

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR
DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**EFFECTOS DE AMPLIFICACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL TERRENO EN LOS
ALREDEDORES DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE CERRO PRIETO, BAJA
CALIFORNIA**

TESIS

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

Presenta:

FELIPE DE JESÚS VEGA GUZMÁN

Ensenada, Baja California, México, Julio de 2010.

TESIS DEFENDIDA POR
Felipe de Jesús Vega Guzmán
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

Dr. José Antonio Vidal Villegas
Director del Comité

Dr. Carlos I. Huerta López
Miembro del Comité

Dr. Luis Munguía Orozco
Miembro del Comité

Dr. Mario González Escobar
Miembro del Comité

Dr. Julio Sheinbaum Pardo
Miembro del Comité

Dr. Thomas Gunter Kretschmar
*Coordinador del programa de posgrado
en Ciencias de la Tierra*

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales
Director de Estudios de Posgrado

Julio de 2010.

RESUMEN de la tesis de **Felipe de Jesús Vega Guzmán**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en Ciencias de la Tierra con orientación en Geofísica Aplicada. Ensenada, Baja California, México. Julio de 2010.

EFFECTOS DE AMPLIFICACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL TERRENO EN LOS ALREDEDORES DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE CERRO PRIETO, BAJA CALIFORNIA

Resumen aprobado por:

Dr. José Antonio Vidal Villegas
Director de Tesis

Debido a reportes de amplificaciones altas de la señal sísmica, seleccionamos un área de estudio de 79 km^2 en cuyo centro está el volcán de Cerro Prieto, en el Valle de Mexicali, Baja California. Un ejemplo de estas amplificaciones lo tenemos en los registros de la estación GEO, localizada en el Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP). En esta estación se han registrado aceleraciones del orden de 492 Gales (generadas por un sismo de magnitud 5.4). Adicionalmente, habitantes de poblados cercanos al área han reportado que “*se sienten muy fuerte los temblores.*” ¿Existe amplificación de la señal sísmica en nuestra área de estudio? De ser así, ¿a qué se debe? El objetivo de esta tesis es responder estas preguntas y estimar la estructura superficial (0-50 m) de 8 sitios de interés. Para lograrlo, se obtuvieron muestras de ruido sísmico, con sismómetros de periodo corto (1 s) e intermedio (5 s) y grabadoras de 16 bits, a lo largo de un perfil que cruza el volcán con orientación N18⁰E. Además, analizamos registros de sismos (ocurridos de 2004 a 2006) obtenidos con acelerógrafos de 24 bits. Con ambos tipos de datos (ruido y acelerogramas) efectuamos el cálculo de cocientes espectrales H/V e hicimos comparaciones espectrales entre sitios. Para estimar la estructura somera efectuamos el modelado unidimensional de los cocientes H/V usando el método de propagación de matrices de acuerdo a como fue implementado por Huerta-López *et al.* (2005). A continuación presentamos los resultados obtenidos.

El volcán. Los cocientes H/V confirman la existencia de amplificación en la parte alta (159 m) con respecto a su parte baja (~ 31 m). Los resultados muestran una amplitud de 6.3 a 1.2 Hz con datos de ruido, y de 4.2 a 1.8 Hz con datos de aceleración. Con ambos tipos de datos se corroboró la amplificación.

El sitio GEO. A pesar de que este sitio (ubicado en el CGCP) se encuentra a una altura de 30 m, los cocientes H/V muestran un valor de 5.6 y la frecuencia fundamental de 0.9 Hz está bien definida.

Otros sitios. En los sitios DEL, CGG y CHI, ubicados en poblados del Valle de Mexicali, encontramos cocientes H/V altos (entre 4.9 y 15.2) que concuerdan con reportes de los pobladores de que “*sienten muy fuerte los temblores.*”

Los resultados del modelado de los cocientes H/V, con base en una estructura propuesta de 3 capas horizontales sobre un semi-espacio, nos indican que las propiedades físicas en los 8 sitios de interés son diferentes. Estas propiedades son: V_s (velocidad de la onda S), ρ (densidades), σ (razones de Poisson), con valores que van de 90 a 680 m/s, 1.0 a 2.3 g/cm³ y 0.20 a 0.35; respectivamente.

Palabras Clave: Amplificación, ruido sísmico, acelerogramas, cocientes espectrales H/V, modelado unidimensional.

ABSTRACT of the thesis presented by **Felipe de Jesús Vega Guzmán** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in Earth Sciences with orientation in Applied Geophysics. Ensenada, Baja California, México. July 2010.

GROUND MOTION AMPLIFICATION EFFECTS ON THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD AREA, BAJA CALIFORNIA

Because of previous reports of high amplification of the seismic signal, we choose for study an area of around 79 km^2 , centered at the Cerro Prieto volcano, in the Mexicali valley, Baja California. Examples of these high amplifications are those recorded at GEO station, located in the Cerro Prieto geothermal field (CPGF). This station has recorded accelerations of 492 gals, which were produced by an earthquake of magnitude 5.4. Residents that live near the study area have reported that they feel “so strong” the earthquakes. Is there amplification of the seismic signal in the area? If so, what produces this amplification? The goal of our study is to answer these questions and to determine the shallow structure (0-50 m) at 8 specific sites.

To obtain some answers, we gathered seismic noise using short period (1 s), and intermediate (5 s) seismometers in combination with 16 bit digital recorders. Noise data were collected along a profile that crosses the volcano with an N18⁰E orientation. Furthermore, we analyzed ground-motion data recorded from 2004 to 2006 using 24-bit accelerographs. Using both types of data, noise and acceleration, we calculated H/V spectral ratios, and made comparisons of H/V ratios among sites. To estimate the shallow structure, we modeled the H/V ratios on the basis of a one-dimensional model, using the stiffness propagation method as implemented by Huerta-Lopez *et al.* (2005). The results are as follows.

The volcano. The H/V ratios confirm the existence of amplification at the top (159 m) regarding the lower part (average 31 m). The results show amplitude of 6.3 at 1.2 Hz with noise data and 4.2 at 1.8 Hz with acceleration data. Both types of data confirm the amplification effect.

The GEO site. Although this site (located at the CPGF) has an altitude of 30 m, the H/V ratios show amplification of 5.6 and the fundamental frequency of 0.9 Hz is well defined.

Other sites. In sites as DEL, CGG and CHI, located at villages of Mexicali valley, we found high H/V ratios (between 4.9 and 15.2). These values are consistent with reports of villagers that they “felt very strong the earthquakes”.

Results of modeling the H/V ratios, based on a structure of three horizontal layers lying over a half-space, show that the physical properties of the 8 sites modeled are different. These properties: V_S (S wave velocity), ρ (density), and σ (Poisson's ratio), have values of 90 to 680 m/s, 1.0 to 2.3 g/cm³, and 0.20 to 0.35; respectively.

Keywords: Amplification, seismic noise, accelerograms, H/V spectral ratios, one-dimensional modeling.

Dedicatorias

Los hombres buenos nunca se derrumban ante nada,
los hombres buenos derriban cualquier obstáculo,
a los hombres buenos no les da miedo intentar
hacer realidad sus sueños.

Los hombres buenos cada día escalan mayores alturas,
los hombres buenos no viven de rodillas ante la vida
si no por el contrario dan la cara y con la mirada de
frente, los hombres buenos son capaces de viajar hasta
el fin del mundo y conquistar la tierra de los héroes.
Los hombres buenos son para siempre.

Xiomara Vega

Para mi hija Xiomara, porque llegaste a nuestras vidas trayendo muchas risas y optimismo.

A mis padres, mis hermanos y a la vida.

Para mi abuela Manuela Hernández Gallardo.

Este trabajo también esta dedicado al Ing. Ernesto Rocha, porque con su adiós nos ha dejado muchas tareas por hacer.

Agradecimientos

A mi gran amiga Beny Chávez Cano y sus hijos Berry y Nancy, porque todos los momentos difíciles siempre fueron alegres.

A mi cuñado Cirilo “cuarritas” Mayorquin y a los tremendos “chapotillos de Tijuana” Morelia y Ernesto, también a Karen y Kenia.

Para mi amiga Iliana Lizeth Lee Chang, mis amigos Jorge Bañaga y Guadalupe Cano.

A los estudiantes y amigos del CICESE en especial a Luis Alberto Sánchez, William Thomas alias el “Biliberto Zúñiga”, Rosalba Contreras, Hoon Song, Ana Cristina Islas Romo, Eduardo Mar y Gemma Gómez Castillo.

A Miriam Marcela Tostado (alias “Srita. Tostado”) por las imágenes facilitadas.

A Erick Roberto Hernández Quezada y Víctor Rodríguez, a todos los amigos del grupo RESNOM, Francisco Javier Farfán, Luis Raúl Orozco y Oscar Gálvez Valdez, también a los del grupo RANM Manuel Luna Munguía, a Miguel Navarro y Tito Valdez por las imágenes proporcionadas.

A CONACYT por el apoyo valioso, a todo el personal desde investigadores, técnicos y personal administrativo de Ciencias de La Tierra y Servicios Escolares.

Al Dr. Antonio Vidal Villegas por su gran paciencia y por defender la misma “camiseta” que yo defendiendo: La del trabajo.

A los miembros de mi comité responsables de haberme “domesticado” los Drs. Julio Sheinbaum, Luis Munguía, Carlos Huerta y Mario González.

CONTENIDO

	Página
Resumen español.....	i
Resumen inglés.....	iii
Dedicatorias.....	iv
Agradecimientos.....	v
Contenido.....	vi
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tablas.....	xvi
Capítulo I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1 Zona de estudio.....	1
I.2 Información tectónica general.....	3
I.3 Acerca del tema.....	6
I.4 Objetivo general.....	9
I.4.1 Objetivos particulares.....	9
I.5 Descripción del trabajo.....	11
Capítulo II. RUIDO SÍSMICO AMBIENTAL.....	12
II.1 Perfil de ruido en el volcán Cerro Prieto.....	12
II.1.2 Instrumentación.....	14
II.1.3. Obtención de los datos en cada sitio.....	14
II.1.4 Procesamiento preliminar.....	15
II.1.4.1 Conversión de formato crudo a código ASCII.....	17
II.1.4.2 Sismogramas de ruido: graficado y análisis.....	18
II.2 El ruido sísmico y la técnica de Nakamura.....	23
II.3 Procesamiento de datos: cálculo de los cocientes H/V.....	28

CONTENIDO (Continuación)

II.4	Discusión de resultados.....	35
II.4.1	Sitios alejados.....	36
II.4.2	Sitios sobre el volcán.....	38
II.4.3	Sitios complementarios.....	40
II.4.4	Comparación espectral.....	42
Capítulo III. DATOS DE ACELERACIÓN.....		47
III.1	Obtención de los datos.....	47
III.1.1	Instrumentación.....	49
III.2	Graficado de los acelerogramas.....	53
III.3	Cálculo de los cocientes H/V a partir de la onda S.....	55
III.4	Discusión de resultados.....	58
III.4.1	Comparación entre cocientes espectrales.....	66
Capítulo IV. MODELADO DE LOS COCIENTES H/V.....		70
IV.2	Matrices de rigidez.....	70
IV.2.1	Caso de una capa.....	70
IV.3	Procesamiento.....	77
IV.4	Resultados.....	83
IV.5	Discusión.....	87
Capítulo V. CONCLUSIONES.....		93
V.1	Recomendaciones.....	96

REFERENCIAS.....	97
APÉNDICES.....	100
A. Formato ASA 2.0 propuesto por el CENAPRED	100
B. Valores de velocidades de ondas de cuerpo para diferentes materiales.....	102

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Localización de la zona de estudio donde se observa el valle de Mexicali (VM), parte del valle Imperial (VI), la sierra Cucapah (SC) y la sierra El Mayor (SEM), la laguna de evaporación (LE) y el volcán “Cerro Prieto” (VCP). También se muestran las estaciones CPX y LMX pertenecientes a la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM), la falla Imperial (FI), la falla Cerro Prieto (FCP), río Colorado (RC) y parte de la Laguna Salada (LS). Con más detalle (recuadro izquierdo) también observamos algunas vías de comunicación (líneas rectas oscuras), el campo geotérmico Cerro Prieto (CGCP) y poblados cercanos al área de interés en el presente estudio (marcado con un círculo).	2
2	Fallas tectónicas en la zona de estudio: Imperial (FI), Cerro Prieto (FCP), Cucapah (FC) y Laguna Salada (FLS). Entre las fallas FI y FCP existe una zona de dispersión (ZD). La región está “repartida” en las placas del Pacífico (PPA) y la Norteamericana (PNA), las flechas indican la dirección del movimiento de estas placas. Los rasgos topográficos son Sierra Cucapah (SC), Sierra El Mayor (SEM) y volcán Cerro Prieto (VCP). Existen algunos poblados ubicados alrededor de la Laguna de Evaporación (LE) como: Michoacán de Ocampo (MO), Chihuahua (CH), Hidalgo (H), Nuevo León (NL), Delta (D), Nayarit (N) y Sonora (S). Las estaciones de aceleración (triángulo invertido y código encerrado en cuadro) CGG, CHI y DEL se encuentran en las comunidades Michoacán de Ocampo, Chihuahua y Delta respectivamente. La estación GEO está en uno de los patios del CGCP, la estación CUC en la Sierra Cucapah, VCP en el volcán Cerro Prieto. Por último, se observa los epicentros de los sismos de febrero de 1987 M_L 5.4 (asterisco) y mayo de 2006 M_L 5.4 (cruz).	4
3	a) Planta Geotérmica de Cerro Prieto y b) volcán “Cerro Prieto”.	5

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página
4	a) Valores de aceleración para el sismo de febrero de 1987 M_L 5.4 (Munguía <i>et al.</i> , 1988) registrado en la estación VCP (distancia epicentral 5.6 km) y b) para el sismo de mayo de 2006 M_L 5.4 registrado en GEO (distancia epicentral 1.7 km). El encabezado de cada figura indica el código de la estación, los dos últimos dígitos del año, el día juliano, la letra A indica que los datos registrados están en código ASCII y los dos números restantes es el número del evento. A continuación se indica la fecha de registro del evento y el tiempo de la primera muestra (horario GMT). Con respecto a los acelerogramas, en a) observamos el tipo de componente, orientación y la aceleración máxima negativa. En b) se indica el tipo de componente, entre paréntesis el canal donde se grabó, la orientación de la componente y las aceleraciones máximas (positivas y negativas).	6
5	Ejemplo de amplificación de la señal sísmica en el volcán Cerro Prieto. Los acelerogramas corresponden al sismo del 13 de mayo de 2005 M_L 3.9 registrado en la componente transversal de las estaciones R02 (14 m), distancia epicentral 8 km y VCP (110 m), distancia epicentral 7.8 km. Clasificación del VCP de acuerdo a la altura: parte baja (altura promedio de 28 m, nivel del VM), parte media (28 a 60 m) y parte alta (60 a 159 m).	8
6	Ubicación de los sitios para el registro de ruido sísmico ambiental. En la figura se aprecia el VCP, la laguna de evaporación del CGCP y el sitio GEOv, el cual está separado una distancia de 190 m de la estación de aceleración GEO.	12
7	Instrumentación usada para el registro de datos de ruido sísmico. a) Grabadora SSR-1 (señalada con la flecha blanca) en la estación LMX (La Mesa de Andrade) y b) sismómetros de periodo intermedio en el sitio CRT.	16
8	Sismograma de ruido obtenido en el sitio F4A (parte baja, 18 m) utilizando sismómetros de período intermedio. El encabezado se forma de las tres primeras letras, que es el código del sitio, dos cifras para los dos últimos dígitos del año de registro, tres para el día juliano, la extensión .A del código ASCII y dos cifras para indicar el número del registro. La siguiente parte del encabezado indica año, mes y día de la toma de los datos y por último el tiempo local en horas, minutos y segundos. Se incluye también, el	19

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página
	nombre de cada componente, período promedio de la señal predominante de frecuencia baja y amplitudes máximas y mínimas.	
9	Sismograma de ruido obtenido en el sitio CRT (parte alta, ~159 m) utilizando sismómetros de período intermedio. La componente norte y este dan la impresión de estar saturadas (marcado con elipses); sin embargo, esto no es así, lo podemos comprobar al observar las flechas indicadas en la Figura 10. La descripción del encabezado es la misma que la descrita en el pie de la Figura 8.	20
10	Sismograma de ruido obtenido en el sitio CRT (parte alta, ~159 m) utilizando sismómetros de período intermedio. La escala vertical está aumentada aproximadamente un factor de 7 con respecto a la Figura 9. Las flechas indican que efectivamente el sismograma no está saturado en la componente norte y este como se sugiere en la Figura 9 (con elipses).	20
11	Sismograma de ruido obtenido en el sitio CRT (parte alta, ~159 m) utilizando sismómetros de período corto.	21
12	Esquema que ilustra el origen del ruido sísmico: Las fuentes lejanas y cercanas se combinan para formar el ruido sísmico.	23
13	Capa infinita en la que sólo se considera arriba perpendicular de energía a las capas (basamento y estratigrafía). Se supone que no afecta el material existente en las otras dos dimensiones (planos horizontal y perpendicular). HS, VS, HB, VB, son respectivamente los espectros de Fourier de las componentes horizontal y vertical en superficie y horizontal y vertical en la base de la estratigrafía.	24
14	Diagrama del procesamiento semiautomático aplicado a los sismogramas de ruido sísmico para obtener cocientes espectrales H/V.	28
15	Sismograma de ruido perteneciente al primer segmento (4096	30

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página
	muestras, longitud 20.48 s) del sitio ROAD (24 m). El encabezado se forma de las tres primeras letras, que es el código del sitio, dos cifras para los dos últimos dígitos del año de registro, tres para el día juliano, la extensión .A del código ASCII y dos cifras para indicar el número del registro. La siguiente parte del encabezado indica año, mes y día de la toma de los datos y por último el tiempo local en horas, minutos y segundos del inicio del registro. Se incluye también, el nombre de cada componente.	
16	Espectro de amplitud del primer segmento (4096 muestras, longitud 20.48 s) perteneciente al sitio ROAD (24 m).	31
17	Espectro de amplitud suavizado del primer segmento (4096 muestras, longitud 20.48 s) perteneciente al sitio ROAD (24 m).	31
18	Cocientes espectrales H/V del primer segmento (4096 muestras, longitud 20.48 s) perteneciente al sitio ROAD (24 m).	34
19	Cocientes espectrales H/V de dos segmentos (8192 muestras, longitud 40.96 s) pertenecientes al sitio ROAD (24m) y su desviación estándar (líneas discontinuas).	34
20	Resultados de cocientes espectrales de algunos sitios del perfil y comparación espectral entre el sitio CRT y el promedio de cocientes espectrales H/V de los sitios de la parte baja (desde ROAD hasta F1F). En las graficas de los cocientes H/V de los sitios, las líneas punteadas representan la desviación estándar, la línea continua es el cociente H/V (RCM), también se indica el código del sitio y su elevación con respecto al nivel medio del mar.	35
21	Resultados H/V de los sitios alejados del volcán (a distancias de 0.9 a 3.5 km con respecto al sitio CRT y alturas promedio de 31 m). La línea discontinua horizontal de amplitud 1, indica el cociente espectral de un sitio donde no existe amplificación.	36
22	Resultados H/V de los sitios ubicados en la parte alta del volcán (CRT y SITIO4), parte media (F7B y FFF) y parte baja (F0A). La línea discontinua horizontal de amplitud 1, indica el cociente	38

Figura	LISTA DE FIGURAS (Continuación)	Página
	espectral de un sitio donde no existe amplificación.	
23	Acelerógramas del sismo ocurrido el 13 de Mayo de 2005 ($M_L=3.9$) registrado en las estaciones a) R02 a una altura de 24 m, distancia epicentral 8 km y b) VCP a una altura de 110 m, distancia epicentral de 7.8 km. Hay que notar las aceleraciones máximas en b) las cuales son casi el doble que en a).	39
24	Resultados de cocientes espectrales H/V del sitio GEOv (30 m), las líneas discontinuas representan la desviación estándar.	41
25	Promedio de cocientes espectrales H/V de sitios alejados del volcán (parte baja). Se observan claramente amplitudes bajas en el promedio de los sitios alejados del VCP y comprendidos en el perfil de ruido. La línea discontinua horizontal de amplitud 1, indica el cociente espectral de un sitio donde no existe amplificación.	42
26	Comparación de espectros con el promedio de los sitios de la parte baja. a) CRT, b) SITO4, c) F7B y d) F0A. La línea continua horizontal de amplitud 1 indica el cociente espectral de un sitio donde no existe amplificación.	43
27	Distribución de epicentros (rectángulos) de los sismos seleccionados los cuales fueron registrados de 2004 a 2006. Las estaciones (triángulos invertidos) que los registraron están instaladas sobre suelo sedimentario (aluvión) (CGG, CHI, GEO, DEL, y R02), sobre roca riódacítica (VCP) y sobre granito intemperizado (CUC). Se muestran también las fallas Imperial (FI) y Cerro Prieto (FCP). El área marcada con cruces nos indica roca, con líneas horizontales riódacita y el resto es sedimento.	48
28	Estaciones acelerográficas: a) R02, b) VCP, c) instrumentación en VCP, d) DEL y e) instrumentación en DEL.	51
29	Acelerógramas del sismo ocurrido el 24 de Mayo de 2006 ($M_L=5.4$) registrado en las estaciones a) CUC y b) GEO. El epicentro de este sismo fue reportado por Munguía <i>et al.</i> , 2009 y se muestra en la Figura 27 incluyendo la distancia epicentral.	53

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página
30	“Grafical User Interface” (cursores) de Matlab, en el cual se selecciona el segmento de onda S para obtener cocientes espectrales H/V.	55
31	Programa “hovgui” (<i>h over v graphical user interface</i>) para calcular cocientes espectrales de onda S.	56
32	Cocientes espectrales H/V de onda S de registros de aceleración (10), las graficas corresponden a las estaciones CGG, CHI, VCP, GEO, R02 y DEL en las cuales la línea sólida gruesa representa el promedio y las líneas interrumpidas la desviación estándar (σ). Además, se anexa información acerca del intervalo de magnitudes, el tipo de material donde se ubican las estaciones y alturas sobre el nivel medio del mar.	58
33	Comparación entre cocientes H/V con datos de ruido y aceleración en la parte alta del VCP.	61
34	Cocientes espectrales H/V de las ondas P, S y coda de registros de aceleración, las gráficas corresponden a las estaciones CHI, GEO, CGG, DEL, VCP, R02 y CUC. La línea sólida gruesa representa el promedio, además, se anexa el tipo de suelo, información acerca del intervalo de magnitudes y alturas sobre el nivel medio del mar de las estaciones.	64
35	Cocientes espectrales de aceleración (líneas delgadas) de 24 sismos registrados por la estación CUC procesando todo el sismograma, que incluye las ondas P, S y coda (4096 muestras) y promedio (línea gruesa). El rango de magnitudes de los eventos sísmicos va de 2.4 a 5.4 en M_L .	66
36	Comparación espectral de cocientes H/V de onda S de cada una de las 6 estaciones con el cociente H/V promedio de CUC y cocientes H/V de 24 acelerogramas en CUC.	67
37	Fuerzas que definen las componentes de esfuerzos que actúan sobre una superficie. Los esfuerzos en la dirección vertical están indicados por círculos.	71

