, es necesario cambiar la distancia de separación entre los sensores respecto de un centro imaginario en el área a estudiar (ver figura 12).



Figura 12. Esquema de la ejecución del método SASW, para distancias distintas y que utilizan distintas distancias de fuente, realizadas en diferentes tiempos (pruebas).

Las distancias elegidas de la figura 12 son tales que para cada prueba exista un cierto traslape en la longitud de onda entre cada ensayo. Un posible criterio para elegir la distancia entre los sensores, seria en base a la ecuación 7.

$$x \simeq e^{0.5a}, a = 0, 1, 2, 3, \dots, 2\ln(h),$$
 (7)

donde:

*h*: La profundidad deseada.

x: La distancia aproximada entre los sensores.

La ecuación 7 proviene de aplicar el logaritmo natural a la relación que propone Chávez-García *et al.* (2005), considerando que es la forma general que podría tener la curva de dispersión es de la forma de la ecuación 8.

$$V = V_0 f^{-1} = \frac{\lambda V_0}{V},$$
(8)

donde:

 $V_0$ : velocidad inicial.

V: velocidad instantánea.

*f*: frecuencia.

 $\lambda$ : longitud de onda.

La ecuación 7 se obtiene del siguiente aplicando el logaritmo natural en ambos lados de la ecuación 8, obteniendo posteriormente la ecuación 9.

$$LnV = 0.5Ln\lambda + 0.5LnV_0 \tag{9}$$

La ecuación 9 puede interpretarse como una ecuación lineal equivalente a la ecuación 8, donde se observa que su razón de cambio es 0.5, lo cual se puede reinterpretar en términos de la ecuación 7 mediante múltiplos enteros de la exponencial natural de esta razón de cambio, la cual pudiera funcionar como un criterio para que los métodos SASW o SPAC estimen apropiadamente las velocidades de ondas de corte a profundidad. Nótese que esta relación carece de unidades; así que, puede ser aplicada en la escala y en las unidades que se deseé, además, esta relación da pie a utilizar separaciones entre sensores de tal manera que exista cierto traslape entre las curvas de dispersión obtenidas para cada separación entre sensores y evitar información redundante al momento de estimar las curvas de dispersión. La distancia entre los sensores también dependerá de las dimensiones del sitio deseado, la portabilidad del equipo, el tipo de fuente que se encuentre al alcance y la profundidad a la que se desee estimar sus propiedades. Es recomendable aplicar la fuente en posiciones opuestas (figura 12) para minimizar el efecto de posibles

heterogeneidades laterales, así como la posible inclinación (considerada moderada) que pudieran tener las capas del subsuelo.

#### III.3 MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO DEL MÉTODO SASW

El concepto fundamental del método SASW proviene de su predecesor que es el método de onda estacionaria de Rayleigh, y asume la factibilidad de generar artificialmente un campo de ondas dominado por ondas superficiales del tipo Rayleigh.

Las hipótesis principales del método SASW son: (i) que las capas del subsuelo son planas y paralelas, que aun existiendo pequeñas variaciones respecto de esta hipótesis, no debería causar mayor problema (Foti, 2000) y (ii) que son registradas predominantemente ondas Rayleigh propagándose en su modo fundamental (Foti, 2000).

Una de las principales dificultades que tiene el método SASW, es el obtener información del subsuelo a grandes profundidades, por lo regular del orden de 30 m y profundidades superiores, resultando mucho más difícil disponer de una fuente adecuada que posea la suficiente energía para no atenuarse significativamente cuando hay grandes separaciones entre sensores. Por ejemplo, una caída de peso relacionada con una separación entre sensores de 30 m tendría, al menos, una separación de 60 m al segundo sensor, por lo que de no tener suficiente energía, posiblemente se perdería significativamente la señal con el ruido de fondo.

En esta investigación, se propone el uso de ruido ambiental como fuente de energía para complementar así la porción de la curva de dispersión para los casos en que se tengan limitaciones de una fuente de energía artificial que provea amplitudes significativas en la banda de frecuencias bajas (Tokimatsu, 1995; Zywicki y Rix, 1999; Malovichko *et al.* 2006). La variante de esta propuesta considera que las señales contenidas en la vibración ambiental están compuestas esencialmente de ondas superficiales tipo Rayleigh (ver

capítulo II). Se sabe sin embargo, que estas ondas viajan en diferentes direcciones y es complicado captarlas en el momento en el que estas ondas se encuentren presentes y pasen a lo largo del arreglo de sensores, por ello, una posibilidad de aprovechar este tipo de ondas, es registrar los microtremores durante un tiempo lo suficientemente largo (dependiendo de la capacidad del equipo utilizado) para que mediante el procesado de los datos, promediar un buen número de segmentos y así buscar enfatizar la información registrada, para determinar las propiedades del medio. Trabajos similares en este contexto proponen lograr resoluciones de hasta una profundidad aproximada de unos 200 m (Zywiki y Rix, 1999; Liu *et al.*, 2000).

El procesamiento para las fuentes pasivas es el mismo que el utilizado con fuentes activas, pero con la diferencia que se desconocen los mecanismos exactos de la producción del ruido ambiental, su dirección de propagación y los diferentes modos de propagación (principalmente en el caso de tratarse de microtremores). Debido a la multidireccionalidad del ruido ambiental, es necesario registrar suficiente tiempo como para llegar a obtener porciones de ondas que se encuentren alineados con el arreglo lineal, o bien, crear un arreglo con cobertura azimutal (ver figura 13). Foti (2000), propone a un arreglo similar al del método SPAC, que será posteriormente descrito y utilizado.

#### III.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESAMIENTO PARA EL MÉTODO SASW

El método SASW consiste del procesamiento de las señales en el dominio de las frecuencias y el análisis de los espectros de fase respecto de la posición de los sensores. Como se mencionó anteriormente, mínimamente se requiere de dos sensores, para después analizar las señales en el dominio de las frecuencias. De este proceso se obtienen: (i) Los autoespectros de potencia  $G_{ii}(f)$  (ecuación 40 del apéndice A), (ii) los espectros de potencia cruzados  $G_{ij}(f)$  (ecuación 41 del apéndice A), (iii) la función de coherencia

 $\gamma^{2}_{ij}(f)$  (ecuación 44 del apéndice A), y (iv) la estimación del espectro de fase  $\Theta_{ij}(f)$  (ecuación 10).

El procedimiento para la construcción de la curva de dispersión consiste en estimar la diferencia de fase observada entre los dos sensores. Posteriormente se deberá estimar su equivalente en tiempo (ecuación 11) y dado que la separación entre sensores es conocida, se calcula la velocidad de fase en función de la frecuencia (ecuación 12) conocida también como curva de dispersión.

$$\Theta_{ij}(f) = \tan^{-1}(\frac{\operatorname{Im}(G_{ij}(f))}{\operatorname{Re}(G_{ij}(f))})$$
(10)

$$t(f) = \frac{\Theta_{ij}(f)}{360f} \tag{11}$$

$$V_{R}(f) = \frac{D}{t(f)}$$
(12)

La función de coherencia (ecuación 39 del apéndice A) es de gran utilidad ya que valores de coherencia cercanos a la unidad indican las porciones en que el espectro de fase no está significativamente contaminado por la contribución de ruido aleatorio (ruido incoherente) además de que el sistema tiene un comportamiento lineal. Así también, esta función de coherencia es un parámetro de calidad para determinar cuan modificada se encuentra una señal respecto de dos puntos de medición (en los dos sensores) y utilizar aquellas porciones del espectro de fase donde la coherencia tenga un valor cercano a la unidad.

El autoespectro de potencia es utilizado para observar el contenido de energía en cada uno de los sensores en función de la frecuencia, y evaluar donde hay significativamente más energía de las ondas registradas (consideradas superficiales tipo Rayleigh), ya que si la energía es baja, es posible que la información esté contaminada por señales aleatorias (o de otra procedencia distinta a la colineal) o que se haya atenuado considerablemente. Así, para cada separación entre los sensores, la curva de dispersión es calculada en forma independiente y subsiguientemente podrán ser agrupadas para obtener la curva de dispersión experimental compuesta, que será la curva característica de las velocidades de propagación de las ondas Rayleigh para el sitio de estudio.

Es importante mencionar que el uso del tiempo de retraso (ecuación 11) obtenido de la fase del espectro de potencia cruzado, está basado en la hipótesis de que la velocidad de grupo de las ondas está compuesto de un solo modo de propagación y así, la función de fase esté solo en función de la frecuencia (como ha sido descrito), para poder analizar estas ondas mediante la teoría del análisis de Fourier, que asume que las ondas son una superposición de harmónicos.

Por otro lado, es indispensable mencionar que la porción utilizable de la fase, es aquella donde la longitud de onda cumpla con el siguiente criterio de la ecuación 13 (Stokoe *et al.*, 1988).

$$\frac{x}{3} < \lambda < 2x \tag{13}$$

Este criterio es conocido también como filtrado físico, donde se considera que longitudes de onda fuera del criterio se encuentran mayormente afectadas por el ruido o por efectos de campo cercano, dicho de otra forma, a longitudes de onda mayores al triple de la distancia entre sensores se atenúa en tal medida que las ondas se pierden entre el ruido de fondo.

Un punto crítico en la determinación de la curva de dispersión, es el desdoblamiento (unwrapping) de la curva de fase, que consiste en agrupar porciones de fase cuando existen cambios en múltiplos de 180 grados. A esta curva de fase se le puede aplicar un criterio de suavizamiento o de ajuste por mínimos cuadrados, realizando un

barrido a lo largo de toda la curva con un cierto número de puntos de traslape (Nazarian y Desai, 1993; Pérez-Marcial, 2005; Huerta-López, 2005).

Para calcular el espectro de potencia cruzado, es indispensable elegir alguna técnica para su procesamiento, las que pueden ser las técnicas de Welch, Music o alguna otra que permita determinar un espectro estable (Oppenheim y Schafer, 1975), que por lo usual consiste en elegir un cierto número de puntos para calcular la transformada de Fourier aplicando ventanas en el dominio del tiempo (Hanning, Blackman u otras) y elegir un porcentaje de traslape entre ventanas, para realizar un promediado que enfatice la componente determinística de la señal y trate de minimizar la componente aleatoria, y así determinar el espectro cruzado más estable. El resultado de lo antes descrito, es una curva de velocidad de fase de las ondas Rayleigh en función de las frecuencias, esto es para cada separación entre sensores.

La etapa final consiste en apilar todas las curvas de dispersión obtenidas para cada separación entre sensores en una sola gráfica llamada curva de dispersión compuesta, donde a ésta se le puede aplicar un ajuste mediante alguna técnica estadística y finalmente en base a esta, se realizar un proceso de inversión (que será descrito posteriormente) para calcular el perfil de velocidades de ondas de corte en función de la profundidad. El resultado final será aquel que estadísticamente ajuste de mejor forma a la curva de dispersión compuesta de velocidades de ondas Rayleigh. Sólo se realiza la inversión para estimar el modelo de velocidades de ondas de corte.

# III.5 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE AUTOCORRELACIÓN ESPACIAL (SPAC)

El método SPAC fue propuesto por Aki (1957) y permite adquirir información de la velocidad de propagación de las ondas tipo Rayleigh a grandes profundidades del subsuelo a partir de registros de ruido ambiental. Asume que el ruido está compuesto

principalmente por ondas superficiales, sin precisar en detalle el tipo de estas. Posteriormente, Asten (1976) demuestra más propiamente que el ruido ambiental está formado por ondas superficiales de tipo Rayleigh, es por ello que se utiliza la componente vertical de los registros.

Las principales suposiciones para este método son que el suelo se encuentre estratificado aproximadamente en forma horizontal (Tokimatsu, 1997) y que el campo de ondas se encuentre compuesto principalmente por ondas superficiales y sea considerado de origen lejano.

Recientemente, el método SPAC ha mostrado su aplicación en forma significativa en áreas urbanas, en estudios para caracterizar la estructura somera del terreno (Apostolidis *et al.*, 2004; Asten y Dhu, 2004; Chávez-García *et al.*, 2005 y 2006; Hartzell *et al.*, 2005; Kudo *et al.*, 2002; Roberts y Asten, 2008; Flores-Estrella *et al.*, 2004; Wathelet *et al.*, 2008; Claprood M. y Asten, 2009).

El objetivo del método SPAC es obtener el perfil de velocidades de ondas de corte del suelo, a partir del cálculo de los coeficientes de correlación obtenidos del registro del ruido ambiental. Para ello, se registra simultáneamente en diversos sensores, donde se proponen un mínimo de cuatro estaciones (Aki, 1957; Flores-Estrella *et al.*, 2004; *et al.*), para tener una cobertura azimutal del sitio (ver figura 13) y realizar un promedio azimutal de los coeficientes de correlación de cada pareja centro-vértice.





Figura 13. Arreglo típico para la aplicación del método SPAC, formando un triángulo equilátero, ilustrando un sensor común al centro y en sus vértices, simultáneamente.

Se han realizado estudios (Roberts y Asten, 2004) donde se asume que las fuentes del ruido ambiental están considerablemente distantes del arreglo de sensores (campo lejano), lo que permite suponer que el frente de ondas superficiales es plano, aunque no se ha estudiado a fondo el efecto de fuentes cercanas (Roberts y Asten, 2008) con el ruido ambiental (campo cercano).

Las consecuencias de medir ruido ambiental en la cercanía de posibles fuentes, es el incluir un efecto de un frente de onda no plano (esférico), la predominancia de ondas de cuerpo sobre las ondas superficiales y la posible presencia de modos de propagación superiores al fundamental.

Se han realizado estudios (Okada, 2006) comparando los resultados obtenidos de un arreglo triangular, en comparación con un arreglo hexagonal, asumiendo un campo de ondas lejano, sin encontrar una ventaja significativa respecto del arreglo hexagonal.
Roberts y Asten (2006) realizaron estudios numéricos para el caso de tener fuentes cercanas a los arreglos de sensores, encontrando que los coeficientes de correlación pueden sesgarse debido a tener unas fuentes más cercanas que otras.

También es reconocido que las curvas experimentales de los coeficientes de correlación pueden obtenerse utilizando tan solo un par de sensores, registrando ruido ambiental por el mayor tiempo posible (Asten, 2006 y Chávez-García *et al.*, 2006), argumentando tener estacionalidad temporal. Cabe mencionar que no hay un consenso preciso del tiempo mínimo a registrar, pero se recomienda registrar por lo menos diez minutos de ruido ambiental (SESAME, 2004).

La aplicación de este método no se encuentra limitado en la caracterización general del suelo, sino también tiene aplicación a escala de la ingeniería sísmica (alrededor de los 30 m de profundidad).

El procesamiento del registro de ruido ambiental mediante este método consiste de tres etapas: (i) la estimación de los coeficientes de correlación (también llamados curva espectral característica), (ii) el cálculo de las curvas de dispersión, y (iii) la inversión de ésta curva de dispersión para estimar el perfil de velocidades de ondas de corte.

La resolución del método SPAC se encuentra intrínsecamente relacionada con las amplitudes espectrales del campo de ondas incidente, la apertura del arreglo de sensores y su geometría; así como, la duración del registro del ruido ambiental (Aki, 1957; Chávez-García *et al.*, 2006; Wathelet *et al.*, 2008).

Hasta este momento no se ha llegado a un consenso acerca de la configuración para el registro del ruido ambiental. Asten y Henstridge (1984) recomiendan que el diámetro del arreglo debe ser de al menos la mayor longitud de onda que se pretenda registrar, y la apertura de los arreglos (distancia centro vértices) deben realizarse a distancias de al menos la mitad de la longitud de onda más corta que se desee registrar. También se sugiere utilizar el criterio de la ecuación 7.

En resumen, respecto de la configuración del método SPAC, Tokimatsu (1997), proponen las desigualdades 14 y 15.

$$\lambda_{max} < 3D_{max},\tag{14}$$

$$\lambda_{min} < 2D_{min},\tag{15}$$

donde  $D_{min}$  y  $D_{max}$  son las aperturas mínimas y máximas del arreglo SPAC.

#### III.6 MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL DEL MÉTODO SPAC

Es indispensable mencionar que la hipótesis fundamental del método SPAC es que existan ondas estacionarias dentro de los registros de los microtremores (Aki, 1957 y Chávez-García *et al.*, 2006). La hipótesis puede interpretarse bajo un esquema de ondas guiadas (Sadiku, 2006), considerando que una onda estacionaria se forma por la interferencia de dos ondas de la misma naturaleza con igual amplitud, longitud y frecuencia que avanzan en sentido opuesto a través de un medio, y que se encuentran confinadas en un espacio (que puede ser un estrato del subsuelo). Hay puntos de las ondas que no vibran (nodos), o sea permanecen estacionarios (dicho de otra forma, viajan a una velocidad uniforme), mientras que otros (vientres o antinodos) lo hacen con una amplitud de vibración máxima, igual al doble de la de las ondas que interfieren, y con una energía máxima.

Se puede considerar que las ondas estacionarias no son propiamente ondas de propagación sino los diferentes modos de vibración del medio, ya que sólo hay ciertas frecuencias a las que se producen ondas estacionarias, llamadas así también frecuencias de resonancia (Sadiku, 2006). La más baja denominada frecuencia fundamental, y las demás son múltiplos enteros de esta. Por lo anterior, la curva de dispersión se obtiene a partir de las vecindades del primer cero de los coeficientes de correlación, que coincide con el primer cero de la función de Bessel de orden cero (ver figura 14 o consultar Arfken y Weber, 2001), además del análisis realizado por Aki (1957).



Figura 14. Gráfica de la función Bessel de orden cero, de primera clase, en el intervalo [0, 12].

Los coeficientes de correlación  $\Gamma_{o,j}(r,\theta,f)$ , se obtienen calculando los espectros de potencia del registro de cada sensor (de una configuración preestablecida) y la función de correlación cruzada entre el centro del arreglo respecto de cada sensor en la posición *j*, que a su vez depende del radio *r* del arreglo experimental, mediante la ecuación 16.

$$\Gamma_{o,j}(r,\theta,f) = \operatorname{Re}\left(\frac{A_{oj}(r,\theta,f)}{\sqrt{A_o(f)A_j(r,\theta,f)}}\right),\tag{16}$$

donde:

 $A_{i}(f)$  : es el espectro de potencia de la estación *j*.

 $A_o(f)$  : es el espectro de potencia del sensor central.

 $A_{oj}(f)$ : es el espectro de potencia cruzado entre el sensor central y cada uno de los sensores vecinos.

 $\Gamma_{o,j}(r,\theta,f)$ : son los coeficientes de correlación en función del radio, frecuencia y posición de cada sensor utilizado.

Re : indica la parte real de una función compleja.

Esta última expresión sirve para calcular los coeficientes de correlación entre dos pares de estaciones, pero si lo que se desea es obtener un promedio azimutal, entonces se requiere calcular la siguiente integral de la ecuación 17.

$$\overline{\rho(r,f)} = \frac{1}{n} \int_{0}^{2\pi} \Gamma_{oj}(r,\theta,f) d\theta, \qquad (17)$$

donde:

n: es el número de estaciones utilizadas.

 $\overline{\rho(r, f)}$ : es el promedio de los coeficientes de correlación.

Los coeficientes de correlación se encuentra relacionada con la función de Bessel de orden cero de primera clase  $J_0$  (Aki, 1957), mediante la ecuación 18.

$$\rho(r,f) = J_o(\frac{2\pi f r}{c(f)}),\tag{18}$$

donde:

- *f*: frecuencia lineal.
- r: distancia de separación entre sensores respecto del centro.
- c(f): velocidad de fase en función de la frecuencia.

#### III.7 DESCRIPCIÓN DEL PROCESAMIENTO PARA EL MÉTODO SPAC

La etapa del procesamiento de los registros de ruido ambiental del método SPAC, consiste de cuatro pasos:

- Se eligen los registros obtenidos del ruido ambiental del sensor del centro, para particionar la serie de tiempo en una cierta cantidad de porciones (subregistros), de tal forma que sus segundos momentos estadísticos (Oppenheim y Schafer, 1975), sean lo más semejantes posibles entre sí, para determinar si la serie de tiempo (de cada subregistro) es estacionaria o cuasi-estacionaria; no es un requisito indispensable para el método SPAC de configuración azimutal aunque si recomendable.
- Una vez elegidas estas nuevas particiones (porciones), se calculan los promedios de los coeficientes de correlación para cada una de las porciones entre todas las estaciones posibles del arreglo experimental.
- 3. Se determina la curva de dispersión mediante inversión de la ecuación 18, para obtener el valor del argumento de la función de Bessel de orden cero de primera clase mediante un proceso de inversión propuesto por Menke (1984).

4. Se estima el perfil de velocidades de ondas de corte por medio de un método de inversión, en este caso por medio de un método de búsqueda, específicamente por medio de algoritmos genéticos, proporcionados por Lai y Rix (1999) y recomendado por Wathelet (2008).

Cabe mencionar, que el procesamiento de una configuración de un par de sensores, es exactamente el mismo con la diferencia que en lugar de hacer un promedio respecto a las estaciones circundantes (promedio azimutal) se realiza un promedio entre las dos estaciones utilizadas (promedio lineal).

Una vez calculados los coeficientes de correlación, se calculan las curvas de dispersión (velocidad de fase de las ondas Rayleigh en función de las frecuencias) para todas las distancias requeridas, combinarlas y así obtener la curva de dispersión compuesta.

Tomando en cuenta los criterios de Henstridge (1979), la estimación de la curva de velocidad de fase C(f) se obtiene en donde el argumento de la función de Bessel se encuentre entre 0.4 y 3.2. Esto último se puede observar mediante el siguiente análisis.

Considérese la función de correlación en función del número de onda k (ecuación 19).

$$C(k) = J_0(kr) \tag{19}$$

Se analiza su varianza, con la segunda derivada, utilizando la función de recurrencia generadora de funciones de Bessel de orden superior de primera clase (ecuación 20) tomada de Abramowitz y Stegun (1972).

$$\frac{d^m}{dx^m}[J_{\alpha}(x)] = (-1)^m J_{\alpha+m}(x)$$
(20)

De donde se obtiene la ecuación 21.

$$\operatorname{var}[C(k)] = -r^2 J_2(kr) \tag{21}$$

La varianza máxima se encuentra en los valores cuyo argumento son 0 y 3.8 respectivamente, es por esto que cuando el argumento de la función de Bessel de orden cero es 0.4, es el valor del coeficiente de correlación máximo a tomar (valor máximo de los coeficientes de correlación) y cuando el argumento de ésta es aproximadamente 3.2, entonces es la mitad de la varianza del valor mínimo de la función de Bessel de orden cero.

A manera de comparación y tomando como referencia el método SASW, el cual para la construcción de las curvas de dispersión, requiere tan solo de una relación lineal (ecuación 12) para obtener la velocidad de las ondas Rayleigh en función de la frecuencia, el método SPAC requiere una relación no lineal (ecuación 18), por lo que es necesario el uso de algún método de inversión de datos, como lo puede ser un método de mínimos cuadrados ponderados como el propuesto por Menke (1984) y Chávez-García *et al.* (2005), descrito brevemente en el esquema de la figura 15.



Figura 15. Diagrama de flujo para la inversión de los coeficientes de correlación para estimar la curva de dispersión mediante el método SPAC.

La figura 15 muestra en resumen, el proceso de inversión para el método SPAC, donde la solución inicial es una función hiperbólica (Chávez-García *et al.*, 2005) de la forma de la ecuación 22.

$$V = A f^{-1}, (22)$$

donde:

f: la frecuencia.

A: una constante de ajuste.

La ecuación 22 es tomada como solución inicial para el criterio de mínimos cuadrados iterativos y ponderados (Menke, 1984; Tarantola y Valette, 1982) que posee una forma como la ecuación iterativa 23, para obtener la curva de dispersión mediante el método SPAC.

$$P_{i+1} = P_0 + C_{p0p0} G_i^T (C_{d0d0} + G_i C_{p0p0} G_i^T)^{-1} (C_0 - g(P_i) + G_i (P_i - P_0)),$$
(23)

donde:

P<sub>0</sub>: la solución inicial.

 $C_{p0p0}$ : la matriz de covarianza de los coeficientes de correlación calculados.

G: la matriz de derivadas parciales de la función de Bessel de orden cero de primera clase.  $C_{d0d0}$ : la matriz de covarianza de los coeficientes de correlación del ruido ambiental. *i*: el número de iteración.

A partir de este proceso, se obtienen las curvas de dispersión para cada distancia, para posteriormente obtener el perfil de velocidades de las ondas de corte, utilizando algún método adicional de inversión, como el método de los algoritmos genéticos, que será descrito posteriormente.

### III.8 DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE COCIENTES ESPECTRALES H/V (HV-SPR)

Típicamente se ha estimado la respuesta de sitio registrando el movimiento del suelo durante un evento de movimiento fuerte, haciendo una comparación entre registros en otras localidades de referencia, procurando estar sobre el afloramiento de roca (Jarpe *et al.*, 1989). Sin embargo, en diversas regiones donde no se dispone de instrumentación instalada en forma permanente, este tipo de análisis resulta imposible de realizar, por ello, muchos investigadores han evaluado la respuesta de sitio utilizando sismos de intensidad pequeña a moderada (Field y Jacob, 1992; Carver y Hartzell, 1996; Zaslavsky y Shapira, 2000).

Nakamura (1989), introdujo el método de cocientes espectrales de las componentes horizontales con la componente vertical del registro de ruido ambiental, proponiendo en base a observaciones empíricas, que este cociente es una estimación confiable de la frecuencia preferencial de vibración, y con esta poder hacer inferencia de la respuesta de sitio. Su argumento es que dividiendo el espectro de la componente horizontal con el espectro de la componente vertical (también conocida como componente de referencia), se remueve el efecto de fuentes y de las ondas Rayleigh contenidas en el ruido ambiental, quedándose solo con ondas de cuerpo, hipótesis que indica que el cociente espectral H/V es la función de respuesta de sitio, bajo pequeñas deformaciones del suelo; argumentando que la componente vertical del movimiento observado no queda afectada significativamente por los materiales blandos del suelo. Dicho de otra forma, la componente vertical de la vibración ambiental en la superficie, remueve el efecto de las fuentes y enfatiza las características de las componentes horizontales en la roca competente (sitio de referencia).

Diversos estudios han mostrado que la función obtenida por medio del método de cocientes espectrales HV-SPR coincide apropiadamente con la respuesta de la estructura del subsuelo ante la incidencia de ondas de corte (Gitterman *et al.*, 1996; Konno y

Ohmachi, 1998; Mucciarelli, 1998; Chávez-García y Cuenca, 1998; Shapira *et al.*, 2001; Zaslavsky *et al.*, 2003 y 2004). Diversos resultados obtenidos, por: Lachet y Bard (1994), Theodulidis *et al.* (1996), Raptakis *et al.* (1998), entre otros, encuentran resultados confiables en suelos blandos, que se encuentran bien correlacionados con la frecuencia fundamental y revela la dependencia de la respuesta de sitio en un rango de frecuencias.

Es importante que para el procesamiento de los cocientes espectrales H/V, siga las siguientes recomendaciones generales en el registro de ruido ambiental para determinar la frecuencia fundamental  $f_{0}$ , las cuales se resumen en la tabla III, criterios que bien pueden emplearse para el modelado de los cocientes espectrales.

Tabla III. Duración de registro de ruido ambiental recomendado para determinar la frecuencia fundamental del suelo (periodo dominante). Modificada de SESAME (2004).

$f_0$	Tiempo de registro	Número mínimo de	Duración de registro
(Hz)	mínimo por ventana (s)	ventanas	mínimo (min)
0.2	50	10	30
0.5	20	10	20
1.0	10	10	10
2.0	5	10	5
5.0	5	10	3
10.0	5	10	2

Los cocientes espectrales son calculados utilizando el siguiente procedimiento descrito por Chatelain *et al.* (2008), consensado por el grupo de trabajo de SESAME (2004), en conjunto con diferentes criterios para el procesamiento y estabilización de los espectros propuestos por Huerta-López *et al.* (2003).

Este procedimiento se enlista brevemente a continuación.

- 1. Se remueve el valor medio del registro de ruido ambiental.
- 2. Se seleccionan secciones (ventanas) de ruido ambiental donde no se observen notoriamente la presencia de transientes.
- 3. Se calculan las transformadas de Fourier de cada componente (vertical y horizontal).
- Se calcula la razón espectral H/V mediante la media cuadrática de las dos componentes horizontales H<sub>1</sub> y H<sub>2</sub> (usualmente ortogonales), expresada por la ecuación 24.

$$R = \frac{\sqrt{\frac{H_1^2 + H_2^2}{2}}}{V}$$
(24)

- 5. Se aplica un suavizado de media móvil a la razón espectral con una cantidad de puntos del 0.1 % de la longitud del espectro.
- 6. Se obtiene la media aritmética de los cocientes espectrales de todas las ventanas.
- 7. Se grafica el promedio de las curvas R en ejes logarítmicos.

Aún cuando la técnica de cocientes espectrales (HV-SPR) se destaca por la facilidad en la ejecución y el procesamiento de las mediciones, lo cual se traduce en bajos costos de entre todos los métodos, se puntualiza que debe tenerse toda una serie de cuidados antes de aplicar esta metodología con éxito, donde éstos pueden ser consultados en Chatelain *et al.* (2008), Haghshenas *et al.* (2008) y Guillier *et al.* (2008), principalmente.

Finalmente, este método se ha utilizado para caracterizar el efecto de sitio (Alfaro *et al.*, 1998; Euroseismod, 1998, *et al.*), para modificar planos geotécnicos de ciudades como Lieja, Bélgica (Euroseismod, 1998) y estimar el perfil de velocidades de ondas de corte mediante un modelado directo utilizado por ejemplo, el método de matrices de rigidez (Kausel y Roesset, 1981; Huerta-López *et al.*, 2005).

#### III.9 MÉTODO DE INVERSIÓN MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS

En los años 1970, John Henry Holland estableció los principios básicos de los algoritmos genéticos (Goldberg, 1989), una de las líneas destacadas de la inteligencia artificial, automatización y la optimización. Son llamados así porque son un método de optimización matemática que está basado en la evolución natural.

Esta metodología puede analizarse considerando que si la evolución permitió que una diminuta cadena núcleo proteica, hiciera que sus descendientes llegaran a ser seres complejos con el paso del tiempo, entonces pueden hacer que la solución de un modelo matemático converja a la solución óptima.

Esto último se puede demostrar matemáticamente mediante el teorema fundamental de los algoritmos genéticos. Tal derivación puede consultarse en Goldberg (1989).

Una descripción resumida de estos algoritmos puede entenderse suponiendo tener organismos (soluciones) que pueden cruzarse, heredando sus características y apareciendo eventualmente rasgos aleatorios (mutaciones), donde algunos serán más aptos que otros. Los más competentes poseerán mayor probabilidad de reproducirse, y sus características persistirán, mientras que los menos competentes, desaparecerán gradualmente con el paso del tiempo. Al final, las características fuertes continuarán prevaleciendo y complementándose para lograr organismos complejos y con una gran cantidad de fortalezas (la solución óptima).

El funcionamiento de los algoritmos genéticos se resume en cuatro etapas: la selección, reproducción, mutación y el crossover (intercambio o cruzamiento) que serán descritas a continuación en forma general.

Se establecen las variables que conjeturan el modelo físico (o matemático), definiendo el rango de valores que pueden tener sus soluciones (si son positivos, enteros, etc.), siendo estas los genes del problema, que en conjunto forman al cromosoma.

Posteriormente se define la función objetivo o también llamada función de aptitud, formalizada como una expresión matemática, concretando cuales son las restricciones del modelo empleado para conseguir ajustar la función. La función objetivo sirve para evaluar que tan bueno es un conjunto de genes (soluciones parciales) y con ello se realiza un filtro de las características que se propagan entre generaciones, y cuáles no. Una breve descripción se muestra a continuación:

- 1. Se define la población inicial (solución inicial), de acuerdo con el tipo de problema a resolver (cromosomas).
- 2. Se crean nuevas poblaciones (cruzamiento), donde los hijos heredan una parte de la información genética de las dos poblaciones principales (padre y madre).
- 3. Se producen mutaciones aleatoriamente, que introducen nueva información a los cromosomas hijo, que posteriormente puede ser heredada a los cromosomas nietos.
- 4. Se habrá llegado a la respuesta pseudo-óptima (o en ciertos casos la óptima) después de iterar un cierto número finito de veces o hasta que los cromosomas (solución) converjan a un buen ajuste con la función objetivo.

De las aplicaciones más comunes son: diseño de sistemas de distribución de aguas, predicción en juegos de azar, hallazgo de errores en programas (control de calidad del software), optimización de producción y distribución de energía eléctrica, diseño automatizado de sistemas de comercio en el sector financiero, diseño de sistemas de distribución de aguas, inversión de curvas de dispersión en geofísica y muchas más.

Un algoritmo genético puede presentar diversas variaciones, dependiendo de: cómo se realiza la selección de genes, cómo se aplican los operadores genéticos (cruzamiento y

mutación) y cómo se decide el reemplazo de los individuos para formar la nueva población.

Existen diversas formas de escoger a los cromosomas "padres", la forma más simple consiste en generar un vector aleatorio, teniendo como elementos patrones aleatorios de ceros y unos, de tal manera que las posiciones de los unos son los cromosomas "fuertes" y los ceros los "débiles", los cuales serán reemplazados por los cromosomas de uno de los padres, dando como resultado la primera generación de hijos, ejemplo ilustrado en la figura 16.



Figura 16. Ejemplo simple de la mutación en algoritmos genéticos.

Muy similar a la forma en cómo actúa la naturaleza, cada quien aporta la mitad de los cromosomas, pero no puedes saber qué mitad compartir, ya que desde antes de aparearse, las células reproductoras, ya tienen la mitad de los cromosomas. Una estrategia evolutiva puede resumirse de la siguiente forma:

- 1. El problema se define como la búsqueda de un vector n-dimensional "x", de valores reales que se asocia con una función F. Sin pérdida de generalidad, podemos implementar el procedimiento como un proceso de minimización.
- 2. Se genera al azar una población inicial de vectores padres, *xi*, de entre un rango posible en cada dimensión. La distribución de las pruebas iníciales es típicamente uniforme.
- Un vector nuevo, xi', se crea a partir de cada padre xi, añadiendo una variable aleatoria Gaussiana con media cero y desviación estándar seleccionada de antemano para cada componente de xi.
- 4. La operación de selección determina cuál de estos vectores se mantendrá. Para ello compara el error entre F(xi) y F(xi'). Los vectores que posean el error más pequeño serán los nuevos padres en la siguiente generación.
- 5. El proceso de generación de nuevas pruebas y selección de aquellos con mínimo error continúa hasta que se encuentra una solución suficientemente buena (bajo una cierta tolerancia), hasta llegar a un cierto número de soluciones o hasta que los recursos computacionales se agoten.

# III.10 DESCRIPCIÓN DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS PARA LOS MÉTODOS SASW Y SPAC

El proceso de inversión de la curva de dispersión ha sido de especial interés en cuantiosos estudios en las últimas décadas, como los estudios de: Thomson (1950), Haskell (1953), Nazarian (1984), Horike (1985), Yuan y Nazarian (1993), Tokimatsu (1995), Lai y Rix (1998), Zywicki (1999), Loui *et al.* (2001), Noguchi y Nishida (2002), Huerta-López *et al.* (2001 y 2003), Pezeshk y Zarrabi (2005) y Chávez-García (2006), entre otros.

Muchos autores (incluyendo algunos de los ya mencionados) han optado por los algoritmos genéticos en lugar de métodos como los de gradientes conjugados.

El proceso de inversión tanto para el método SASW como SPAC para estimar el perfil de velocidades de ondas de corte consiste de dos etapas principales:

Como primera etapa, se utiliza una función objetivo que habitualmente es utilizada para el modelado directo con el fin de estimar el perfil de velocidades de ondas de corte al ajustar esta función (teórica) a una curva de dispersión experimental y eventualmente estimar el perfil de velocidades de ondas de corte. Esta función objetivo permite resolver la ecuación de dispersión de Rayleigh (Lai y Rix, 1998) para las velocidades las ondas de corte y compresión (ecuación 25).

$$F_R(\lambda(h),\mu(h),\rho(h),k(f)) = 0$$
<sup>(25)</sup>

Siendo  $\lambda y \mu$  los dos parámetros de Lamé en función de la profundidad "*h*", al igual que la densidad " $\rho$ " y el número de onda "*k*", en función de la frecuencia de excitación "*f*". Cabe mencionar que en la inversión del perfil de velocidades de ondas de corte, la razón de Poisson y la densidad, no afectan significativamente el modelo final, siempre que se elijan valores razonables para el medio (Rix *et al.*, 1991). Por lo tanto se invertirá el perfil de velocidades con las variables principales *h* y *V*<sub>s</sub> con valores típicos de densidad de masa y

razón de Poisson, adaptando un algoritmo desarrollado en ambiente Matlab ®, por Rix y Lai (1999), el cual se encuentra basado en pruebas realizadas por Lai y Rix (1998) así como Hisada (1994). La descripción de este algoritmo se ilustra en el diagrama de flujo de la figura 17.



Figura 17. Diagrama de flujo que ilustra el funcionamiento del algoritmo genético, empleado para modelar las curvas de dispersión para los métodos SASW y SPAC.

El cálculo de la curva de dispersión teórica (ecuación 25) es obtenida al resolver el problema de eigenvalores de la onda Rayleigh en un medio elástico, verticalmente heterogéneo (consultar Lai y Rix, 1998). Dentro de este proceso, se calculan las derivadas parciales, las cuales tienen la forma  $\frac{\partial(V_R)_j}{\partial(V_S)_k}$ , donde *j* es el eigenmodo de propagación de las ondas Rayleigh *k* es el número de capa en la cual se evalúan las derivadas parciales, en el valor estimado de velocidad de las ondas P y S, donde la velocidad de las ondas P se calcula mediante la relación de Poisson. Las curvas de dispersión y las derivadas parciales son calculadas para el modo fundamental de propagación de las ondas Rayleigh.

El perfil de velocidades de ondas de corte obtenido por los algoritmos genéticos (figura 17) busca el valor mínimo de la raíz cuadrática media de los residuales, en norma  $L_2$  (ecuación 26).

$$\varepsilon_{rms} = \min_{i} \frac{\left[ \left\| V_{Rexp} - V_{Rteo} \right\|^2 \right]^{1/2}}{\sqrt{n}},$$
(26)

donde:

 $V_{Rexp}$ : son las velocidades de la curva de dispersión experimental,  $V_{Rteo}$ : son las velocidades de la curva de dispersión teórica calculada, *n*: es el número de puntos pertenecientes a las curvas de dispersión teórica y experimental,  $\varepsilon_{rms}$ : es el error RMS del ajuste de las curvas de dispersión en la i-ésima iteración.

Una vez encontrada una solución convergente de la curva de dispersión teórica con el criterio de la ecuación 26, al perfil de velocidades de ondas de corte se le asocia un error estimado para cada capa mediante el criterio de la ecuación 28 para el último iterando de los algoritmos genéticos.

$$H = [(\sigma I + (WJ)^{T} WJ][(WJ)^{T} W]^{-1},$$
(27)

$$V_{s\_std} \cong diag[\{H(I\sigma^2)H^T\}^{1/2}], \qquad (28)$$

donde:

 $V_{s\_std}$ : es la desviación estándar de las velocidades de ondas de corte estimadas, W: es la matriz de peso con el 1% de error de la curva de dispersión experimental, J: es la matriz de derivadas parciales, evaluadas en las estimaciones de las velocidades de ondas de corte y compresión e I: es la matriz identidad.

# III.11 DESCRIPCIÓN DE LA INVERSIÓN PASO A PASO MEDIANTE EL MÉTODO DE MATRICES DE RIGIDECEZ

La siguiente descripción del método de matrices de rigidez se encuentra basada en el trabajo de Haskel (1953) y Huerta-López *et al.* (2003).

El método de las matrices de rigidez es empleado para describir la propagación de ondas mediante matrices de transferencia (ver apéndice A). Las matrices de transferencia están escritas en términos de la frecuencia y el vector número de onda, las cuales resuelven las transferencias de cargas en términos de sus transformadas de Fourier (Thomson, 1950 y Haskell, 1953).

Las matrices de transferencia, el vector de estado Z, el cual relaciona los desplazamientos D con los esfuerzos  $\tau$ , en una interface j con una interface adyacente j+1 se encuentran representadas mediante la ecuación matricial 29.

$$Z_{j+1} = H_j Z_j \tag{29}$$

Donde  $H_j$  es la matriz de transferencia en el estrato j-ésimo, cuyos elementos de la matriz están en función de la frecuencia angular de excitación  $\omega$ , los números de onda k (en el plano) y l (fuera del plano), las propiedades del suelo y los espesores de cada estrato.

Para un suelo estratificado (sistema), la matriz global de rigidez se construye traslapando las contribuciones de las matrices de rigidez de cada interface (sub matrices). El vector global de cargas externas corresponde a los esfuerzos existentes en las interfaces.

Se ejemplificará en seguida la aplicación de la matriz de rigidez para una onda SH propagándose en un solo estrato.

En la figura 18,  $\alpha$  denota el ángulo de incidencia de la onda SH; *l*, *m*, y *n* son los cosenos directores de los desplazamientos *U*, *V* (de las ondas SH) y *W*;  $A_{SH}$  y  $A'_{SH}$  son las amplitudes de las ondas SH viajando en direcciones positivas y negativas, respectivamente del eje z. las variables  $C_s$ ,  $\rho$ ,  $\xi$ , *h*, y  $\sigma$  son la velocidad de ondas de corte, la densidad, el amortiguamiento, el espesor del estrato y la razón de Poisson del estrato, respectivamente.



Figura 18. Onda SH viajando a través de un estrato homogéneo. Figura tomada de Huerta-López et al. (2003).

La figura 18 corresponde matemáticamente a la siguiente ecuación matricial 30 (*Huerta-López et al., 2003*).

$$\begin{cases} \tau_0 \\ \tau_{-h} \end{cases} = \frac{Gks}{e^{ksh} - e^{-ksh}} \begin{bmatrix} e^{ksh} + e^{-ksh} & -2 \\ -2 & e^{ksh} + e^{-ksh} \end{bmatrix} \begin{cases} v_0 \\ v_{-h} \end{cases}$$
(30)

donde G, k y s son el módulo al esfuerzo cortante, el número de onda y s el número imaginario descrito por la ecuación 31.

$$s = \sqrt{1 - \frac{\omega^2}{k^2 C_s^2}}$$
(31)

,

El método de las matrices de rigidez fue mejorado por Kausel y Roesset (1981) y aplicado debido a que: (i) se tiene la libertad de utilizar un campo de ondas completa (P, SV y SH) o un tipo de ondas de especial interés, (ii) puede aplicarse para modelar estratos delgados, (iii) puede manejar cualquier ángulo de incidencia de las ondas en la entrada del sistema (en la base sobre la cual descansa el sistema) y (iv) se puede ir analizando la evolución del campo de onda conforme pasa las interfaces del sistema (los estratos).

# CARACTERIZACIÓN Y ESTIMACIÓN DE PROPIEDADES DINÁMICAS DE VARIOS SITIOS DE ESTUDIO

En esta sección se presentan en forma resumida los resultados obtenidos con los métodos SASW, SPAC y HV-SPR en términos de la caracterización y estimación de las propiedades dinámicas de los sitios de estudio. Las propiedades dinámicas que aquí se presentan corresponden al perfil de velocidades de las ondas de corte y la estimación de la frecuencia fundamental de vibración de cada sitio. Los resultados que en esta sección se presentan son posteriormente discutidos y comparados entre sí en el capitulo V. Estas propiedades de los suelos son comúnmente utilizadas en el análisis ingenieril y en el diseño para la estimación del potencial de licuación del terreno entre diferentes sitios. Los parámetros que se estiman mediante estas metodologías, o la integración de ellas, pueden ser usados de guía para la evaluación inicial de la propuesta de proyecto en los sitios de interés, inclusive considerando las limitaciones que estas puedan tener respecto de los métodos tradicionalmente utilizados (y aceptados) en el campo de la ingeniería civil, en particular la geotecnia y mecánica de suelos.

La descripción de los fundamentos analíticos y prácticos de las metodologías arriba mencionadas han sido presentadas en el capítulo III.

Es práctica común utilizar la estimación del periodo fundamental como representativo de las condiciones iníciales del sitio, de ahí el interés por estimar la frecuencia preferencial de vibración del terreno asumiendo representa el periodo fundamental del sitio. Ante la incidencia de un sismo, el depósito de suelos responderá en términos de sus propiedades dinámicas y las características del campo de ondas incidente.

### IV.1 SITIO CAMPO ÁNGEL

Se eligió como caso de estudio un terreno particular aquí denominado "Campo Ángel", cercano a la localidad de "La salina" perteneciente al Municipio de Ensenada en el Estado de Baja California, ubicado en el kilometro 63 de la carretera Tijuana- Ensenada.

Fue elegido como caso de estudio ya que posee ciertas características que pueden ayudar a la aplicación de los métodos SASW, SPAC y HV-SPR. Las características principales que posee este sitio se resumen en la tabla IV.

	Norte	Este	Sur	Oeste
Actividad	Puerto Salina a	Autopista a una	Pequeño	
humana	una distancia	distancia de 160 m	asentamiento	
	aproximada de	aproximadamente.	civil con un	
	500 m.		área	
			aproximada	
			de 250 m <sup>2</sup> a	
			una distancia	
			de 300 m al	
			Suroeste	
Actividad	Costa a una		Costa a una	Costa:
natural	distancia		distancia	choque del
visible	superior de		superior de	oleaje a una
	1 km		1km	distancia
				mínima
				aproximada
				de 250 m.

Tabla	IV.	Resumen	de	las	actividades	cercanas	al	área	de	estudio	en	un	radio
aproxi	mad	o de 1 km.											

Dentro del contexto del tipo de materiales que se observan en la superficie del terreno y de las características geológicas, se resume lo siguiente.

En la vecindad del sitio, se observó un corte vertical de aproximadamente 4.5 m de profundidad (respecto de la superficie), con un estrato medianamente consolidado de aproximadamente 2 m, seguida de una franja de aproximadamente 50 cm de cantos rodados incrustados, que es seguido de un estrato de aluvión cuyo espesor no se encuentra bien definido, y se estima en 2 m aproximadamente (ver figura 20).

Para el caso del método SASW, existe la posibilidad de tener ruido inmerso en las fuentes activas (descritas posteriormente). Lo anterior trae como consecuencia considerar la posibilidad de utilizar microsismos la caracterización del terreno. Para los métodos SPAC y HV-SPR, se estudiarán sus alcances para la caracterización de las propiedades mecánicas del terreno en presencia de microsismos. En la figura 19 se muestra la ubicación del sitio.



Figura 19. Imagen digital del sitio Campo Ángel, ubicado a 32 02' 56.70" latitud Norte y longitud 116° 52' 46.68" oeste. El triángulo blanco esquematiza la orientación de los sensores para los métodos SASW y SPAC. Modificada de Google Earth 2009 pro.



Figura 20. El dibujo izquierdo representa la distribución de la geología superficial del área en los alrededores del sitio Campo Ángel (rectángulo verde), así como los principales trazos de fallas regionales. El dibujo derecho muestra la zona de estudio con un rectángulo verde. Los colores amarillos corresponden a sedimentos de aluvión, los rojos a rocas ígneas. Tomadas de INEGI, carta geología superficial escala 1:50000. Carta: I11D81-C.

### IV.2 ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO SASW: SITIO CAMPO ÁNGEL

Se diseñó e instaló una configuración de sensores para realizar tanto del método SASW como SPAC, utilizando acelerómetros Episensor FBA ES-T y una grabadora de 16 bits. Las características y especificaciones de la instrumentación utilizada así como los parámetros de grabación se dan en la tabla XXII del apéndice B. La configuración para el método SASW consistió en colocar un par de sensores a lo largo de una línea recta orientada a N70°E, cuyas distancias de los sensores (respecto del centro del arreglo) fueron de 3 m, 5 m, 8 m y 10 m, representados por los triángulos, tomando siempre como referencia el centro del arreglo, como muestra la figura 21. La orientación se eligió procurando que el arreglo de los sensores quedara perpendicular a la carretera y a la costa.