LISTA DE FIGURAS (Continuación)

Figura		Página
38	Diferentes capas en un medio estratificado descansando sobre basamento.	73
39	Una onda SH propagándose a través de un espacio unidimensional. Abreviaturas utilizadas: h , espesor de la capa; α , α_r ángulo de la onda incidente y ángulo de refracción; l , m , y n cosenos directores de los desplazamientos U , V y W de la onda SH; A_{SH} y A'_{SH} amplitudes de la onda SH viajando en el sentido positivo y negativo con respecto al eje z y C_s , ρ , ξ , σ , G velocidad de ondas de corte, densidad, amortiguamiento, razón Poisson, módulo de corte respectivamente.	73
40	Diagrama del procesamiento semiautomático para obtener la función de transferencia de los sitios CGG, CRT, R02, CHI, GEO y DEL a partir de los cocientes espectrales de onda S.	77
41	Formato de entrada del conjunto de propiedades físicas del modelo	78
42	Resultados de las pruebas realizadas para obtener los cocientes espectrales H/V teóricos y experimentales del sitio CRT con el uso del programa "gomsite" en combinación con el programa de graficado "3capas" en ambiente MATLAB 7.0.0.	81
43	Resultado final de cocientes espectrales H/V teóricos y experimentales de los sitios CRT y GEO, obtenidos a partir de datos de ruido sísmico y VCP y GEO con aceleración.	83
44	Resultado final de cocientes espectrales H/V teóricos y experimentales de los sitios CGG, CHI, R02 y DEL obtenidos a partir de datos aceleración.	84
45	Localización, profundidad y litología (Martín-Barajas <i>et al.</i> , 1998) de los pozos más cercanos a los sitios de modelado.	86

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Ubicación de los sitios a lo largo del perfil y sitios adicionales donde se registraron muestras de ruido.	13
II	Características de la instrumentación sísmica utilizada para el registro de datos de ruido.	14
III	Archivos grabados en cada uno de los sitios.	17
IV	Archivos de entrada y salida obtenidos en el proceso de conversión de formato	17
V	Ubicación y tipo de instrumento de las estaciones de aceleración.	49
VI	Características de la instrumentación de las estaciones que fueron seleccionadas.	50
VII	Resultados de los valores H/V y frecuencia fundamental para cada sitio.	59
VIII	Resultados de cocientes espectrales de señal completa para cada sitio.	65
IX	Comparación espectral de cocientes H/V de onda S.	68
X	Vista parcial de un archivo de salida de frecuencias y desplazamientos de las ondas SV, SH y P.	79
XI	Contenido del archivo llamado “ <i>smodpcctesi</i> ” con datos organizados por segmentos Δf e interfases.	80
XII	Resultados del modelado unidimensional de los cocientes espectrales H/V, utilizando datos de ruido sísmico y de aceleración.	85
XIII	Comparación de resultados del modelado de los cocientes H/V entre los presentados por Vidal Villegas <i>et al.</i> , 2007 y los del presente trabajo.	87
XIV	Resultados del modelo de velocidades obtenidos por Louie <i>et al.</i> (2001) usando la técnica de refracción de microtemores.	91

Capítulo I. INTRODUCCIÓN

I.1 Zona de estudio

En la región norte de Baja California y noroeste de Sonora, México, ocurren sismos en un amplio rango de magnitudes ($1.0 \leq M \leq 7.2$) y en particular en la zona sedimentaria del valle de Mexicali, Baja California. Esta área es una continuación del valle Imperial en Estados Unidos (Figura 1). Ambos valles pertenecen a la provincia geológica conocida como la “Depresión Salton” (Suárez-Vidal *et al.*, 1991). Hacia el sur se encuentra el sistema montañoso “El Mayor”, la parte este la domina el cauce del río Colorado que es la división política entre los estados de Sonora y Baja California. Al oeste se tiene la zona con más complejidad geológica pues encontramos la sierra Cucapah y la depresión que forma la cuenca “Laguna Salada”.

El presente estudio se centra en una zona de aproximadamente 79 km^2 , la cual se marca con un círculo en la Figura 1. Esta zona circular (de aproximadamente 5 km de radio) la hemos ubicado tomando como punto central la cima del Volcán Cerro Prieto (VCP). En esta área se encuentran tres estaciones de la Red de Acelerógrafos del Noroeste de México (RANM), una a 110 m snm en el VCP y dos dentro del área circular (ambas a 14 m snm).

En la presente tesis “snm” significa “sobre el nivel del mar”, en adelante todas las alturas estarán referidas a este dato excepto las señaladas con GE, que significa alturas estimadas a partir de imágenes de Google Earth.

Nuestro estudio se enfoca en el área antes mencionada debido a los valores altos de aceleración registrados en la parte alta del VCP. Derivado de esto, nos preguntamos si existe amplificación alta en su parte baja o en sitios alejados de él (3.5 a 15 km). Otros sitios de interés son el Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) debido a su cercanía con el volcán y con comunidades cercanas, en las que se ha reportado que “se sienten muy fuerte los temblores”.

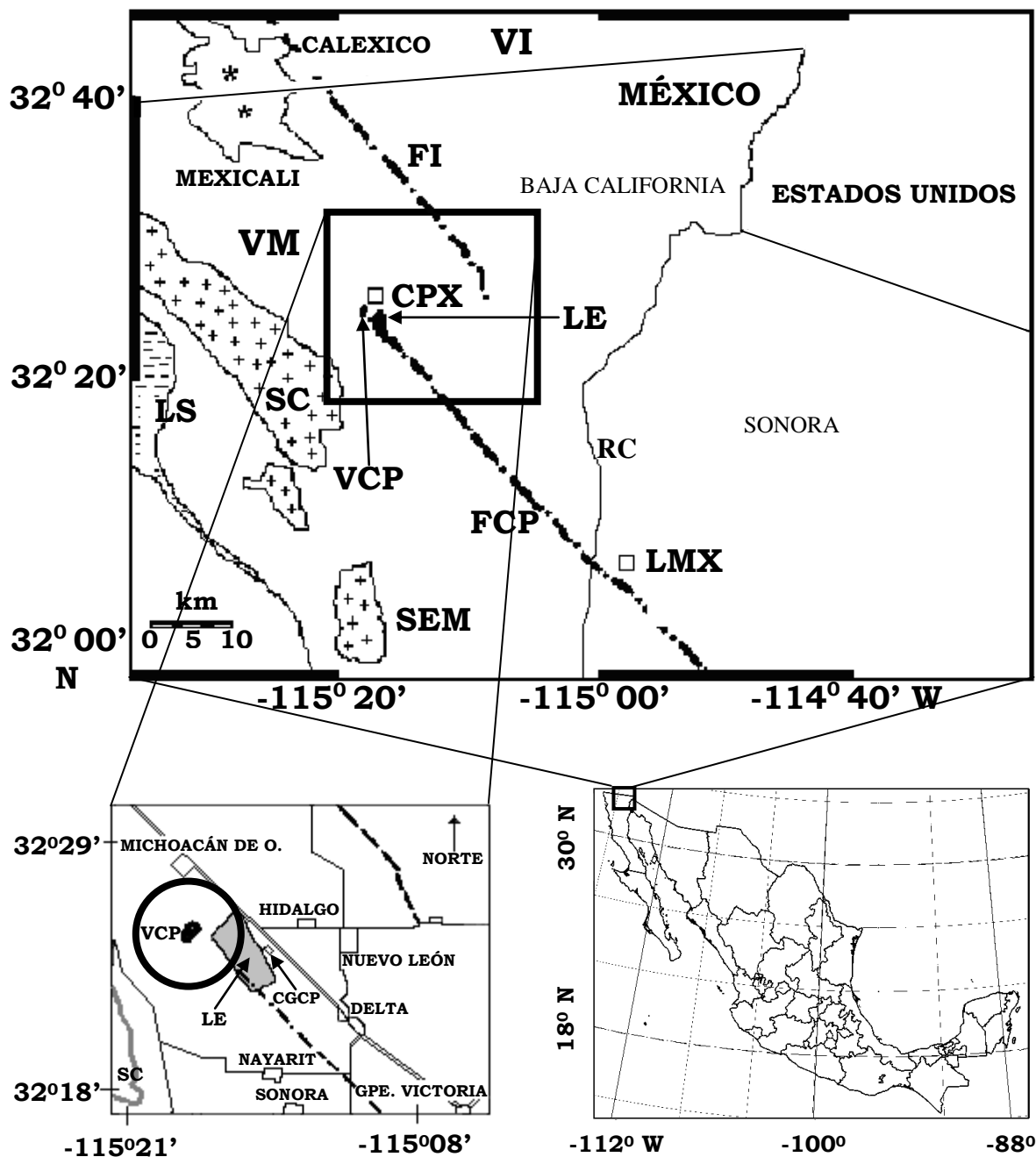


Figura 1. Localización de la zona de estudio donde se observa el valle de Mexicali (VM), parte del valle Imperial (VI), la sierra Cucapah (SC) y la sierra El Mayor (SEM), la laguna de evaporación (LE) y el volcán “Cerro Prieto” (VCP). También se muestran las estaciones CPX y LMX pertenecientes a la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM), la falla Imperial (FI), la falla Cerro Prieto (FCP), río Colorado (RC) y parte de la Laguna Salada (LS). Con más detalle (recuadro izquierdo) también observamos algunas vías de comunicación (líneas rectas oscuras), el campo geotérmico Cerro Prieto (CGCP) y poblados cercanos al área de interés en el presente estudio (marcado con un círculo).

I.2 Información tectónica general

La zona del valle de Mexicali está “repartida” en dos placas: la del Pacífico hacia el oeste y la Norteamericana hacia el este; esta frontera tectónica pertenece al llamado sistema de fallas “San Andrés-Golfo de California” (Suárez-Vidal *et al.*, 1991). En nuestra región sobresalen las fallas Cerro Prieto (FCP) e Imperial (FI), ambas con orientación SE-NO (Figura 2). Estas dos fallas presentan movimiento lateral derecho y son del tipo transcurrente, es decir, su movimiento dominante es horizontal y paralelo al rumbo de la falla. Otras fallas activas son las que tienen que ver con el levantamiento de la sierra Cucapah: fallas Cucapah y Laguna Salada (Johnson *et al.*, 1983; Axen *et al.*, 2000, Martín-Barajas *et al.*, 2001).

En la región del valle de Mexicali existe actividad geotérmica que se aprovecha en el CGCP (Figura 3a) para la generación de energía eléctrica (Mañón *et al.*, 1978). El VCP es un rasgo topográfico aislado (Figura 3b), ya que está ubicado en una región plana y se localiza a 30 km al sur de la ciudad de Mexicali (Gastil *et al.*, 1975). Este volcán es de origen cuaternario con una edad aproximada de 700,000 años, su composición es de tipo riodacítico y su forma es de tipo mixta (Suárez-Vidal *et al.*, 1991). De acuerdo con estos autores, el volcán experimentó su última erupción hace 17000 años aproximadamente y tiene una altura aproximada de 225 m (Puente y de la Peña, 1978).

La actividad de este edificio volcánico se considera en reposo, no se cuenta con ningún registro confiable acerca de la fecha de su primera erupción o datos que permitan calcularla; sólo existen leyendas y mitos de antiguos pobladores Cucapah (Thomas, comunicación personal, 2009). El cono principal alberga un cráter de forma elipsoidal, cuyo semieje mayor mide aproximadamente 200 m de longitud y el semieje menor unos 140 m, la profundidad promedio es de 60 m. La base del volcán también es elipsoidal, su semieje mayor tiene dirección norte-sur con 1800 m de longitud, el semieje menor tiene 1200 m (dimensiones estimadas a partir de imágenes de Google Earth).

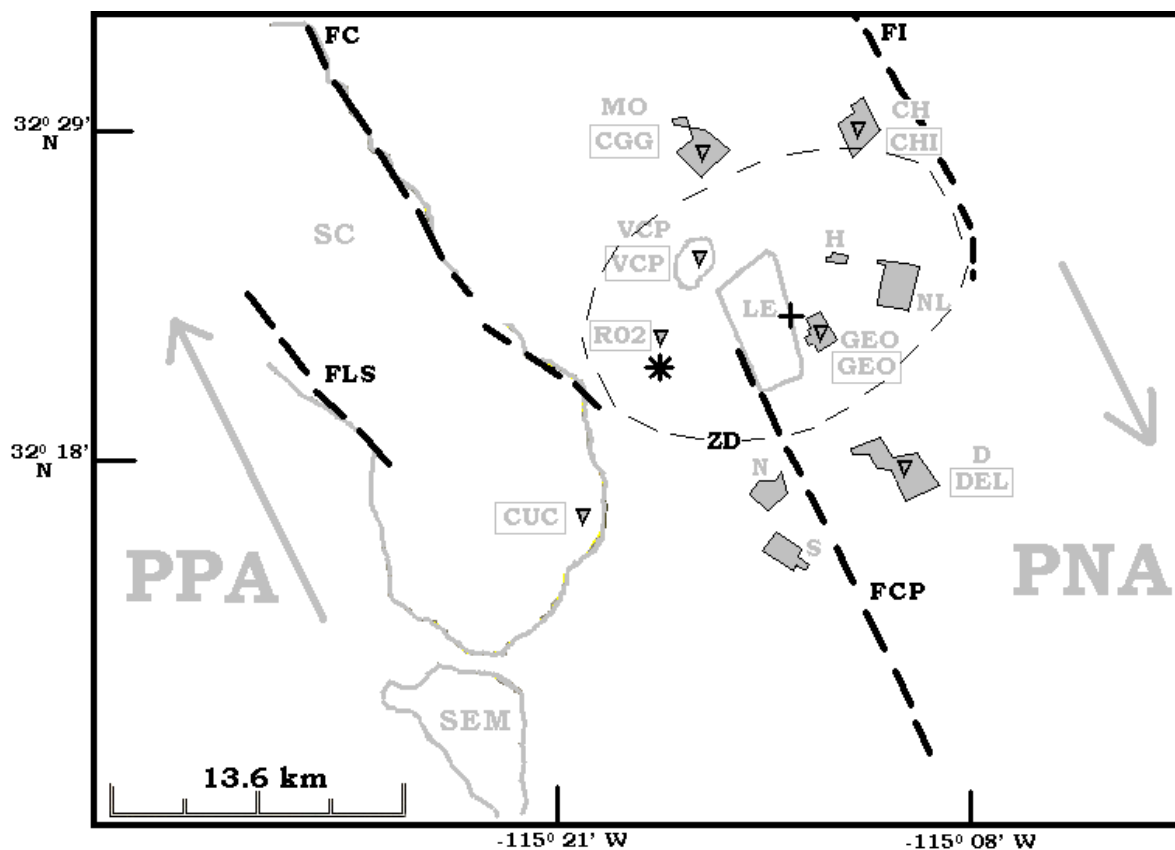


Figura 2. Fallas tectónicas en la zona de estudio: Imperial (FI), Cerro Prieto (FCP), Cucapah (FC) y Laguna Salada (FLS). Entre las fallas FI y FCP existe una zona de dispersión (ZD). La región está “repartida” en las placas del Pacífico (PPA) y la Norteamericana (PNA), las flechas indican la dirección del movimiento de estas placas. Los rasgos topográficos son Sierra Cucapah (SC), Sierra El Mayor (SEM) y volcán Cerro Prieto (VCP). Existen algunos poblados ubicados alrededor de la Laguna de Evaporación (LE) como: Michoacán de Ocampo (MO), Chihuahua (CH), Hidalgo (H), Nuevo León (NL), Delta (D), Nayarit (N) y Sonora (S). Las estaciones de aceleración (triángulo invertido y código encerrado en cuadro) CGG, CHI y DEL se encuentran en las comunidades Michoacán de Ocampo, Chihuahua y Delta respectivamente. La estación GEO está en uno de los patios del CGCP, la estación CUC en la Sierra Cucapah, VCP en el volcán Cerro Prieto. Por último, se observa los epicentros de los sismos de febrero de 1987 M_L 5.4 (asterisco) y mayo de 2006 M_L 5.4 (cruz).

a)



b)



Figura 3. a) Planta Geotérmica de Cerro Prieto y b) volcán “Cerro Prieto”.

I.3 Acerca del tema

En el área del CGCP se han registrado valores altos de aceleración en sitios como la parte alta del VCP (110 m), en la estación GEO (30 m, ubicada en uno de los patios del CGCP) y en la estación DEL (28 m). Un ejemplo de los valores de aceleración registrados lo constituye el caso del sismo de febrero de 1987 M_L 5.4. Para este sismo, ubicado aproximadamente a 6 km al sur del VCP (32.37^0 N, 115.30^0 O, profundidad 5.6 km; Munguía *et al.*, 1988), se obtuvo un valor máximo de aceleración de 1.4 g en la componente horizontal (S 5 E) de la estación VCP (Figuras 2 y 4a). En otro ejemplo, el sismo de mayo de 2006 cuyo epicentro se localizó a 1.7 km al este de la estación GEO (32.41^0 N, 115.26^0 O, profundidad 3.6 km; Munguía *et al.*, 2009), se registró una aceleración mayor a $\frac{1}{2}$ de g que incluso presentó saturación en su componente vertical (Figura 4b).

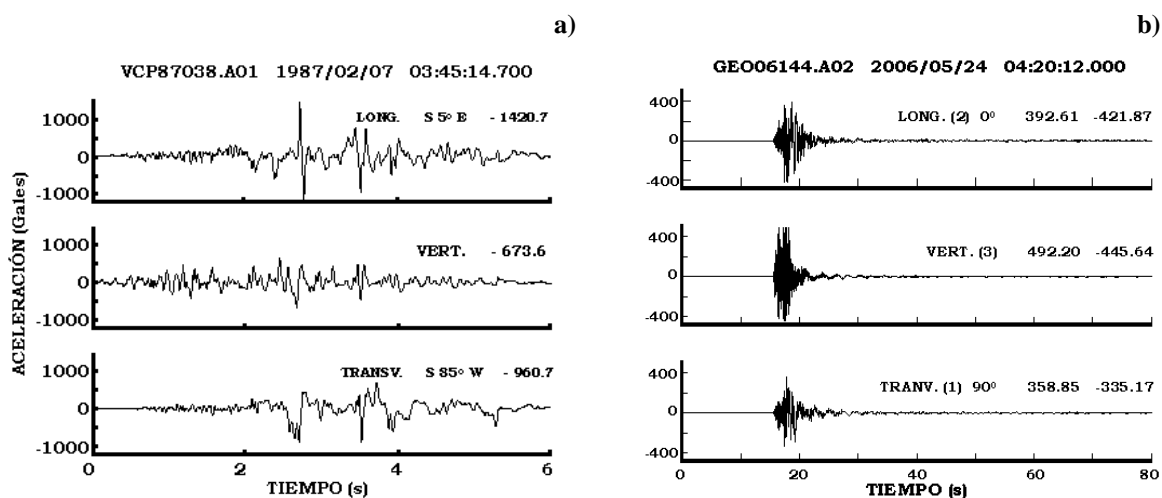


Figura 4. a) Valores de aceleración para el sismo de febrero de 1987 M_L 5.4 (Munguía *et al.*, 1988) registrado en la estación VCP (distancia epicentral 5.6 km) y b) para el sismo de mayo de 2006 M_L 5.4 registrado en GEO (distancia epicentral 1.7 km). El encabezado de cada figura indica el código de la estación, los dos últimos dígitos del año, el día juliano, la letra A indica que los datos registrados están en código ASCII y los dos números restantes es el número del evento. A continuación se indica la fecha de registro del evento y el tiempo de la primera muestra (horario GMT). Con respecto a los acelerogramas, en a) observamos el tipo de componente, orientación y la aceleración máxima negativa. En b) se indica el tipo de componente, entre paréntesis el canal donde se grabó, la orientación de la componente y las aceleraciones máximas (positivas y negativas).

Con el propósito de corroborar la existencia de amplificación de la señal sísmica en la parte alta del volcán, Vidal Villegas *et al.* (2007) calcularon cocientes H/V de ondas S y reportaron una amplificación de 8 (a alrededor de 1.6 Hz). Adicionalmente, estos autores reportaron una amplificación de 6.5 (a alrededor de 1.7 Hz), obtenida esta vez, a partir de cocientes H/V de muestras de ruido ambiental. Estos resultados muestran una concordancia de los factores H/V obtenidos a partir de diferentes señales. No obstante, en algunos sitios ubicados en la parte baja del volcán, los cocientes H/V no muestran amplificaciones como en la parte alta. En algunos casos, se observan amplificaciones de alrededor de 2 a frecuencias de entre 2 a 5 Hz (Vidal Villegas *et al.*, 2007).

Derivado de estos resultados, surgen dudas de si existe amplificación de la señal sísmica a alturas intermedias del volcán (Figura 5), en su base y en sitios circundantes a él; ubicados a alturas del nivel del valle, como es el caso de GEO (28 m). Las amplitudes altas observadas en dos sitios ubicados en la parte superior del volcán; CPX (180 m) y VCP (110 m), como las mostradas en la Figura 4a, nos han dado la idea de iniciar el presente trabajo. Sabemos que no existen asentamientos humanos en el volcán, pero existe infraestructura de comunicación sobre él (Figura 3b). Esta infraestructura pudiera verse afectada por la ocurrencia de un sismo importante ($M_L > 5$). Aún no sabemos la causa de estas amplificaciones, ¿efecto de la topografía?, ¿el tipo de material? En las observaciones de campo se reportan desgajamientos producidos por sismos en donde claramente se nota material sedimentario. En el presente trabajo trataremos de dar una explicación de las amplitudes (al menos en un sitio) considerando una estructura somera de velocidades.

Los resultados del presente estudio son importantes desde el punto de vista de ingeniería. Es decir, para un sitio podremos estimar la frecuencia fundamental y la amplificación de la señal sísmica en ese sitio. En cuanto a la frecuencia fundamental, es de utilidad para el diseño de obras civiles, las cuales se tienen que alejar de esta frecuencia. En el área de estudio se encuentran obras civiles como las instalaciones de la planta geotérmica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), además de centros urbanos que pudieran verse afectados ante la ocurrencia de un sismo importante.