Figura 21. Esquema de las configuraciones de sensores, utilizados tanto para el método SASW como SPAC para el sitio Campo Ángel, donde solo el arreglo A-B es utilizado por el método SASW, con una orientación N70°E. El Lado A del arreglo indica el lado más cercano al océano y B el lado más cercano a la carretera Tijuana-Ensenada. Los círculos azules (y números negros) corresponden a la configuración para el método SPAC. Los triángulos negros son los sensores y sus distancias (números verdes) de para el método SASW.

Aprovechando los trazos realizados para la configuración del método SASW se complementó a esta configuración (lineal), una configuración triangular para el método SPAC, colocando un sensor en el centro de referencia del arreglo para el método SASW y tres sensores en los vértices de un triangulo equilátero con el sensor central equidistante a cada vértice, como lo muestra la figura 21.

Para el método SASW a la distancia de 3 metros (respecto del centro del arreglo), se utilizó como fuente un pequeño marro con un peso aproximado de 6 libras, realizando cuatro impactos en una placa metálica de 30 cm de diámetro. Para las distancias de 5 m, 8 m y 10 m, se realizaron ocho impactos directos en la misma placa metálica con un marro de un peso aproximado de 16 libras.

Las distancias de las fuentes utilizadas fueron elegidas de tal forma que éstas fueran superiores o iguales al criterio de distancias sensor-fuente propuesto por Ganji *et al.* (1998) con el fin de investigar su efecto sobre las características de las señales registradas. Las posiciones de las fuentes elegidas para cada separación están esquematizadas en la figura 22.



Figura 22. Esquema de la configuración fuente-sensores para el método SASW del sitio Campo Ángel, donde el lado A indica el lado del arreglo más cercano al océano y el lado B el más cercano a la carretera Tijuana-Ensenada. Los asteriscos indican las fuentes empleadas así como su distancia respecto del centro.

### IV.3 ANÁLISIS ESPECTRAL DE FUENTES ACTIVAS: SITIO CAMPO ÁNGEL

Se calcularon los espectros de potencia, espectros cruzados y la función de coherencia para todas las distancias entre sensores con sus respectivas distancias de la fuente utilizada (fuente activa: martillo y marro) con el fin de analizar el contenido de frecuencias en las señales registradas.

Los espectros de potencia de cada sensor, la función de coherencia, la curva de fase y el espectro de potencia cruzado fueron calculados a partir de impulsos aislados del ruido. El tamaño de la ventana (Hanning) utilizada en la serie de tiempo, fue elegida de tal forma que los impulsos quedaran localizados en el centro de la ventana utilizada, para enfatizar la información contenida en los impulsos (Foti, 2000).

En la tabla V se documentan las características observadas en la señal para cada una de las fuentes.

Tabla V.	Tabl	a compara	tiva del co	ntenido de las	frecuenc	ias del espe	ctro de j	potencia
cruzado	para	distancias	utilizadas	fuente-sensor	respeto	del criterio	de Gar	nji <i>et al</i> .
(1998).								

Distancia	Distancia	Distancia	Frecuencia	Frecuencias	Rango de
entre	utilizada	de fuente	del modo	de modos	frecuencias
sensores	respecto del	según	fundamental	superiores	(Hz) con un
(m)	sensor	criterio	observable	observables	umbral de
	cercano a la	(m)	(Hz)	(Hz)	coherencia
	fuente (m)				superior a
					0.8
6	12	6	37	Ninguna	[16, 37]
10	10	10	28	33	[25, 28]
16	28	16	20	27, 39	[21, 41]
16	28	16	27	40	[21, 43]
20	35	20	20	30	[20, 30]

El valor inferior al rango de frecuencias donde la coherencia tiene un umbral igual o superior a 0.8, permanece prácticamente a una misma frecuencia conforme se aleja la fuente del par de sensores, mientras que el valor superior, va corriéndose a frecuencias inferiores.

En general, al incrementar la distancia (respecto al criterio mínimo) entre el centro del arreglo y la fuente activa, no se observa que se modifique la frecuencia más baja, así como la curva de fase (ver figuras 23 y 24), pero si se reduce el rango de frecuencias donde la coherencia supera el umbral de 0.8.



Figura 23. Análisis espectral con el método SASW, para una separación entre sensores de 16 m y una fuente a 36 m respecto del censor cercano. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 8 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.



Figura 24. Análisis espectral con el método SASW, para una separación entre sensores de 20 m y una fuente a 45 m respecto del censor cercano. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 8 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.

Cuando se incrementa la distancia de la fuente respecto al criterio de Ganji *et al.* (1998), aparecen modos de orden superior en el espectro de potencia cruzado (ver tabla V), sin embargo, nótese que el rango de frecuencias donde la coherencia tiene un umbral superior a 0.8 y la fase es estable, en el intervalo de frecuencias donde apenas aparece el segundo modo de vibración. Lo anterior puede interpretarse de la siguiente manera: al utilizar la distancia de fuente igual a la separación entre los sensores (respecto del sensor

cercano), es equivalente a aplicar un filtro pasa banda (Herrmann, 1973) dejando pasar a lo más el segundo modo de vibración.

Es de relevancia señalar que en la figura 22 se indica que se aplicaron fuentes activas en posiciones opuestas para una misma distancia de separación entre sensores, sin embargo no siempre fueron consideradas las fuentes aplicadas del lado A (del mar), ya que la curva de coherencia para todas las distancias (excepto la distancia de 16 m entre sensores) tuvo un umbral de coherencia notoriamente inferior a 0.8. El umbral de coherencia baja, se presume pudo deberse a problemas de acoplamiento placa-suelo, dado que en la superficie del terreno del lado A, se observó una capa de tierra excesivamente suelta, mientras que el lado B, se pudo evitar limpiando ligeramente la superficie.

# IV.4 CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA DE DISPERSIÓN POR EL MÉTODO SASW: SITIO CAMPO ÁNGEL

Se calcularon las curvas de fase para la configuración descrita en la figura 21 y la tabla V, eligiendo los rangos de frecuencia donde la función de coherencia superó el umbral de 0.8; el cual, es un valor adecuado según Nazarian y Desai (1993).

El procesamiento final de las curvas de fase consistió en aplicar una ventana de suavizado móvil, con un tamaño del 3% del número total de puntos de la curva de fase calculada mediante la ecuación 10, esto, para minimizar las contribuciones del ruido inmerso en la serie de tiempo, conservando la tendencia global de la curva de fase. Este proceso de suavizado es similar al aplicado en el suavizado del método de cocientes espectrales (Chatelain *et al.*, 2008), así como a lo sugerido por Pérez-Marcial (2005), que consiste en asignar un valor promedio al punto medio de un segmento móvil, directamente sobre la curva de dispersión compuesta, con un cierto traslape entre sí, de donde se calculará nuevamente su valor promedio, y así sucesivamente a lo largo de toda la curva.

Un criterio adicional es el que sugiere Nazarian y Desai (1993), aplicando el criterio de mínimos cuadrados ponderados (por la función de coherencia), cuya diferencia respecto de este otro criterio es que se mantienen los rasgos originales de la curva de fase, de donde se preservan las posibles variaciones globales de la curva de fase y por tanto la de los materiales del suelo, donde estos pudieran no ser estrictamente homogéneos.

Finalmente, de cada curva de dispersión para cada separación de sensores, obtenida mediante la ecuación 10, se parte a agrupar las curvas de dispersión en una sola gráfica (curva de dispersión compuesta).

En este caso de estudio, se construyó una curva de dispersión compuesta (figura 25), de donde se realizó un suavizado con *splines* cúbicos a tal grado de no perder (visualmente) los rasgos generales de las curvas de dispersión de cada distancia entre sensores.



Figura 25. Curva de dispersión compuesta de las curvas de dispersión cuyas separaciones entre sensores (respecto del centro del arreglo) son: 6 m, 10 m, 16 m y 20 m con sus respectivas distancias de fuente, siendo: 15 m, 15 m, 36 m y 45 m, con respecto al centro del arreglo de la figura 21. La curva de color rojo es la curva suavizada de las curvas de dispersión individual, provenientes del método SASW. Curvas pertenecientes al sitio Campo Ángel. Las letras "c" y "m" indican el lado aplicado de la fuente, siendo carretera y océano, respectivamente.

A partir del ajuste de la curva de dispersión compuesta, se aplicó el método de algoritmos genéticos modificado de Rix *et al.* (1998), de donde se obtuvo el perfil de velocidades de ondas de corte correspondiente (figura 26).


Figura 26. Modelo del perfil de velocidades de ondas de corte mediante el método SASW para el sitio Campo Ángel, calculado por razón de algoritmos genéticos. Las líneas horizontales color marrón indican la desviación estándar de los modelos iterados. La gráfica se obtuvo después de ocho iteraciones, con un criterio de variación del 1%.

En la figura 26, se muestra el modelo de capas obtenido, mismo que se interpreta como un modelo de seis capas descansando en un semiespacio, cuyos parámetros del modelo se han tabulado en la tabla VI.

Número de	Espesor (m)	Densidad	Razón de	Velocidad
capa		gr/m <sup>3</sup>	Poisson	de ondas de
				corte (m/s)
1	2.0	1600	0.2	$285 \pm 2.5$
2	2.0	1600	0.2	$222 \pm 2.5$
3	2.0	1600	0.2	$318 \pm 10.1$
4	2.0	1600	0.3	$448 \pm 16$
5	3.0	1600	0.3	$531 \pm 30$
6	9.0	1700	0.3	553 ±33
SE		1700	0.3	553 ±33

Tabla VI. Se muestra el modelo de seis capas (estratos) obtenido mediante el método SASW para el sitio Campo Ángel, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson y velocidad de ondas de corte (con su error calculado).

La tabla VI muestra el modelo obtenido mediante el método SASW a través de la inversión de la curva de fase con una inversión por algoritmos genéticos, en el que se propuso como modelo inicial un modelo de 6 capas con velocidad uniforme de 115 m/s. La solución encontrada en este proceso de inversión arroja una inversión de velocidad en el segundo estrato a una profundidad de dos metros. El modelo consta de un semiespacio con una velocidad de 553 m/s.

# IV. 5 ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO SPAC: SITIO CAMPO ÁNGEL

Una configuración triangular y cuatros sensores, tres de ellos en los vértices registrando solo la componente vertical (Z) y uno fijo en su centro registrando las tres componentes (X, Y, Z) del movimiento del terreno fue el diseño base para las mediciones

con el método SPAC. Los vértices se encontraron a 5 m, 8 m, 13 m, 20 m, 25 m y 30 m de distancia respecto del centro del arreglo, tal como se muestra la figura 21.

Se registró ruido ambiental por un tiempo aproximado de 15 minutos, simultáneamente para los cuatro sensores, en los seis triángulos empleados, con una frecuencia de muestreo de 100 Hz. Para las distancias de 5 m y 25 m de distancia radial, se registraron 30 minutos de ruido ambiental.

Se reescribió el algoritmo empleado por Herrmann y Ammon (2004) (el cual se encontraba escrito en lenguaje Fortran) en ambiente Matlab ®, para facilitar la manipulación gráfica de los coeficientes de correlación y probar diferentes técnicas para el procesado del ruido ambiental.

Así también, se escribió un algoritmo de fuerza bruta para escanear el ruido ambiental registrado en el sensor central (y/o los sensores necesarios), con el fin de investigar la estacionalidad del ruido ambiental.

El algoritmo de fuerza bruta fue escrito basado en el concepto de ataque de fuerza bruta en criptografía, la cual usualmente consiste en probar todas las combinaciones de contraseñas posibles hasta encontrar aquella que permita el acceso a un sistema.

En el caso especifico de este algoritmo se realiza un barrido de toda la serie de tiempo, punto a punto, con ventanas móviles que van del 1% del número total de muestras de la serie de tiempo hasta de un 33%, de las cuales se va calculando y guardando en memoria la desviación estándar de cada ventana utilizada, para posteriormente elegir aquellas que presenten una desviación estándar mínima (mínima variación de la desviación estándar), proceso que será ilustrado mediante la figura 27; algoritmo por el cual hace que las curvas de los coeficientes de correlación tengan una forma más definida, respecto a una función Bessel (de primera clase de orden cero) o al menos aclarar la zona donde se realiza el cruce por cero (ver figura 14).



Figura 27. Ejemplos del barrido aplicado por el algoritmo de fuerza bruta, donde se calcula la desviación estándar de las ventanas (rectángulos rojos).

Usualmente los algoritmos de fuerza bruta son muy costosos en tiempo computacional, pero para el caso de registros de ruido ambiental de 30 minutos toma tan solo unos cuantos segundos en ejecutarse, en una computadora personal.



Figura 28. Gráficas de los coeficientes de correlación a una separación de 13m. La gráfica de la izquierda corresponde a los coeficientes de correlación obtenidos, promediando 15 ventanas de 1 minuto de ruido ambiental, aplicando un suavizado móvil con 10 puntos. La gráfica de la derecha, corresponde a los coeficientes de correlación, obtenidos a partir del algoritmo de fuerza bruta, con 38 ventanas de 17 segundos, con un tiempo total de 11 minutos.

Se calcularon los coeficientes de correlación para las distancias propuestas, utilizando las series de tiempo designadas por el algoritmo de fuerza bruta, calculada a partir de la ecuación 16 y ajustada mediante el algoritmo modificado de Herrmann y Ammon (2004), obteniendo así las gráficas de la figura 28.



Figura 29. Gráficas de los coeficientes de correlación (líneas azules) obtenidas a partir de ruido ambiental con su respectivo valor de varianza. Las líneas rojas son los ajustes obtenidos a partir del algoritmo modificado por Herrmann y Ammon (2004). Las gráfica superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, corresponden a distancias radiales de 5 m, 8 m, 13 m, 20 m, 25 m y 30 m, respectivamente.

La figura 29 muestra las curvas de los coeficientes de correlación, de las cuales no siempre (distancias radiales de 5 m, 20 m y 30 m principalmente) se logra alcanzar la forma de una función Bessel de orden cero de primera clase, en la vecindad negativa de la primera raíz, a pesar de aplicar el algoritmo de fuerza bruta; sin embargo, se agotaron diversas posibilidades para buscar que éstas funciones alcancen al menos un valor de -0.2 en su primer mínimo. Lo anterior puede deberse a la falta de fuentes de microtremores que son los que se encuentran en el rango de frecuencias de interés, sin embargo, la figura 29 sugiere la presencia de microtremores, debido a que existieron coeficientes de correlación que llegan con un mínimo cercano a -0.4, los cuales pudieron haberse registrado por el paso de los automóviles en la autopista, o alguna otra posible fuente no visible desde el sitio de estudio. Sin embargo las raíces pueden estimarse aplicando el algoritmo de inversión modificado de Herrmann y Ammon (2004), de las cuales se calcularon sus correspondientes curvas de dispersión y posteriormente la curva de dispersión compuesta, ilustrada en la figura 30.



Figura 30. Curva de dispersión compuesta de las curvas de dispersión cuyas distancias radiales entre sensores son: 5 m, 10 m, 13 m, 20 m, 25 m y 30 m. La linea de color negro es la curva suavizada con splines cúbicos de las curvas de dispersión individual, provenientes del método SPAC. La letra "b" indica un segundo registro de 15 minutos respecto a su correspondiente distancia "a". Curvas pertencecientes al sitio Campo Ángel.



Figura 31. Modelo del perfil de velocidades de ondas de corte obtenido mediante el método SPAC para el sitio Campo Ángel, calculado por razón de algoritmos genéticos. Las líneas horizontales color marrón indican la desviación estándar de los modelos iterados. La gráfica se obtuvo después de 17 iteraciones, con un criterio de variación del 1%.

El modelo de capas obtenido en la figura 31, se interpreta como un modelo de cuatro capas descansando en un semiespacio, cuyos parámetros se encuentran tabulados en la tabla VII.

Tabla VII. Se muestra el modelo de cuatro capas (estratos) obtenido para el método SPAC en el sitio Campo Ángel, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson y velocidad de ondas de corte (con su error calculado). La abreviación SE indica semiespacio.

Número de	Espesor (m)	Densidad	Razón de	Velocidad de
capa		gr/m <sup>3</sup>	Poisson	ondas de corte
				(m/s)
1	6.0	1600	0.2	$290 \pm 0.7$
2	6.0	1600	0.25	$576 \pm 3.8$
3	6.0	1700	0.25	$774 \pm 8.4$
4	20.0	1700	0.25	937 ±4.2
SE		1800	0.25	1334 ±9.1

La tabla VII muestra el modelo obtenido mediante la inversión por algoritmos genéticos a partir de la curva de dispersión teórica calculada por el método SPAC, a partir de un modelo inicial de 4 capas con velocidad uniforme de 115 m/s. El modelo consta de un semiespacio con una velocidad de 1334 m/s.

## IV.6 ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO HV-SPR: SITIO CAMPO ÁNGEL

Se registraron 105 minutos de ruido ambiental en 7 intervalos de 15 minutos, simultáneamente en sus componentes vertical y horizontales (mutuamente ortogonales, donde una de ellas se encontró direccionada al norte magnético), la ubicación del sitio de registro fue en el centro del arreglo del método SPAC.

Se calcularon cocientes espectrales (mediante la ecuación 24) en los 7 intervalos de tiempo antes mencionados, aplicando los criterios de la tabla III.

Para este caso de estudio, se emplearon ventanas de 30 segundos, y se obtuvieron los espectros de potencia aplicando un traslape entre ventanas del 75%, con los criterios del tratamiento de señales descritos en el capitulo dos. El propósito de lo anterior es para enfatizar en los espectros, la distribución de la energía como función de la frecuencia en lo que corresponde a la respuesta del sistema. Este procedimiento permitió enfatizar la amplitud de la frecuencia dominante del sistema. Esta forma de obtener un promediado aritmético, trabaja estadísticamente como un suavizado en el cual, la componente aleatoria será minimizada, y la componente determinística enfatizada.

Este procedimiento está exento del sesgo del analista. En una etapa final se aplicaron tres barridos con una ventana móvil del 0.1% de longitud del tamaño de la ventana utilizada.

Se aplicaron estos parámetros al cálculo de los cocientes espectrales, con lo que se encontró la frecuencia fundamental para este sitio, siendo esta de 3.67 Hz (periodo de 0.27 segundos), con una desviación estándar de 0.3 en la amplitud correspondiente al pico del cociente (2.70) en la frecuencia fundamental  $f_0$ . La figura 32 muestra el correspondiente cociente espectral combinado con las dos componentes horizontales, obtenidas mediante la ecuación 24.



Figura 32. Gráfica de los cocientes espectrales H/V calculados para el sitio Campo Ángel, obtenidos a partir de la media cuadrática de sus componentes horizontales. La línea negra representa la gráfica del cociente espectral H/V obtenido del ruido ambiental. Las líneas magenta y verde indican los márgenes superior e inferior de la desviación estándar experimental. La línea azul es la gráfica de la respuesta del terreno obtenida por la técnica de matrices de rigidez. La flecha roja indica la posición de la frecuencia fundamental  $f_0$ .

Con los parámetros antes mencionados para la obtención de los cocientes espectrales H/V, y mediante el método de matrices de rigidez, se realizó el modelado directo de la propagación del campo total de ondas (P, SV, SH) en un medio estratificado unidimensional. Dado el modelo inicial, y con los resultados obtenidos de esta simulación numérica mediante un proceso iterativo se calcularon los cocientes espectrales teóricos entre las componentes SV/P, SH/P hasta alcanzar el mejor ajuste con respecto de los experimentales. El resultado del mejor ajuste se muestra con línea azul en la figura 32. El modelo obtenido mediante este procedimiento, correspondiente a la figura 32, se muestra a continuación en la tabla VIII.

Tabla VIII. Se muestra el modelo de cuatro capas (estratos) obtenido mediante el método de cocientes espectrales, para el sitio Campo Ángel, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson, porcentaje de amortiguamiento y velocidad de ondas de corte, obtenidas mediante modelado directo con la técnica de matrices de rigidez. La abreviación SE indica semiespacio.

Número	Espesor	Densidad	Razón	Porcentaje de	Velocidad
de capa	(m)	$(gr/m^3)$	de	amortiguamiento	de ondas de
			Poisson		corte (m/s)
1	6.0	1600	0.2	5.0	250
2	6.0	1600	0.25	5.0	360
3	6.0	1600	0.26	2.0	460
4	20.0	1600	0.26	1.0	550
SE		1800	0.25	0	600

#### **IV. 7 SITIO CALLE SEGUNDA**

Se eligió como segundo caso de estudio un área localizada en el cauce del Arroyo Ensenada en la cercanía del puente de la calle segunda, que se localiza en la ciudad de Ensenada, en el estado de Baja California.

Este sitio fue elegido para la aplicación de los métodos SASW, SPAC y HV-SPR, utilizando acelerómetros Episensor FBA ES-T, sensores de banda ancha WR-1 y una grabadora de 16 bits. Las características y especificaciones de la instrumentación utilizada así como los parámetros de grabación se dan en la tabla XXII del apéndice B.

Las posibles fuentes de microsismos y microtremores en este sitio son principalmente debidas al tráfico de automóviles y posible maquinaria ligera, así como la cercanía de la costa, los cuales pueden ser aprovechados por cualquiera de las metodologías ya mencionadas, para estimar velocidades de ondas de corte a profundidades superiores a las obtenidas con fuentes activas. En la figura 33 se muestra la ubicación del sitio.



Figura 33. Imagen digital del sitio Calle Segunda, ubicado a 31° 51' 39.46" latitud Norte y longitud 116° 37' 5.12" oeste. El triángulo blanco esquematiza la orientación de los sensores para los métodos SASW y SPAC. Modificada de Google Earth 2009 pro. La letra A en azul, indica el Boulevard Costero. La letra B en azul, indica la Calle Primera. La letra C en azul indica el puente de la Calle Segunda.

En el área de estudio los materiales del terreno que se observan en superficie se encuentran compuestos principalmente por aluvión (figura 34). Específicamente en el sitio de estudio, se observaron depósitos sedimentarios no consolidados de areniscas y arcilla, producto del transporte con paso de la corriente de agua en tiempos de lluvia.



Figura 34. El dibujo izquierdo representa la distribución de la geología superficial del área en los alrededores del sitio Calle Segunda (rectángulo verde), así como los principales trazos de fallas regionales. El dibujo derecho muestra la zona de estudio con un triangulo verde. Los colores amarillos corresponden a sedimentos de aluvión, los rojos a rocas ígneas. Tomadas de INEGI, carta geología superficial escala 1:50000. Carta: H11B12-C.

# IV.8 ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO SASW: SITIO CALLE SEGUNDA

El estudio fue realizado con una configuración de sensores a lo largo de una línea recta, a separaciones de: 5 m, 10 m, 15 m y 20 m, con respecto a un centro imaginario colocado en el cauce del arroyo (ver figura 35).



Figura 35. Esquema de la configuración de sensores utilizados tanto para el método SASW como SPAC, ubicado en el cauce del arroyo en la zona de la calle segunda. La letra "c" indica la posición del sensor central. Las letras "x", "y" y "z" indican las posiciones de los vértices. Los círculos azules indican las posiciones de los sensores para el método SPAC. Los triángulos negros indican las posiciones para el método SASW.

Aprovechando los trazos realizados para la configuración del método SASW, se complementó a esta configuración (lineal) con una configuración triangular para el método SPAC, colocando un sensor en el centro de referencia del arreglo del método SASW y tres sensores en los vértices de triángulos equiláteros, con el sensor central equidistante a cada vértice, como lo muestra la figura 35.

Para una distancia de 10 metros de separación entre sensores, se utilizó como fuente un pequeño marro de aproximadamente 6 libras de peso, la fuente se ubico a 15 m respecto del centro del arreglo y se aplicaron cuatro impactos en una placa metálica de 30 cm de diámetro. Para el resto de las distancias de separación entre sensores, se realizaron ocho impactos directos en la misma placa metálica con un marro de aproximadamente 16 libras de peso, las distancias de ubicación de las fuentes se ilustran en la figura 36 y son resumidas en la tabla IX.



Figura 36. Esquematización de la configuración fuente-sensor para el método SASW en el sitio Calle Segunda.

#### IV.9 ANÁLISIS ESPECTRAL DE FUENTES: SITIO CALLE SEGUNDA

Se calcularon los espectros de potencia, espectros cruzados y la función de coherencia para todas las distancias entre sensores con sus respectivas distancias de la fuente utilizada (fuente activa: martillo y marro) con el fin de analizar el contenido de frecuencias en las señales registradas.

Los espectros de potencia de cada sensor, la función de coherencia, la curva de fase y el espectro de potencia cruzado fueron calculados a partir de impulsos aislados del ruido.

El tamaño de la ventana (Hanning) utilizada en la serie de tiempo fue elegida de tal forma que los impulsos quedaran localizados en el centro de la ventana utilizada, para enfatizar la información contenida en los impulsos (Foti, 2000).

A continuación se muestra la tabla IX donde se documentan diversas características observadas de las fuentes utilizadas para el método SASW, la cual se analizará a continuación.

Tabla IX. Tabla comparativa del contenido de las frecuencias del espectro de potencia cruzado para distancias utilizadas fuente-sensor respeto del criterio de Ganji *et al.* (1998). Los asteriscos (\*) indican que se observó una coherencia inferior a 0.8 o una curva de fase inestable.

Distancia	Distancia de	Distancia	Primer modo	Frecuencias	Rango de
entre	la fuente	de fuente	de vibración	de modos	frecuencias
sensores	respecto del	según	observable	superiores	(Hz) con un
(m)	sensor más	criterio	(Hz)	observables	umbral de
	cercano (m)	(m)		(Hz)	coherencia
					superior a
					0.8
10	10	10	34		[22, 37]
10	15	10	34		[20, 37]
20	20	20			*
20	30	20	27	34	[23, 45]
30	25	30			*
40	20	40			*
40	30	40			*
40	40	40			*

La tabla IX muestra los casos aplicados con el método SASW, empleando variaciones a las distancias de la fuente, respecto del criterio propuesto por Ganji *et al.* (1998), observándose que después de los 20 m de separación entre sensores, resulta complicado extraer información debido a la atenuación de los impulsos, principalmente en el sensor lejano.

Se observó un segundo modo de vibración para la distancia de 20 m, siendo ésta la misma que el primer modo para la distancia de 10 m; además se logró obtener su respectiva curva de dispersión en un rango de frecuencias similar a las distancias inferiores (separaciones entre sensores) con un umbral de coherencia superior a 0.8.

En general, al incrementar la distancia (respecto al criterio mínimo) entre el centro del arreglo y la fuente activa, no se observó que se modificara la frecuencia más baja (con



coherencia superior a 0.8), además de observarse una curva de coherencia estable (ver figuras 37 y 38).

Figura 37. Análisis espectral con el método SASW, para una separación entre sensores de 10 m y una fuente a 15 m respecto del censor cercano. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 8 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.



Figura 38. Análisis espectral con el método SASW, para una separación entre sensores de 10 m y una fuente a 20 m respecto del censor cercano. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 8 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.

Sin embargo, es importante mencionar que después de los 20 m de separación entre sensores, la fuente activa utilizada termina atenuándose en el sensor lejano (ver figura 39).



Figura 39. Análisis espectral con el método SASW, para una separación entre sensores de 40 m y una fuente a 40 m respecto del censor cercano. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 8 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.

El procesamiento del ruido ambiental se realizó utilizando los registros de ruido ambiental del método SPAC, mediante el método SASW, donde este procesado es el mismo que para fuentes activas, sin embargo, debido al bajo grado de coherencia observado, resulta ineficiente el aplicar el criterio de un umbral de coherencia superior (0.8 o superior) por lo menos a longitudes de onda del orden de 30 m. Por lo anterior, en la ausencia del criterio de la función de coherencia, se analizó que puede ser suficiente con la obtención de la curva de fase que presente cambios definidos de 180 grados y cuyo inicio en frecuencias bajas comience en ángulos cercanos a cero ver figura 40.

Obsérvese en la amplitud del autoespectro de potencia de la figura 39, que la energía del sensor lejano se encuentra atenuado en un 95% respecto del sensor cercano, estando este último también atenuado respecto de distancias de fuentes más cercanas, como lo muestran los autoespectros de las figuras 37 y 38.



Figura 40. Las gráficas de los incisos A al F, se encuentran en función de la frecuencia, obtenidas a partir del espectro de potencia cruzado utilizando ventanas de 3 segundos con un traslape del 98%. La gráfica A es la curva de fase para la combinación "c-x". La gráfica B es la fase desdoblada de la gráfica A. La gráfica C es la curva de fase para la combinación "c-y". La gráfica D es la fase desdoblada de la gráfica F es la fase desdoblada de la gráfica E es la curva de fase para la combinación "c-z". La gráfica E es la curva de fase para la combinación "c-z". La gráfica F es la fase desdoblada de la gráfica E es la curva de fase para la combinación "c-z". La gráfica F es la fase desdoblada de la gráfica E es la curva de fase para la combinación "c-z". La gráfica F es la fase desdoblada de la gráfica E. Donde "c-x", "c-y" y "c-z" son las parejas entre sensores del centro con los vértices de la figura 46.

En la figura 40, se observa una tendencia estable y creciente de las curvas de fase, en un rango de frecuencias correspondiente a microtremores, solo en una dirección de las tres combinaciones centro-vértice (del triángulo de la figura 35).

La curva de fase es obtenida por la ecuación 10, con ventanas de 3 segundos y traslapes entre ventanas del 98%, aplicando posteriormente un suavizado de un 3% de la longitud total de la curva, los cuales juegan un papel importante ya que al aplicar este suavizado y traslape se minimiza el efecto de oscilaciones aleatorias dejando como resultado una curva de fase promedio estable en un rango de frecuencia que va de 8 Hz hasta 15 Hz. Lo anterior se aplicó aprovechando la configuración y los registros de ruido ambiental del método SPAC, en todas las combinaciones entre parejas de sensores, para su procesado con el método SASW, encontrando una dirección preferencial de la cual se calculó una curva de fase con las características antes mencionadas para separaciones de 10 m, 15 m y 20 m.

# IV.10 CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA DE DISPERSIÓN POR EL MÉTODO SASW: SITIO CALLE SEGUNDA

Se calcularon las curvas de dispersión para la configuración descrita en la figura 35 y la tabla IX, así como el ruido ambiental para una separación entre sensores de 10 m, 15 m y 20 m, eligiendo los rangos de frecuencia de las fuentes activas donde la función de coherencia superó el umbral de 0.8, y para el ruido sísmico, donde la función de fase desdoblada fuera estable y con una tendencia similar a la figura 40 inciso B.

Tras obtener las curvas de dispersión para las diferentes configuraciones de separación entre sensores, se construyo la curva de dispersión compuesta, a la que se le aplico una ventana de suavizado móvil, con un tamaño del 1% del número total de puntos de la curva, conservando la tendencia global, este proceso asigna un valor promedio al

punto medio de un segmento móvil con un cierto traslape entre sí (25% de traslape) a lo largo de toda la curva.

Finalmente al disponer de la curva de dispersión compuesta (figura 41), se aplico un ajuste final mediante un suavizado con *splines* cúbicos a la curva de dispersión obtenida mediante promediado móvil.



Figura 41. Curva de dispersión compuesta de las curvas de dispersión provenientes del método SASW para el sitio Calle Segunda, cuyas separaciones entre sensores son: 10 m, 10 m y 20 m con sus respectivas distancias de fuente, siendo: 15 m, 20 m y 40 m, con respecto al centro del arreglo de la figura 35. La curva de color rojo es la curva suavizada por splines, obtenida a partir del promedio móvil (línea azul). La línea negra es la curva de dispersión teórica obtenida por algoritmos genéticos. La curva de dispersión teórica se calculó con un error RMS de 0.4830 m/s de la variación después de 10 iteraciones.

Se utilizó el ajuste de la curva de dispersión compuesta (línea roja de la figura 41), para interpretar del perfil de velocidades de las ondas de corte del subsuelo mediante la inversión de la curva de dispersión con el método de algoritmos genéticos modificado de Rix *et al.* (1998). El resultado obtenido de este proceso se muestra en la figura 42.



Figura 42. Modelo del perfil de velocidades de ondas de corte mediante el método SASW para el sitio Calle Segunda, calculado por razón de algoritmos genéticos. Las líneas horizontales color marrón indican la desviación estándar de los modelos iterados. La gráfica se obtuvo después de 10 iteraciones, con un criterio de variación del 1%.

El modelo de capas obtenido en la figura 42, corresponde a un sistema de suelos de seis capas que descansan en un semiespacio, cuyos parámetros se encuentran tabulados en la tabla X.

Tabla X. Se muestra el modelo de cinco capas (estratos) obtenido mediante el método SASW para el sitio Calle Segunda, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson y velocidad de ondas de corte (con su error calculado).

Número de	Espesor (m)	Densidad	Razón de	Velocidad
capa		gr/m <sup>3</sup>	Poisson	de ondas de
				corte (m/s)
1	3.0	1600	0.2	238±2.7
2	3.0	1600	0.2	269±5.8
3	3.0	1600	0.2	234±7.6
4	3.0	1600	0.2	$317 \pm 14.4$
5	19.0	1700	0.25	603 ±9.1
6		1900	0.25	$880 \pm 20.0$

La tabla X muestra el modelo obtenido mediante el método SASW mediante la inversión por algoritmos genéticos de la curva de dispersión. El resultado de la inversión determina una inversión de velocidad en el tercer estrato a una profundidad de seis metros. El modelo consta de un semiespacio con una velocidad de 880 m/s.

## IV.11 ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO SPAC: SITIO CALLE SEGUNDA

Una configuración triangular y cuatros sensores, tres de ellos en los vértices registrando solo la componente vertical (Z) y uno fijo en su centro registrando las tres componentes (X, Y, Z) del movimiento del terreno fue el diseño base para las mediciones con el método SPAC. Los vértices se encontraron a 2 m, 5 m, 10 m, 15 m y 20 m de distancia respecto de su centro, tal como se muestra la figura 35.

Se registro ruido ambiental por un tiempo aproximado de 15 minutos, simultáneamente para los cuatro sensores, en los cinco triángulos empleados, con una frecuencia de muestreo de 100 Hz.

Se utilizó el algoritmo modificado de Herrmann y Ammon (2004) en ambiente Matlab ®, para facilitar la graficación de los coeficientes de correlación y probar diferentes técnicas para el procesado del ruido ambiental. Así también, se utilizó el algoritmo de fuerza bruta para escanear el ruido ambiental registrado en el sensor central, con el fin de investigar la estacionalidad del ruido ambiental.

Se realizó un barrido de toda la serie de tiempo, punto a punto, con ventanas móviles que van del 1% del número total de muestras de la serie de tiempo hasta de un 33%, de las cuales se va calculando y guardando en memoria, la desviación estándar de cada ventana utilizada para posteriormente elegir aquellas que presenten una desviación estándar mínima (registros con máxima similitud estadística).

Se calcularon los coeficientes de correlación para las distancias propuestas, utilizando las series de tiempo designadas por el algoritmo de fuerza bruta, calculada a partir de la ecuación 16 y ajustada mediante el algoritmo modificado de Herrmann y Ammon (2004), obteniendo así las gráficas de la figura 43.



Figura 43. Gráficas de los coeficientes de correlación (líneas azules) obtenidas a partir de ruido ambiental, con su respectivo valor de varianza. Las líneas rojas son los ajustes obtenidos a partir del algoritmo modificado por Herrmann y Ammon (2004). Las gráfica superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha e inferior izquierda, corresponden a distancias radiales de 2 m, 5 m, 10 m, 15 m y 20 m, respectivamente.

La figura 43 muestra los coeficientes de correlación promedio, de las cuales su primera raíz se encuentra bien definida, para todas las distancias elegidas. Nótese que tal raíz se va colocando a frecuencias cada vez más bajas conforme se aumenta la apertura del triángulo de la figura 35.

Adicionalmente, se estudiaron los coeficientes de correlación para cada combinación centro-vértice, obtenido las gráficas de la figura 44.



Figura 44. Gráficas de los coeficientes de correlación obtenidos a partir de ruido ambiental. Las curvas fueron obtenidas a partir del algoritmo modificado por Herrmann y Ammon (2004). La curva azul, roja y verde, representan los coeficientes de correlación experimentales entre los sensores "c-z", "c-x" y "c-z", respectivamente de la figura 35. La curva negra es el promedio de las tres antes mencionadas. Las gráfica superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha e inferior izquierda, corresponden a distancias radiales de 2 m, 5 m, 10 m, 15 m y 20 m, respectivamente.

Se observó que el comportamiento de las gráficas verde y rojo es muy similar para todas las distancias, con un desfase en frecuencia respecto de la curva azul en un rango de 0 a 23 Hz.

Las raíces de estas tres gráficas tienen valores distintos, por ejemplo, analizando la gráfica correspondiente a una apertura de 20 m, las raíces de las curvas azul, rojo y verde, tienen raíces en las frecuencias 6.25 Hz, 7.8 Hz y 7.3 Hz, respectivamente, con las cuales al utilizar la ecuación 16 corresponden a velocidades de 327 m/s, 402 m/s y 385 m/s, respectivamente. Estas velocidades tienen una desviación estándar de 32 m/s entre sí, y una desviación media de 29 m/s respecto a la curva promedio (línea negra). Estos cambios en las raíces de los coeficientes de correlación se pueden deber a cambios laterales en las propiedades del terreno.

A partir de los coeficientes de correlación obtenidos (figura 44), se estimaron sus correspondientes curvas de dispersión, utilizando el algoritmo de inversión modificado de Herrmann y Ammon (2004), y posteriormente la curva de dispersión compuesta, ilustrada en la figura 45.



Figura 45. Curva de dispersión compuesta para el método SPAC, de las curvas de dispersión cuyas distancias radiales entre sensores son: 5 m, 10 m, 15 m y 20 m. La linea de color azul es la curva suavizada con splines cúbicos de las curvas de dispersión individual despues del promedio móvil. La curva roja es la curva de dispersión teórica, obtenida mendiante algoritmos genéticos. Curvas pertencecientes al sitio Calle Segunda.

Se invirtio la curva suavizada con *splines* (linea azul) medinte algoritmos genéticos, introduciendo como solución inicial un modelo de cuatro capas con una velocidad uniforme de 115 m/s, del cual se obtuvo un modelo de cuatro capas descansando en un semiespacio (ver figura 46). Es importante mencionar que el código de los algoritmos genéticos utilizado, solo permite la automatizacion en la estimación de las velocidades de ondas de corte; los parametros de espesor, densidad y razon de Poisson, son parametros que deben predefinirse por el usuario, de los cuales el espesor es el parámetro mas sensitivo para el modelado (semi-directo). La curva de dispersión teórica se calculó con un error RMS de 0.7430 m/s.



Figura 46. Modelo del perfil de velocidades de ondas de corte obtenido mediante el método SPAC para el sitio Calle Segunda, calculado por razón de algoritmos genéticos. Las líneas horizontales color marrón indican la desviación estándar de los modelos iterados. La gráfica se obtuvo después de 37 iteraciones, con un criterio de variación del 1%.

El modelo de capas obtenido en la figura 46, se interpreta como un modelo de cuatro capas descansando en un semiespacio, cuyos parámetros se encuentran tabulados en la tabla XI.

Tabla XI. Se muestra el modelo de cuatro capas (estratos) obtenido para el método SPAC en el sitio Calle Segunda, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson y velocidad de ondas de corte (con su error calculado). La abreviación SE indica semiespacio.

Número de	Espesor (m)	Densidad	Razón de	Velocidad de
capa		gr/m <sup>3</sup>	Poisson	ondas de corte $(m/a)$
				(11/S)
1	5.0	1600	0.2	149 ±0.7
2	5.0	1600	0.2	317 ±2.4
3	5.0	1600	0.2	460 ±5.4
4	13.0	1700	0.25	639 ±5.7
SE		2300	0.25	670 ±7.5
## IV.12 ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO HV-SPR: SITIO CALLE SEGUNDA

Se registraron 75 minutos de ruido ambiental en 5 intervalos de 15 minutos, simultáneamente en sus componentes vertical y horizontales (mutuamente ortogonales, donde una de ellas se encontró direccionada al norte magnético). La ubicación del sensor fue en el centro del arreglo utilizado por el método SPAC.

Se calcularon cocientes espectrales (mediante la ecuación 24) en los 5 intervalos de tiempo ya mencionados, aplicando los criterios de la tabla III. Para este caso de estudio, se emplearon ventanas de 30 segundos, y se obtuvieron los espectros de potencia aplicando un traslape entre ventanas del 75%, y los criterios del tratamiento de señales descritos en el capitulo dos. El propósito de lo anterior es para enfatizar en los espectros la distribución de la energía como función de la frecuencia en lo que corresponde a la respuesta del sistema. Este procedimiento permitió enfatizar la amplitud de la frecuencia dominante del sistema. Esta forma de obtener un promediado meramente numérico trabaja estadísticamente como un suavizado en que la componente aleatoria será minimizada y la componente determinística enfatizada. Este procedimiento está exento del sesgo del analista. En una etapa final se aplicaron tres barridos con una ventana móvil del 0.1% de longitud del tamaño de la ventana utilizada.

Se aplicaron estos parámetros al cálculo de los cocientes espectrales, con lo que se encontró la frecuencia fundamental para este sitio, siendo esta 1.36 Hz (periodo de 0.73 segundos), con una desviación estándar de 2.6 en la amplitud correspondiente al pico del cociente (3.3) en la frecuencia fundamental  $f_0$ . La figura 47 muestra el correspondiente cociente espectral combinado con las dos componentes horizontales, obtenidas mediante la ecuación 24.



Figura 47. Gráfica de los cocientes espectrales H/V calculados para el sitio Calle Segunda, obtenidos a partir de la media cuadrática de sus componentes horizontales. La línea negra representa la gráfica del cociente espectral H/V obtenido del ruido ambiental. Las líneas magenta y verde indican los márgenes superior e inferior de la desviación estándar experimental. La línea azul es la gráfica de la respuesta del terreno obtenida por la técnica de matrices de rigidez. La flecha roja indica la posición de la frecuencia fundamental  $f_0$ .

Con los parámetros antes mencionados para la obtención de los cocientes espectrales H/V, y mediante el método de matrices de rigidez se realizó el modelado directo de la propagación del campo total de ondas (P, SV, SH) en un medio estratificado unidimensional. Dado el modelo inicial, y con los resultados obtenidos de esta simulación numérica mediante un proceso iterativo se calcularon los cocientes espectrales teóricos entre las componentes SV/P, SH/P hasta alcanzar el mejor ajuste con respecto de los experimentales. El resultado del mejor ajuste se muestra con línea azul en la figura 47.

El modelo obtenido mediante este procedimiento, correspondiente a la figura 47, se muestra a continuación en la tabla XII.

Tabla XII. Se muestra el modelo de cuatro capas (estratos) obtenido mediante el método de cocientes espectrales, para el sitio Calle Segunda, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson, porcentaje de amortiguamiento y velocidad de ondas de corte, obtenidas mediante modelado directo con la técnica de matrices de rigidez. La abreviación SE indica semiespacio.

Número	Espesor	Densidad	Razón	Porcentaje de	Velocidad
de capa	(m)	$(gr/m^3)$	de	amortiguamiento	de ondas de
			Poisson		corte (m/s)
1	2.0	1600	0.2	5.0	190
2	6.0	1600	0.2	5.0	180
3	21.0	1600	0.2	5.0	250
4	15.0	1700	0.35	2.0	270
SE		2400	0.35	0	480

### **IV.13 SITIO LA SALINA**

El sitio seleccionado es un predio localizado en Puerto Salina, aproximadamente en el kilometro 63 de la autopista Tijuana-Ensenada, en el estado de Baja California. Tres fueron las razones para estudiar este sitio: (i) Se nos permitió consultar un estudio de mecánica de suelos, (ii) se encuentra solo a aproximadamente a 500 metros del sitio Campo Ángel, y (iii) prácticamente está rodeado por agua, lo que contrasta respecto del sitio Campo Ángel.

Para el estudio se aplicaron los métodos SASW, SPAC y HV-SPR, en que se utilizaron acelerómetros Episensor FBA ES-T, con una grabadora de 16 bits para la adquisición de datos. Las características y especificaciones de la instrumentación utilizada así como los parámetros de grabación se dan en la tabla XXII del apéndice B. En las figuras 48, 49 y 50 se muestra la ubicación del sitio.



Figura 48. Imagen digital del sitio La Salina, ubicado a 32° 03' 23.71" latitud Norte y longitud 116° 52' 47.15" oeste. Modificada de Google Earth 2009 pro.



Figura 49. El dibujo izquierdo representa la distribución de la geología superficial del área en los alrededores del sitio La Salina (rectángulo verde), así como los principales trazos de fallas regionales. El dibujo derecho muestra la zona de estudio con un rectángulo verde. Los colores amarillos corresponden a sedimentos de aluvión, los rojos a rocas ígneas. Tomadas de INEGI, carta geología superficial escala 1:50000. Carta: I11D81-C.

Las condiciones geológicas y el tipo de los materiales que se observan en superficie tienen las siguientes características. El terreno es plano y se encuentra junto a la Marina del desarrollo Puerto Salina. La zona de estudio consiste de una zona montañosa en donde afloran rocas prebatolíticas jurasicas y meta sedimentos cretácicos, intrusionados por rocas intrusivas graníticas de edad Cretácica; hacia la costa se presenta una serie de rocas volcánicas basáltico-andesíticas cubiertas localmente por sedimentos cuaternarios (ver figura 49). Las unidades litoestratigráficas que se presentan en las cercanías de la zona de estudio son rocas metavolcánicas y granodioritas.

En el estudio de mecánica de suelos para este sitio se encontró: Relleno formado por arena bien graduada color café claro de baja plasticidad a 2 m de profundidad, secuencia de arenas bien graduadas (sueltas a medianamente compactas) de 2 m a 7 m de profundidad, arenas bien graduadas (de medianamente compactas a compactas) de 7 m a 9 m.

PUERTO SALINA



Figura 50. Esquematización del predio en estudio ubicado junto a La Marina del desarrollo Puerto Salina. El punto verde indica la ubicación aproximada donde se realizó un ensayo de penetración estándar (IIGSA, 2007).

Las condiciones que prevalecieron durante las tomas de datos y que actuaron como fuentes generadoras (de energía) de vibraciones no controladas (transientes) a distancias cortas, información misma que es evidente en los registros de ruido ambiental, se listan en la tabla XIII, la maquinaria de tipo ligero y pesada propia para la preparación del terreno que opero en esos momentos.

Cantidad	Tipo de fuente	Distancias aproximadas
	-	de las fuentes (m)
1	Retroexcavadora	Entre 15 y 20
2	Roto-martillos	Entre 5 y 10
1	Revolvedora	40
1	Generador de	10
	electricidad	

Tabla XIII. Se muestran las fuentes presentes en el momento de los registros utilizados para los métodos SASW, SPAC y HV-SPR. Las distancias son aproximadas, respecto del centro de los arreglos.

### IV.14 ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO SASW: SITIO LA SALINA

La configuración para el estudio con el método SASW consistió en colocar un par de sensores a lo largo de una línea recta orientada este-oeste, cuyas distancias entre sensores fueron de: 5 m, 10 m, 20 m, 30 m y 40 m, respecto del centro del arreglo representados por los triángulos tomando siempre como referencia el centro del arreglo, como muestra la figura 51. La orientación se eligió procurando que el arreglo de los sensores quedara perpendicular a la costa.

Aprovechando los trazos realizados para la configuración del método SASW, se complementó a esta configuración (lineal), una configuración triangular para el método SPAC, colocando un sensor en el centro de referencia del arreglo para el método SASW y tres sensores en los vértices de un triangulo equilátero con el sensor central equidistante a cada vértice, como lo muestra la figura 51.