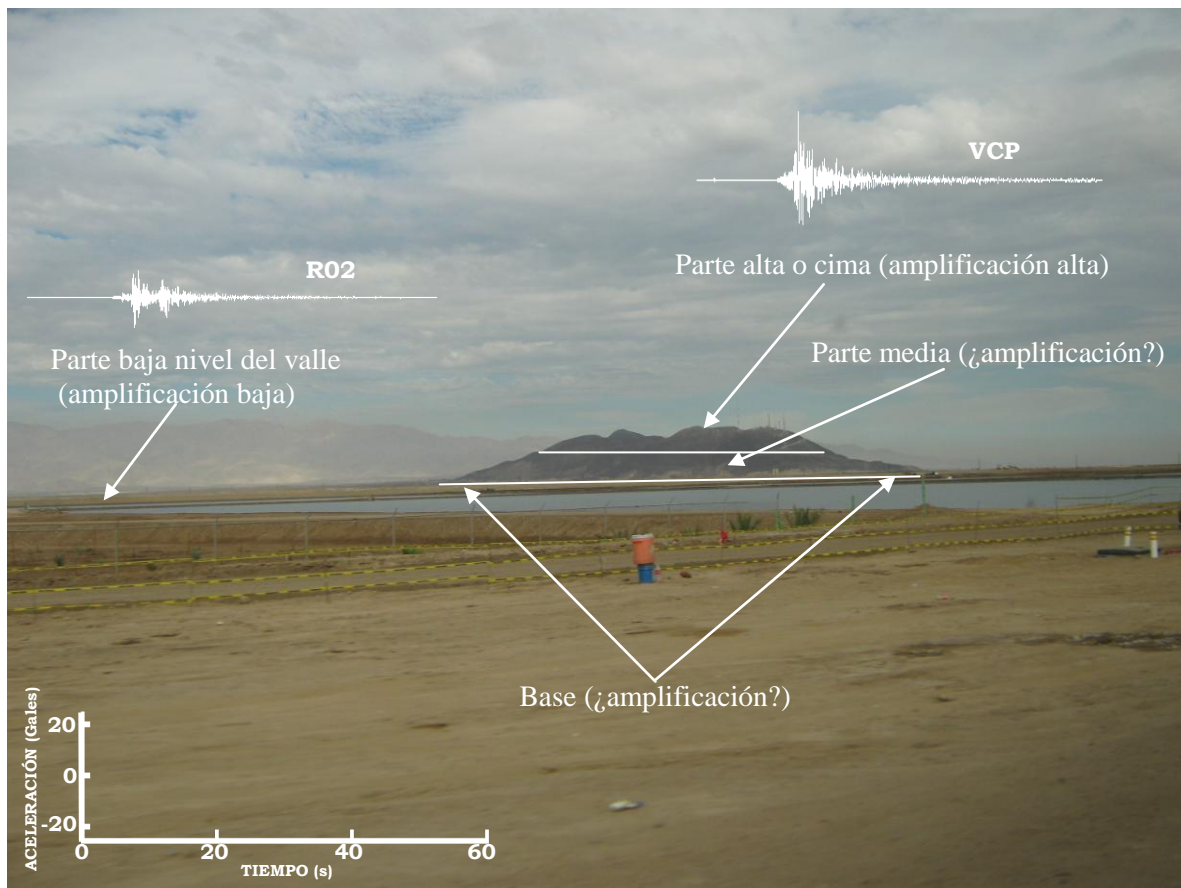


Figura. 5. Ejemplo de amplificación de la señal sísmica en el volcán Cerro Prieto. Los acelerogramas corresponden al sismo del 13 de mayo de 2005 M_L 3.9 registrado en la componente transversal de las estaciones R02 (14 m), distancia epicentral 8 km y VCP (110 m), distancia epicentral 7.8 km. Clasificación del VCP de acuerdo a la altura: parte baja (altura promedio de 28 m, nivel del VM), parte media (28 a 60 m) y parte alta (60 a 159 m).

I.4 Objetivo general

Estudiar la amplificación del movimiento del terreno en sitios sobre y cercanos al volcán Cerro Prieto, los cuales se encuentran en el ambiente sedimentario del valle de Mexicali. Adicionalmente, estimar la frecuencia fundamental mediante los cocientes espectrales H/V y, con el modelado de estos cocientes, determinar la función de transferencia de los sitios de interés.

I.4.1 Objetivos particulares

Son los siguientes:

1. Estimar la amplificación del movimiento del terreno y obtener la frecuencia fundamental de sitios de interés en los alrededores del CGCP mediante el cálculo de los cocientes espectrales H/V. Estos sitios se encuentran en la parte alta del VCP (60-159 m), parte media (28-60 m) y en 5 sitios circundantes (R02, DEL, GEO, CHI y CGG) ubicados entre 3.5 y 15 km de distancia del volcán. Los sitios anteriormente mencionados son interesantes debido a:
 - Reportes previos de amplificación alta de la señal sísmica (Vidal Villegas *et al.*, 2007).
 - La ubicación de la estación GEO en una de las instalaciones de la planta geotérmica de Cerro Prieto de la CFE (Figura 2).
 - Por los reportes de pobladores acerca de la “fuerza” con que sienten los sismos.

Para llevar a cabo el cálculo de los cocientes H/V utilizaremos registros de aceleración y ruido sísmico ambiental.

2. Modelado unidimensional de los cocientes espectrales H/V y de la frecuencia fundamental de los sitios de interés mediante el uso del método de propagación de matrices de rigidez (Kausel *et al.*, 1981).

3. Estimación de la estructura somera de la corteza (aproximadamente de 0 a 43 m) mediante la variación de parámetros como la velocidad de ondas de corte, densidad, amortiguamiento y espesor para cada sitio. Para esta estimación utilizamos la variante del método de propagación de matrices de rigidez propuesta por Huerta-López *et al.* (2005), quienes utilizaron este método en combinación con datos de ruido sísmico ambiental y telesismos para la estimación de estructura.
4. Por último, seleccionaremos un probable sitio de referencia con el objetivo de comparar las amplitudes obtenidas en los lugares antes mencionados con respecto a al sitio seleccionado.

I.5 Descripción del trabajo

El Capítulo II contiene la información referente a la adquisición de los datos de ruido sísmico, las actividades realizadas para su obtención, así como la instrumentación utilizada. Incluimos una sección de conocimiento teórico y metodología para el análisis de este tipo de datos. Presentamos también, el procesado aplicado a los datos para la obtención de los cocientes espectrales H/V y a continuación una discusión de estos resultados.

Siguiendo un esquema similar al descrito en el Capítulo II, en el Capítulo III hicimos el análisis de datos de aceleración con el propósito de corroborar o establecer diferencias con los resultados obtenidos con datos de ruido ambiental.

En el Capítulo IV llevamos a cabo un modelado unidimensional de cocientes H/V obtenidos a partir de ruido y aceleración. Esto implicó presentar la teoría del método usado, la secuencia de procesado, la obtención de resultados y su respectiva discusión.

Finalmente, en el Capítulo V materializamos la presente investigación presentando conclusiones y recomendando algunas actividades con la finalidad de complementar los resultados del presente trabajo.

Capítulo II. RUIDO SÍSMICO AMBIENTAL

La decisión de registrar ruido sísmico (en adelante sólo lo llamaremos de esta manera), obedeció a que es de fácil adquisición y a que el trabajo de campo es relativamente rápido. Además, se ha comprobado en otras investigaciones (Nakamura, 1989) que en este tipo de señal se encuentra presente el llamado efecto de sitio, es decir, aquella modificación que experimenta la señal sísmica en las primeras decenas de metros de la corteza terrestre. En nuestro caso, estamos interesados en la variación de la amplitud de la señal sísmica.

II.1 Perfil de ruido en el volcán cerro prieto

El registro de ruido sísmico ambiental se realizó entre diciembre de 2002 y mayo de 2003, a lo largo de una línea de 13 estaciones con orientación N18°E que cruza el volcán de “Cerro Prieto” (Figura 6).

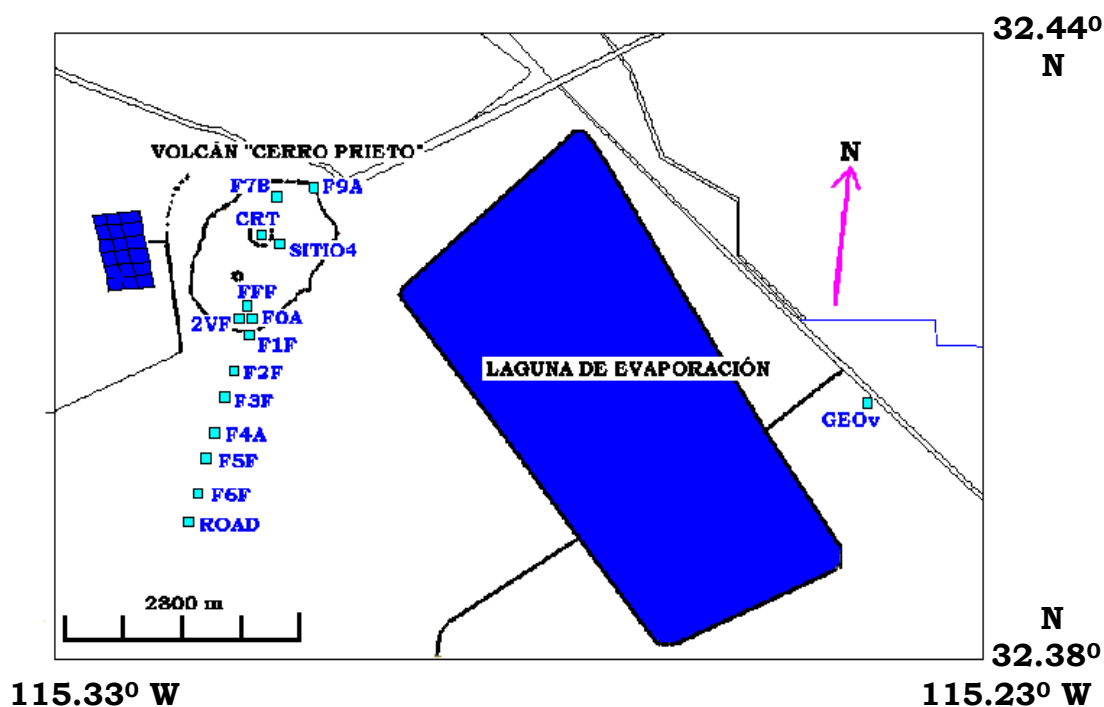


Figura 6. Ubicación de los sitios para el registro de ruido sísmico ambiental. En la figura se aprecia el VCP, la laguna de evaporación del CGCP y el sitio GEOv, el cual está separado a una distancia de 190 m de la estación de aceleración GEO.

Este perfil fue planeado con el propósito de observar, si existe variación de la amplitud de la señal conforme nos acercamos a la cima del volcán. Es por esto, también, que las distancias entre sitios de registro son aproximadamente iguales. Debido a lo accidentado del terreno sobre el volcán, no fue posible conservar la línea ni el espaciamiento regular entre sitios. La Tabla I muestra los datos de cada uno de los sitios del perfil.

Tabla I. Ubicación de los sitios a lo largo del perfil y sitios adicionales donde se registraron muestras de ruido.

PUNTOS	LATITUD N (grados)	LONGITUD O (grados)	Z (elevación respecto al nivel medio del mar en metros)	ACIMUT (del sitio al siguiente) en grados)	DISTANCIA (de la estación ROAD al sitio de interés en metros)
ROAD	32.3866	115.3148	24	18	0
F6F	32.3901	115.3137	40 *	17	400
F5F	32.3936	115.3131	19	18	795
F4A	32.3971	115.3118	18	~18	1200
F3F	32.4007	115.3108	28	19	1610
F2F	32.4040	115.3097	28	~17	2000
F1F	32.4076	115.3083	37	~349 *	2410
2VF	32.4090	115.3087	33	~54 *	2556
F0A	32.4096	115.3078	25	~18	2640
FFF	32.4106	115.3075	58	~17	2770
CRT	32.4197	115.3065	~159	~21	~3749 *
F7B	32.4239	115.3051	60	~74 *	~4230 *
F9A	32.4252	115.3006	9		~4471 *
Sitios adicionales ubicados fuera del perfil					
SITIO4	32.4199	115.3038	165*		~3880*
GEOv	32.4000	115.2400	30		~7120

* Datos tomados de Google Earth

En la Tabla I incluimos también sitios complementarios: GEOv y SITIO4. El primero está separado a una distancia de 190 m de la estación GEO (30 m) de la red de acelerógrafos y el segundo se encuentra ubicado en la parte alta del volcán, próximo a la estación CPX de RESNOM (230 m), a 165 m de altura (Figura 6). Estos dos sitios no pertenecen al perfil; sin embargo, el interés de tomar muestras de ruido en ellos obedeció a que en estudios previos se reportaron valores de amplificación alta de la señal sísmica (GEO, González *et al.*, 2001) (SITIO4, Vidal-Villegas, *et al.*, 2007). Es de nuestro interés corroborar con este tipo de datos (en nuestro caso ruido) las amplificaciones altas reportadas.

II.1.2 Instrumentación

En la Tabla II se indican las características de los instrumentos usados en la adquisición de las muestras de ruido sísmico y la Figura 7 muestra este tipo de equipo.

Tabla II. Características de la instrumentación sísmica utilizada para el registro de datos de ruido.

INSTRUMENTACIÓN	FREC. NAT. f_n (Hz)	CTE. DE MOTOR $\left(\frac{Vs}{m}\right)$	GANANCIA	RESOLUCIÓN (bits)	FILTROS (pasa banda)
SISMÓMETROS					
Periodo corto	1	273	-	-	
Periodo intermedio	0.2	150	-	-	
GRABADORA SSR-1	-	-	1 y 10	16 (96 db)	0.1-50 Hz

El propósito de utilizar sismómetros de período intermedio, obedece a que, en depósitos aluviales, la frecuencia fundamental se encuentra a frecuencias bajas $0.5 \text{ Hz} \leq f_n \leq 1 \text{ Hz}$ (Bard, 1998). Además de la instrumentación sísmica mencionada en la Tabla II, también se utilizó una computadora personal (laptop) y los programas QT y QL16, los cuales son proporcionados por el fabricante (Kinometrics). Con el primer programa se establece la comunicación con la grabadora para definir parámetros de grabación, hacer pruebas de funcionalidad del equipo y extraer los datos grabados. Con el segundo, se lleva a cabo el graficado de los datos registrados, una vez transferidos a la laptop.

II.1.3 Obtención de los datos en cada sitio

El trabajo hecho en cada sitio consistió de lo siguiente:

1. Instalación del equipo en cada uno de los sitios del perfil mostrado en la Figura 6. Las muestras de ruido se tomaron a partir del sitio ROAD, y en algunos sitios fue necesario excavar orificios de 60 cm de profundidad aproximadamente (Figura 7b) para evitar el efecto del viento en los registros.
2. Realizar pruebas de funcionalidad (comunicación entre la grabadora y el sismómetro y ver que éstos funcionaban adecuadamente). Lo anterior se repitió en cada sitio del perfil.
3. Registro de ruido en archivos con longitudes de tiempo de 90 segundos de grabación. Esta información fue grabada a una razón de muestreo de 200 muestras por segundo por canal.
4. Una vez terminado el trabajo anterior procedimos a realizar el trabajo de gabinete, es decir, el procesamiento de los datos.

II.1.4 Procesamiento preliminar

Las actividades de laboratorio empiezan con la extracción de la información recabada en campo con ayuda del programa QT. Como resultado se obtienen archivos en formato binario (con extensión ".ssr"). La Tabla III muestra los archivos (longitud de registro de 90 s) para cada sitio, así como las ganancias utilizadas en la grabadora mostrada en la Figura 7a para el registro del ruido.

a)



b)



Figura 7. Instrumentación usada para el registro de datos de ruido sísmico. a) Grabadora SSR-1 (señalada con la flecha blanca) en la estación LMX (La Mesa de Andrade) y b) sismómetros de periodo intermedio en el sitio CRT.

Tabla III. Archivos grabados en cada uno de los sitios.

SITIOS	GANANCIA		TIPO DE SISMÓMETRO USADO Y ARCHIVOS	
	1	10	PERIODO INTERMEDIO	PERIODO CORTO
ROAD	*		ROAD0001.ssr al ROAD0007.ssr ROAD0008.ssr al ROAD0010.ssr	
F6A		*	F6A0001.ssr al F6A0007.ssr	
F5F		*	F5F0001.ssr al F5F0007.ssr	
F4F		*	F4F0001.ssr al F4F0007.ssr	
F3F		*	F3F0005.ssr al F3F0011.ssr	
F2F		*	F2F0013.ssr al F2F0019.ssr	
F1F		*	F1F0001.ssr al F1F0007.ssr	
2VF		*	2VF0001.ssr al 2VF0005.ssr	2VF0008.ssr al 2VF0009.ssr 2VF0006.ssr al 2VF0007.ssr
F0A		*	F0A0001.ssr al F0A0007.ssr	
FFF		*	FFF0001.ssr al FFF0007.ssr	
CRT		*	CRT0001.ssr al CRT0007.ssr	CRT001.ssr al CRT003.ssr
F7B		*	F7B0001.ssr al F7B0007.ssr	F7BM0001.ssr al F7BM0003.ssr
F9A		*	F9A0001.ssr al F9A0008.ssr	
GEOV	*		GEOV0001.ssr, GEOV0002.ssr	GEOV 0003.ssr al GEOV0007.ssr

II.1.4.1 Conversión de formato crudo a código ascii

Para convertir los datos crudos a código ASCII utilizamos el programa ejecutable K2.EXE (Luna-Munguía *et al.*, 2005). Con él obtuvimos los archivos de salida en formato ASA 2.0, el cual fue propuesto por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, consultar Apéndice A). La siguiente tabla muestra un ejemplo de conversión para la estación ROAD.

Tabla IV. Archivos de entrada y salida obtenidos en el proceso de conversión de formato.

SITIO	ARCHIVOS EN CÓDIGO BINARIO	ARCHIVOS EN CÓDIGO ASCII
ROAD	ROAD0001.ssr, ROAD0002.ssr, ROAD0003.ssr, ROAD0004.ssr, ROAD0005.ssr, ROAD0006.ssr, ROAD0007.ssr, ROAD0008.ssr, ROAD0009.ssr, ROAD0010.ssr	ROA02346.A01, ROA02346.A02, ROA02346.A03, ROA02346.A04, ROA02346.A05, ROA02346.A06, ROA02346.A07, ROA02346.A08, ROA02346.A09, ROA02346.A10

El nombre de cada archivo en código binario (archivos de entrada), está formado por la clave del sitio, 4 caracteres que nos dan el número del archivo y la extensión “ssr” que denota el código binario (Tablas III y IV). En cambio los que se tienen en código ASCII (archivos de salida), sólo presentan las tres primeras letras de la clave del sitio, dos números que representan las dos últimas cifras del año en que se obtuvo el registro, tres para el día juliano, la letra A indica que es en código ASCII y finalmente dos cifras representativas del número de archivo.

El contenido de los archivos en código ASCII incluye el encabezado de cada registro y la serie de tiempo. El encabezado contiene información general de la institución responsable, datos propios del archivo como son versión del formato, nombre y fecha de creación del archivo. Incluye también datos del sitio de registro, del instrumento, entre otros. El lector puede consultar mayor información en el Apéndice A.

II.1.4.2 Sismogramas de ruido: graficado y análisis

Las series de tiempo resultantes de cada archivo fueron graficadas utilizando el ambiente de programación MATLAB (versión 7.0). Un ejemplo de los sismogramas resultantes los mostramos en las Figuras 8 a la 11.

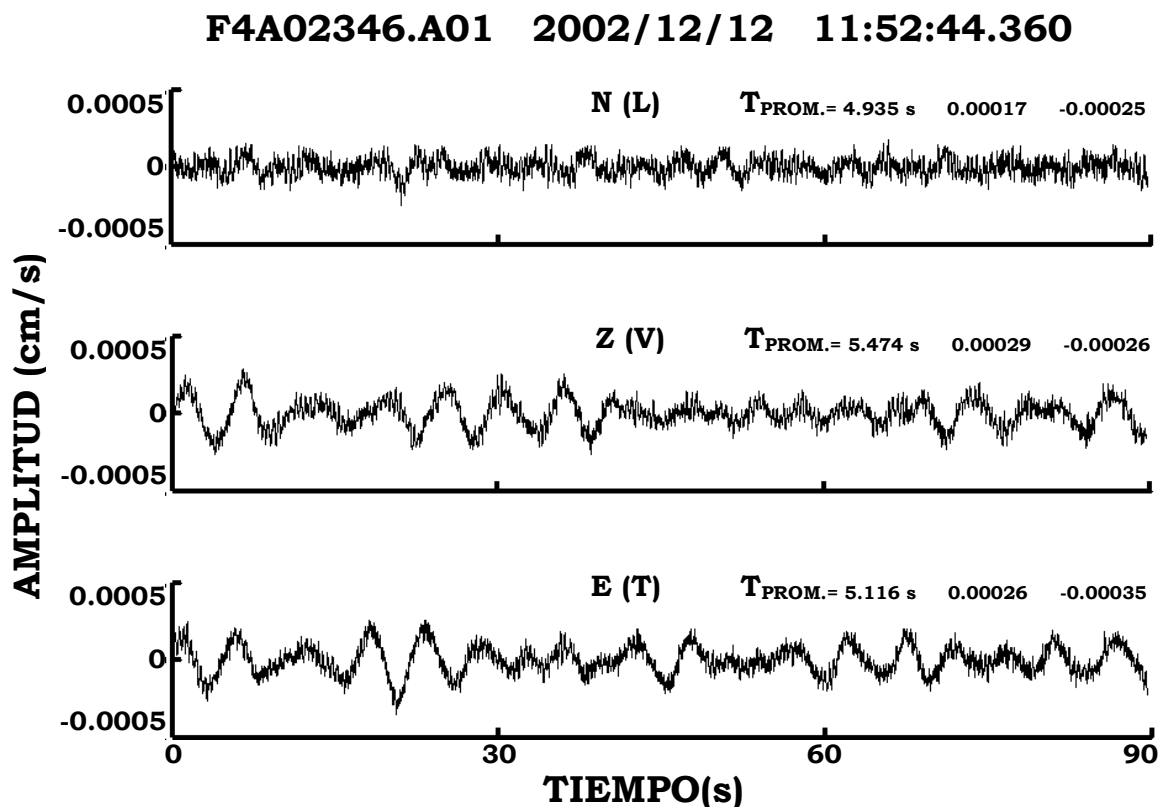


Figura 8. Sismograma de ruido obtenido en el sitio F4A (parte baja, 18 m) utilizando sismómetros de período intermedio. El encabezado se forma de las tres primeras letras, que es el código del sitio, dos cifras para los dos últimos dígitos del año de registro, tres para el día juliano, la extensión .A del código ASCII y dos cifras para indicar el número del registro. La siguiente parte del encabezado indica año, mes y día de la toma de los datos y por último el tiempo local en horas, minutos y segundos. Se incluye también, el nombre de cada componente, período promedio de la señal predominante de frecuencia baja y amplitudes máximas y mínimas.