Figura 51. Esquema de la configuración de sensores utilizados tanto para el método SASW como SPAC, ubicado en el sitio La Salina con orientación Norte-Sur. El círculo rojo indica el sensor central para el método SPAC. Las letras "x", "y" y "z" indican las posiciones de los vértices. Los círculos azules indican las posiciones de los sensores para el método SPAC. Los triángulos negros indican las posiciones de los sensores para el método SASW.

Para el método SASW, a la distancia de 5 metros de separación entre sensores, (respecto del centro del arreglo), como fuente se utilizó un pequeño marro de aproximadamente 6 libras, realizando cuatro impactos en un trozo de madera de 4x4x20 pulgadas, cuya fuente fue colocada a 15 metros respecto del centro del arreglo. Para el resto de las distancias, se realizaron ocho impactos directos en una placa metálica con un

marro cuyo peso aproximado es de 16 libras. Las distancias de las fuentes utilizadas fueron elegidas de tal forma que éstas fueran superiores o iguales al criterio de distancias sensor-fuente propuesto por Ganji *et al.* (1998), con el fin de investigar su efecto sobre las características de las señales registradas. Las posiciones de las fuentes elegidas para cada separación están esquematizadas en la figura 52.



Figura 52. Esquema de la configuración fuente-sensores para el método SASW en el sitio La Salina. Las letras A y B, corresponden a la posición norte y sur, respectivamente, respecto de centro.

## IV.15 ANÁLISIS ESPECTRAL DE FUENTES: SITIO LA SALINA

Se calcularon los espectros de potencia, espectros cruzados y la función de coherencia para todas las distancias entre sensores con sus respectivas distancias de la fuente utilizada (fuente activa: martillo y marro) con el fin de analizar su contenido en frecuencia.

Los espectros de potencia de cada sensor, la función de coherencia, la curva de fase y el espectro de potencia cruzado fueron calculados a partir de impulsos aislados del ruido. El tamaño de la ventana (Hanning) utilizada en la serie de tiempo fue elegida de tal forma que los impulsos quedaran localizados en el centro de la ventana utilizada, para enfatizar la información contenida en los impulsos (Foti, 2000).

En la tabla XIV se documentan diversas características observadas en la señal para una de las fuentes.

Tabla XIV. Tabla comparativa del contenido de las frecuencias del espectro de potencia cruzado para distancias utilizadas fuente-sensor respeto del criterio de Ganji *et al.* (1998). Los asteriscos (\*) indican que se observó una coherencia inferior a 0.8 o una curva de fase inestable.

Distancia	Distancia de	Distancia	Primer modo	Frecuencias	Rango de
entre	la fuente	de fuente	de vibración	de modos	frecuencias
sensores	respecto del	según	observable	superiores	(Hz) con un
(m)	sensor más	criterio	(Hz)	observables	umbral de
	cercano (m)	(m)		(Hz)	coherencia
					superior a
					0.8
5	5	5			*
10	15	10	25		[20, 33]
10	2.5	10	39	42	[28, 46]
10	2.5	10	42		*
10	5	10	39		*
20	22	20	23	33	[27, 43]
20	22	20	30		[17, 48]
20	10	20	33		[26, 33]
20	10	20	24		[21, 27]
40	12	40	22	26, 34, 38,	*
				42	
40	12	40	22	28, 33	*

De la inspección de la tabla XIV se observa que después de los 20 m de separación entre sensores, resulta complicado extraer información debido a la atenuación de los impulsos, principalmente en el sensor más lejano.

Se observó que al emplear fuentes a distancias inferiores a la separación entre sensores, se pierde información a frecuencias superiores a 30 Hz, el umbral de coherencia se reduce a valores de 0.5 o menores para frecuencias menores a 17 Hz, y superiores a 35 Hz, lo anterior se puede observar en las figuras 53 y 54.



Figura 53. Análisis espectral con el método SASW, para una separación entre sensores de 20 m y una fuente a 20 m respecto del censor cercano. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 4 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.



Figura 54. Análisis espectral con el método SASW, para una separación entre sensores de 20 m y una fuente a 32 m respecto del censor cercano. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 4 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.

Por su parte, para la distancia entre sensores de 10 m, la coherencia se ve reducida significativamente a frecuencias menores a 12 Hz, esto es ocurre el efecto contrario al utilizar distancias de las fuentes inferiores al criterio de Ganji *et al.* (1998). Dicho en otras palabras, a frecuencias menores a 12 Hz las amplitudes espectrales se ven reducidas significativamente y se enfatizan a frecuencias superiores a los 12 Hz. La figura 55, es un ejemplo de este comportamiento.



Figura 55. Análisis espectral con el método SASW, para una separación entre sensores de 10 m y una fuente a 7.5 m respecto del censor cercano. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 4 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.

Se considero además, utilizar mediciones de ruido ambiental, y dado que el procesamiento mediante el método SASW, es el mismo que para fuentes activas, sin embargo aplicar el criterio de un umbral de coherencia de al menos 0.8, es prohibitivo, dado los bajos valores de coherencia.

Por lo anterior, en la ausencia del criterio de la función de coherencia, se analizó que puede ser suficiente con la obtención de la curva de fase que presente cambios

definidos de 180 grados y cuyo inicio en frecuencias bajas comience en ángulos cercanos a cero.

La curva de fase obtenida a partir del ruido ambiental es calculada por la ecuación 10, con ventanas de 3 segundos y traslapes entre ventanas del 80%, aplicando posteriormente un suavizado de un 3% de la longitud total de la curva, el cual juega un papel importante ya que al aplicar este suavizado se minimiza el efecto de oscilaciones aleatorias dejando como resultado una curva de fase con una tendencia central. Lo anterior se aplico aprovechando la configuración y los registros de ruido ambiental del método SPAC, en todas las combinaciones entre parejas de sensores, para su procesado con el método SASW, sin encontrar una dirección preferencial de la cual se calculó una curva de fase para separaciones de 15 m, 20 m y 25 m.

# IV.16 CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA DE DISPERSIÓN POR EL MÉTODO SASW: SITIO LA SALINA

Se calcularon las curvas de dispersión para la configuración descrita en la figura 51 y tabla XIV, así como el ruido ambiental para una separación entre sensores de 15 m, 20 m y 25 m, eligiendo los rangos de frecuencia de las fuentes activas donde la función de coherencia supere el umbral de 0.8 (ver tabla XIV), y para el ruido sísmico, donde la función de fase desdoblada fuera estable. Para ambos casos, con 182 puntos para el cálculo de los espectros, con un 25% de traslape cuando no se observó ruido en la serie de tiempo y un 75% de traslape (para impulsos) cuando se observa ruido entre los trascientes.

Tras obtener las curvas de dispersión para las diferentes configuraciones de separación entre sensores, se construyo la curva de dispersión compuesta, a la que se le aplico una ventana de suavizado móvil, con un tamaño del 1% del número total de puntos de la curva, conservando la tendencia global, este proceso asigna un valor promedio al punto medio de un segmento móvil con un cierto traslape entre sí (25% de traslape) a lo largo de toda la curva.

Finalmente al disponer de la curva de dispersión compuesta (figura 56), se aplicó un ajuste final mediante un suavizado con *splines* cúbicos a la curva de dispersión obtenida mediante promediado móvil.



Figura 56. Curva de dispersión compuesta de las curvas de dispersión provenientes del método SASW, cuyas separaciones entre sensores son: 10 m, y 20 m con sus respectivas distancias de fuente, siendo: 15 m, 2.5 m, 22 m, y 10 m, con respecto al sensor mas cercano. Las letras "a" y "b" al final de la leyenda, significan las direcciones este y oeste, respectivamente. La curva de color azul es la curva suavizada por splines, obtenida a partir del promedio móvil. La línea negra es la curva de dispersión teórica obtenida por algoritmos genéticos. La curva de dispersión teórica se calculó con un error RMS de 1.8713 m/s después de 23 iteraciones. Curvas pertencecientes al sitio La Salina.

Se utilizo el ajuste de la curva de dispersión compuesta (línea azul de la figura 56), para interpretar del perfil de velocidades de las ondas de corte del subsuelo mediante la inversión de la curva de dispersión con el método de algoritmos genéticos modificado de Rix *et al.* (1998). El resultado obtenido de este proceso se muestra en la figura 57.



Figura 57. Modelo del perfil de velocidades de ondas de corte mediante el método SASW para el sitio La Salina, calculado por razón de algoritmos genéticos. Las líneas horizontales color marrón indican la desviación estándar de los modelos iterados. La gráfica se obtuvo después de 23 iteraciones, con un criterio de variación del 1%.

El modelo de capas obtenido en la figura 57, se interpreta como un modelo de ocho capas descansando en un semiespacio, cuyos parámetros del modelo se encuentran tabulados en la tabla XV.

Tabla	XV.	Se	muestra	el	modelo	de	ocho	capas	(estratos)	obtenido	mediante	el
métod	o SAS	SW	para el si	tio	La Salin	a, i	ndicar	ndo los	parámetro	s de espes	or, densida	ad,
razón	de Po	isso	n y veloci	da	d de ond	as d	le cort	e (con s	su error ca	lculado).		

Número de	Espesor (m)	Densidad	Razón de	Velocidad
capa		gr/m <sup>3</sup>	Poisson	de ondas de
				corte (m/s)
1	2.0	1600	0.2	154±0.7
2	2.0	1600	0.2	254±4.1
3	2.0	1600	0.2	182±5.1
4	2.0	1600	0.2	208±9.6
5	4.0	1600	0.2	368±11.3
6	5.0	1600	0.2	514±10.5
7	10.0	1600	0.2	596±11.8
8	21.0	1700	0.25	710±16.4
SE		1800	0.25	746±24.7

La tabla XV pauta el modelo obtenido mediante el método SASW con una inversión por algoritmos genéticos, proponiendo un modelo inicial de cinco capas con velocidad uniforme de 115 m/s, encontrando una inversión de velocidad entre el tercer y cuarto estrato a una profundidad de cuatro a ocho metros. El modelo consta de un semiespacio con una velocidad de 746 m/s.

# IV.17 ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO SPAC: SITIO LA SALINA

Una configuración triangular y cuatros sensores, tres de ellos en los vértices registrando solo la componente vertical (Z) y uno fijo en su centro registrando las tres componentes (X, Y, Z) del movimiento del terreno fue el diseño base para las mediciones

con el método SPAC. Los vértices se encontraron a 2.5 m, 5 m, 10 m, 15 m y 20 m de distancia respecto de un sensor central, tal como se muestra la figura 51.

Se registro ruido ambiental por un tiempo aproximado de 15 minutos, simultáneamente para los cuatro sensores, en los tres triángulos empleados, con una frecuencia de muestreo de 100 Hz.

Se utilizó el algoritmo modificado de Herrmann y Ammon (2004) en ambiente Matlab ®, para facilitar el graficado de los coeficientes de correlación, y sobre todo probar diferentes técnicas para el procesado del ruido ambiental.

Se utilizó el algoritmo de fuerza bruta para escanear el ruido ambiental registrado en el sensor central, con el fin de investigar la estacionalidad del ruido ambiental.

Se realizó un barrio de toda la serie de tiempo, punto a punto, con ventanas móviles que van del 1% del número total de muestras de la serie de tiempo hasta de un 33%, de las cuales se va calculando y guardando en memoria, la desviación estándar de cada ventana utilizada para posteriormente elegir aquellas que presenten una desviación estándar mínima. Después de ejecutar este algoritmo, se encontró que el tamaño de las ventanas a utilizar era el máximo posible (33% de longitud), lo que invita a considerar que no existía estacionalidad en el ruido ambiental registrado. Aún con la premisa de no presentarse una notoria estacionalidad en las ondas registradas, se calcularon los coeficientes de correlación para las distancias propuestas, utilizando distintas longitudes y porciones de las series de tiempo con el fin de investigar si es posible calcular una curva de autocorrelación similar a las encontradas en los sitios anteriores.

Las curvas de autocorrelación obtenidas por promedio azimutal después de una exhaustiva investigación (en su procesado), no se observó un comportamiento favorable (ver figura 58) en estas curvas como para ser modeladas.



Figura 58. Gráficas de los coeficientes de correlacion promedio, obtenidos a partir de ruido ambiental. Las gráfica superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha e inferior izquierda, corresponden a distancias radiales de 2.5 m, 5 m, 10 m, 15 m y 20 m, respectivamente.

A diferencia del análisis de estacionalidad realizado en el sensor central, los sensores en los vértices presentaron un comportamiento similar entre sí. El resultado de este análisis se presenta en forma resumida en la tabla XVI.

Distancia	Sensor central	Vértice 1 (%)	Vértice 2 (%)	Vértice 3 (%)
azimutal	(%)			
2.5	33	21	20	21
5.0	33	11	11	9
10.0	33	21	20	22
15.0	33	25	25	25
20.0	33	25	24	23

Tabla XVI. Se indica el porcentaje máximo del tamaño de ventana a utilizar para registrar eficientemente ondas estacionarias, basado en el algoritmo de fuerza bruta.

La tabla XVI indica que por lo menos existe una ventana con el porcentaje mostrado donde su variabilidad es mínima, lo que muestra que pueden emplearse ventanas de a lo mucho 3.75 minutos o menos, para el caso de 15 m y de 1.35 minutos para el caso de 5 m. Es importante señalar que el sensor central no posee las características (estadísticas) de los sensores en los vértices.

Así mismo, se investigaron los coeficientes de correlación obtenidos sobre parejas de sensores vértice-vértice, de las que se obtuvieron coeficientes de correlación bien parecidos a funciones Bessel de primera clase de orden cero. El cálculo consistió en el promedio de dos sensores, en un arco de 120°, tomando como común al vértice 1, obteniendo las gráficas de la figura 59, para las distancias de 4.062 m, 8.66 m, 17.32 m, 25.98 m y 34.641 m, cuyas distancias fueron calculadas a partir del triángulo de la figura 51, mediante la ley de cosenos.



Figura 59. Gráficas de los coeficientes de correlación promedio (líneas azules) obtenidos a partir de ruido ambiental entre los vértices de la figura 51. Las gráfica superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha e inferior izquierda, corresponden a distancias radiales de 4.062 m, 8.66 m, 17.32 m, 25.98 m y 34.641 m, respectivamente. Las líneas rojas indican el ajuste mediante el algoritmo modificado de Herrmann y Ammon (2004).

De las curvas ajustadas de la figura 59, se calcularon las curvas de dispersión correspondientes, para posteriormente construir la curva de dispersión compuesta de la figura 60.



Figura 60. Curva de dispersión compuesta para el método SPAC del sitio La Salina, con curvas de dispersión cuyas distancias entre vertices son: 4.062 m, 8.66 m, 17.32 m, 25.98 m y 34.64 m. La curva de color negro es la curva de dispersion teórica, obtenida mendiante algoritmos genéticos.

Se invirtio la curva de dispersión compuesta mediante algoritmos genéticos, introduciendo como solución inicial un modelo de siete capas con una velocidad uniforme de 115 m/s, del cual se obtuvo un modelo de siete capas descansando en un semiespacio (ver figura 61). Es importante mencionar que el código de los algoritmos genéticos utilizado, solo permite la automatizacion en la estimación de las velocidades de ondas de corte; los parametros de espesor, densidad y razon de Poisson, son parametros que deben

predefinirse por el usuario, de los cuales el espesor es el parámetro mas sensitivo para el modelado (semi-directo). La curva de dispersión teórica se calculó con un error RMS de 2.3674 m/s.



Figura 61. Modelo del perfil de velocidades de ondas de corte obtenido mediante el método SPAC para el sitio La Salina, calculado por razón de algoritmos genéticos. Las líneas horizontales color marrón indican la desviación estándar de los modelos iterados. La gráfica se obtuvo después de 52 iteraciones, con un criterio de variación del 1%.

El modelo de capas obtenido en la figura 61, se interpreta como un modelo de siete capas descansando en un semiespacio, cuyos parámetros del modelo se encuentran tabulados en la tabla XVII.

Tabla XVII. Se muestra el modelo de siete capas (estratos) obtenido para el método SPAC en el sitio La Salina, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson y velocidad de ondas de corte (con su error calculado). La abreviación SE indica semiespacio.

Número de	Espesor (m)	Densidad	Razón de	Velocidad de
capa		gr/m <sup>3</sup>	Poisson	ondas de corte
				(m/s)
1	3.0	1600	0.2	$130 \pm 1.6$
2	3.0	1600	0.25	$222 \pm 1.7$
3	3.0	1600	0.25	412 ±4.8
4	3.0	1600	0.25	454 ±4.9
5	3.0	1600	0.25	$323 \pm 3.3$
6	3.0	1700	0.25	$246 \pm 3.2$
7	20.0	1700	0.25	531 ±3.3
SE		1800	0.25	840 ±7.5

### IV.18 ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO HV-SPR: SITIO LA SALINA

Se registraron 75 minutos de ruido ambiental en 5 intervalos de 15 minutos, simultáneamente en sus componentes vertical y horizontal (mutuamente ortogonales, donde una de ellas se encontró direccionada al norte magnético), la ubicación del sitio de registro fue en el centro del arreglo utilizado por el método SPAC.

Se calcularon cocientes espectrales (mediante la ecuación 24) en los 5 intervalos de tiempo ya mencionados, aplicando los criterios de la tabla III.

Para este caso de estudio, se emplearon ventanas de 30 segundos, y se obtuvieron los espectros de potencia aplicando un traslape entre ventanas del 75%, y los criterios del tratamiento de señales descritos en el capitulo dos. El propósito de lo anterior es para enfatizar en los espectros la distribución de la energía como función de la frecuencia en lo que corresponde a la respuesta del sistema. Este procedimiento permitió enfatizar la amplitud de la frecuencia dominante del sistema. Esta forma de obtener un promediado meramente numérico trabaja estadísticamente como un suavizado en que la componente aleatoria será minimizada, y la componente determinística enfatizada. Este procedimiento está exento del sesgo del analista. En una etapa final se aplicaron tres barridos con una ventana móvil del 0.1% de longitud del tamaño de la ventana utilizada. Se aplicaron estos parámetros al cálculo de los cocientes espectrales, con lo que se encontró la frecuencia fundamental para este sitio, siendo esta 6.33 Hz. La figura 62 muestra el cociente espectral combinado con las dos componentes horizontales, obtenidas mediante la ecuación 24.



Figura 62. Gráfica de los cocientes espectrales H/V calculados para el sitio La Salina, obtenidos a partir de la media cuadrática de sus componentes horizontales. La línea negra representa la gráfica del cociente espectral H/V obtenido del ruido ambiental. Las líneas magenta y verde indican los márgenes superior e inferior de la desviación estándar experimental. La línea azul es la gráfica de la respuesta del terreno obtenida por la técnica de matrices de rigidez.

Con los parámetros antes mencionados para la obtención de los cocientes espectrales H/V, y mediante el método de matrices de rigidez se realizó el modelado directo de la propagación del campo total de ondas (P, SV, SH) en un medio estratificado unidimensional. Dado el modelo inicial, y con los resultados obtenidos de esta simulación numérica mediante un proceso iterativo se calcularon los cocientes espectrales teóricos entre las componentes SV/P, SH/P hasta alcanzar el mejor ajuste con respecto de los experimentales. El resultado del mejor ajuste se muestra con línea azul en la figura 62. El modelo obtenido mediante este procedimiento, correspondiente a la figura 62, se muestra a continuación en la tabla XVIII.

Tabla XVIII. Se muestra el modelo de cinco capas (estratos) obtenido mediante el método de cocientes espectrales, para el sitio La Salina, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson, porcentaje de amortiguamiento y velocidad de ondas de corte, obtenidas mediante modelado directo con la técnica de matrices de rigidez. La abreviación SE indica semiespacio.

Número	Espesor	Densidad	Razón	Porcentaje de	Velocidad
de capa	(m)	$(gr/m^3)$	de	amortiguamiento	de ondas de
			Poisson		corte (m/s)
1	2.0	1600	0.2	1.0	150
2	2.0	1600	0.2	1.0	280
3	2.0	1600	0.2	2.0	140
4	4.0	1600	0.2	5.0	280
5	20.0	1600	0.2	5.0	310
SE		1600	0.25	0.0	490

### IV.19 SITIO EJIDO ZARAGOZA (RIZ)

Se eligió un predio de la zona rural localizado en el kilometro 57 de la carretera Ensenada-Tecate, en el estado de Baja California (ver ubicación en circulo azul de la figura 63).

El sitio se encuentra alejado de sus ciudades circundantes por aproximadamente 30 km de la ciudad más cercana y de la carretera por aproximadamente 1.2 km. Estas características fueron requeridas para este experimento, con el propósito de estar fuera de la influencia de ruido civil que existe en las zonas urbanas. Es pertinente mencionar que estas características pueden o no favorecer el estudio de los métodos SASW y SPAC, cuando se utilizan mediciones de microtremores. Durante la toma de datos, fuertes ráfagas de viento se manifestaron ocasionalmente. Para la toma de datos, se utilizaron acelerómetros Episensor FBA ES-T y una grabadora de 16 bits. Las características y especificaciones de la instrumentación utilizada así como los parámetros de grabación se dan en la tabla XXII del apéndice B.



Figura 63. Imagen digital del sitio RIZ, ubicado a 32° 11' 44.85" latitud Norte y longitud 116° 28' 31.16" oeste. El círculo azul indica la configuración de los sensores para los métodos SASW y SPAC. Modificada de Google Earth 2009 pro.

Las características geológicas y el tipo de los materiales que se observan en superficie para este sitio se describen a continuación. El terreno es sensiblemente plano rodeado de rocas metamórficas (esquisto-pizarra) y un pequeño cuerpo de rocas ígneas (ígnea intrusiva acida). Regionalmente se encuentra dentro de provincia fisiográfica y geológica de Baja California, que consiste de una zona montañosa en donde afloran rocas prebatolíticas jurasicas y meta sedimentos cretácicos, intrusionados por rocas intrusivas graníticas de edad Cretácica (ver figura 64). El tipo de suelo que se observa es aluvión y de acuerdo a la inspección visual de pozos artesianos de agua, pudiese alcanzar hasta 15 m en promedio.



Figura 64. El dibujo izquierdo representa la distribución de la geología superficial del área en los alrededores del sitio RIZ (rectángulo verde), así como los principales trazos de fallas regionales. El dibujo derecho muestra la zona de estudio con un triangulo verde. Los colores amarillos corresponden a sedimentos de aluvión, los morados y rojos a rocas metamórficas e ígneas, respectivamente. Tomadas de INEGI, carta geología superficial escala 1:50000. Carta: I11D82-C.

### IV.20 ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO SASW: SITIO EJIDO ZARAGOZA

Basado en la experiencia de los experimentos de los sitios Campo Ángel, Calle Segunda y La Salina, se decidió realizar este experimento de una forma que no tuviese la restricción de un arreglo lineal para el método SASW. Esta idea, misma que como parte de los análisis y resultados de nuestros estudios, se encontró también como una propuesta en el trabajo de Foti (2000). La justificación que aquí se da es que tomando la geometría del método SPAC, se puede hacer el método SASW a lo largo de cada línea que axialmente conecta el centro del triangulo con los vértices de los triángulos según se vayan cambiando las dimensiones de éste. La restricción que aquí se maneja es que será solo para las dimensiones pequeñas del triangulo, y tratar al final estos resultados como un promedio de los resultados obtenidos en cada línea axial del triangulo. Se colocaron cuatro sensores en una configuración tipo SPAC en distancias radiales de 5 m y 10 m, con fuentes generadas impactando directamente el suelo con un marro de 16 libras a 5 m y 10 m, respectivamente para cada pareja centro-vértice, como lo indica la figura 65.



Figura 65. Esquema de la configuración utilizada para los métodos SASW y SPAC, en el sitio RIZ. Los círculos azules indican sensores colocados en los vértices y a posiciones equidistantes de 5 m y 10 m, respecto del sensor central (círculo rojo). Los asteriscos color morado indican fuentes impulsivas a distancias de 10 m y 20 m (con referencia al centro), respectivamente. Las letras A, B y C son marcas para las posiciones de los sensores de los vértices. El vértice centro-A se orienta al norte.

### IV.21 ANÁLISIS ESPECTRAL DE FUENTES: SITIO EJIDO ZARAGOZA

Se calcularon los espectros de potencia, espectros cruzados y la función de coherencia para todas las distancias entre sensores con sus respectivas distancias de la fuente utilizada con el fin de analizar su contenido en frecuencia en las señales registradas.

Los espectros de potencia de cada sensor, la función de coherencia, la curva de fase y el espectro de potencia cruzado, fueron calculados a partir de impulsos aislados del ruido. El tamaño de la ventana (Hanning) utilizada en la serie de tiempo fue elegida de tal forma que los impulsos quedaran localizados aproximadamente en el centro de la ventana utilizada, para enfatizar la información contenida en los impulsos (Foti, 2000). La ventana utilizada fue de 182 puntos. A continuación, en la tabla XIX se documentan diversas características observadas de las fuentes utilizadas para el método SASW, la cual se analizará a continuación.

Tabla XIX. Tabla comparativa del contenido de las frecuencias del espectro de potencia cruzado para distancias utilizadas fuente-sensor respeto del criterio de Ganji *et al.* (1998). Los asteriscos (\*) indican que se observó una coherencia inferior a 0.8 o una curva de fase inestable.

Distancia	Distancia de	Distancia	Primer modo	Frecuencias	Rango de
entre	la fuente	de fuente	de vibración	de modos	frecuencias
sensores	respecto del	según	observable	superiores	(Hz) con un
(m)	sensor más	criterio	(Hz)	observables	umbral de
	cercano (m)	(m)		(Hz)	coherencia
					superior a
					0.8
5a	5	5	35		*
5b	5	5			[13, 48]
5c	5	5	38		[15, 33]
10a	10	10	27	43	*
10b	10	10			[20, 37]
10c	10	10	34	41	[20, 43]

La tabla XIX, muestra los casos aplicados con el método SASW, empleando el criterio propuesto por Ganji *et al.* (1998). Valores de coherencia inferiores a 0.8 y un comportamiento inestable en la curva de fase se observan a frecuencias menores a 10 Hz, en el intervalo de 30 Hz a 40 Hz, y frecuencias superiores a 43 Hz, esto para la línea con dirección centro-vértice A (ver figura 65). Para las líneas con dirección centro-vértice-B y centro-vértice-C, el comportamiento de la curva de fase es estable, con un umbral de coherencia superior a 0.8 en el intervalo de frecuencias de 18-40 Hz (ver figura 66 y 67).



Figura 66. Análisis espectral con el método SASW, para una separación entre sensores de 10 m y una fuente a 10 m respecto del censor cercano, en la dirección centro-vértice A. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 10 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.



Figura 67. Análisis espectral con el método SASW, para una separación entre sensores de 10 m y una fuente a 10 m respecto del censor cercano, en la dirección centro-vértice C. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo con la unión de 10 diferentes impulsos, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor cercano, rojo sensor lejano a la fuente), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.

En este caso, también se consideró el procesamiento del ruido ambiental mediante el método SASW, sin embargo, se encontraron niveles bajos de coherencia, así como curvas de fase inestables. Solo en la línea centro-vértice B, y distancia total entre sensores de 10 m, mostro una muy buena tendencia lineal y estabilidad de la curva de fase en el intervalo de frecuencias de 5-25 Hz (ver figura 68), con la cual se complemento la curva de dispersión compuesta.




Figura 68. Análisis espectral con el método SASW, para una separación entre sensores de 10 m, en la dirección centro-vértice C. Las gráficas superior izquierda, superior derecha, central izquierda, central derecha, inferior izquierda e inferior derecha, respectivamente representan: la serie de tiempo del registro de ruido ambiental por 15 minutos, en muestras, los espectros de autopotencia (color azul es el sensor en vértice, rojo sensor en el centro), en color azul el espectro de potencia cruzado, en color verde es la función de coherencia, en azul la curva de fase desenvuelta (unwraped), las curvas de dispersión en función de la frecuencia y longitud de onda.

# IV.22 CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA DE DISPERSIÓN POR EL MÉTODO SASW: SITIO EJIDO ZARAGOZA

Se calcularon las curvas de dispersión para la configuración descrita en la figura 65 y tabla XIX, así como el ruido ambiental para una separación entre sensores de 10 m. Se eligieron los rangos de frecuencia de las fuentes activas donde la función de coherencia supere el umbral de 0.8 (ver tabla XIX), y para el ruido sísmico, donde la función de fase desdoblada fuera estable; siendo para ambos casos con 182 puntos para el cálculo de los espectros, con un 25% de traslape.

Tras obtener las curvas de dispersión para las diferentes configuraciones de separación entre sensores y las diferentes líneas: centro-vértice A, Centro-vértice B y centro-vértice C, se construyo la curva de dispersión compuesta, a la que se le aplico una ventana de suavizado móvil, con un tamaño del 1% del número total de puntos de la curva, conservando la tendencia global, este proceso asigna un valor promedio al punto medio de un segmento móvil con un cierto traslape entre sí (25% de traslape) a lo largo de toda la curva.

Finalmente al disponer de la curva de dispersión compuesta (figura 69), se aplico un ajuste final mediante un suavizado con *splines* cúbicos a la curva de dispersión obtenida mediante promediado móvil.



Figura 69. Curva de dispersión compuesta de las curvas de dispersión obtenidas mediante el método SASW, cuyas separaciones entre sensores fuerón de: 5 m y 10 m con sus respectivas distancias de fuente, siendo: 10 m y 20 m, con respecto al centro del arreglo.Las letras "B" y "C" indican la combinación de sensores utilizados en el triángulo de la figura 65. La curva de color azul es la curva obtenida mediante un promedio móvil. La linea roja es la curva suavizada por splines, a partir del promedio móvil. La línea negra es la curva de dispersión teórica obtenida por algoritmos genéticos. La curva de dispersión teórica se calculó con un error RMS de 0.671 m/s después de 8 iteraciones. Curvas pertencecientes al sitio RIZ.

Se utilizó el ajuste de la curva de dispersión compuesta (línea roja de la figura 69), para interpretar del perfil de velocidades de las ondas de corte del sub-suelo mediante la inversión de la curva de dispersión con el método de algoritmos genéticos modificado de Rix *et al.* (1998). El resultado obtenido de este proceso se muestra en la figura 70.



Figura 70. Modelo del perfil de velocidades de ondas de corte mediante el método SASW en el sitio RIZ, calculado por razón de algoritmos genéticos. Las líneas horizontales color marrón indican la desviación estándar de los modelos iterados. La gráfica se obtuvo después de 8 iteraciones, con un criterio de variación del 1%.

El modelo de capas obtenido en la figura 70, corresponde a un sistema de suelos de seis capas que descansan en un semiespacio, resumiéndose en la tabla XX.

Tabla XX. Se muestra el modelo de seis capas (estratos) obtenido mediante el método SASW para el sitio RIZ, indicando los parámetros de espesor, densidad, razón de Poisson y velocidad de ondas de corte (con su error calculado).

Número de	Espesor (m)	Densidad	Razón de	Velocidad
capa		gr/m <sup>3</sup>	Poisson	de ondas de
				corte (m/s)
1	2.5	1600	0.2	269±3.3
2	2.5	1600	0.25	244±3.1
3	1.0	1600	0.25	223±3.0
4	1.5	1600	0.25	261±4.3
5	3.0	1600	0.25	384±4.6
6	6.0	1600	0.25	530±5.8
SE		1600	0.25	644±7.5

La tabla XX. Muestra el modelo obtenido mediante el método SASW con una inversión por algoritmos genéticos, proponiendo como un modelo inicial de cinco capas con velocidad uniforme de 115 m/s, encontrando una inversión de velocidad en el segundo y tercer estrato, a una profundidad de 2.5 a 6 metros. El modelo consta de un semiespacio con una velocidad de 644 m/s.

## IV.23 ANÁLISIS MEDIANTE EL MÉTODO SPAC: SITIO EJIDO ZARAGOZA

La configuración para el arreglo SPAC, consistió de cuatros sensores que registraron solo la componente vertical, y se formaron dos triángulos equiláteros cuyos vértices se encontraron a 5 m y 10 m de distancia respecto de un sensor que se ubico en el centro del triangulo, tal como se indica la figura 65.

Se registró ruido ambiental por un tiempo aproximado de 15 minutos, simultáneamente en los cuatro sensores, para las configuraciones de los dos triángulos empleados. Los sensores utilizados fueron acelerómetros EpiSensor FBA-T, y se utilizo una agravadora de 16 bits. La frecuencia de muestreo fue de 50 Hz. Detalles de las características y especificaciones del equipo utilizado se dan en la tabla XXII del apéndice B.

Se utilizó el algoritmo modificado de Herrmann y Ammon (2004) en ambiente Matlab ®, para facilitar la manipulación gráfica de los coeficientes de correlación y probar diferentes técnicas para el procesado del ruido ambiental. Así también, se utilizó el algoritmo de fuerza bruta antes descrito, para escanear el ruido ambiental registrado en el sensor central, con el fin de investigar la estacionalidad del ruido ambiental.

Se realizó un barrido de toda la serie de tiempo, punto a punto, con ventanas móviles que van del 1% del número total de muestras de la serie de tiempo hasta de un 33%, de las cuales se va calculando y guardando en memoria, la desviación estándar de cada ventana utilizada para posteriormente elegir aquellas que presenten una desviación estándar mínima. Sin embargo, después de ejecutar este algoritmo, se encontró que el tamaño de las ventanas a utilizar es de alrededor del 30% de longitud, en todas las parejas de sensores. Lo que propone la existencia de ondas estacionarias de longitud de onda largas, que pueden emplearse para determinar el perfil de ondas de corte a profundidades superiores a los 30 m (ver tabla XXI).

Tabla XXI. Se indica el porcentaje máximo del tamaño de ventana a utilizar para registrar eficientemente ondas estacionarias, basado en el algoritmo de fuerza bruta.

Distancia	Sensor central	Vértice 1 (%)	Vértice 2 (%)	Vértice 3 (%)
azimutal	(%)			
5.0	31	33	30	31
10.0	32	32	32	31

La tabla XXI puede compararse con los espectros de autopotencia de cada sensor, al encontrar niveles de energía diferente para frecuencias superiores a 2 Hz y similares para frecuencias inferiores a esta (ver figura 71).



Figura 71. Gráficas de espectros de autopotencia para el sitio RIZ. Las gráficas superior e inferior corresponden a las distancias radiales de 5 m y 10 m, respectivamente. La curva azul, roja y verde, representan los espectros de autopotencia de los sensores centro, A, B y C, respectivamente de la figura 65.

Los coeficientes de correlación obtenidos, después de una exhaustiva investigación (en su procesado), no corresponden tan siquiera en la forma a la esperada de una función de Bessel de orden cero, (ver figura 72), lo que hace estéril el tratar de modelarlas ya que nunca se acercaran a la forma de una función Bessel de orden cero de primera clase.



Figura 72. Gráficas de los coeficientes de correlación promedio obtenidos a partir de ruido ambiental. La gráfica izquierda y derecha, corresponden a distancias radiales de 5 m y 10 m, respectivamente. La curva azul, roja y verde, representan los coeficientes de correlación experimentales entre los sensores centro con A, B y C, respectivamente de la figura 65.

Se desconoce la razón del porque en este sitio, a pesar de contar aparentemente con condiciones favorables de que las señales registradas de microsismos no estuviesen contaminadas con microtremores, ya que no fue posible obtener resultados acordes a lo esperado con el método SPAC, como fueron los casos de los sitios: Campo Ángel, La Salina y Calle Segunda; es tema que se propone sea investigado en un futuro.

#### DISCUSIONES Y CONCLUSIONES DE LOS SITIOS DE ESTUDIO

### V.1 SITIO CAMPO ÁNGEL



Figura 73. Perfiles de velocidades de ondas de corte mediante los métodos SASW (líneas rojas), SPAC (líneas azules) y HV-SPR (líneas verdes) en el sitio Campo Ángel. Las sombras de colores muestran la variabilidad entre los tres métodos. La leyenda en la parte derecha, indica el rango de variación de la velocidad de ondas de corte entre los métodos. Los paréntesis indican la variabilidad entre los métodos. Las líneas moradas muestran el tipo de suelo a profundidad según IBC 2003.

Aplicando los métodos SASW, SPAC y HV-SPR se llego al perfil de velocidades de ondas de corte (ver figura 73), de los cuales se observa lo siguiente:

- Con el modelado de las curvas de cocientes espectrales se estimó un amortiguamiento promedio del 4 % hasta una profundidad de 18 m.
- El método SPAC estima velocidades consistentemente mayores, en contraste con los métodos HV-SPR y SASW. de entre estos, las velocidades menores las estima el método HV-SPR.
- Con el método SASW se estima un modelo de estratos más delgados (de hasta 2 m de espesor como mínimo) y resuelve hasta una profundidad de 18 m. Estima además una inversión de velocidades, en el intervalo de 2 a 4 m.
- Entre los métodos SASW, SPAC y HV-SPR se encontró la menor variabilidad en las velocidades de ondas de corte en la parte somera del suelo, siendo el valor máximo de 80 m/s en el intervalo de 2 a 4 m. De 6 a 12 m de profundidad, la máxima variabilidad es de 200 m/s, en el intervalo 12 a 18 m de profundidad la variabilidad máxima es de 300 m/s y en el intervalo de 18 a 38 m de profundidad la variabilidad es de 350 m/s (ver figura 73).
- Hasta una profundidad aproximada de 6 m, con los rangos estimados de velocidad, el suelo puede ser clasificado tipo D de acuerdo al IBC 2003 y del tipo C de 6 m a 18 m.
- Con las estimaciones obtenidas con los métodos SPAC y HV-SPR de acuerdo al IBC 2003, el suelo puede ser clasificado tipo C de 18 m hasta 38 m.



Figura 74. Perfiles de velocidades de ondas de corte mediante los métodos SASW (líneas rojas), SPAC (líneas azules) y HV-SPR (líneas verdes) en el sitio La Salina. La leyendas SPT1 y SPT2 indican el perfil de velocidades de ondas de corte con las relaciones de Ohta y Goto (1978) y la Japan Road Association (2002), respectivamente. Las sombras de colores muestran la variabilidad entre los tres métodos. La leyenda en la parte derecha, indica el rango de variación de la velocidad de ondas de corte entre los métodos. Los paréntesis indican la variabilidad entre los métodos. Las líneas moradas muestran el tipo de suelo a profundidad según IBC 2003.

Aplicando los métodos SASW, SPAC y HV-SPR se llego al perfil de velocidades de ondas de corte mostrada en la figura 75, en contraste con dos relaciones proporcionadas por Ohta y Goto (1978) y la Japan Road Association (2002) y en base al estudio de mecánica de suelos que nos fue facilitado, se observa lo siguiente:

 Según el estudio de mecánica de suelos y las relaciones de Ohta y Goto (1978) (ecuación 32) y la Japan Road Association (2002) (ecuación 33) el suelo en este sitio se clasifica como tipo D, de 2 m a 10 m de profundidad.

$$V_s = 85.34 N^{0.348} \tag{32}$$

$$V_{\rm s} = 80N^{\frac{1}{3}} \tag{33}$$

- Se estimó con los métodos SASW, SPAC y HV-SPR que el suelo se clasifica como tipo E de 0 m a 2 m, tipo D de 2 m a 4 m, entre tipo E y D de 4 m a 6 m, entre tipo C y D de 6 m a 30 m, lo anterior de acuerdo con el IBC 2003.
- Con los métodos SASW y SPAC se estimó que el suelo se clasifica como tipo C de 30 m a 37 m de profundidad, de acuerdo con el IBC 2003.
- Con el modelado de las curvas de cocientes espectrales se estimó un amortiguamiento promedio del 2% a una profundidad de 10 m.
- El método SPAC estima consistentemente velocidades mayores de 2 m a 12 m.
- El método SASW estima consistentemente velocidades mayores de 12 m a 37 m.
- El método HV-SPR muestra tendencia a estimar velocidades menores en prácticamente todo el perfil de velocidades respecto a los métodos SASW y SPAC.
- En presencia de un alto nivel de actividad antropogenica los métodos SASW y HV-SPR presentan una resolución en la geometría del subsuelo con estratos del orden de 2 m, hasta una profundidad de 10 m.
- El método SPAC estimó una inversión de velocidad entre 15 m y 18 m, en un ambiente de alta actividad antropogenica.

#### V.3 SITIO CALLE SEGUNDA



Figura 75. Perfiles de velocidades de ondas de corte mediante los métodos SASW (líneas rojas), SPAC (líneas azules) y HV-SPR (líneas verdes) en el sitio Calle Segunda. Las sombras de colores muestran la variabilidad entre los tres métodos. La leyenda en la parte derecha, indica el rango de variación de la velocidad de ondas de corte entre los métodos. Los paréntesis indican la variabilidad entre los métodos. Las líneas moradas muestran el tipo de suelo a profundidad según IBC 2003.

Aplicando los métodos SASW, SPAC y HV-SPR se llego al perfil de velocidades de ondas de corte mostrada en la figura 75, se observó lo siguiente:

 Los métodos SASW, SPAC y HV-SPR caracterizan al suelo entre tipo D y E de 0 m a 9 m y entre tipo C y D de 9 m a 41 m de profundidad, según el IBC 2003.

- Con el modelado de las curvas de cocientes espectrales se estimó un amortiguamiento promedio del 4 % para este sitio.
- El método SPAC estima velocidades mayores de 5 m a 41 m.
- El método HV-SPR estima velocidades menores de 5 m a 41 m.
- El método SASW resuelve capas de menor espesor (de aproximadamente 2 m).
- Entre los método SASW, SPAC y HV-SPR se observó una variabilidad máxima del orden de 230 m/s, hasta una profundidad de 13 m y de hasta 410 m/s de entre 13 m y 41 m.
- Los método con menor variabilidad después de los 10 m de profundidad resultaron los métodos SASW (con fuente pasiva) y SPAC.

### V.4 SITIO EJIDO ZARAGOZA

Aplicando los métodos SASW y SPAC se llego al perfil de velocidades de ondas de corte mostrada en la figura 70 (solo con el método SASW) y se observó lo siguiente:

- El método SASW logra estimar inversiones de velocidad en estratos del orden de 2 m de espesor, con una profundidad de prospección del orden de 20 m con fuente activa en complemento con fuente pasiva.
- No fue posible determinar coeficientes de correlación con el método SPAC, posiblemente por encontrarse el sitio alejado de posibles fuentes antropogenicas.
- En base al algoritmo de fuerza bruta se interpretó que no fue posible encontrar ondas estacionarias con un periodo inferior a 2 segundos, motivo por el cual se piensa es el motivo de no lograr estimar coeficientes de correlación con el método SPAC.

#### **V.5 CONCLUSIONES Y DISCUSIONES GENERALES**

El método SASW claramente permite definir:

- Estratos de menor espesor respecto a los métodos SPAC y HV-SPR en los primeros 10 m de profundidad, por lo tanto el método SASW provee la mejor resolución aplicando una fuente activa.
- Las velocidades estimadas caen dentro de los valores máximos y mínimos obtenidos con SPAC y HV-SPR. El rango total de variabilidad es de 15 m/s en los primeros 8 m de profundidad. A profundidades mayores a los 8 m de profundidad la variabilidad muestra incrementos que alcanzan valores máximos de 220 m/s o más en el rango de profundidades de 18 a 40 m.
- Identifica estratos de baja velocidad.
- A partir de profundidades de aproximadamente 12 m, el método SASW tiene la tendencia a estima velocidades mayores a las obtenidas con SPAC y HV-SPR. Este comportamiento se observo en los sitios experimentales, exceptuando al sitio Campo Ángel.
- El procesamiento del ruido ambiental para curvas de fase con un comportamiento estable, permite obtener modelos similares al método SPAC a profundidades superiores a 12 m.
- Debido a no existir un criterio como la función de coherencia para el procesamiento del ruido ambiental, salvo la inspección de las curvas de fase, debe buscarse al menos dos distancias con curvas de dispersión similares entre sí, considerándose abierta la posibilidad de buscar un criterio para la discriminación de curvas de dispersión obtenidas por ruido ambiental.

El método SPAC observó que:

 Permite caracterizar la estructura a profundidades mayores respecto de los métodos SASW y HV-SPR. Muestra tendencia a estimar velocidades mayores que los otros métodos

- No se mostró necesario registrar ruido ambiental por más de 15 minutos, ya que con registros de 15 minutos se encontró que los coeficientes de correlación para el método SPAC en sus diferentes combinaciones de sensores centro-vértices son cuasi-equivalentes para distancias de separación entre sensores de 10 m y superiores.
- Se encontraron coeficientes de correlación diferentes entre las distintas combinaciones de sensores centro-vértice, para distancias inferiores a 10 m, de lo cual se interpreta de que los coeficientes de correlación se pueden ver afectados por el efecto de campo cercano.

El método HV-SPR observó lo siguiente:

- Muestra tendencia a estimar velocidades menores a las estimadas con los métodos SASW y SPAC.
- Potencialmente logra definir estratos de espesores pequeños en la parte somera en el sitio con un alto nivel de actividad antropogenica, más no es el caso para la parte profunda de la estructura.

La comparación general entre los métodos SASW, SPAC y HV-SPR se da en los siguientes puntos:

- En presencia de intensa actividad antropogenica, los métodos SASW y SPAC se pueden complementar para estimar las propiedades del suelo a profundidades del orden de 30 m, ya que el método SASW puede resolver capas de espesores más delgados que el método SPAC en una profundidad del orden de 10 m, y el método SPAC puede resolver inversiones de velocidad a profundidades superiores de 10 m.
- Por lo observado en el sitio Ejido Zaragoza, el método SPAC puede tener dificultades para obtener el modelo del subsuelo en ambientes con un bajo nivel de actividad antropogénica.

- El método SASW con fuente activa viene a complementar con mejor resolución la porción somera de la estructura si se utiliza en complemento a los métodos SPAC y HV-SPR.
- Se encuentra favorable la determinación del amortiguamiento, la densidad y la razón de Poisson mediante el modelado de cocientes espectrales por el método de matrices de rigidez, parámetros que se observaron mayormente sensitivos que la inversión utilizada de algoritmos genéticos, esto lleva a complementar con el método SASW a profundidades someras del orden de 10 m.
- Con la aplicación del algoritmo de fuerza bruta aplicado sobre los registros de ruido ambiental para encontrar fracciones de registro donde se encuentre una media y varianza con mínima variabilidad (por tanto máxima similitud estadística), mejora la estimación de las curvas de los coeficientes de correlación al obtener una mejor definición del comportamiento general de la curva y de la primera raíz. Lo que sugiere apoyar el fundamento del registro de ondas estacionarias del ruido ambiental, para el método SPAC.
- Se sugiere tratar al subsuelo como un sistema estratificado al momento de considerar el espectro de diseño de estructuras, donde la geometría y las propiedades de los materiales, indican una respuesta distinta, tanto en amplificación como en el período fundamental del suelo; en base a las diferencias de las curvas de los cocientes espectrales, aún cuando las propiedades generales del suelo fuesen similares en diferentes sitios. Este punto puede tener una importante repercusión en la interacción suelo-estructura.
- En complemento al punto anterior, un parámetro promedio como lo es la velocidad promedio de ondas de corte en los primeros 30 m de profundidad ( $V_s30$ ), no considera que pueda determinar acertadamente (en general) el tipo de suelo, ya que el suelo puede presentar anomalías puntuales tales como inversiones de velocidad, que pueden llevar a la licuefacción, así como distintos valores en el periodo fundamental de vibración en un sitio.

Abramowitz M. y Stegun I. A. 1972. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. Dover Publications. New York. 1046 pp.

Aki K. 1957. Space and time spectra of stationary schtocastic waves, with special reference to micrortemors. *Bulleting of the Earthquake Research Institute of Tokio University.* 35: 415-457 p.

Aki K. 1965. A note on the use of microseisms in determining the shallow structure of the Earth's crust. *Geophysics*. 30: 665-666 p.

Alfaro A., Goula X., Susagna T., Pujades L.G., Canas J.A. Navarro M. y Sánchez J. 1998. Estimación del Período Predominante del Suelo a Partir de Microtemblores. Aplicación a Barcelona. IX Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. Aguadulce Almería, España. 8 pp.