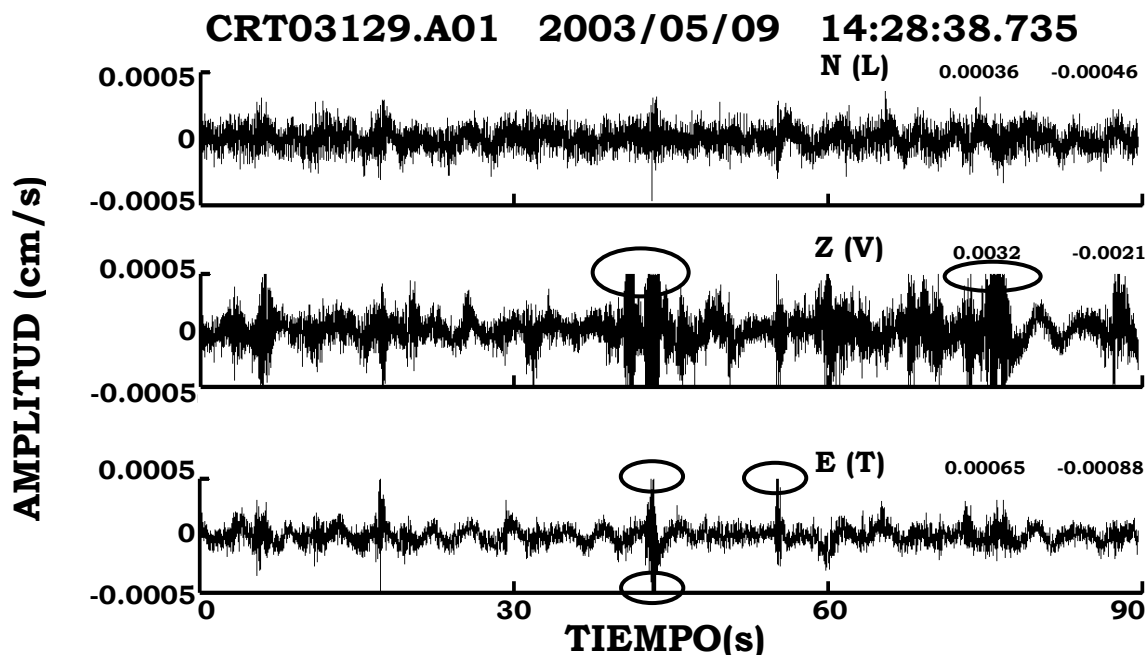


Figura 9. Sismograma de ruido obtenido en el sitio CRT (parte alta, ~159 m) utilizando sismómetros de período intermedio. La componente norte y este dan la impresión de estar saturadas (marcado con elipses); sin embargo, esto no es así, lo podemos comprobar al observar las flechas indicadas en la Figura 10. La descripción del encabezado es la misma que la descrita en el pie de la Figura 8.

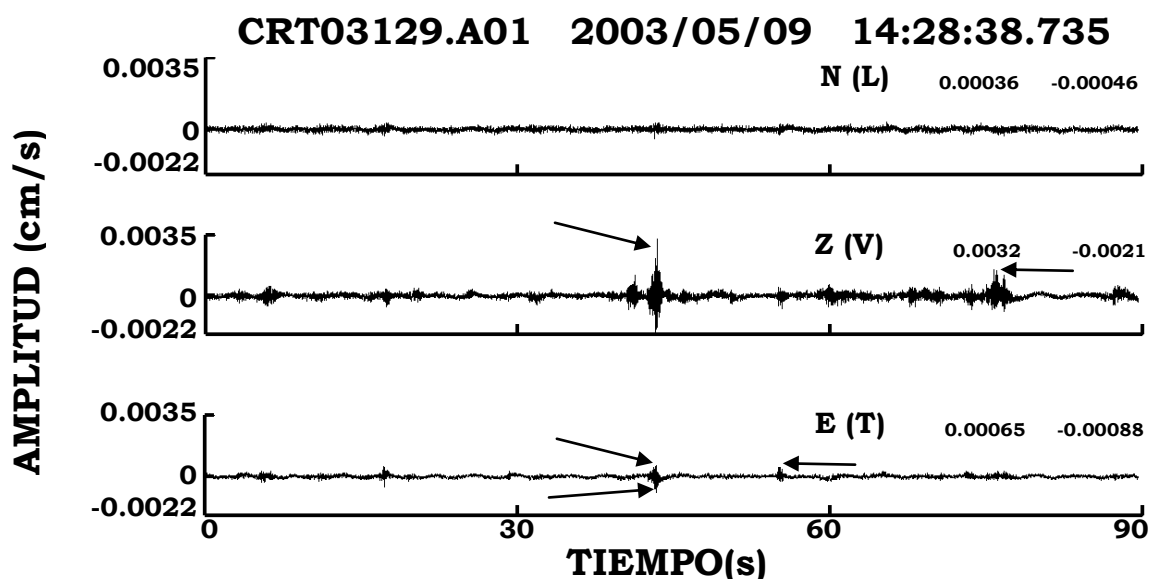


Figura 10. Sismograma de ruido obtenido en el sitio CRT (parte alta, ~159 m) utilizando sismómetros de período intermedio. La escala vertical está aumentada aproximadamente un factor de 7 con respecto a la Figura 9. Las flechas indican que efectivamente el sismograma no está saturado en la componente norte y este como se sugiere en la Figura 9 (con elipses).

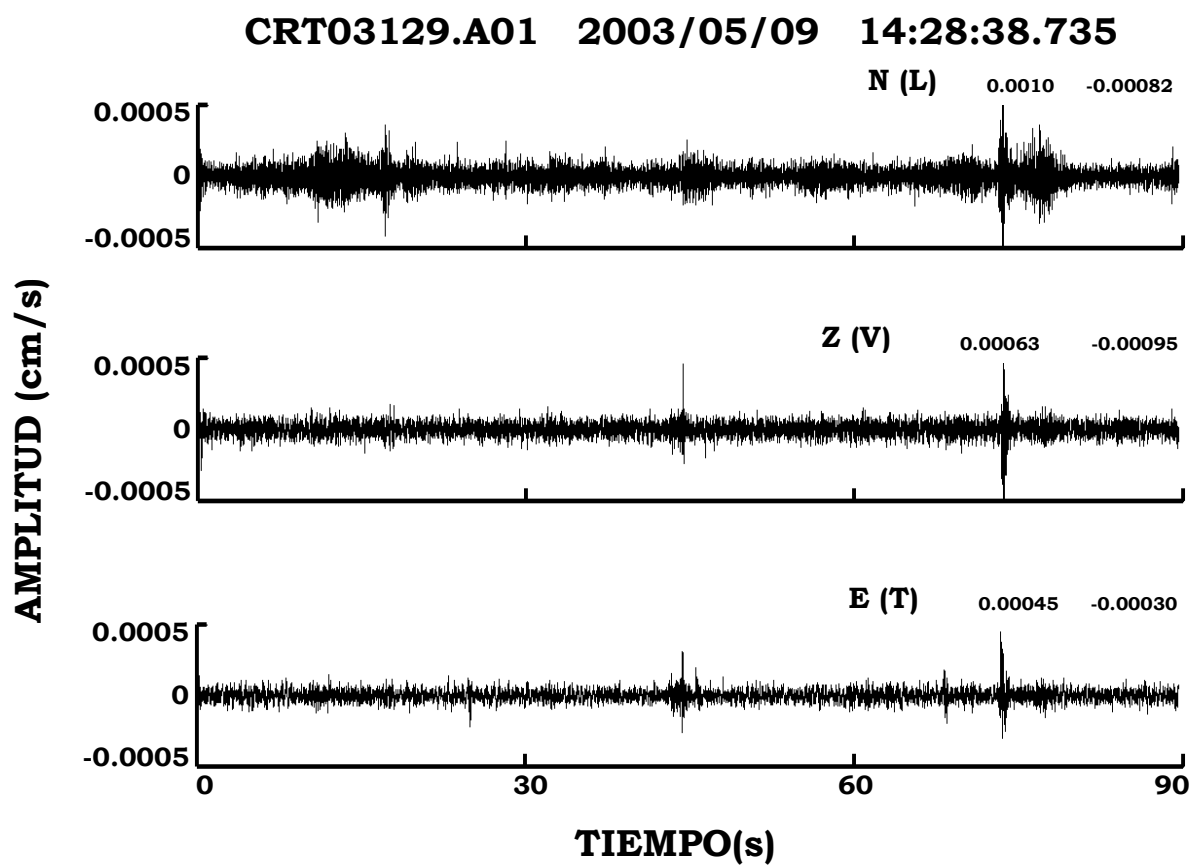


Figura 11. Sismograma de ruido obtenido en el sitio CRT (parte alta, ~159 m) utilizando sismómetros de período corto.

Aunque no fueron tomados en forma simultánea, los registros de ruido en el sitio F4A (parte baja) y el sitio CRT (cráter del volcán) presentan diferencias que resaltan a la vista. La primera de ellas es el contenido de frecuencias altas que se observan en los registros de CRT (Figuras 9 y 10) y que no se aprecian en F4A (Figura 8). La segunda diferencia es con respecto a las amplitudes, por ejemplo, en la componente N (L) las diferencias son de aproximadamente 1.8 a 2.1 veces mayores en CRT que en F4A. Es de resaltar también que en los registros de ambos sitios se encuentra presente una señal predominante de frecuencia baja con un período de 5.1s aproximadamente. El poder explicar a que se debe esta señal no está en los alcances de la presente investigación se requeriría hacer un estudio con un número mayor de registros. Como referencia Aki y Richards (1980) muestran el espectro de potencia de ruido sísmico en que resaltan dos “picos”, uno a 0.14 Hz y otro a 0.07 Hz y explican que ambos son debidos a ondas oceánicas. En nuestro caso, la frecuencia que observamos es de 0.2 Hz, en la que esta superpuesta señal de frecuencia alta. Con respecto a esta frecuencia, hay que recordar que en la zona hay ruido producido por el tráfico de maquinaria pesada en la zona del CGCP, el viento y pozos geotérmicos funcionando.

Para efectos de comparación con los registros de período intermedio (Figuras 9 y 10), presentamos en la Figura 11 los registros de ruido con instrumentación de período corto para el sitio CRT. En esta ocasión los registros se obtuvieron en forma simultánea. De la comparación podemos apreciar la consistencia de la presencia de las frecuencias altas en los registros, aunque las amplitudes ya no son directamente comparables por ser diferente la constante de motor de los sismómetros. Es de notar que los registros mostrados en la Figura 11 ya no está presente la señal con período de 4.9 a 5.4 s, la cual obviamente no se puede detectar con sismómetros de período corto (1s).

En la siguiente sección de la tesis describimos la técnica de Nakamura y la secuencia para obtener los cocientes espectrales H/V de cada sitio, a partir de registros de ruido como los mostrados en la sección anterior.

II.2 El ruido sísmico y la técnica de Nakamura

Es conveniente hacer una breve descripción del ruido sísmico y de una de las técnicas utilizadas para su análisis: la técnica de Nakamura (1989).

Ruido sísmico. Existen varias formas de llamarlo: microtrepidaciones, microsismos, ruido sísmico de fondo, campo natural, vibración o ruido ambiental, oscilaciones omnipresentes o microtemblores (Flores-Estrella *et al.*, 2004). Como ya hemos señalado, en el presente trabajo lo llamaremos simplemente ruido sísmico, el cual es una vibración permanente del suelo, producida por una combinación de fuentes cercanas y lejanas, es decir, actividades humanas y naturales (Figura. 12).

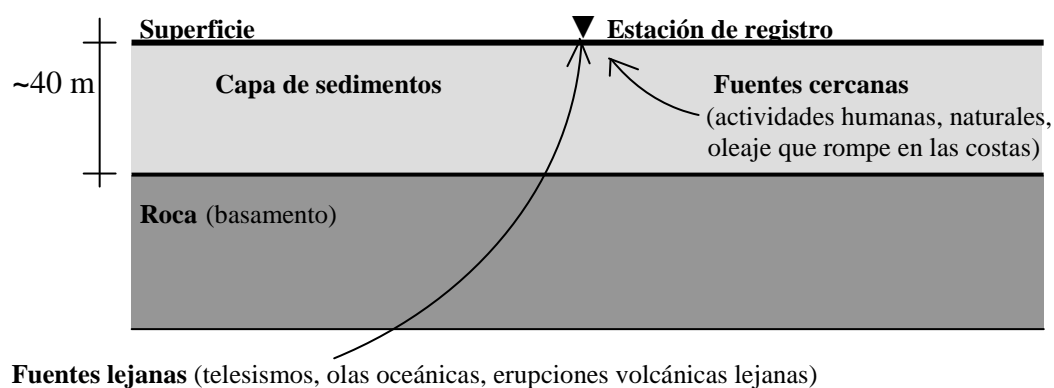


Figura 12. Esquema que ilustra el origen del ruido sísmico: Las fuentes lejanas y cercanas se combinan para formar el ruido sísmico.

El ruido sísmico se deriva de diferentes causas: olas oceánicas lejanas; en mar abierto la masa oceánica experimenta grandes movimientos que se refleja en una parte del contenido en frecuencias del ruido, es decir, a frecuencias menores de 0.3 y hasta 0.5 Hz. El oleaje cercano a las costas y el viento, entre 0.3 y 0.5 hasta 1 Hz, y la principal causa: las actividades humanas. Estas actividades aportan el mayor contenido en frecuencias, mayores a 1 Hz (Flores-Estrella *et al.*, 2004).

La técnica de Nakamura. Es un método numérico que pretende aislar la frecuencia fundamental (periodo dominante) del movimiento del suelo. Esta técnica supone que el efecto de sitio se da por la interacción entre las ondas sísmicas y un medio lateralmente homogéneo. La técnica conlleva la obtención de espectros de Fourier en la superficie de la estratigrafía y en la base del basamento (Figura 13).

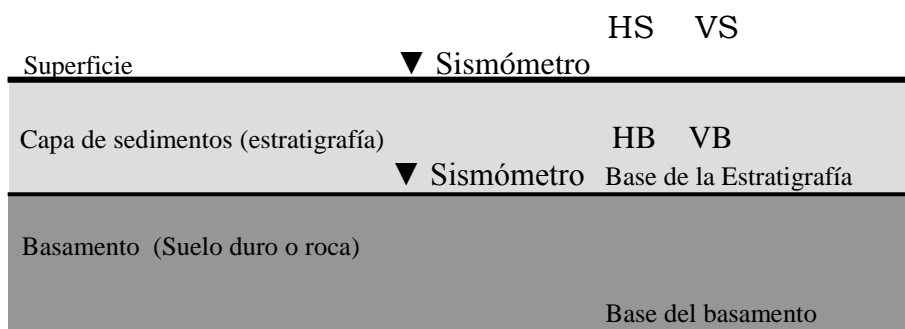


Figura 13. Capa infinita en la que sólo se considera arribo perpendicular de energía a las capas (basamento y estratigrafía). Se supone que no afecta el material existente en las otras dos dimensiones (planos horizontal y perpendicular). HS, VS, HB, VB, son respectivamente los espectros de Fourier de las componentes horizontal y vertical en superficie y horizontal y vertical en la base de la estratigrafía.

El autor de este método (Nakamura, 1989) afirma que el espectro de Fourier en superficie está compuesto por fuentes lejanas (telesismos, olas oceánicas, erupciones volcánicas lejanas, etc.), por fuentes cercanas (actividades humanas y naturales) y por el llamado efecto de sitio:

$$HS = FH \cdot FR \cdot S \quad (1)$$

Donde las variables representan los espectros de Fourier de;

HS , componente horizontal en superficie

FH , las ondas de cuerpo (Fuentes lejanas)

FR , las ondas superficiales (Fuentes cercanas)

S , efecto de sitio

Por *efecto de sitio* entenderemos aquella modificación que experimenta la señal sísmica al arribar a las primeras decenas de metros (50 m aproximadamente) de la superficie terrestre. En el presente trabajo estamos interesados en la modificación de la amplitud debida a los sedimentos.

El método consiste en aislar S (el efecto de sitio) de la ecuación (1); para esto tomaremos en cuenta que el espectro de Fourier de la componente horizontal en la base del basamento está formado sólo por ondas de cuerpo (fuentes lejanas):

$$HB = FH . \quad (2)$$

En cambio, el espectro de Fourier de la componente vertical en superficie está compuesto también por ondas de cuerpo (fuentes lejanas) y además por ondas superficiales (fuentes cercanas), es decir:

$$VS = FH \cdot FR . \quad (3)$$

Procedemos a continuación a hacer cocientes de los espectros de Fourier HS y HB , es decir, la componente horizontal en superficie entre la componente horizontal en roca:

$$C^* = \frac{HS}{HB} , \quad (4)$$

donde:

C^* , primer cociente.

Sustituyendo (1) y (2) en (4) queda:

$$C^* = FR \cdot S . \quad (5)$$

De igual forma, en la componente vertical en la base del basamento, sólo tendremos ondas de cuerpo (fuentes lejanas):

$$VB = FH . \quad (6)$$

Un segundo cociente entre el espectro de Fourier de la componente vertical en superficie (VS), y el espectro de Fourier de la componente vertical pero en la base del basamento (VB), nos enfatizará las ondas superficiales:

$$\frac{VS}{VB} = FR . \quad (7)$$

Al efectuar la división de los cocientes de los espectros horizontales y verticales, es decir (4) entre (7) tendremos

$$C = \frac{\frac{HS}{HB}}{\frac{VS}{VB}} = \frac{HS \cdot VB}{HB \cdot VS} . \quad (8)$$

Resultado que podemos escribir como:

$$C = \frac{HS}{VS} \cdot \frac{FH}{FH} . \quad (9)$$

Debido a la ecuación (2), el segundo cociente de la ecuación (9) es 1, porque las fuentes lejanas provienen de una gran cantidad de eventos sísmicos y tienden a homogenizarse. Es decir, tienden a ser iguales; con base en esta suposición el efecto de sitio será simplemente:

$$C = \frac{HS}{VS} = S. \quad (10)$$

Esto es, el cociente entre los espectros de las componentes horizontales sobre verticales en superficie.

II.3 Procesamiento de datos: cálculo de los cocientes H/V

Con base en la técnica de Nakamura y trabajando en el ambiente de MATLAB (versión 7.0.0), obtenemos los cocientes espectrales para cada uno de los sitios mostrados en la Figura 6. El siguiente diagrama de flujo nos indica el funcionamiento del programa “hov” escrito por Vidal Villegas (2008, comunicación personal) para obtener cocientes espectrales H/V.

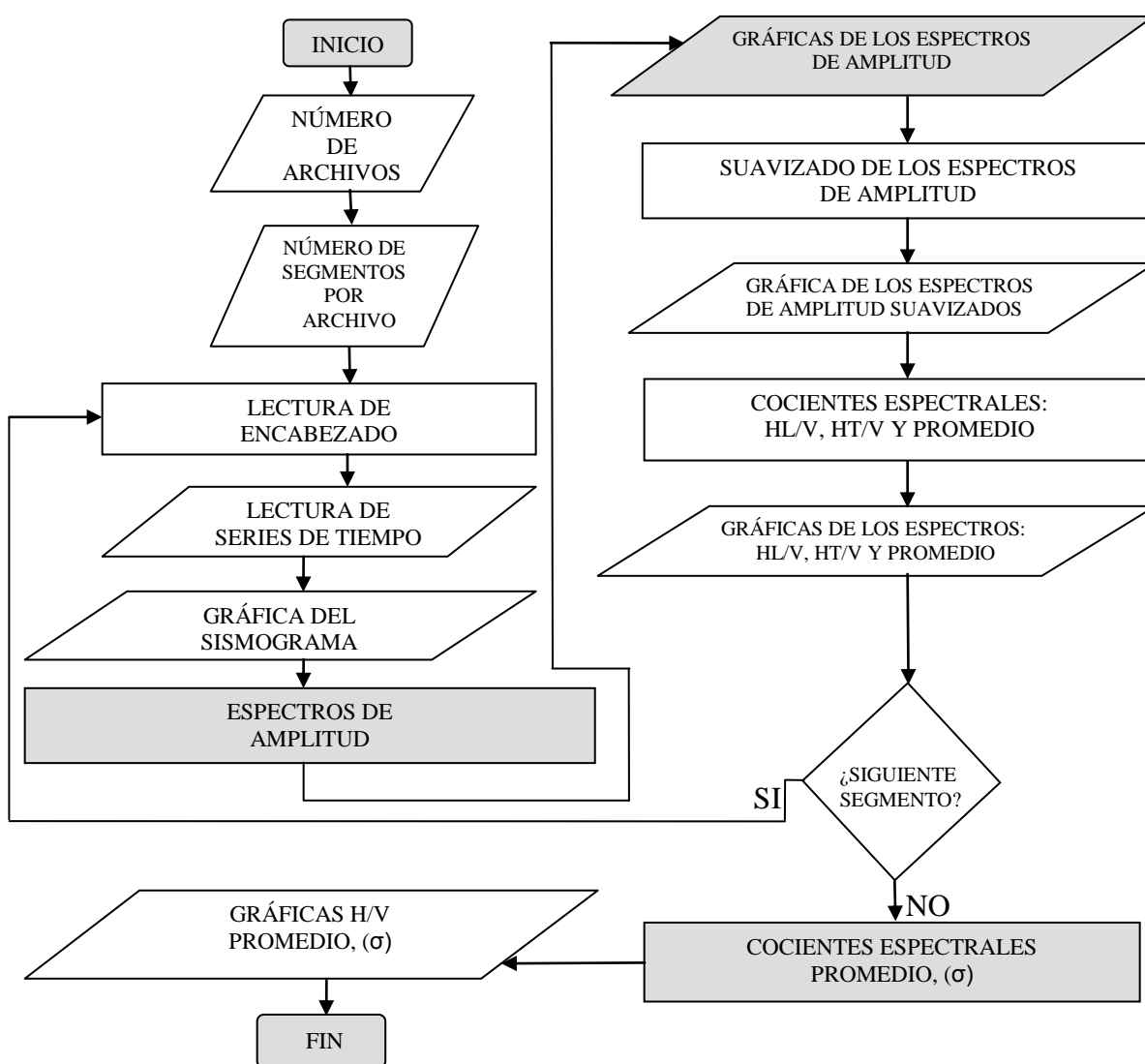


Figura 14. Diagrama del procesamiento semiautomático aplicado a los sismogramas de ruido sísmico para obtener cocientes espectrales H/V.

El programa “hov” (Figura 14) funciona de la siguiente manera: primeramente al programa se le da el número total de archivos de salida (en código ASCII) grabados en el sitio, ver Tabla IV. Por ejemplo, para el sitio ROAD se grabaron 10 archivos. La longitud de grabación de cada archivo fue de 90 s a una razón de 200 muestras por segundo (1.8×10^4 muestras). Esta longitud de grabación fue seleccionada para evitar saturación en la grabadora. Con base en la razón de muestreo, el intervalo de tiempo entre cada muestra será:

$$\Delta t = \frac{1}{200} = 0.005s, \quad (11)$$

valor que usaremos para calcular el intervalo de frecuencia.

En seguida, seleccionamos el número de segmentos de acuerdo a la siguiente relación:

$$n_{seg} = \frac{LT_{muestreo}}{LV}. \quad (12)$$

Donde:

n_{seg} , número de segmentos

$LT_{muestreo}$, longitud total (1.8×10^4 muestras)

LV , longitud de la ventana o longitud del segmento (4096 muestras).

Sustituyendo valores podremos obtener el valor para n_{seg} , es decir:

$$n_{seg} = \frac{1.8 \times 10^4}{4096} = 4.39 \quad (13)$$

El resultado de la ecuación (13), nos indica que tenemos el número de muestras suficientes para procesar 4 segmentos por cada archivo. En el denominador escogimos 2×10^4 (4096, longitud del segmento LV) muestras porque deseamos poder definir la frecuencia

fundamental para cada sitio. De acuerdo al intervalo de muestreo obtenido en la ecuación (11), tendremos el siguiente intervalo de frecuencias:

$$\Delta f = \frac{1}{(2^{12})(0.005)} = 0.049 \text{ Hz} \quad (14)$$

valor que consideramos apropiado, ya que para ambientes sedimentarios, se ha reportado que la frecuencia fundamental está entre 0.5 Hz y 1 Hz (Bard, 1998), con este Δf tendremos el número suficiente de puntos espectrales (20) hasta llegar a 1 Hz.

El paso siguiente es efectuar la lectura del primer segmento (de los cuatro según [13]), para a continuación obtener el graficado del sismograma correspondiente a este primer segmento (Figura 15). La finalidad de presentar el sismograma de cada ventana, obedece a que podemos verificar la calidad de éste. Esto es, que no haya saturación en la señal, amplitudes demasiado altas (como las marcadas con flechas en la Figura 10) provocadas por el paso de vehículos pesados, entre otros.

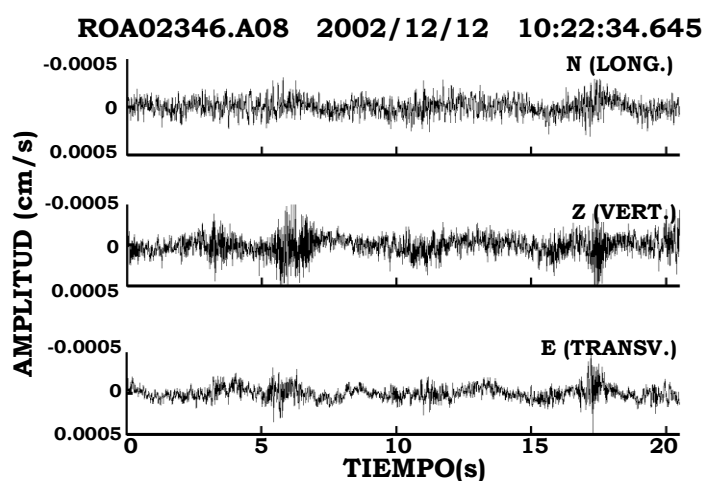


Figura 15. Sismograma de ruido perteneciente al primer segmento (4096 muestras, longitud 20.48 s) del sitio ROAD (24 m). El encabezado se forma de las tres primeras letras, que es el código del sitio, dos cifras para los dos últimos dígitos del año de registro, tres para el día juliano, la extensión .A del código ASCII y dos cifras para indicar el número del registro. La siguiente parte del encabezado indica año, mes y día de la toma de los datos y por último el tiempo local en horas, minutos y segundos del inicio del registro. Se incluye también, el nombre de cada componente.

Una vez que verificamos la calidad del sismograma, calculamos su espectro de amplitud (Figura 16) por medio de la Transformada Rápida de Fourier, con el fin de observar el contenido de frecuencias de la señal. A continuación suavizamos los espectros de amplitud resultantes (Figura 17) por medio de un suavizador de tres puntos. Este suavizador consiste en tomar tres puntos y calcular la media aritmética, enseguida se toman los siguientes tres y se repite el cálculo hasta completar los 2048 puntos espectrales.

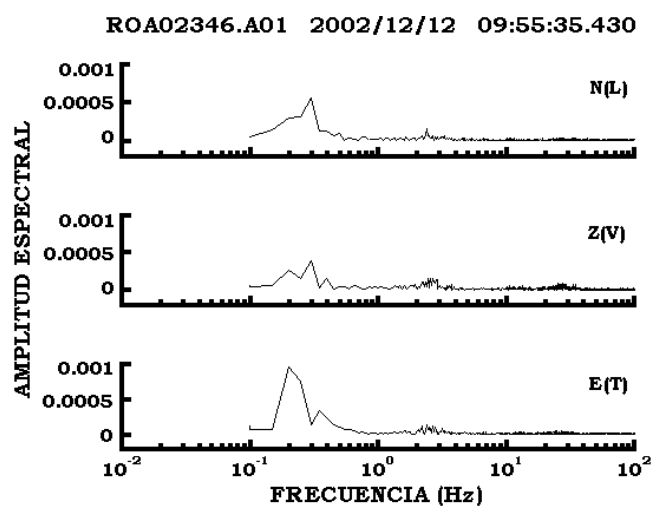


Figura 16. Espectro de amplitud del primer segmento (4096 muestras, longitud 20.48 s) perteneciente al sitio ROAD (24 m).

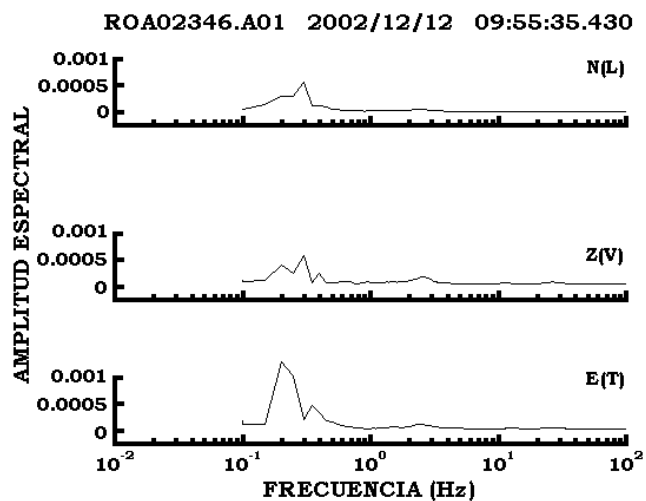


Figura 17. Espectro de amplitud suavizado del primer segmento (4096 muestras, longitud 20.48 s) perteneciente al sitio ROAD (24 m).

El cálculo de los cocientes H/V del primer segmento (Figura 18), se hace simplemente efectuando cocientes entre los espectros mostrados en la Figura 17, es decir:

$$LONGITUDINAL = \frac{N(L)}{Z(V)} \quad (15)$$

Donde: *LONGITUDINAL*, Es el cociente H/V Longitudinal (Figura 18)

N(L), Es la componente norte o Longitudinal (Figura 17)

Z(V), Es la componente Zeta o Vertical (Figura 17)

$$TRANSVERSAL = \frac{E(T)}{Z(V)} \quad (16)$$

Donde: *TRANSVERSAL*, Es el cociente H/V Transversal (Figura 18)

E(T), Es la componente este o Transversal (Figura 17)

Z(V), Es la componente Zeta o Vertical (Figura 17)

El valor raíz cuadrático medio (RCM, Figura 19) lo calculamos mediante la siguiente ecuación:

$$ho\ var\ ms = \sqrt{\frac{LONGITUDINAL^2 + TRANSVERSAL^2}{2}} \quad (17)$$

Donde: *ho var ms* Es la raíz cuadrada del promedio de los cocientes espectrales elevados al cuadrado.

LONGITUDINAL² Cocientes espectrales de la componente longitudinal al cuadrado

TRANSVERSAL² Cocientes espectrales de la componente transversal al cuadrado

Ya que obtuvimos los cocientes H/V del primer segmento, repetimos el procesado para los restantes 3 segmentos, para este primer archivo. El programa almacena los cocientes espectrales de cada segmento, hasta completar el último archivo (en este caso 10), con lo que en total tenemos 40 cocientes H/V.

Por último, el programa efectúa el promedio de los 40 cocientes H/V de cada componente y de la resultante (etiqueta como “RCM” en la Figura 18). La desviación estándar para los tres tipos de cocientes (Figura 19) se calcula a partir de:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (18)$$

Donde: N , es el número total de los puntos espectrales (40) para cada frecuencia

x_i , es el valor de amplitud de cada punto espectral (40).

\bar{x} , es el promedio de los valores de amplitud de los 40 puntos espectrales para cada frecuencia.

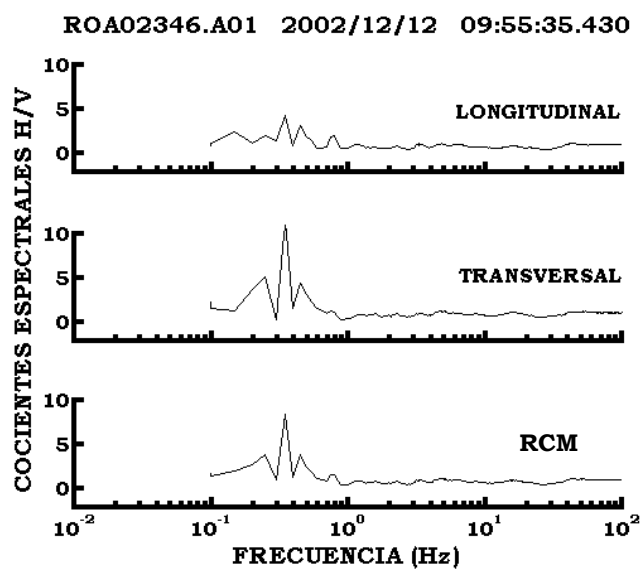


Figura 18. Cocientes espectrales H/V del primer segmento (4096 muestras, longitud 20.48 s) perteneciente al sitio ROAD (24 m).

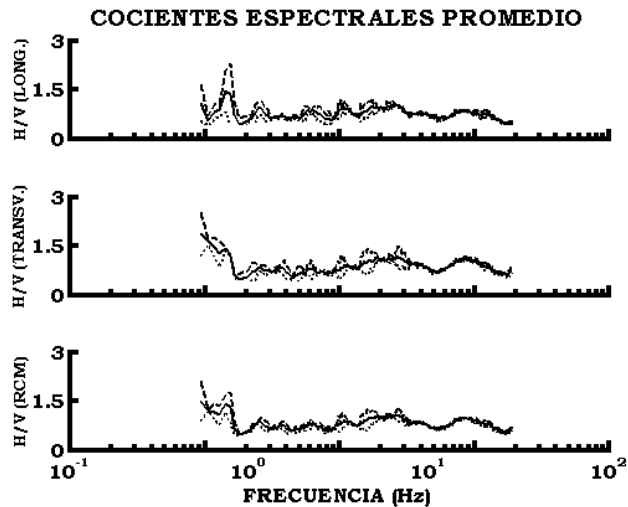


Figura 19. Cocientes espectrales H/V de dos segmentos (8192 muestras, longitud 40.96 s) pertenecientes al sitio ROAD (24m) y su desviación estándar (líneas discontinuas).

II.4 Discusión de resultados

Con base en lo descrito en las secciones II.2 y II.3, efectuamos el cálculo de los cocientes espectrales H/V para cada uno de los sitios del perfil mostrado en la Figura 6. Presentamos en la Figura 20 los cocientes H/V obtenidos para la mayoría de estos sitios.

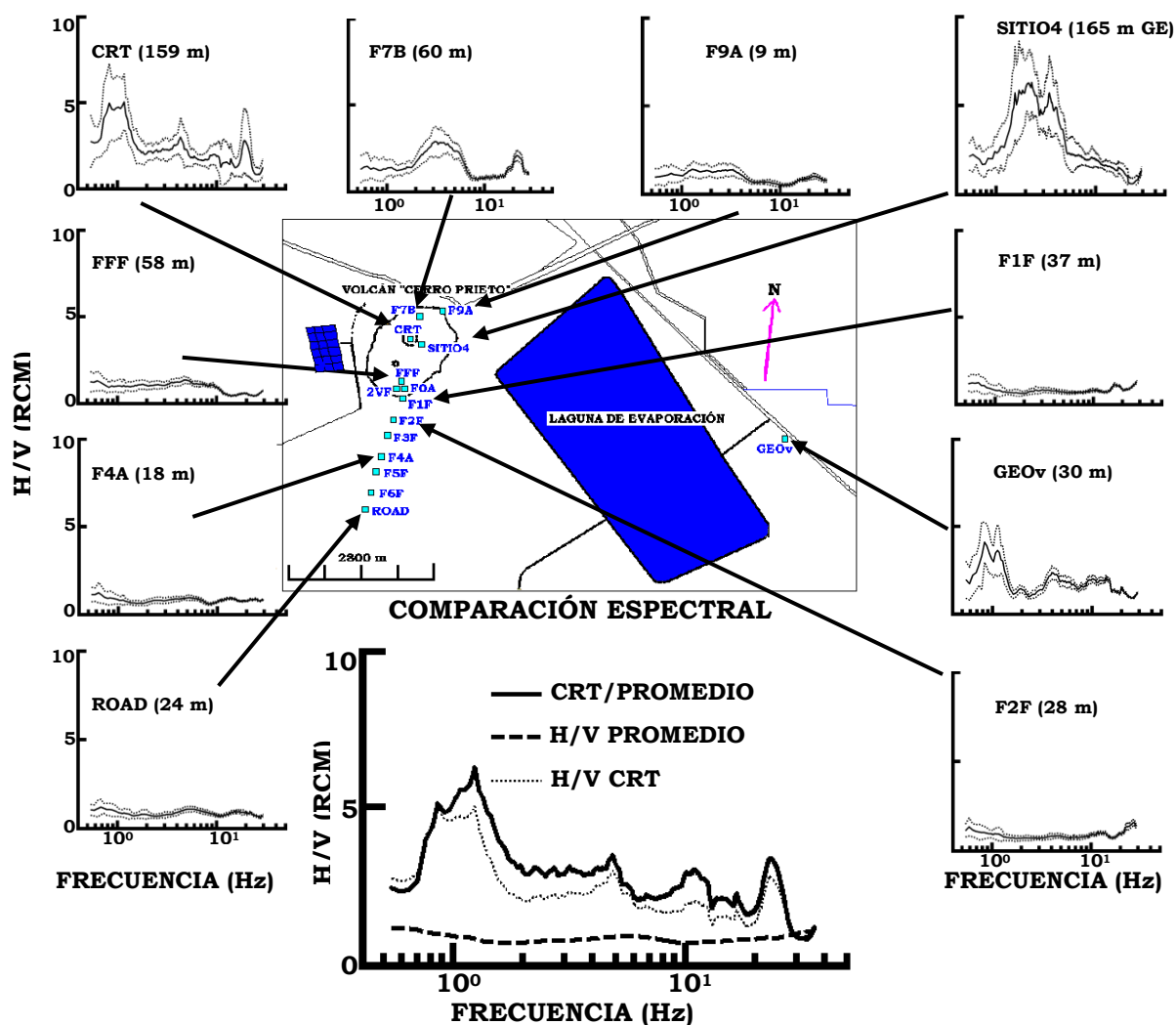


Figura 20. Resultados de cocientes espectrales de algunos sitios del perfil y comparación espectral entre el sitio CRT y el promedio de cocientes espectrales H/V de los sitios de la parte baja (desde ROAD hasta F1F). En las graficas de los cocientes H/V de los sitios, las líneas punteadas representan la desviación estándar, la línea continua es el cociente H/V (RCM), también se indica el código del sitio y su elevación con respecto al nivel medio del mar.

Los resultados de cocientes H/V de la Figura 20, los dividimos en 3 grupos:

- Sitios alejados del volcán (parte baja) ubicados sobre material sedimentario ROAD, F6F, F5F, F4A, F3F, F2F, F1F, 2VF y F0A (altura promedio 31 m)
- Sitios sobre el volcán (diferentes altitudes) ubicados en material riolodácico CRT (159 m), SITIO4 (165 m GE) y F7B (60 m)
- Sitios complementarios pero dentro del área de estudio (Figura 1) sobre sedimento GEOv (30 m)

II. 4.1 Sitios alejados

En la siguiente gráfica se muestra una comparación de los cocientes espectrales H/V resultantes para el primer grupo de sitios que se encuentran ubicados a lo largo del perfil del VCP.

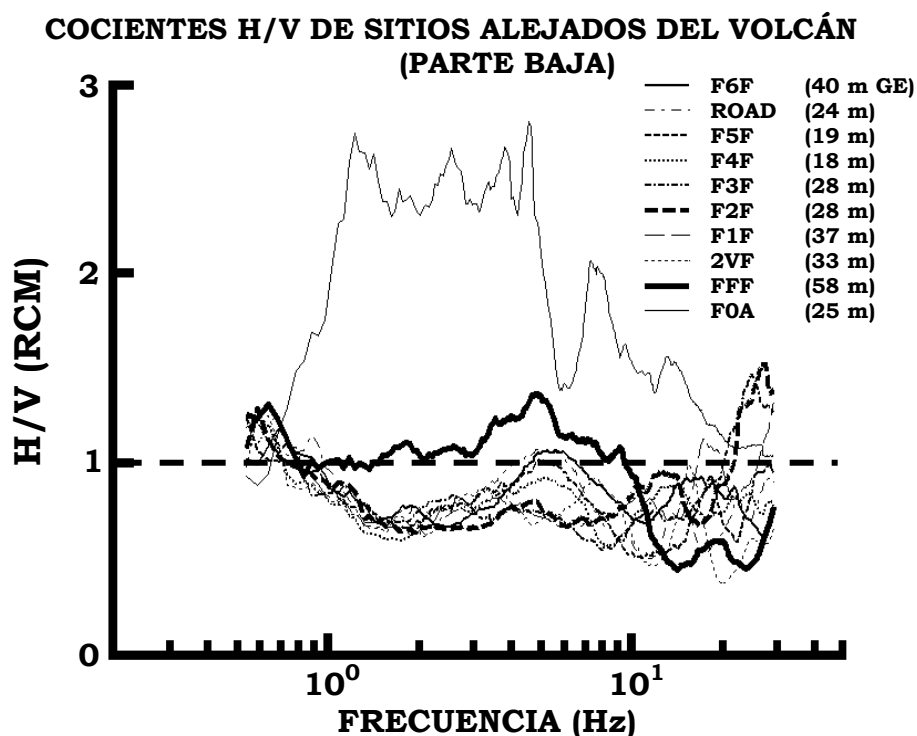


Figura 21. Resultados H/V de los sitios alejados del volcán (a distancias de 0.9 a 3.5 km con respecto al sitio CRT y alturas promedio de 31 m). La línea discontinua horizontal de amplitud 1, indica el cociente espectral de un sitio donde no existe amplificación.

De la Figura 21 podemos apreciar que en el intervalo entre 1 y 20 Hz, el cociente H/V es <1 y solamente 3 sitios (F1F, F2F y F3F) rebasan el valor de 1, con un promedio de 1.4 entre 20 y 30 Hz. Esto es, que no existe amplificación del movimiento del terreno con excepción de F0A (ubicado sobre el VCP a una altura de 25 m). Entre 20 y 28 Hz aproximadamente, en los sitios F1F, F2F, y F3F la amplitud alcanza valores de hasta 1.5, lo cual no es significativo. El sitio F0A (25 m) es el único en el cual tenemos amplitudes de 2.7 entre 1 y 5 Hz, no obstante consideramos que está dentro de las llamadas amplitudes bajas (< 4). En el cociente H/V de F0A observamos 4 “picos” en el intervalo de 1 a 5 Hz con los siguientes valores: 1 Hz y 2.7 de amplitud, 2.7 Hz y 2.7 de amplitud, 4 Hz y 2.6 de amplitud, por último 5 Hz y 2.8 de amplitud aproximadamente y en cuanto al sitio FFF (58 m) solamente notamos dos cocientes H/V máximos uno a 0.6 Hz con amplitud de 1.3 y otro a 4.8 Hz de amplitud 1.4.

Los valores de cocientes espectrales H/V obtenidos en los sitios de la parte baja del volcán Cerro Prieto, nos sugieren una amplificación promedio < 1 en casi todo el intervalo de frecuencias analizado (0.4 a 50 Hz). Los sitios de la parte baja del VCP (ubicados a una altura promedio de 31 m) se encuentran al sur-suroeste del volcán sobre suelo sedimentario es decir, arena media, limo y arcilla (Martín-Barajas *et al.*, 1998), producto de abanicos aluviales procedentes de la sierra Cucapah.

Si estamos hablando de materiales aluviales entonces tomaremos en cuenta dos consideraciones:

1. En suelos sedimentarios esperaríamos obtener amplificaciones mayores a 1 (Bard, 1998), por lo pronto aún no podemos dar una explicación hasta comprobar con datos de acelerogramas.
2. La amplificación promedio en los sitios de la parte baja nos podría indicar que se trata de sedimentos consolidados, esperamos corroborar con datos de acelerogramas en el siguiente capítulo.

En estos sitios podemos decir que no hay amplificación del movimiento del terreno, con ello esperaríamos que las ondas sísmicas tengan poca modificación, lo cual es sumamente importante para la instalación permanente de equipo sísmico. No obstante, esperamos

corroborar con resultados de cocientes H/V del sitio R02 donde funcionó una estación de aceleración. Los resultados anteriores nos sugieren que la amplificación del movimiento del terreno en estos sitios es muy pequeña.

Aunque es difícil apreciar la frecuencia fundamental para estos sitios, consideramos que puede ser 0.6 Hz con amplitud de 1.2 (ver el promedio en la Figura 25).