Anderson J. G., Lee Y., Zeng Y. y Day S. 1996. Control of strong motion by the upper 30 meters. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 86(6): 1749-1759 p.

Apostolidis P., Raptakis D., Roumelioti Z. y Pitilakis K. 2004. Determination of S-wave velocity structure using microtremors and spac method applied in Thessaloniki (Greece). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 24(1): 49-67 p.

Arfken G. B. y Weber, H. J. 2001. Mathematical Methods for Physicists. Fifth Edition. Academic Press. San Diego, California, U.S.A. 1112 pp.

Asten M. W. 1976. The use of microseism in geophysical exploration. Ph D. Thesis. Macquire University. Australia. 178 pp.

Asten M. W. y Henstridge J. D. 1984. Array estimates and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins. *Geophysics*. 49(11): 1828-1837 p.

Asten M. (2006). On bias and noise in passive seismic data from finite circular array data processed using SPAC methods. *Geophysics*. 71(6): 153-162 p.

Asten M. W. y Dhu T. 2004. Site response in the Botany area, Sydney, using microtremor array methods and equivalent linear site response modelling. Australian Earthquake Engineering in the New Millennium. *Proceedings of a conference of the Australian Earthquake Engineering Society*. Mt Gambier South Australia. 33.

Bath M. 1979. Introduction to Seismology. Birkhauser, Boston. 428 pp.

Beauchamp K. G. y Yuen C. K. 1979. Digital Methods for Signal Analysis. George Allen and Unwen. London. 334 pp.

Bennett K. 2005. Development of Testing Protocol and Correlations for Resilient Modulus of Subgrade Soils. University of Arkansas, Department of Civil Engineering. Final report MBTC - 2032. Arkansas State Highway and Transportation Department. 247 pp.

Boore D. M y Joyner W. B. 1997. Site amplification for generic rock sites. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 87(2): 327-341 p.

Borcherdt R. D. y Gibbs J. F. 1976. Effects of local geological conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and the intensities of the 1906 earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 66(2): 467-500 p.

Borcherdt R. D. y Glassmoyer G. 1992. On the characteristics of local geology and their influence on ground motions generated by the Loma Prieta earthquake in the San Francisco Bay region, California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 82(2): 603-641 p.

Borcherdt R. D. y Glassmoyer G. 1994. Influences of local geology on strong and weak ground motions recorded in the San Francisco Bay region and their implications for site-specific building-code provisions: in R. D. Borcherdt, Ed., The Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989. Strong Ground Motion. U.S. Geological Survey Professional Paper. 1551: 77-108 p.

Brown L. T. 1998. Comparison of Vs profiles from SASW and borehole measurements at strong motion sites in southern California. M.Sc. Eng. Thesis. University of Texas at Austin. 349 pp.

Brown L. T., Boore D. M. y Stokoe II. K. 2002. Comparison of Shear-Wave Slowness Profiles at 10 Strong-Motion Sites from Noninvasive SASW Measurements and Measurements Made in Boreholes. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 92(8): 3116-3133 p.

Burger H. R. 1992. Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface. Prentice Hall, Englewood Cliffs. 489 pp.

Chatelain J. L., Guillier B. F. C., Duval A. M., Bard K. A. P. Y. y The WP02 SESAME team. 2008. Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 6(1): 33-74 p.

Carver D. y Hartzell S.H. 1996. Earthquake site response in Santa Cruz, California. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 86(1): 55-65 p.

Chávez García F. J. y Cuenca J. 1998. Site effects and microzonation in Acapulco. *Earthquake Spectra*. 14(1): 75-93 p.

Chávez García F. J., Rodriguez M. y Stephenson W. R. 2005. An alternative approach to the SPAC analysis of microtremors: exploiting the stationarity of noise. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 95(1): 277-293 p.

Chávez García F. J., Rodriguez M. y Stephenson W.R. 2006. Subsoil Structure Using SPAC Measurements along a Line. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 96(2): 729-736 p.

Claprood M. y Asten M. W. 2009. Microtremor observations in Tamar valley, Launceston, Tasmania: evidence of 2D resonance from observed microtremor and numerical modelling. Extended Abstracts of the ASEG 20th Geophysical Conference and Exhibition. Adelaide.

Das B. M. 1992. Principles of Soil Dynamics. PWS-Kent Publishing Company, Boston. 592 pp.

Euroseismod. 1998. Development and experimental validation of advanced modeling techniques in engineering seismology and earthquake engineering. Final report, project ENV4-CT96-0255.

Field E. H., Jacob K. H. y Hough S. E. 1992. Earthquake site response estimation: a weakmotion case study. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 82(6): 2283-2306 p.

Flores Estrella H., Lomnitz C. y Yussim S. 2004. Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtremores con el método SPAC. *GEOS*. 24(3): 438-445 p.

Foinquinos R. 1995. Dynamic Nondestructive Testing of Pavements. Report GR 95-4. Civil Engineering Department. The University of Texas at Austin.

Foti S. 2000. Multistation Methods for Geotechnical Characterization using Surface Waves. PhD Dissertation. Politecnico di Torino. Italy. 229 pp.

Fumal T. E. y Tynsley, J. D. 1985. Mapping shear-wave velocities of near- surface geologic materials. Evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region. U.S. Geological Survey Professional paper. 1360: 127-149 p.

Ganji V., Gucunski N. y Nazarian S. 1998. Automated inversion procedure for spectral analysis of surface waves. J Geotech and Geoenv. Eng. 124(8): 757-770 p.

Gazetas G. 1991. Foundation Vibrations: Foundation Engineering Handbook. 2nd Edition. Hsai-Yang Fang, and Editor. 553-593 p.

Gibbs J. F., Fumal T. E. Boore D. M. y Joyner W. B. 1992. Seismic velocities and geologic logs from borehole measurements at seven strong motion stations that recorded the 1989 Loma Prieta earthquake. Open-File Report 92-287. *U.S. Geological Survey*. Menlo Park, California.139 pp.

Gibbs J. F., Fumal T. E. y Powers T. J. 1993. Seismic velocities and geologic logs from borehole measurements at eight strong-motion stations that recorded the 1989 Loma Prieta, California, earthquake.Open-File Report 93-376. U.S. Geological Survey, Menlo Park. California. 119 pp.

Gitterman Y., Zaslavsky Y., Shapira A. y Shtivelman V. 1996. Empirical site response evaluations: Case studies in Israel. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 15(7): 447-463 p.

Goldberg D. E. 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts. 403 pp.

Graff K. F. 1975. Wave Motion in Elastic Solids. Dover, New York. 682 pp.

Guillier B., Atakan K., Chatelain J.L, Havskov J., Ohrnberger M., Cara F, Duval A.M., Zacharopoulos S., Teves Costa P., Accera C., Alguacil G., Azzara R., Bard P.Y, Blarel F., Borges A., Grandison M., Rao S., Theodulidis N., Tvedt E., Utheim T., Vidal S., Vollmer D. 2008. Influence of instruments on the H/V spectral ratios of ambient vibrations. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 6(1): 3-31 p.

Gutenberg B. 1931. Microseisms in North America. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 21(1): 1-24 p.

Gutemberg B. 1957. Effects of ground on earthquake motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 47(3): 221-250 p.

Haghshenas E. P., Bard Y., Theodulidis N. y SESAME WP04 Team. 2008. Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 6(1): 75-108 p.

Hartzell S., Carver D., Seiji T. y Herrmann R. 2005. Shallow shear-wave velocity measurements in the Santa Clara Valley; comparison of SPAC and FK methods. http://pubs.usgs.gov/of/2005/1169/

Haskell N. A. 1953. The dispersion of surface waves on multilayered media. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 43(1): 17-34 p.

Heath K. Louie J. N. Biasi G., Pancha A. y Pullammanappallil S. 2006. Blind test of refraction microtremor analysis against synthetics and borehole data. SSA Meeting: 100th Anniversary Earthquake Conference, Commemorating The 1906 San Francisco Earthquake. 10 pp.

Heisey J.S., Stokoe K.H. II, Meyer A.H. 1982. Moduli of pavement systems from spectral analysis of surface waves. *Transport Research Record*. Washington D.C. 852: 22-31 p.

Henstridge J.D. 1979. A signal processing method for circular array. *Geophysics*. 44(2): 179-184 p.

Herrmann R. B. 1973. Some aspects of band-pass filtering of surface waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 63(2): 663-671 p.

Herrmann R. B y C. J. Ammon. 2004. Computer Programs in Seismology version 3.20: Surface Waves, Receiver Functions, and Crustal Structure, St. Louis University, Missouri.

Hisada Y. 1994. An efficient method for computing Green's functions for a layered halfspace with sources and receivers at close depth. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 84(5): 1456-1472 p.

Holland J. H. 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor MI. The University of Michigan Press. 211 pp.

Horike M. 1985. Inversion of phase velocity of long-period microtremors to the S-wave velocity structure down to the basement in urbanized areas. *Journal of Physics of the Earth*. 33: 59-96 p.

Huang M.W., Wang J.H, Kuo-Fong Ma, Wang C.Y., Hung, J. H. y Wen K. L. 2007. Frequency-Dependent Site Amplifications with f \_ 0.01 Hz Evaluated from Velocity and Density Models in Central Taiwan. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 97(2): 624-637 p.

Huerta López C. I., Pulliam J., Nakamura Y. y Yates B. 2001. Modeling amplification effects of marine sedimentary layers via horizontal/vertical spectral ratios. *Society of Exploration Geophysicist*. Proceedings of the 71st SEG meeting. 1: 825-828 p.

Huerta Lopez Carlos Isidro, Jay Pulliam, Kenneth H. Stokoe, José M. Roesset, Celestino Valle Molina. 2003. Spectral characteristics of earthquakes recorded on the Gulf of México seafloor and modeling of soft marine sediments. *Proceedings of the 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. Del 08 al 13 de junio. Cancún, Quintana Roo. 1-9 p.

Huerta López C. I., Stokoe K. H., Pulliam J., Roësset J. M. y Valle Molina C. 2005. Modeling of seafloor soft marine sediments and spectral characteristics of earthquakes recorded on the Gulf of México. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. *American Society of Mechanical Engineers*. ASME (ISSN 0892-7219). 127(1): 59-67 p.

IIGSA. 2007. Estudio geotécnico para la revisión del diseño de la cimentación de un edificio a construirse dentro del proyecto Puerto Salina en el km 63 de la autopista Tijuana Ensenada, estado de Baja California. Informe: 2006-213. 25 pp.

INEGI. Cartas de geología superficial. Escala 1:50000. Cartas: H11B12, I11D82-C y I11D81-C.

Japan Road Association. 2002. Specification for highway bridges. Part V seismic design. http://www.road.or.jp/english/index.html

Jarpe S. P., Hutchings, L. J., Hauk, T. F., y Shakal, A. F. 1989. Selected strong and weakmotion data from the Loma Prieta Sequence. *Seismological Research Letters*. 60: 167-176 p.

Joyner W. B., Warrick R. E. y Fumal T. E. 1981. The effect of Quaternary alluvium on strong ground motion in the Coyote Lake, California, earthquake of 1979. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 71(4): 1333-1349 p.

Kausel E. y J. M. Roesset. 1981. Stiffness matrices for layered soils. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 71(6): 1743-1761 p.

Kramer S. L. 1996. Geotechnical earthquake engineering. Prentice Hall, U. S A. 653 pp.

Konno K. y T. Ohmachi. 1998. Ground motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremors. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 88(1): 228-241p.

Kudo K., Kanno T., Okada H., Ozel O., Erdik M., Sasatani T., Higashi S., Takahashi M. y Yoshida K. 2002. Site- specific issues for strong ground motions during the Kocaeli, Turkey, earthquake of 17 August 1999, as inferred from array observations of microtremors and aftershocks. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 92 (1): 448-465 p.

Kurian N. P. 2006. Design of foundation systems, Principles and practices. Alpha Science. Third edition. Harrow, U. K. ISBN: 1-84265-127-7. 830 pp.

Lachet C. y Bard P. 1994. Numerical and theorical investigations on the possibilities and limitations of the "Nakamura's" technique. *Journal of Physics of the Earth (Japan)*. 44: 377-397 p.

Lai C. G. y Rix G. J. (1998). Simultaneous inversion of Rayleigh phase velocity and attenuation for near-surface site characterization. Research Report. *National Science Foundation and U.S. Geological Survey*. Georgia Institute of Technology. 258 pp.

Lay T. y Wallace T.C. 1995. Modern global seismology. Academic Press, San Diego, Cal. 521 pp.

Linares Montenegro, Giselle Mercedes. 2005. Introducción y aplicación del método de sísmica de microtremores en áreas urbanas. Tesis de licenciatura: Ingeniería Geofísica. Universidad de Simón Bolivar. 105 pp.

Liu H. P., Boore D. M., Joyner W. B., Oppenheimer D. H., Warrick R. E., Zhang W., Hamilton J. C. y Brown L.T. 2000. Comparison of phase velocities from array measurements of Rayleigh waves associated with microtremor and results calculated from borehole shear wave velocity profiles. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 90(3): 666-678 p.

Louie J. N. 2001. Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremors arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 91(2): 347-364 p.

Luna R. y Jadi H. 2000. Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods. Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure. St. Louis. 15 pp.

Malovichko A. A., Molovichko D. A., Shylakov D.Y., Butirin P. G. y Anderson N. L. 2006. Estimation of near surface shear wave velocities by SASW method in southeast Missouri. Mining Institute, Ural Branch, Russian Academy of Sciences and Department of Geology and Geophysics. University of Missouri-Rolla. 11 pp.

Marven C. y Ewers G. 1996. A Simple Approach to Digital Signal Processing. John Wiley and Sons, Inc. New York. 233 pp.

Mavko G., Mukerji T., y Dvorkin J. 2003. The Rock Physics Handbook. Cambridge University Press (paperback). 325 pp.

Menke W. 1984. Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory. Academic Press. 260 pp.

Miller G. F. y Pursey H. 1955. On the partition of energy between elastic waves in a semiinfinite solid. *Proceedings of the Royal Society*. Series A. 233: 55-69 p. Mok Y. J., Sánchez-Salinero I., Stokoe, K. H. y Roesset J. M. 1988. In situ damping measurements by Cross-Hole seismic method. *Proceedings of the American Society of Civil Engineering*. Special conference in earthquake engineering and soil dynamics. 305-320 p.

Mucciarelli M. 1998. Reliability and applicability of Nakamura's technique using microtremors: an experimental approach. *Journal of Earthquake Engineering*. 2(4): 625-638 p.

Nakamura Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*. 30(1): 25-33 p.

Nazarian S. 1984. In Situ Determination of Elastic Moduli of Soil Deposits and Pavement System by Spectral-Analysis-of-Surface-Wave Method. Ph. D. Dissertation, The University of Texas at Austin. Austin, Texas. 458 pp.

Nazarian S. y Stokoe K. H., II. 1986. In situ determination of elastic module of pavement systems by spectral-analysis-of-surface-waves method: (theoretical aspects). Nondestructive measurement of thickness and elastic stiffness of pavement layers, report 437-2. I.T.S. library U.C. Berkeley, Austin, Texas. 161 pp.

Nazarian S. y Desai M. R. 1993. Automated Surface Wave Method: Inversion Technique. *Journal of Geotechnical Engineering*. 119(7): 1094-1111 p.

Nakamura Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*. 30(1): 25-30 p.

Noguchi T. y Nishida R. 2002. Determination of Subsurface Structure of Tottori Plain Using Microtremors and Gravity Anomaly. *Journal of Natural Disaster Science*. 24(1): 1-13 p.

Okada H. 2006. Theory of efficient array observations of microtremors with special reference to the SPAC method. *Exploration Geophysics*. 37(1): 73-84 p.

Oppenheim A. V. y Schafer R. W. 1975. Digital signal processing. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, New Jersey. 556 pp.

Ohta Y. y Goto N. 1978. Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristics soil indexes. *Earthquake Engineering and Structure Dynamics*. 6(2): 167-187 p.

Pezeshk S. y Zarrabi M. 2005. A new inversion procedure for spectral analysis of surface waves using a genetic algorithm. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 95(5): 1801-1808 p.

Pérez Marcial Elvin J. 2005. Ground response spectra at surface for Mayagüez considering in-situ soil dynamic properties. M.S. thesis in civil engineering. University of Puerto Rico, Mayagüez campus. 151 pp.

Pullammanappallil S., Honjas B., Louie J., Siemens J. A. y Miura H. 2003. Comparative Study of the Refraction Microtremor (ReMi) Method: Using Seismic noise and standard P-wave refraction equipment for deriving 1-D S-wave profiles. 6th International SEG-J Conference. Tokyo, Japan.

Raptakis D., Theodulidis N. y Pitilakis K. 1998. Standard spectral ratio and horizontal to vertical ratio techniques: data analysis of the Euroseistest strong motion array in Volvi-Thessaloniki (Greece). *Earthquake Spectra*. 14(1): 203-224 p.

Richart F. E. Jr., Wood R. D. y Hall J. R. Jr. 1970. Vibration of Soils and Foundations. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, New Jersey. 401 pp.

Rix G. J., Stokoe K. H. II y Roesset J. M. 1991. Experimental study of factors affecting the spectral analysis of surface waves method. Research Report 1123-5. Center for Transportation Research. The University of Austin Texas. 180 pp.

Rix G. J. y Lai. C. G. 1999. MATLAB forward solution, Free Computer Programs on the Website of Civil Engineering Department. Georgia Institute of Technology. http://www.ce.gatech.edu/\_grix/surface\_wave.html.

Roberts J. y Asten M. (2004). Resolving a velocity inversion at the geotechnical scale using the microtremor (passive seismic) survey method. *Exploration Geophysics*. 35(1): 14-18 p.

Roberts J. y Asten M. 2006. Investigation of near-source in array-based (SPAC) microtremor surveys. Earthquake Engineering in Australia: Conference 2006. Kevin McCue and Sonja Lenz (editors). *Australian Earthquake Engineering Society*. Canberra, Au. 251-256 p.

Roberts J. y Asten M. W., 2008, A study of near source effects in array-based (SPAC) microtremor surveys. *Geophysical Journal International*. 174(1): 159-177 p.

Sadiku N. O. Matthew. 2006. Elementos de electromagnetismo. Editorial Alfaomega. Tercera edición. Mexico D.F. 767 pp.

Sánchez Salinero I., Rosset J. M., Shao K. Y., Stokoe II K. H. y Rix G. J. 1987. Analytical evaluation of variables affecting surface wave testing of pavements. *Transport Research Record*. 1136: 86-95 p.

SESAME European research project WP12. 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibration: measurements processing and interpretation. Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME. 62 pp.

Shapira A., Feldman L., Zaslavsky Y. y Malitzky A. 2001. Application of a stochastic method for the development of earthquake damage scenarios: Eilat, Israel test case. *Computational Seismology*. 32: 58-73 p.

Stokoe K. H., Nazarian S., Rix G. J., Sánchez Salinero I., Sheu J. C. y Mok Y. J. 1988. In situ seismic testing of hard to sample soils by surface wave method. Proceedings. Earthquake Engineering and Soil dynamics II. Recent Advances in Ground Motion Evaluation. J.L Thun (editor). *ASCE Geotechnical Special Publication*. Park City, Utah. 20: 305-320 p.

Taber J. J. y Smith E. G. C. 1992. Frequency dependent amplification of weak ground motions in Porirua and Lower Hutt, New Zealand. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*. 25(4): 303-331 p.

Tarantola A. y Valette B. 1982. Generalized nonlinear inverse problems solved using the least squares criterion. *Reviews of Geophysics and Space Physics*. 20(2): 219-232 p.

Theodulidis N. P., Bard P. Y., Archuleta R. y Buchon M. 1996. Horizontal to vertical spectral ratio and geological conditions: the case of Garner Valley Downhole Array in Southern California. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 86(2): 306-319 p.

Thomson W. T. 1950. Transmission of elastic waves through a stratified soil medium. *Journal of Applied Physics*. 21(1): 89-93 p.

Thorson J. R., y Claerbout, J. F. 1985. Velocity-strack and slant-stack stochastic inversión. *Geophysics*. 50: 2727-2741 p.

Tokimatsu K. 1995. Geotechnical Site Characterization Using Surface Waves, *Proceedings. First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering.* 3: 1333-1368 p.

Tokimatsu K. 1997. Geotechnical site characterization using surface waves. Earthquake Geotechnical Engineering: Proceedings IS-Tokyo 95. Edited by K. Ishihara. *The First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*. 1333-1368 p.

Wathelet M., Jongmans D., Ohrnberger M. y Bonnefoy-Claudet S. 2008. Array performances for ambient vibrations on a shallow structure and consequences over Vs inversion. *Journal of Seismology*. 12(1): 19 pp.

Woods R. D. 1978. Measurement of Dynamic Soil Properties, State of the Art Report: Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference. Earthquake Engineering and Soil Dynamics. Pasadena, CA. 1: 91-178 p.

Woods R. D. 1994. Borehole Methods in Shallow Seismic Exploration: Geophysical Characterization of Sites.Volume prepared by ISSMFE. Technical Committee # 10. XIII ICSMFE. Richard Woods Ed. New Delhi, India. 91-100 p.

Yuan D. y Nazarian S. 1991. Rapid Determination of Layer Properties of Pavements from Surface Wave Method. *Transportation Research Record*. 1377: 159-166 p. Yuan, D. y S. Nazarian. 1993. Automated surface wave method: inversion technique. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE. 119(7): 1112-1126 p.

Zaslavsky Y., Shapira A., Arzi A. 2000. Amplification effects from earthquakes and ambient noise in the Dead Sea rift (Israel). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 20(1-4): 187-207 p.

Zaslavsky Y. Shapira, A. y Leonov J. 2003. Empirical evaluation of site effects by means of H/V spectral ratios at the locations of strong motion accelerometers in Israel. Journal of Earthquake Engineering. 7(4): 655-677 p.

Zaslavsky Y., Gorstein M., Kalmanovich M., Giller D. y Peled U. 2004. Experimental study of site effects and local seismic hazard assessment for the Carmel Olefins area. Haifa, GII Report No 547/037/04.

Zywicki D. J. y Rix G. J. 1999. Frequency-wavenumber analysis of passive surface waves. *Proceeding of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. 75-84 p.

## ONDAS Y PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES Y SISTEMAS

#### A.1 ASPECTOS GENERALES DE LAS ONDAS

Una onda es una perturbación que se propaga en un medio. El medio perturbado puede ser de naturaleza diversa como aire, agua, el espacio o el vacío. En este trabajo se consideraran solamente ondas sísmicas y las propiedades que poseen al viajar a través de un medio solido, como lo es el suelo, las rocas, el asfalto, el concreto, entre otros.

A fin de describir los tipos de ondas sísmicas, es necesario primero definir el medio por el cual pueden viajar. Como primera definición consideramos el espacio, que es el medio extendido en todas direcciones con propiedades constantes.

El semiespacio es definido como un medio que se extiende infinitamente en dos direcciones y que se encuentra con una superficie libre en una tercera dirección. Un espacio o semiespacio puede considerarse ideal si las propiedades de los materiales obedecen la teoría de la elasticidad. El termino espacio o semiespacio será utilizado para describir un medio isotrópico, consistente de múltiples capas, donde cada una de las capas será considerada lateralmente homogénea (ver figura 1).

Considérese una onda sísmica viajando en el espacio físico, que se propaga esféricamente a partir de su origen, por el hecho de que el medio es homogéneo en todas las direcciones, y se propaga a lo largo del tiempo alejándose de la fuente, a ese frente esférico se le llama, frente de onda. Al vector normal al frente de onda se le conoce como rayo. El rayo indica la dirección de propagación del frente de onda (Burger, 1992).

Se discutirá frecuentemente en este trabajo, parámetros que poseen las ondas periódicas y con forma sinusoidal, como lo son la longitud de onda ( $\lambda$ ), la longitud de onda se define como la distancia entre dos puntos sucesivos situados en la misma fase de un movimiento ondulatorio.