Veamos que pasa ahora en sitios de mayor elevación y ubicados en el VCP.

II.4.2 Sitios sobre el volcán

Debido a la topografía del edificio volcánico sólo contamos con cinco sitios: CRT, SITIO4, F7B, F0A y FFF. El primero está ubicado sobre el cráter a una altura de 159 m, SITIO4 a una altura de 165 m GE, F7B a 60 m, F0A a 25 m y FFF a 58 m y F7B a 60 m.

En la siguiente gráfica presentamos los cocientes H/V de los sitios sobre el VCP:

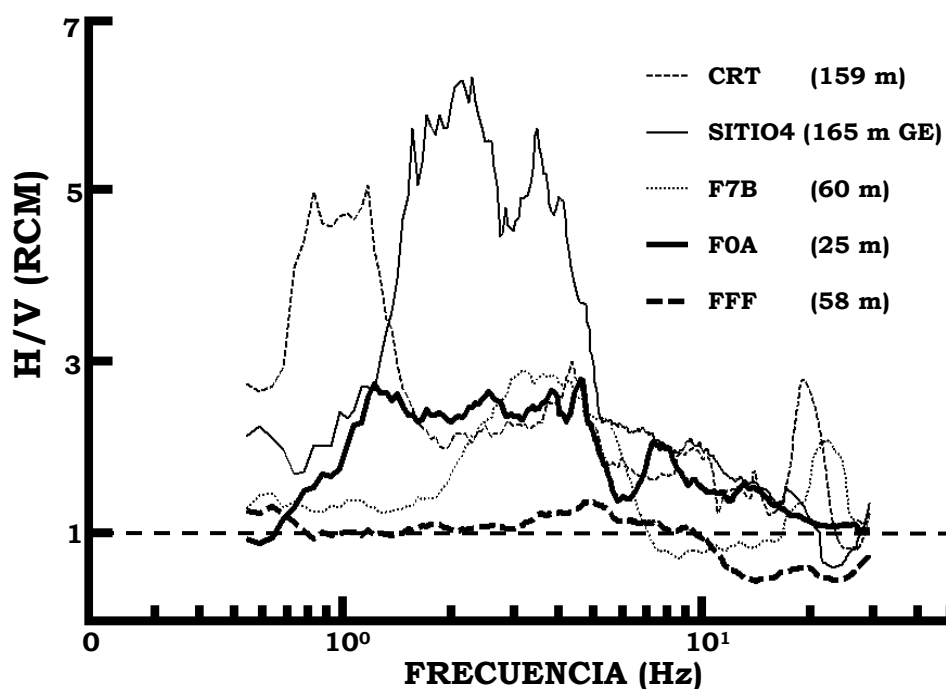


Figura 22. Resultados H/V de los sitios ubicados en la parte alta del volcán (CRT y SITIO4), parte media (F7B y FFF) y parte baja (F0A). La línea discontinua horizontal de amplitud 1, indica el cociente espectral de un sitio donde no existe amplificación.

Vemos ahora los resultados de la Figura 22, existen amplificaciones entre 5 y 6 a frecuencias entre 0.7 y 4 Hz en los sitios CRT y SITIO4; el sitio F7B, que se encuentra en la parte media del volcán (Figura 6), nos indica una amplificación de 3 a 3 Hz, lo que nos puede sugerir que es una amplificación media.

Observando con más detalle los cocientes H/V del sitio SITIO4 (próximo a CPX), apreciamos amplitudes menores a 3 a frecuencias entre 0.5 1.2 Hz. En 2.3 Hz hemos obtenido el máximo valor de amplificación del perfil, este es de 6.3, un segundo “pico” se presenta a 3.5 Hz con amplitud de 5.7, de los 3.5 Hz la curva vuelve a decaer hacia valores de H/V menores a 3 hasta los 30 Hz.

De los cocientes H/V de F0A y F7B ya hemos proporcionado los resultados en el apartado II.4.1, con respecto al sitio FFF en el intervalo de 3 a 8 Hz tenemos cocientes H/V mayores a 1 siendo el valor máximo de 1.5 a 5 Hz aproximadamente.

Como ya observamos anteriormente en la Figura 22, las amplitudes entre 5 y 6 representan aproximadamente 5 veces más que las amplificaciones de los sitios de la parte baja (Figura 21). Es decir, en la cima del volcán la amplitud es 5 veces mayor con respecto a la parte baja. Estos resultados sugieren que un evento sísmico será amplificado en la parte alta del VCP que en sitios en la parte baja, Un ejemplo de la amplificación de la señal sísmica en la parte alta del VCP con respecto a su parte baja (R02), lo presentamos en la Figura 23.

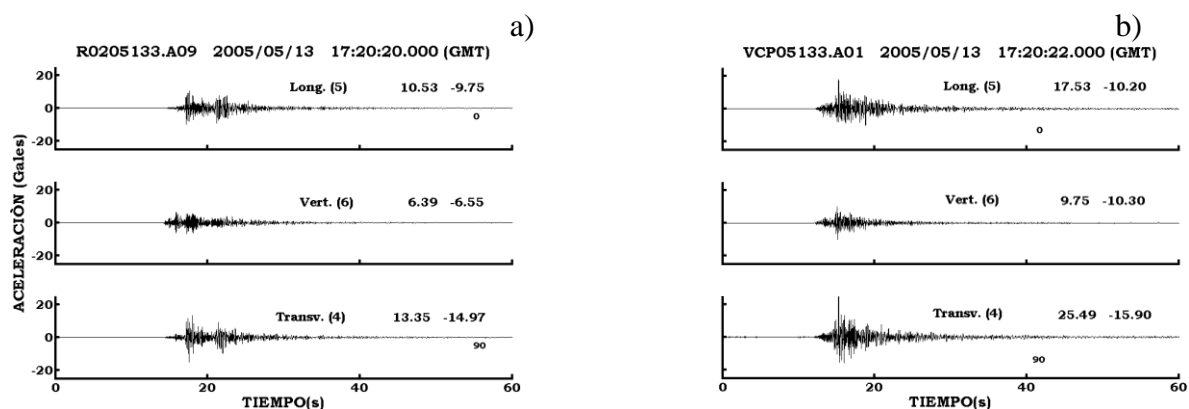


Figura 23. Acelerógramas del sismo ocurrido el 13 de Mayo de 2005 ($M_L=3.9$) registrado en las estaciones a) R02 a una altura de 24 m, distancia epicentral 8 km y b) VCP a una altura de 110 m, distancia epicentral de 7.8 km. Hay que notar las aceleraciones máximas en b) las cuales son casi el doble que en a).

Esta amplificación ya la habíamos anticipado con los resultados de las Figuras 8 a 11. Estas observaciones las confirmaremos al trabajar con datos de aceleración y que trataremos en el siguiente capítulo.

Explicar la razón de la existencia de amplificación alta en la cima del VCP, al menos en esta sección no será posible debido a los pocos datos con que disponemos, tanto geológicos como sismológicos. En el presente trabajo no es posible inferir siquiera cual es la composición interna que puede tener el VCP. Rebollar *et al.* (2003) reportan, con base en el estudio de un enjambre de sismos ocurrido en los alrededores y por debajo del volcán Cerro Prieto, una razón de velocidades $V_p/V_s = 1.91$. Los autores sugieren que este valor está asociado con un medio saturado de fluido o parcialmente fundido.

¿Para que estimar cocientes H/V? Esta pregunta ya la tenemos resuelta, ver sección II.2, ahora ¿para que estimar frecuencia fundamental en el cráter del VCP?, damos la respuesta con base en los resultados de la Figura 22. En el sitio CRT (159 m) los cocientes espectrales H/V nos sugieren que la frecuencia fundamental en el cráter es de 1 Hz con una amplitud aproximada de 5 (Figura 22). Estimar la frecuencia fundamental en el cráter del volcán tiene como objetivo obtener el primer modo de vibración y explicar las amplificaciones altas reportadas por Vidal Villegas *et al.* (2007).

II.4.3 Sitios complementarios

Debido a las amplitudes altas registradas por la estación de aceleración GEO (Figura 4b), decidimos aprovechar las muestras de ruido que se tomaron en el sitio donde anteriormente funcionaba la estación (separado a una distancia de 190 m apartir de diciembre de 2002 respecto a su posición actual) con el propósito de obtener los valores H/V respectivos. Al sitio le denominamos GEOv (Figuras 6 y 20) para diferenciarlo de la estación GEO. La distancia de este sitio a CRT es de aproximadamente 7600 m (Figuras 6 y 20) y se encuentra al este del VCP sobre suelo sedimentario. Los resultados de los cocientes los mostramos en la siguiente figura.

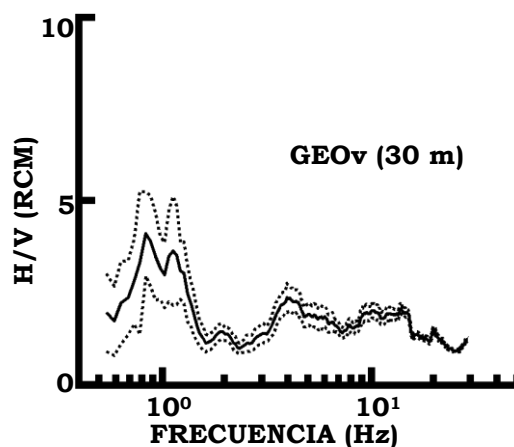


Figura 24. Resultados de cocientes espectrales H/V del sitio GEOv (30 m), las líneas discontinuas representan la desviación estándar.

Aproximadamente entre los 0.8 y 1.1 Hz existe una amplitud de 4, lo que nos sugiere que en algunos lugares alejados del VCP se presentan dichas amplitudes.

Efectuando una comparación con resultados de 17 acelerogramas que presentó González *et al.* (2001) para el mismo sitio, observamos una frecuencia fundamental cercana a 1 con una amplitud entre 10 y 20. La metodología utilizada por estos autores consistió en 17 acelerogramas de sismos registrados en la estación GEO con magnitudes entre 2.2 y 4.0. Los epicentros se ubicaron en un círculo de radio de 7 km teniendo como punto central a la estación GEO. En el siguiente capítulo daremos más resultados del sitio GEO pero ahora con datos de acelerogramas seleccionados para el presente estudio.

Planteamos el problema de la amplificación alta en el sitio ocupado por la estación de aceleración GEO, ¿el porque de esta amplificación? Trataremos de dar una respuesta a esta pregunta en cuanto tengamos los resultados de cocientes H/V de acelerogramas y cuando estimemos un modelo de la estructura somera (0-40 m) del sitio, (resultados que discutiremos en los Capítulos III y IV). Por lo pronto, sólo diremos que la amplitud obtenida en el sitio GEOv se encuentra dentro de lo que hemos venido llamando “amplitud alta”, es decir ≥ 4 (Figura 24). En cuanto a la frecuencia fundamental, podemos decir que es típica de un lugar donde predomina el sedimento (Bard, 1998).

II.4.4 Comparación espectral

Cuando se trabaja con el cálculo de cocientes espectrales H/V, una de sus principales ventajas es la de poder obtener la frecuencia fundamental del suelo. Con el objetivo de estimar amplificación del movimiento del terreno, es de suma importancia obtener los cocientes espectrales H/V de un sitio, cuya ubicación esté directamente sobre roca para así poder comparar resultados a partir de un sitio de referencia.

Como ya se mencionó, en un sitio en roca, la amplificación del movimiento del movimiento del terreno es 1; por esta razón, hacemos una comparación de resultados entre amplificación en sedimentos y en roca. En nuestro caso, considerando que no hay amplitud del movimiento del terreno en sitios alejados del volcán de Cerro Prieto (los valores obtenidos son ≤ 1 , Figura 25), decidimos calcular un promedio aritmético de los cocientes espectrales de estos sitios y el resultado compararlo con los cocientes obtenidos para el cráter del volcán.

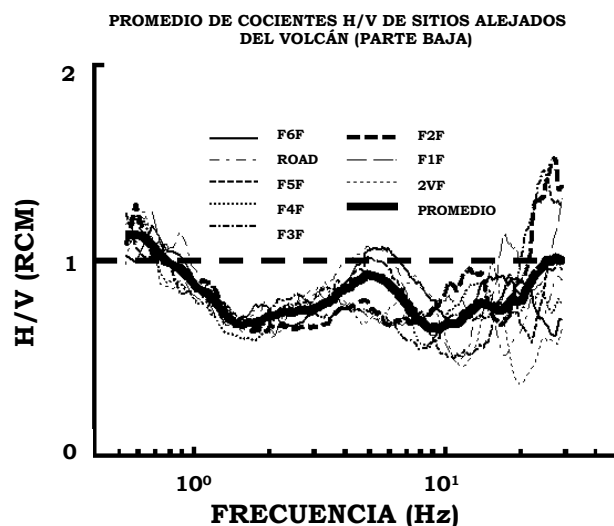


Figura 25. Promedio de cocientes espectrales H/V de sitios alejados del volcán (parte baja). Se observan claramente amplitudes bajas en el promedio de los sitios alejados del VCP y comprendidos en el perfil de ruido. La línea discontinua horizontal de amplitud 1, indica el cociente espectral de un sitio donde no existe amplificación.

De los resultados de la Figura 25, nos llama la atención la amplitud baja en casi todo el intervalo de frecuencias, a pesar de ser sitios ubicados sobre sedimentos. En la misma figura podemos identificar un primer “pico” de 1.2 de amplitud a 0.6 Hz, el otro de 0.9 de amplitud a 5 Hz de frecuencia y el último con una amplitud aproximada de 1 a 28 Hz.

Con el promedio de estos cocientes espectrales H/V, procedimos a comparar los cocientes de los sitios CRT, SITIO4, F7B y F0A contra los valores promedio calculados anteriormente, en la siguiente figura mostramos los resultados.

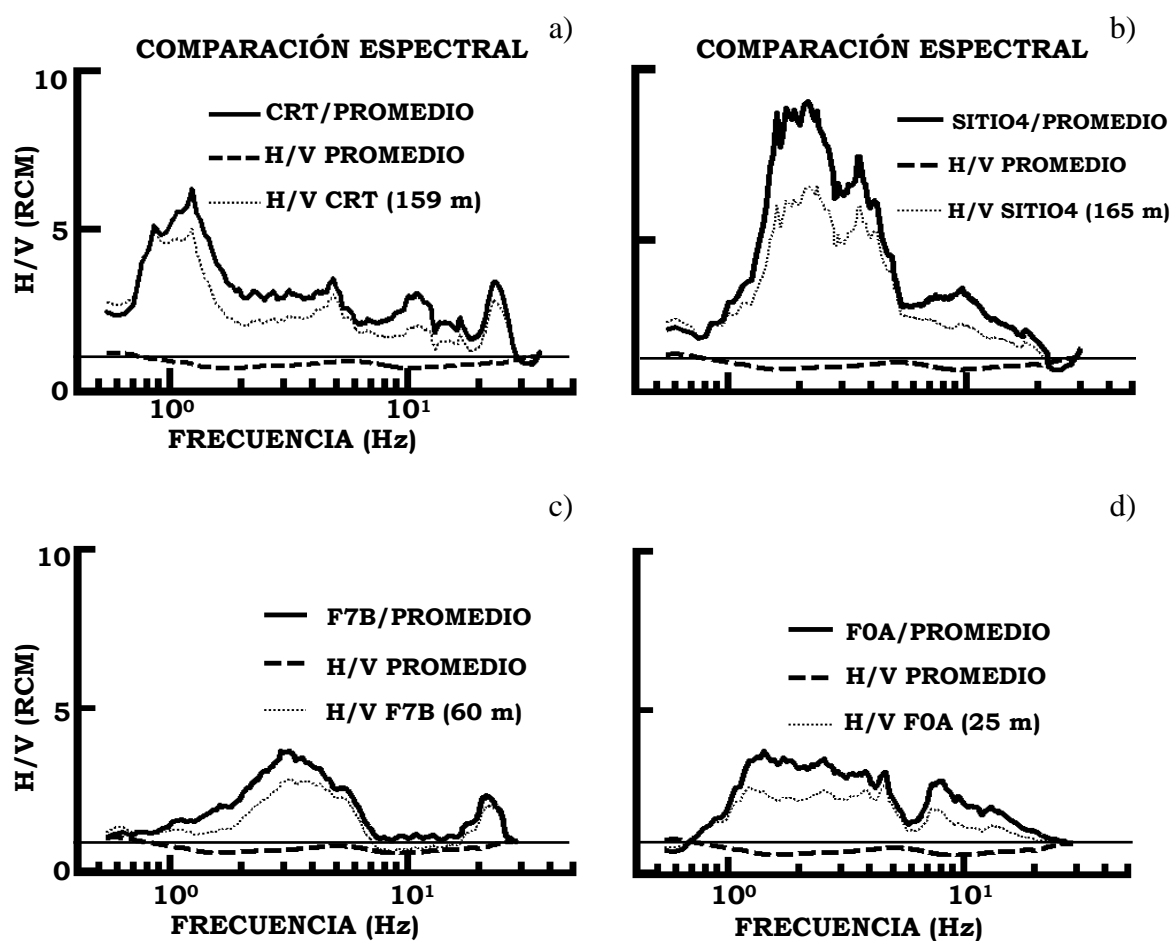


Figura 26. Comparación de espectros con el promedio de los sitios de la parte baja. a) CRT, b) SITO4, c) F7B y d) F0A. La línea continua horizontal de amplitud 1 indica el cociente espectral de un sitio donde no existe amplificación.

La Figura 26a nos muestra que el sitio CRT ubicado en la cima del volcán, presenta amplificaciones mayores de 4 a frecuencias entre 0.8 y 1.2 Hz comparadas con las amplitudes del promedio. Con este proceso hemos comparado una medición con un “patrón de medida”; el objetivo fue el de obtener el factor de amplificación en la parte alta del volcán comparada con un “sitio de referencia” (en este caso el promedio de los valores H/V obtenidos en la parte baja del VCP). Adicionalmente, estimamos una frecuencia fundamental para el cráter del volcán Cerro Prieto de 1.1 Hz con amplitud de 7 (Figura 26a).

La comparación espectral mostrada en la Figura 26b, es decir, SITIO4/PROMEDIO, no nos muestra una frecuencia fundamental apreciable, lo que sí podemos observar son 5 “picos” de amplitud promedio de 8.7 entre un intervalo de frecuencias de 1.6 a 2.3 Hz. El sitio SITIO4 (165 m GE) se encuentra en la parte alta del volcán al este de CRT a una distancia de 250 m, el cociente H/V 8.7 es el valor más grande obtenido por medio de una comparación espectral con registros de ruido. A pesar de ser un valor muy grande comparado con el promedio de los sitios de la parte baja, notamos que tiene una relación muy notoria con la comparación H/V CRT/PROMEDIO en términos de la amplitud y frecuencia. Todavía no podemos sugerir que es un hecho la amplificación de la señal sísmica en la parte alta del volcán Cerro Prieto, lo confirmaremos con datos de aceleración en el siguiente capítulo.

En la Figura 26c la comparación espectral F7B/PROMEDIO, nos dio como resultado una frecuencia fundamental muy bien definida a los 3.2 Hz y un cociente H/V de 3.7. El sitio F7B (60 m) lo ubicamos en la zona del volcán que hemos venido llamando “parte media” (28 a 60 m), se encuentra al norte del cráter mayor a una distancia del sitio CRT de 490 m.

En nuestra última comparación H/V de sitios que se encuentran sobre el volcán (parte baja: F0A, parte media: F7B y parte alta: CRT, SITIO4), es decir F0A/PROMEDIO, no es posible apreciar una frecuencia fundamental solamente observamos una “meseta espectral” inclinada que inicia en una frecuencia de 1.2 Hz y termina en 4.6 Hz, el cociente H/V máximo de esta “meseta” es de 3.8 a 1.4 Hz de frecuencia. También se observa una

reducción de amplitud entre los 4.6 y 7.3 Hz, los cocientes espectrales tienen una reducción constante a partir de 7.3 Hz hasta el final de la banda de frecuencias analizado. No tenemos una explicación clara de este comportamiento espectral. Si relacionamos cocientes H/V máximos en las comparaciones espectrales de las Figuras 26c y 26d en la misma frecuencia, veremos que son bastante parecidos, en F7B/PROMEDIO se tiene un cociente H/V de 3.7 a 3.2 Hz, mientras que en F0A/PROMEDIO tenemos un cociente H/V de 3.0 en la misma frecuencia.

Para estimar la frecuencia fundamental del cuerpo volcánico, no sólo necesitamos el sitio sobre el cráter (CRT), tendríamos que cubrir de forma total con sitios de registro a este edificio natural o también encontrar un arreglo adecuado para este tipo de estructuras. Aunque sobre el volcán no existen asentamientos humanos, si hay instalaciones de comunicación (torres de estructura metálica) que se encargan de mantener comunicada a gran parte de la ciudad de Mexicali y que pudieran verse afectadas por la ocurrencia de un sismo.

De cualquier manera, los resultados de cocientes H/V obtenidos en los sitios F7B y SITIO4 (Figura 22), nos pueden ayudar a estimar una frecuencia fundamental aproximada para el VCP.

Con base en nuestros resultados podemos afirmar que hay amplificación en la parte superior del volcán con respecto a la parte baja. Esto es, cuando se registre un sismo en la parte superior del VCP (CPX o VCP) las amplitudes generadas serán mayores que las registradas en un sitio en la parte baja (por ejemplo R02). Esta afirmación quedará corroborada en la siguiente sección de la tesis.

El poder hablar de la frecuencia fundamental del edificio volcánico es difícil, ya que obtuvimos diferentes valores para 4 sitios (CRT, SITIO4, F7B y F0A) ubicados sobre él. De hecho para los cuatro, la forma de las curvas H/V es ancha, es complicado apreciar la frecuencia fundamental y en lugares como el sitio SITIO4 se aprecian 5 “picos” de amplitud similar a frecuencias de alrededor de 2.1 Hz.

El hablar de amplificación de un sitio, a partir de los cocientes H/V debe hacerse con cautela. Esto ha sido enfatizado por autores como Bard (1998), Field y Jacob (1995), entre otros. No obstante, consideramos que es válida nuestra afirmación de que existe amplificación en la parte superior del volcán con respecto a la parte baja. Esta amplificación en la parte alta la corroboraremos con la variante propuesta por Lermo y Chávez-García (1993) con el uso de la onda S registrada en acelerogramas (Capítulo III).

Capítulo III. DATOS DE ACELERACIÓN

III.1 Obtención de los datos

Con el propósito de comparar los resultados H/V reportados en el Capítulo II, en el presente capítulo presentaremos los resultados H/V pero ahora a partir de acelerogramas. Es por esto que, hicimos una recopilación de registros de aceleración de eventos sísmicos registrados en 7 estaciones de la Red de Acelerógrafos del Noroeste de México (RANM), ver Figura 27.

Los sismos ($60, 2.6 \leq M_L \leq 5.4$) fueron seleccionados con base en los siguientes criterios:

1. Que hayan sido sismos locales (distancias epicentrales entre 1.5 y 32.5 km) registrados en estaciones: R02, VCP, CGG, DEL, GEO y CHI durante 2004 a 2006 (Figura 27).
2. Diez sismos registrados por cada una de las estaciones mencionadas, en el intervalo de magnitudes propuesto y en el intervalo de tiempo mencionado.
3. Cada uno de los 60 sismos debió haberse registrado en al menos 2 estaciones.
4. Selección de un posible sitio de referencia: estación ubicada sobre roca (CUC).

La Figura 27 presenta los epicentros de los sismos seleccionados.

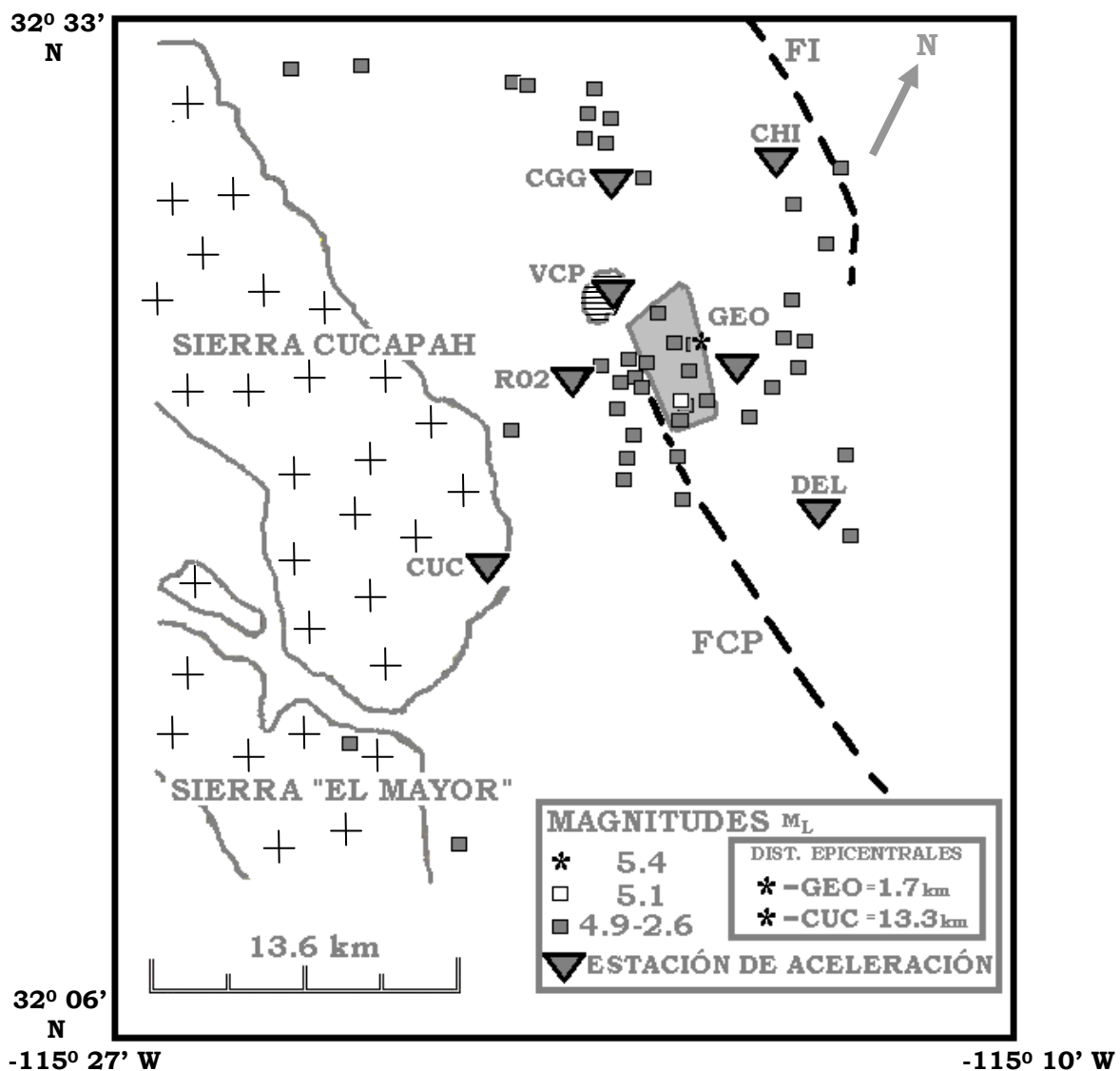


Figura 27. Distribución de epicentros (rectángulos) de los sismos seleccionados los cuales fueron registrados de 2004 a 2006. Las estaciones (triángulos invertidos) que los registraron están instaladas sobre suelo sedimentario (aluvión) (CGG, CHI, GEO, DEL, y R02), sobre roca riolacítica (VCP) y sobre granito intemperizado (CUC). Se muestran también las fallas Imperial (FI) y Cerro Prieto (FCP). El área marcada con cruces nos indica roca, con líneas horizontales riolacita y el resto es sedimento.

III.1.1 Instrumentación

La siguiente tabla nos muestra información de las estaciones de RANM de las que se obtuvieron acelerogramas para el presente estudio.

Tabla V. Ubicación y tipo de instrumento de las estaciones de aceleración.

ESTACIÓN (Nombre, código y elevación en m nivel medio del mar)	LATITUD NORTE (Grados)	LONGITUD OESTE (Grados)	TIPO DE INSTRUMENTO
VOLCÁN DE CERRO PRIETO VCP (110)	32.4200	115.3000	ALTUS-ETNA/ EPISENSOR INTERNO
R02 R02 (14)	32.3860	115.3140	ALTUS-K2/ EPISENSOR EXTERNO
GEOTÉRMICA GEO (30)	32.4000	115.2400	ALTUS-ETNA FBA INTERNO
CHIHUAHUA CHI (15)	32.4884	115.2386	ALTUS-ETNA/ EPISENSOR INTERNO
DELTA DEL (28)	32.3552	115.1872	ALTUS-ETNA FBA INTERNO
CGG CGG (14)	32.4640	115.3160	ALTUS-K2/ EPISENSOR EXTERNO
CUCAPAH CUC (30)	32.3060	115.330	SSA-16 FBA INTERNO

Las estaciones (CGG, VCP y R02) están comprendidas dentro un radio aproximado de 5 km. Consideramos el centro de este radio al cráter (el más grande) del volcán Cerro Prieto, ya que queremos comparar como son las amplificaciones en sitios localizados en la parte baja del volcán (CGG y R02) y que están comprendidos en el área mencionada.

Una descripción breve acerca de la ubicación de las estaciones la presentamos a continuación. R02 se ubica en el inicio del perfil de ruido a una distancia aproximada de 9

km al probable sitio de referencia (CUC), operó durante los años 2002 a 2003 y está ubicada a 3.9 km con respecto al cráter del volcán. VCP se encuentra a una altura de 110 m sobre el volcán de Cerro Prieto y los resultados de los cocientes espectrales H/V los compararemos con los que se obtengan del sitio CRT (159 m) y SITIO4 (165 m), la distancia VCP-CUC es 12.7 km. CGG está ubicada en el poblado Michoacán de Ocampo a 17.6 km de CUC, CHI en el poblado Chihuahua (21.8 km de CUC) y DEL funciona en la comunidad Delta (a 14.8 km de CUC). En estas tres últimas comunidades los habitantes reportan que “se sienten muy fuerte los temblores”. Por último, GEO se encuentra en uno de los patios del CGCP, el cual es uno de los centros de producción de energía eléctrica más importantes de México (a una distancia hacia CUC de 13.6 km). En el pie de la Figura 27 se indica el tipo de material donde se encuentran ubicadas las estaciones mencionadas. Las características de la instrumentación instalada en cada una de las estaciones, se enlistan en la Tabla VI (Luna-Munguía *et al.*, 2005).

Tabla VI. Características de la instrumentación de las estaciones que fueron seleccionadas.

ESTACIÓN (Código)	COMPONENTE	ORIENTACIÓN DE LAS COMPONENTES (Acimut en grados y polaridad de la componente vertical)	SENSIBILIDAD DE LAS COMPONENTES (Volt/g)	FRECUENCIA NATURAL DE LAS COMPONENTES (Hz)	AMORTIGUAMIENTO DE LOS ACELERÓMETROS
VCP	T	90	2.5	198.0	0.70
	L	0	2.5	210.0	0.70
	V	+	2.5	210.0	0.70
R02	T	90	5.0	214.0	entre 0.7 y 1
	L	0	5.0	210.0	entre 0.7 y 1
	V	+	5.0	218.0	entre 0.7 y 1
GEO	L	0	1.3	51.1	0.64
	V	+	1.3	52.1	0.64
	T	90	1.3	53.4	0.64
CHI	T	90	2.5	212.0	0.70
	L	0	2.5	212.0	0.70
	V	+	2.5	210.0	0.70
DEL	L	0	1.3	51.2	0.64
	V	+	1.3	52.3	0.64
	T	90	1.3	51.0	0.66
CGG	T	90	5.0	222.0	entre 0.7 y 1
	L	0	5.0	218.0	entre 0.7 y 1
	V	+	5.0	216.0	entre 0.7 y 1
CUC	T	90	2.5	50.1	0.54
	L	0	2.5	52.1	0.54
	V	+	2.5	50.1	0.56

En seguida podemos apreciar tres de las estaciones mencionadas en la Tabla VI.



Figura 28. Estaciones acelerográficas: a) R02, b) VCP, c) instrumentación en VCP, d) DEL y e) instrumentación en DEL.

A continuación describimos en forma breve el proceso de obtención, procesamiento y catalogación de los acelerogramas registrados en RANM. El trabajo de campo, consiste en recolectar los datos crudos registrados en cada una de las estaciones acelerográficas (Luna-Munguía *et al.*, 2005). Una vez que se tienen los datos en el centro de procesamiento, se efectúa la conversión de formato de datos crudos a código ASCII y se obtiene el volumen I de datos, esto es, acelerogramas corregidos por la constante del instrumento y convertidos a unidades de aceleración. El formato usado en código ASCII es el ASA 2.0 (ver Apéndice A), propuesto por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). En el presente trabajo recibimos, por parte del personal de RANM, archivos comprimidos que contienen los acelerogramas originales (datos crudos), archivos con las series de tiempo en código ASCII y archivos con instrucciones para el graficado de los acelerogramas. Detalles acerca de la nomenclatura de los archivos y su catalogación, pueden consultarse en Luna-Munguía *et al.* (2005).

III.2 Graficado de los acelerogramas

Los acelerogramas, los graficamos en el ambiente de programación MATLAB (versión 7.0.0), en forma similar al graficado de los sismogramas de ruido. La Figura 29 muestra un ejemplo de las gráficas resultantes.

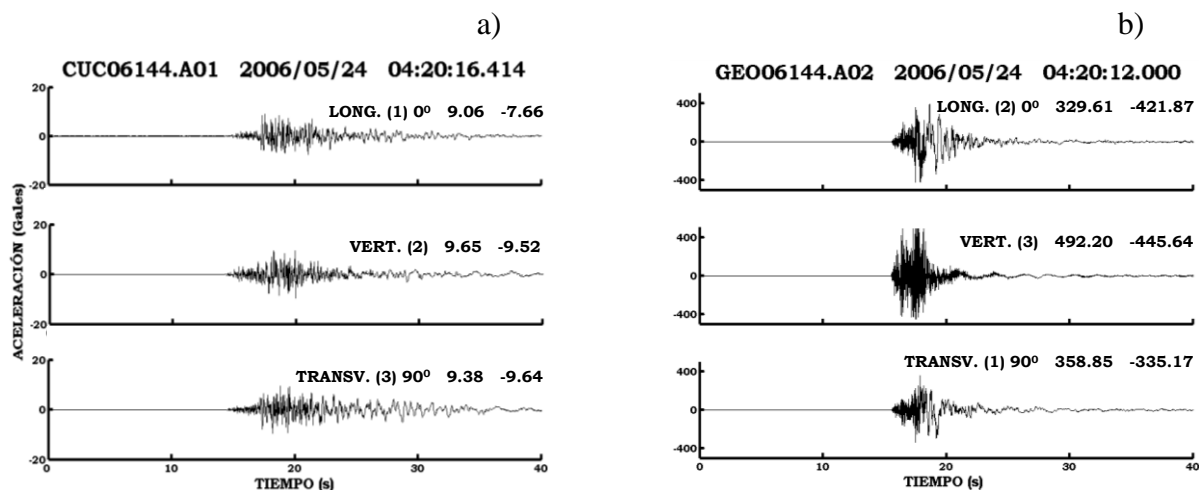


Figura 29. Acelerógramas del sismo ocurrido el 24 de Mayo de 2006 ($M_L=5.4$) registrado en las estaciones a) CUC y b) GEO. El epicentro de este sismo fue reportado por Munguía *et al.*, 2009 y se muestra en la Figura 27 incluyendo la distancia epicentral.

Con respecto a la información contenida en la Figura 29, el encabezado de cada gráfica indica el nombre del archivo en código ASCII, la fecha de obtención del registro (año, mes y día) y el tiempo de inicio del registro (horas, minutos y segundos, GMT). En cuanto al nombre del archivo, las tres primeras letras indican el código de la estación, los siguientes dos dígitos indican las dos últimas cifras del año y los tres dígitos restantes, indican el día juliano. La extensión de estos archivos esta formada por tres caracteres, el primero de ellos indica el tipo de archivo, **A** (código ASCII), y los otros dos indican el número secuencial de registro. La información contenida en la gráfica de cada componente nos indica el tipo de componente (longitudinal, vertical y transversal), número de canal en que fue grabada, la orientación de las componentes horizontales y finalmente los valores máximos de aceleración (positivos y negativos) de cada componente.

En cuanto a los acelerogramas mostrados, notamos claramente la diferencia de amplitudes entre los registros, de CUC (ubicada sobre roca) y GEO (ubicada sobre aluvión). Podemos observar una saturación en la componente vertical de GEO debido a las altas aceleraciones que se registran en este sitio. Se puede apreciar aumento en un factor de 20 en los acelerogramas de GEO con respecto a las aceleraciones de CUC. Una explicación a la diferencia de amplitudes, puede ser a diferencias en la composición geológica del sitio de ubicación de cada estación en combinación con las distancias epicentrales (GEO 1.7 km y CUC 13.3 km).

III.3 Cálculo de los cocientes H/V a partir de la onda S

Una vez obtenidas las gráficas de los acelerogramas para cada sismo, el siguiente paso, consistió en obtener los cocientes espectrales H/V para los sitios (DEL, GEO, CGG, CHI, VCP, R02 y CUC) con el uso de la variante de la técnica de Nakamura propuesta por Lermo y Chávez-García (1993). Para ello, (Sánchez Pérez y Vega Guzmán, comunicación conjunta 2009) modificamos el programa “hov” (Vidal Villegas, comunicación personal 2008). La modificación consistió en llevar el código “hov” al ambiente del Grafical User Interface (GUI) de Matlab (Figura 30), en donde procesamos un segmento de 2048 muestras de longitud, que corresponde al paquete de la onda S y 4096 muestras para señal completa (P, S y coda). Una vez que seleccionamos el inicio del segmento a procesar, en adelante hacemos uso de programa “hov” para el cálculo de los cocientes espectrales, tal y como procesamos los datos de ruido.

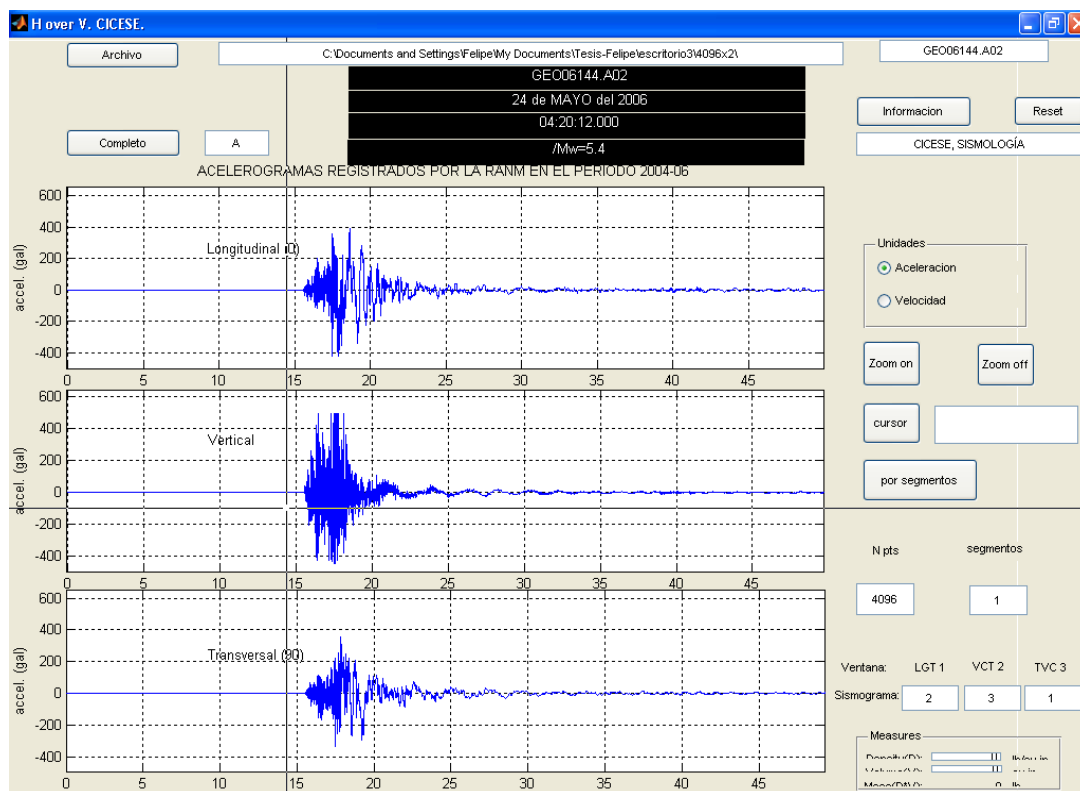


Figura 30. “Grafical User Interface” (cursores) de Matlab, en el cual se selecciona el segmento de onda S para obtener cocientes espectrales H/V.

Al programa modificado lo llamamos “hovgui” cuyo diagrama de flujo observamos en la Figura 31.

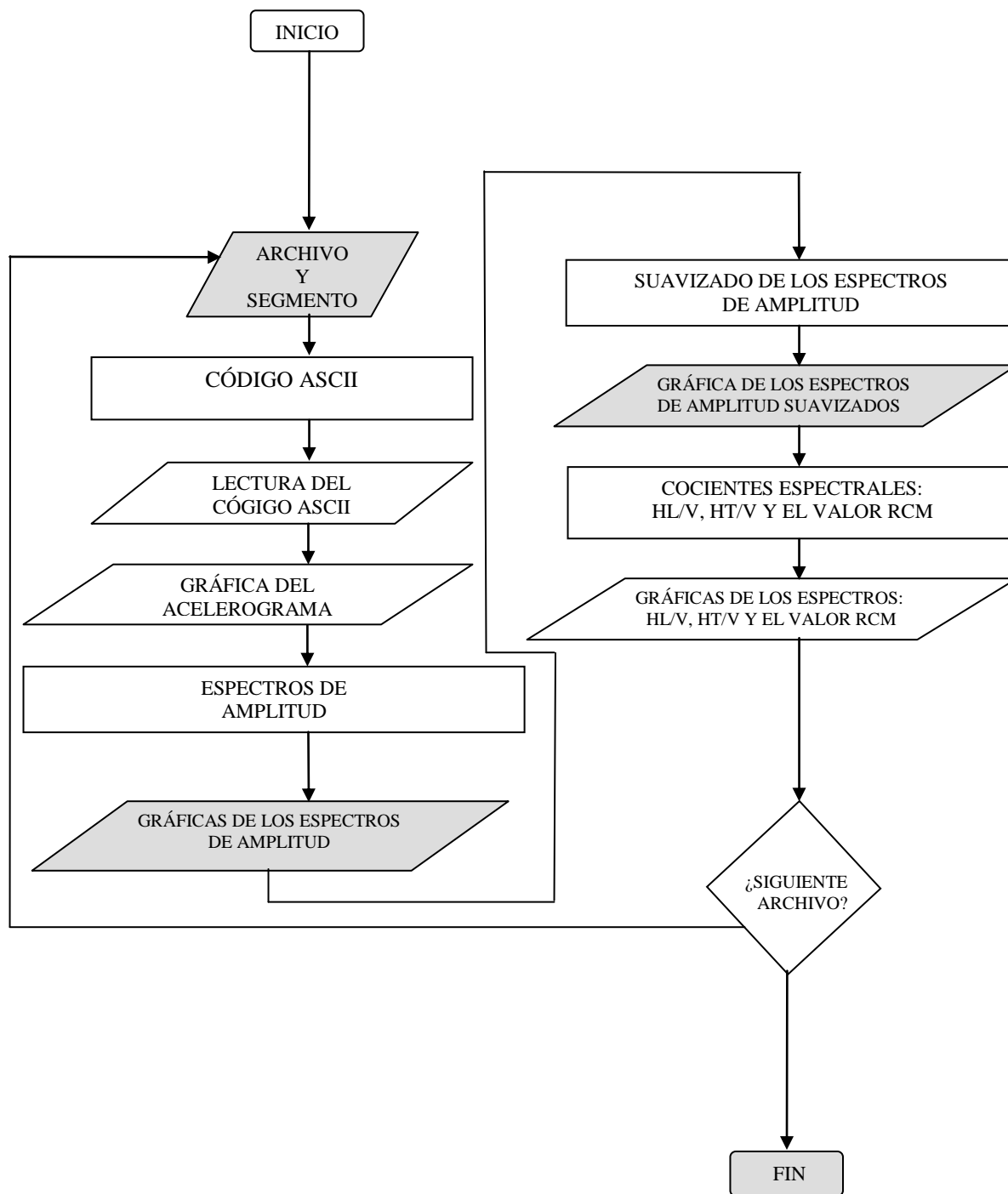


Figura 31. Programa “hovgui” (*h over v graphical user interface*) para calcular cocientes espectrales de onda S.