La amplitud (A) es el desplazamiento máximo que sufre una partícula, resultado del paso de la onda por un material (Burger, 1992). El periodo (T, en segundos en el Sistema Internacional) es el tiempo que le toma a la onda para viajar una longitud de onda. La frecuencia (F, en Hertzios o ciclos por segundo) es un parámetro que describe el número de periodos (ciclos) que ocurren en un segundo. Su relación con el periodo está dada por la ecuación 34.

$$F = 1/T \tag{34}$$

Tomando en cuenta las definiciones antes descritas, existe una ecuación de suma importancia (ecuación 35) para los métodos SASW y SPAC, ya que al saber la frecuencia (f) y longitud de onda ( $\lambda$ ), permite calcular la velocidad (V) de propagación de onda en un medio elástico:

$$V = f\lambda \tag{35}$$

# A.2 ONDAS SÍSMICAS

Partiendo del fundamento matemático de la teoría de elasticidad, se pueden derivar las ecuaciones de movimiento para dos tipos principales de ondas, las cuales pueden existir en el espacio debido a un mecanismo que perturbe al espacio en algún punto. La derivación de estas ecuaciones no se encuentra contemplada para el propósito de esta tesis, pero el lector puede consultar a Graff (1975) para mayor información sobre este tema. Los resultados obtenidos de esta derivación muestran que cada tipo de ondas tienen un movimiento de partícula muy específico, así como su velocidad de propagación asociado a estos movimientos.

El primer tipo de ondas a considerar se transmite por las partículas del medio que oscilan alternadamente comprimiendose y dilatándose (ver figura 76) en la dirección de la propagación; a este tipo de ondas son llamadas ondas P (también llamadas ondas primarias, compresionales, longitudinales o volumétricas), estas viajan a una velocidad mayor que el resto de las ondas (serán descritas enseguida) y porque aparecen primero en los registros sísmicos (Bath, 1979). Estas ondas también son llamadas ondas irrotacionales, ya que el movimiento de partícula solo ocurre en la dirección de propagación por la cual viajan (Graff, 1975).



Figura 76. Esquema de la propagación de las ondas P. Modificado de Bennett (2005).

Las ondas P se transmiten por cualquier medio (no vacío donde existan moléculas), tales como gases, líquidos y sólidos. A las ondas P que viajan en gas o líquidos, se les llaman ondas acústicas.

Existe un segundo tipo de ondas sísmicas que se propagan en un espacio elástico, con un movimiento de partícula; las cuales ocurren en un plano perpendicular a la dirección de su propagación. Este tipo de ondas viaja a una velocidad menor que las ondas P, y es la razón del porque se llaman ondas secundarias, ondas S, u ondas de corte (Lay y Wallace, 1995). En ocasiones las ondas S son llamadas también ondas transversales o rotacionales (ver figura 77).



Figura 77. Esquema de la propagación de las ondas S. Modificado de Bennett (2005).

Ya que el movimiento de las ondas S es perpendicular a la dirección de su propagación, es conveniente descomponerlas en sus componentes horizontal y vertical (relativo a la superficie) llamadas ondas SH y ondas SV, respectivamente (Lay y Wallace, 1995).

Es importante mencionar que las ondas S solo se transmiten en medios materiales que tengan rigidez al esfuerzo cortante. Las ondas S no se transmiten en gases o líquidos (bajo circunstancias normales).

#### A.3 ONDAS SUPERFICIALES

La teoría de elasticidad prueba la existencia de otro tipo de ondas, al introducir la frontera de la superficie libre al espacio. Este tipo de ondas son llamadas ondas Rayleigh y se deben a la interacción entre las ondas P y las S, y el movimiento de cada partícula de la superficie del terreno al paso de la onda, así como su velocidad de propagación. Las ondas Rayleigh viajan a una velocidad inferior a las ondas sísmicas que participan en su formación, y arriban ligeramente después de las ondas de corte en un registro sísmico (Bath, 1979).

Existe una relación entre la velocidad de propagación de las ondas Rayleigh y las ondas de corte, la cual es de suma importancia para los métodos que analiza este trabajo.

Las ondas Rayleigh se originan por una interacción de las ondas P y S en la frontera de la superficie libre en el semiespacio (Graff, 1975) y solo viajarán en la superficie, cerca de la frontera de la superficie libre donde son generadas. Las ondas Rayleigh hacen que las partículas del medio se desplacen solo en el plano vertical, donde la componente horizontal y vertical, tienen una de otra un desfase de 90 grados, que aunque ambas componentes viajan a una misma velocidad, éstas son atenuadas bajo diferentes funciones potenciales con respecto a la profundidad. Así, la componente vertical tiene un desplazamiento mayor que su componente horizontal en la frontera de la superficie libre, lo que causa que el movimiento de partícula sea de tipo elíptico retrogrado. Sin embargo, la dirección de la

partícula cambia a un movimiento progrado a una profundidad de aproximadamente <sup>1</sup>/<sub>2</sub> de la longitud de onda, debido a su diferencia del grado de atenuación de sus componentes (Foti, 2000). La figura 6 muestra las componentes vertical y horizontal de la onda Rayleigh en función de la profundidad.



Figura 78. Amplitud de la onda Rayleigh en función de la profundidad para varios valores de la razón de Poisson v. Modificado de Richart et al. (1970).

El que la amplitud del desplazamiento de las componentes decaiga exponencialmente respecto de la profundidad es una propiedad de las ondas Rayleigh que hay que considerar al aplicar los métodos SASW y SPAC. La figura 78 muestra que la mayor parte del movimiento de partícula asociado con las ondas Rayleigh se encuentra a profundidades inferiores a un medio de la longitud de onda. En la práctica, lo anterior significa que las propiedades del medio por debajo de la zona en la que las ondas Rayleigh viajan a través del medio, no tienen ninguna repercusión en el comportamiento de este tipo de onda (Nazarian, 1984). Por otro lado, las ondas Love se originan en la interface de dos medios (capas o estratos) con propiedades mecánicas diferentes (funcionando como una guía de onda). El movimiento de las partículas es perpendicular a la dirección de propagación de la perturbación, análogo a las ondas S, pero solo aparecen en el plano de la superficie terrestre, su velocidad de propagación tiende a ser ligeramente menor al de las ondas de corte, pero ligeramente mayor a las ondas Rayleigh. En la figura 79 se muestra el movimiento de partícula asociado a las ondas Rayleigh y Love, respectivamente.



Figura 79. Esquema de la propagación de las ondas Rayleigh (izquierda) y ondas Love (derecha). Modificado de Bennett (2005).

Hasta este punto, se ha referido como movimiento de partícula, al movimiento relativo que se observaría entre las moléculas (puntos referenciales) del medio por el cual pasa la energía de la onda mecánica.

### A.4 PROCESAMIENTO DE SEÑALES

El procesamiento de señales involucra el análisis, interpretación y manipulación de series de tiempo provenientes de todo un campo de fenómenos físicos. Una señal puede ser definida como una representación analógica o digital de cantidades físicas que varían con el tiempo o en espacio.

Las señales de interés para los métodos SASW, SPAC y HV-SPR, son generadas por el movimiento de partícula que ocurre por el paso de las ondas sísmicas, las cuales son transformadas en una señal eléctrica por medio de transductores, principalmente por transductores de velocidad o aceleración.

En esta sección se discuten aspectos del procesamiento de señales que son necesarios para adquirir y analizar apropiadamente la señal recolectada mediante los métodos SASW, SPAC y HV-SPR.

## A.5 ANÁLISIS DE FOURIER

El análisis de Fourier permite descomponer cualquier señal (forma de onda) en una serie de ondas armónicas de diferentes frecuencias (ver figura 80). La figura 80a muestra la descomposición de una forma de onda en dos ondas sinusoidales (en el dominio del tiempo). La figura 80b, es una vista tridimensional de la descomposición de una onda, donde es mostrado que estas dos ondas sinusoidales poseen diferentes frecuencias. Una perspectiva más para analizar una onda es mediante la asignación de amplitudes a las armónicas obtenidas en la descomposición de Fourier, lo cual se conoce como espectro de amplitud (figura 80c), que es de especial interés en las metodologías de esta tesis.


Figura 80. Representación de una forma de onda y sus componentes. (a) Representación de una forma de onda en el dominio del tiempo. (b) Representación tridimensional de las ondas. (c) Representación de las ondas en el dominio de frecuencias. Modificada de Benett (2005).

La transformada de Fourier se representa matemáticamente mediante la integral de Fourier (ecuación 36), que permite hacer una transformación o cambio de dominio, del tiempo a la frecuencia:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-jft} dt$$
(36)

La integral de Fourier es una herramienta muy importante, ya que permite escribir una función del tiempo, en función de las frecuencias; esta función será una función compleja, donde puede ser representada mediante magnitud y fase (argumento de la función). Sin embargo, la ecuación 31 se encuentra evaluada en un dominio infinito, y dado que las computadoras manejan la información finita, la ecuación se puede reescribir mediante una nueva función de aproximación, llamada transformada discreta de Fourier, la cual realiza una integración numérica para un número finito de muestras, quedando ésta de la forma de la ecuación 37.

$$X(m\Delta f) \cong \sum_{n=0}^{n-1} x(n\Delta t) e^{-j2\pi m\Delta f n\Delta t}$$
(37)

donde:

 $\Delta t$ : es el intervalo de muestreo, n : es el número de muestras, m= 0, 1, 2,....

Los métodos HV-SPR, SASW y SPAC hacen uso de la transformada discreta de Fourier (TDF) para analizar las señales requeridas.

Es conveniente mencionar que para optimizar el tiempo de cálculo de la TDF se elige un valor "n" en potencias de dos, lo que permite utilizar un algoritmo llamado transformada rápida de Fourier, que agiliza el cómputo de la transformada.

## A.6 CONVERSIÓN ANALÓGICA-DIGITAL

Las señales de entrada para el análisis mediante de los métodos SASW, SPAC o HV-SPR, se obtienen mediante transductores que registran ondas sísmicas y producen un voltaje en forma continua (analógica). También se ha establecido que para analizar las señales (utilizando un ordenador), deben discretizarse en un número finito de puntos, proceso llamado conversión analógica a digital.

Para obtener los puntos discretizados es necesario muestrear la señal continua. El muestreo se realiza tomando mediciones instantáneas de la señal a intervalos iguales de tiempo, pero el proceso de digitalización no se realiza a discreción, se deben tomar algunas consideraciones de vital importancia para obtener una señal representativa de la señal continua, en términos del tipo de información que se pretende obtener al aplicar diferentes

metodologías, tales como las que comprende esta tesis y evitar errores típicos en la adquisición y el procesamiento digital de señales, tales como: aliasing, la cuantización, leakage y resolución.

El aliasing se produce por un principio de conservación de la energía: la información contenida en la señal analógica en frecuencias mayores que la frecuencia de Nyquist ( $F_n$ ) no se pierde, sino que se infiltra en el rango de frecuencias de cero a  $F_n$ , contaminando de esa manera la información útil y dejando inservible la señal discreta. Matemáticamente es imposible eliminar el fenómeno del alias, pero es posible aminorar o eliminar su efecto de contaminación, mediante la cancelación de la energía situada más allá de  $F_n$  con un filtro pasa bajas, antes de realizar la discretización.

En base al teorema de Nyquist la ecuación 37 queda reescrita como la ecuación 38.

$$X(m\Delta f) \approx \sum_{n=0}^{n-1} x(n\Delta t) e^{-j2\pi m\Delta f n\Delta t},$$
(38)

donde:

 $f_n = 2f_i,$ 

 $f_n$ : Es la frecuencia de muestreo de Nyquist (frecuencia de muestreo mínima requerida).  $f_{max}$ : Es la frecuencia máxima requerida. Para asegurar estar en un rango de frecuencias menor al que solicita el criterio de Nyquist, se suele aplicar un filtro pasa bajas, como lo ejemplifica la figura 81, donde la banda de transición dependerá de la tecnología aplicada en el equipo de adquisición.



Figura 81. Filtro pasa bajas (Antialias), a) filtro ideal, b) filtro real.

El factor de cuantización consiste en el error de representatividad de la amplitud de la señal discreta, debido a lo finito de la resolución de la aritmética empleada en el dispositivo de discretización y almacenamiento. Esto es similar al error de redondeo o truncamiento que se produce en el familiar sistema numérico decimal con un número finito de cifras significativas. La única manera de aminorar su efecto es mediante la elección de un equipo de discretización y almacenamiento con un número suficientemente elevado de bits (Marven y Ewers, 1996). Muchos sistemas de adquisición de señales utilizan al menos unos 10 a 16 bits, valores que suelen ser suficientes para propósitos generales.

Por último, se encuentra el proceso del ventaneo y el "leakage" (fuga), que aunque no es un mecanismo de conversión analógico digital, es importante describirse para poder modelar la(s) señal(es) adquirida(s). Cuando se efectúa la transformada discreta de Fourier en una serie de tiempo que no es periódica, el fenómeno de fuga aparece, el cual ocasionará una distorsión en el dominio de las frecuencias.

El fenómeno de fuga (leakage) se define como una traslación de energía de las frecuencias presentes en la señal de entrada a frecuencias vecinas (Foti, 2000).

El leakage puede introducir información falsa a frecuencias altas para compensar cambios bruscos del principio y fin de la serie de tiempo.

Para resolver el problema del leakage, se aplica un proceso llamado ventaneo, que consiste en forzar a la serie de tiempo en convertirse periódica, al asignar un peso a la serie de tiempo, de tal manera que se desvanezca en las orillas en forma suave. Existen diversas funciones peso. Un ejemplo de una función peso aplicable a una serie de tiempo es la función (ventana) Hanning (ver figura 82) aplicada en el dominio del tiempo, la cual es una de las funciones mayormente socorridas por las metodologías aplicadas en esta tesis, ya que este tipo de ventana puede ser utilizada para corregir un transciente (deseable) inmerso en ruido.



Figura 82. Ejemplo de la gráfica de la función de peso (Hanning), para una cierta cantidad de muestras.

Las señales utilizadas para los métodos SASW, SPAC y HV-SPR, contienen transientes, por lo que se hará referencia a esta sección en el momento de adentrarse en el procesado de estas metodologías.

## A.7 ANÁLISIS ESPECTRAL

Se discutió desde el punto de vista del registro de una sola señal en el dominio del tiempo, y después transformada en el dominio de las frecuencias, mediante el análisis de Fourier.

Debido a la naturaleza estocástica de las señales físicas (incluidas las señales empleadas en los métodos SASW, SPAC y HV-SPR) es necesario obtener promedios con el fin de obtener información estable y extraer información significativa en la interpretación de las señales (Beauchamp y Yuen, 1979). También es necesario investigar las similitudes entre las señales, empleando métodos estadísticos a un sistema de dos puertos.

El análisis espectral es el nombre dado a un conjunto de métodos estadísticos empleados para analizar las señales en el dominio de las frecuencias.

El siguiente apartado está dedicado al análisis de un sistema, donde su revisión se realizará de forma general en las siguientes subsecciones, ya que servirá de base para su aplicación en los diferentes métodos de esta tesis.

### A.8 ANÁLISIS DE UN SISTEMA

El análisis de un sistema es el proceso por el cual se determina la respuesta de un sistema dada una señal de entrada. El análisis de un sistema de dos puertos evalúa el comportamiento de un sistema al monitorear su respuesta que ocurre en la salida del sistema respecto del puerto de entrada. Si adicionalmente se considera una condición de linealidad en el análisis del sistema, entonces se podrá considerar el principio de superposición. Con esto se puede decir que un sistema lineal es la suma de las respuestas de cada componente de su entrada.

El párrafo anterior se puede interpretar análogamente al aplicar los métodos SASW, SPAC y HV-SPR.

En particular, los métodos SASW, SPAC y HV-SPR tienen como sistema el suelo, una perturbación sísmica (ondas sísmicas) es el puerto de entrada y la señal registrada por los transductores son el puerto de salida. El análisis del sistema (suelo) con estas metodologías es realizado comparando las señales registradas en dos o más transductores. El suelo será considerado un sistema lineal, debido al nivel de deformación que se pretende estar trabajando (rango lineal), se considerará el principio de superposición.

El suelo puede ser esquematizado como el sistema de la figura 83, en el cual se considera la presencia de ruido de fondo.

El promedio de los espectros de las señales de entrada será empleado para extraerle información relevante (cuasi-determinística) y así minimizar el efecto de información aleatoria no relevante. En el caso del uso de transcientes inducidas por impactos, se pretende minimizar el efecto del ruido inmerso en las señales de entrada, mediante el promediado de los espectros (Nazarian, 1984).





n': Salida ocacionada por el ruido de entrada m: Ruido presente en la salida u = y+n: Entrada y = x+n+m: Salida

Figura 83. Modelo de un sistema lineal ideal (a), Modelo de un sistema lineal real (b).

#### A.9 ESPECTRO LINEAL

La información básica extraíble en el análisis espectral es mediante el espectro lineal de una señal de entrada, de salida, o ambas. El espectro lineal es la transformada de Fourier de una señal, llamada espectro lineal, debido a que cada componente de frecuencia es representada como una línea en el dominio de las frecuencias. El espectro lineal de una señal x(t) es denotada usualmente por  $S_x(f)$  y está definido por la ecuación 39.

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi nt} dt$$
(39)

El espectro lineal contiene información de la magnitud y la fase para las componentes de frecuencias en el rango de frecuencias que contiene la serie de tiempo (Heisey *et al.*, 1982).

#### A.10 AUTOESPECTRO

El autoespectro de una señal se define como la potencia de una señal para cada valor de frecuencia de la medición (ancho de banda). El autoespectro es calculado multiplicando el espectro lineal por su complejo conjugado, de donde se obtiene la magnitud de la señal y se pierde la información de la fase.

El autoespectro de una señal es denotado usualmente por  $G_{xx}(f)$ , mediante la ecuación 40.

$$G_{xx}(f) = S_x(f) S_x^*(f),$$
(40)

donde:  $S_{x}^{*}(f)$  es el complejo conjugado de  $S_{x}(f)$ .

### A.11 ESPECTRO CRUZADO

Es común investigar la similitud que existe entre dos señales, típicamente simultáneas. Para ello, se procede a calcular el espectro cruzado, el cual está definido como la transformada de Fourier de la función de correlación cruzada entre dos señales. El espectro cruzado  $G_{xy}$  puede ser representado matemáticamente por la ecuación 41.

$$G_{yx} = S_y(f) S_x^*(f)$$
 (41)

La ecuación 36 establece que el espectro cruzado es calculado al multiplicar el espectro lineal de la señal de entrada por el complejo conjugado de la señal de salida. El espectro cruzado es una función compleja consistente de magnitud y fase (ecuación 42), en sus componentes de frecuencia.

$$\Theta_{yx}(f) = \tan^{-1}(\frac{\operatorname{Im}(G_{yx}(f))}{\operatorname{Re}(G_{yx}(f))})$$
(42)

La magnitud del espectro cruzado es la potencia mutua entre las dos señales de entrada y salida, y puede ser utilizado para identificar las frecuencias predominantes que las dos señales tienen en común. Las diferencias de fase son debidas a retrasos en el tiempo, retrasos en la propagación o variaciones en las trayectorias de las ondas entre los puntos de medición (Heisey *et al.*, 1982).

La respuesta en función de la frecuencia de un sistema se obtiene comparando la señal de salida del sistema, respeto a la señal de entrada aplicada al sistema; si la respuesta del sistema de cada componente de frecuencia de entrada es conocida, entonces la salida puede ser predicha. Conforme se varia la frecuencia en un rango, la amplitud se modificara por un factor de ganancia y se puede presentar un cambio de fase.

A la curva que representa el cambio de ganancia y de fase respecto de la entrada, es llamada respuesta en frecuencia.

La respuesta en frecuencia del sistema puede ser utilizada para estimar diversas propiedades del sistema, tales como su frecuencia natural, coeficientes de amortiguamiento, rigidez e impedancia (Heisey *et al.*, 1982).

Matemáticamente, la respuesta en frecuencia H(f) se define como el cociente del espectro lineal de la salida del sistema sobre el espectro lineal de la señal de entrada, cuya relación está dada por la ecuación 43.

$$H(f) = \frac{S_y(f)}{S_x(f)} \tag{43}$$

De la ecuación 38, se puede mostrar que es equivalente a la función del espectro cruzado de las señales de entrada y salida, normalizado por los autoespectros de la señal de entrada.

### A.12 FUNCIÓN DE COHERENCIA

La función de coherencia tiene como propósito evaluar la validez de la función de respuesta, en función de la frecuencia (Rix *et. al.,* 1991; Malovichko *et al.,* 2006; *et al.*). El término de coherencia es utilizado ya que mide la potencia presente en la señal de salida que es causada por la potencia de la señal de entrada.

Típicamente se utiliza el símbolo  $\gamma^2$ para representar la función de coherencia, y es calculada mediante la ecuación 44.

$$\gamma^{2} = \frac{G_{yx}(f)G_{yx}^{*}(f)}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)}$$
(44)

La ecuación anterior muestra como están correlacionadas las señales de entrada y salida; si la coherencia tiene el valor de la unidad, implica que la señal de salida fue debida a la señal de entrada, para un valor especifico de frecuencia. Sin embargo, si el valor de la coherencia es cero, entonces significa que la señal de salida no fue ocasionada por la señal de entrada. Los valores cercanos a uno indican la calidad de las mediciones. Los valores cercanos a cero pueden ser debidos a las siguientes situaciones (Heisey *et al.*, 1982):

- 1) No se han medido diversas señales en el sistema.
- 2) Presencia de ruido de fondo.
- 3) Baja resolución en el rango de frecuencia de interés.

# CARACTERÍSTICAS DE LA INSTRUMENTACIÓN

Para registrar las señales requeridas en los métodos sísmicos tratados en este trabajo (SASW, SPAC y HV-SPR) se requiere contar con sensores para detectar el movimiento del terreno y un registrador para almacenar tales registros.

En todos los casos de estudio del capítulo IV, se utilizó una grabadora Kinemetrics modelo SSR-1, cuyas especificaciones pueden encontrarse en la tabla XXII. Además se utilizaron sensores de aceleración modelo EpiSensor FBA ES-T, de Kinemetrics; en la figura 84 se muestran las curvas de respuesta nominal.

También fueron utilizados sismómetros Ranger WR-1 de Kinemetrics, para registrar ruido ambiental. Estos últimos pueden instalarse tanto verticalmente como horizontalmente, y pueden emplearse en su modalidad de velocidad o aceleración (en nuestro caso fue de aceleración). En la figura 85 se muestran las curvas de respuesta nominal.

Grabadora Kinemetrics SSR-1		Acelerómetro EpiSensor	Kinemetrics Ranger WR-1	
	-	(Kinemetrics) FBA ES-T	Modalidad de Velocidad	Modalidad de Aceleración
Almacenamiento	Estado Sólido			
Filtros	Butterworth			
1 11005	de 6 polos			
	Bessel			
Frecuencias de	5, 15 y 50			
filtros (Hz)	, <b>,</b>			
Ganancias	1, 10, 100 y			
	1000			
Convertidor	16 bits			
Analógico				
Digital				
Rango máximo	±2.5v			
de Voltaje	50, 100			
Frecuencia de	50, 100 y			
Muestreo (HZ)	200	DC a 200	0.05 a 20	DC = 20
(Hz)		DC a 200	0.05 a 20	DC a 20
Rango dinámico		155	125 (entre 0.01 v 10 Hz)	
(dB)		155		.01 y 10 112)
Rango a escala		± 0.25g	± 2.5V	
total				
Linealidad		$< 1000 \ \mu g/g^2$		
Sensitividad		20V/g	160 V/m/s a 0.05-20 Hz	
			$\pm 2.5 V / \pm 0.01 g$	
Frecuencia			20	
Natural (Hz)				
Amortiguamiento			7	0
(%)				

Tabla XXII. Tabla de especificaciones de la grabadora SSR-1, los sensores Episensor FBA ES-T y Ranger WR-1, todos de Kinemetrics.



Figura 84. Respuesta del sensor EpiSensor FBA ES-T, en amplitud y fase Modificada del manual de usuario Kinemetrics, Inc. (2005).



Figura 85. Función de transferencia del sensor Ranger WR-1 de Kinemetrics modificada del manual de usuario Kinemetrics, Inc. (1994).