De la Figura 31, vemos que “hovgui” es muy similar a “hov”, la modificación consiste en leer un solo archivo y un segmento al inicio, la otra diferencia consiste en que se calcula la desviación estándar del promedio de los 10 cocientes espectrales, estos obtenidos para cada estación por medio de la ecuación (18), es decir:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

Donde: N , es el número total de los puntos espectrales (10) para cada frecuencia

x_i , es el valor de amplitud de cada punto espectral (10)

\bar{x} , es el promedio de los valores de amplitud de los 10 puntos espectrales para cada frecuencia

En “hovgui” podemos seleccionar el inicio del segmento a procesar (1 o 2 segundos antes del arribo de la onda S, registrada en las tres componentes (ver el cursor en la Figura 30), y con el número de muestras indicado previamente, hace el mismo proceso que “hov”, hasta obtener los cocientes espectrales H/V. Para la mayoría de los sismos analizados, seleccionamos el inicio del segmento a procesar 2 segundos antes del arribo de la onda S y el final hasta un promedio de 5 s de la coda, esto con el fin de asegurar que tomamos el paquete completo de la onda S.

III.4 Discusión de resultados

Del procesamiento descrito en el apartado anterior (III.3), presentamos los cocientes espectrales H/V de onda S de 10 registros de aceleración para cada sitio en la Figura 32.

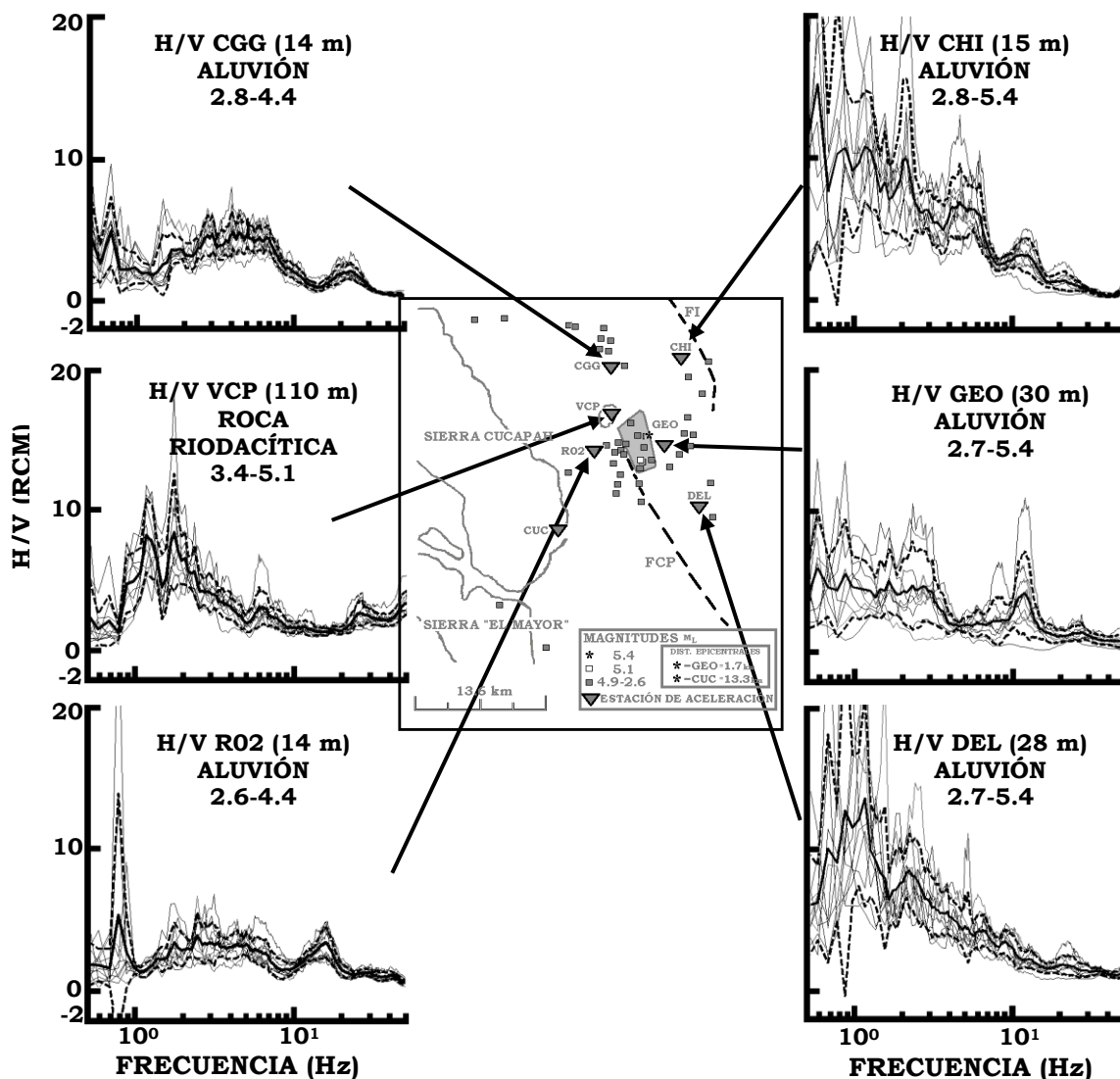


Figura 32. Cocientes espectrales H/V de onda S de registros de aceleración (10), las graficas corresponden a las estaciones CGG, CHI, VCP, GEO, R02 y DEL en las cuales la línea sólida gruesa representa el promedio y las líneas interrumpidas la desviación estándar (σ). Además, se anexa información acerca del intervalo de magnitudes, el tipo de material donde se ubican las estaciones y alturas sobre el nivel medio del mar.

Como mencionamos anteriormente, la estación DEL no se encuentra dentro de los límites de interés de la investigación, no obstante, la incluimos porque residentes del poblado Delta (Figura 2) reportan que los sismos se “sienten muy fuertes”. La Figura 32 muestra, además de los cocientes H/V, la ubicación de los epicentros de los 60 sismos analizados y las 7 estaciones acelerográficas de las que se obtuvieron los acelerogramas.

De la Figura 32 apreciamos en la estación VCP dos “picos”, uno a 1.2 Hz y otro a 1.8 Hz. El valor H/V para ambos es de 8.2 y 8.4 Hz respectivamente. Con mayor detalle discutiremos los resultados para este sitio en la siguiente página. Los resultados de cocientes espectrales de las estaciones CHI, CGG, GEO y DEL muestran una amplificación de 5 hasta 15 entre 0.6 y 1.2 Hz. En la estación R02 se aprecia una amplitud de 4 a 2.4 Hz, un “pico” cuyo cociente espectral es de 5.4 a 0.8 Hz. Debido a que tenemos sólo 4 puntos espectrales, consideramos que no es confiable la amplitud de 5.4. Más adelante presentaremos resultados con más acelerogramas para verificar esta amplitud. Los resultados mostrados en la Figura 32 pueden verse en la Tabla VII.

Tabla VII. Resultados de los valores H/V y frecuencia fundamental para cada sitio.

ESTACIÓN	H/V	f_n (Hertz)	FORMACIÓN GEOLÓGICA
CGG	4.9	0.7	aluvión
VCP	8.4	entre 1 y 2	riodacíta
R02	5.4	0.8	aluvión
CHI	15.2	0.6	aluvión
GEO	5.6	0.9	aluvión
DEL	13.3	1.2	aluvión
CUC	3.0	2.3	granito intemperizado

Apartir de los cocientes H/V de la Tabla VII, podemos decir que en todos los sitios (excepto VCP y CUC) ubicamos la frecuencia fundamental cercana 1 Hz, lo que corresponde a un suelo sedimentario. Con respecto a las amplitudes, la estación CUC es en

donde obtenemos valores H/V bajos por estar ubicada en roca. A continuación daremos una explicación con más detalle por estación.

El sitio VCP. Los cocientes H/V nos indican una amplitud promedio de 8.3 a frecuencias entre 1.2 y 1.8 Hz, estos números podemos compararlos con los datos de ruido (amplitud 6.2 a frecuencia de 1.2 Hz) del sitio CRT que se encuentra a una altura de 159 m snm (Figura 33). Además, en un estudio previo, Castro (1998) reportó una amplitud 4.4 a frecuencia de 1.5 Hz para el sitio CPRI (ubicado a 90 m snm que se ubica a una distancia de 1,000 m de VCP y a 450 m del sitio CRT). El tipo de procesamiento utilizado por Castro fue diferente al del presente trabajo. Él utilizó registros de 5 eventos sísmicos con magnitudes de 4.1 a 6.6 y distancias epicentrales entre 2.9 y 21 km respectivamente. Los cocientes espectrales H/V los calculó con inicio de ventanas de onda S y una longitud del sismograma equivalente al 90% de energía total.

Castro (1998), en otra investigación, realizó un estudio de la respuesta de sitio usando ondas P y S para varios sitios de RESNOM. Con respecto a sus resultados obtenidos a partir de la onda S (longitud de ventana de 2.5 y 4 s), él obtuvo una amplificación de 13 a 1.6 Hz con el uso de sismos registrados en la estación CPX de RESNOM (ubicada a 450 m al SO de la estación VCP). Los sismos que él trabajó tuvieron magnitudes entre 2.2 y 4.8 con profundidad focal menor a 20 km y distancias hipocentrales entre 5 y 330 km.

Las amplitudes y las frecuencias son muy similares entre los resultados del presente trabajo y los resultados de Castro (1998) para la parte alta del edificio volcánico. Estas similitudes nos indican que existe amplificación alta, corroborada con el uso de dos tipos de datos (ruido y aceleración) y los usados en trabajos previos (sismogramas).

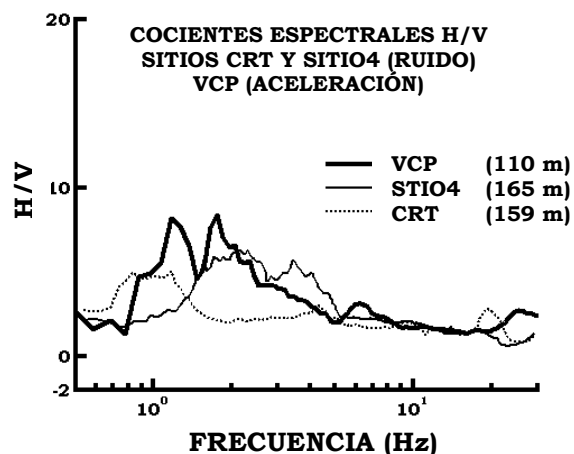


Figura 33. Comparación entre cocientes H/V con datos de ruido y aceleración en la parte alta del VCP.

¿El porque de las amplitudes altas en la cima del VCP (Figura 33)?, aún no tenemos respuesta. Sin embargo, con el modelado de los cocientes H/V (por medio de la propuesta de una estructura somera, Capítulo IV) intentaremos dar una respuesta.

El sitio R02. De la Figura 32 vemos que existen amplitudes menores a 4 en el valor promedio de cocientes y en el intervalo de frecuencias analizado. La estación R02 (14 m) se encontraba ubicada aproximadamente a 100 m del sitio ROAD (inicio del perfil de registros de ruido) y funcionó solo durante el período 2002-03. Esta estación se instaló con el propósito de corroborar si existía o no amplificación en sitios ubicados en la parte baja del volcán. Los resultados obtenidos corroboran los que se obtuvieron previamente a partir de registros de ruido. No hay amplificación significativa en esta estación. Tratamos ahora de dar una explicación al respecto.

En sitios rocosos una señal sísmica no tiende a modificarse, esto es, no existe el efecto de sitio (Bard, 1998). Sin embargo, en los sitios de registro de ruido (desde ROAD hasta F1F, Figuras 20 y 25), analizados en el capítulo anterior, nos da incluso un valor promedio de cocientes H/V menor a 1. Como sabemos estos sitios se encuentran sobre un valle aluvial. Entonces ¿qué pasa en esta zona? Una posible respuesta es la siguiente: R02 (estación de

aceleración) nos da amplificaciones bajas a frecuencias mayores a 1 Hz, el sitio del perfil de ruido que coincide con R02 (ROAD) nos arroja también los mismos resultados. Con lo anterior, podemos sugerir que estamos ante un suelo sedimentario bien consolidado. Intentaremos presentar un modelo somero (0-50 m) para este sitio y así corroborar nuestra sugerencia.

El sitio GEO. En los estudios de campo se ha observado que en la zona de explotación geotérmica, existe suelo saturado de fluido (Vidal Villegas, comunicación personal, 2009). En la bibliografía (Bormann, 2002) encontramos que un material cuya densidad es de 1.95 gr/cm^3 corresponde a un material del Cenozoico saturado de agua. Por otro lado, los cocientes H/V de 5.6 a 0.9 Hz obtenidos en la presente investigación, nos sugiere que las razones anteriores pueden ser algunas de las causas de las aceleraciones altas registradas en la estación GEO. En forma similar al caso de VCP, hacemos una comparación del procesamiento de 17 acelerogramas que presentaron González *et al.* (2001) para el sitio donde antes se encontraba ubicada la estación (al que llamamos sitio GEOv), donde obtuvieron una frecuencia fundamental cercana a 1 Hz y un cociente H/V de 10.3 aproximadamente (con el uso de sismos entre 2.2 y 4.0 de magnitud). Los epicentros se ubicaron en un círculo de radio de 7 km teniendo como punto central el sitio GEOv. Nuestros resultados son diferentes a los reportados por González *et al.* (2001), frecuencia fundamental de 0.9 Hz y un cociente H/V de 5.6, esto puede ser indicativo de que existen diferencias en la estructura superficial de los sitios GEO y GEOv. Presentaremos también para GEO un modelo de la estructura somera que ajuste a los cocientes H/V obtenidos.

Otros sitios. Para explicar la aceleración alta que tenemos en DEL ubicada en el poblado Delta, tendremos que tener un modelo somero del sitio y esto lo presentaremos en el siguiente capítulo. De cualquier manera, la grafica de cocientes espectrales para este sitio nos sugiere una frecuencia fundamental entre 0.9 y 1.2 Hz y cocientes H/V de 12.5 y 13.3, debido a que se aprecian dos “picos” muy cercanos en frecuencia.

En la estación CHI, que se encuentra en el poblado Chihuahua, obtuvimos uno de los valores H/V más altos: de 15.2 a una frecuencia de 0.6 Hz. De igual manera no tenemos una explicación para esto, el modelado de este sitio probablemente nos aclare un poco la situación.

Por último, en CGG (Ejido Michoacán de Ocampo) tenemos lo que pareciera ser una frecuencia fundamental a 0.7 Hz y un cociente H/V de 4.9. Estos resultados son contrastantes con respecto a los reportes de residentes que afirman sentir “fuerte los temblores”. Sin embargo, podríamos relacionarlo con el dato proporcionado por Suárez Vidal (comunicación personal, 2009) acerca de la directividad de la energía que liberan los sismos provocados por la falla Cerro Prieto (la cual, apunta aproximadamente hacia Michoacán de Ocampo, Figura 27). Para confirmar esto último, necesitaríamos otro tipo de estudio, el cual está fuera de los alcances del presente trabajo. Trataremos también de realizar el modelado para este sitio.

Con el propósito de corroborar los resultados mostrados en la Figura 32, obtenidos a partir del uso de 10 sismos registrados en cada estación, a continuación obtuvimos resultados de cocientes H/V de acelerogramas incluyendo un número mayor de sismos ocurridos en el período ya mencionado (2004-06). Además en esta ocasión, procesamos todo el sismograma (Figura 30), que incluye las ondas P, S y coda (4096 muestras). Los resultados los presentamos en la Figura 34.

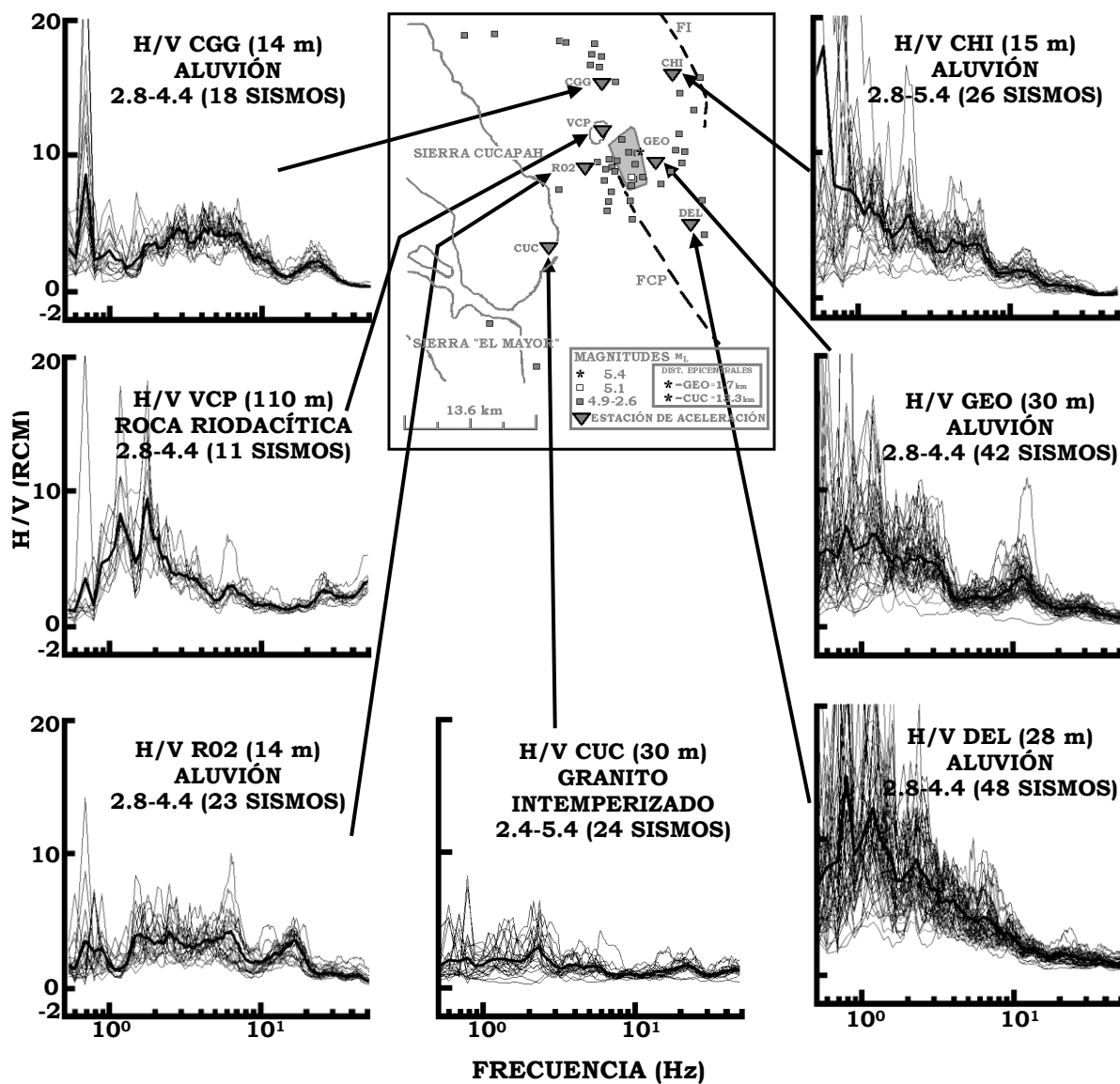


Figura 34. Cocientes espectrales H/V de las ondas P, S y coda de registros de aceleración, las gráficas corresponden a las estaciones CHI, GEO, CGG, DEL, VCP, R02 y CUC. La línea sólida gruesa representa el promedio, además, se anexa el tipo de suelo, información acerca del intervalo de magnitudes y alturas sobre el nivel medio del mar de las estaciones.

De esta figura podemos apreciar que los cocientes espectrales con señal completa (P, S y coda) tienen variaciones con respecto a los procesados con onda S, esto lo confirmamos con los datos aportados en la siguiente tabla.

Tabla VIII. Resultados de cocientes espectrales de señal completa para cada sitio.

ESTACIÓN	H/V	f_n (Hertz)	FORMACIÓN GEOLÓGICA
CGG	9.5	0.7	aluvión
VCP	10	entre 1 y 2	riodacita
R02	-	-	aluvión
CHI	17	0.6	aluvión
GEO	7	0.9	aluvión
DEL	15	0.8	aluvión
CUC	3.0	2.3	granito intemperizado

De la Tablas VII y VIII, notamos que la frecuencia fundamental con ambos tipos de procesado varía muy poco. En los sitios CHI, GEO y DEL las variaciones son 0.3, 0.1 y 0.4 respectivamente, valores que consideramos de poca relevancia. Sólo en el caso de R02, en donde no observamos su frecuencia fundamental con el procesado de la señal completa, el resto de los sitios (CGG, VCP y CUC) conservan los mismos valores. En CUC presentamos los mismos resultados debido a que solamente procesamos 24 acelerogramas con señal completa.

Con respecto a los cocientes H/V, excepto por los sitios CGG y R02, no presentan mucha diferencia siendo estas entre 0.4 y 1.7. La situación en R02 es la siguiente: aunque si conserva la forma de la curva del promedio, en el procesado con onda S el “pico” que se aprecia a 0.8 Hz, no lo apreciamos con procesado de señal completa (Figura 34). Curiosamente CGG presenta un comportamiento inverso, en este caso el “pico” que notamos a 0.7 Hz en la Figura 32 aumenta el doble en los resultados presentados en la Figura 34.

Por último, presentamos resultados de cocientes H/V de un sitio (CUC) sobre roca, con el fin de hacer una comparación espectral con los sitios ubicados sobre material sedimentario (CHI, GEO, DEL, CGG, R02) incluyendo al sitio VCP el cual se encuentra sobre material riolacítico.

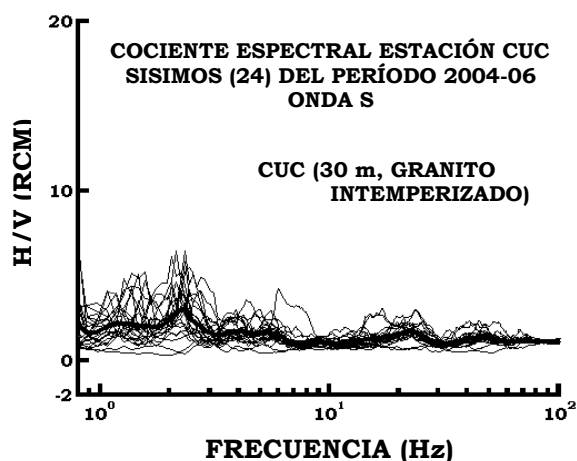


Figura 35. Cocientes espectrales de aceleración (líneas delgadas) de 24 sismos registrados por la estación CUC procesando todo el sismograma, que incluye las ondas P, S y coda (4096 muestras) y promedio (línea gruesa). El rango de magnitudes de los eventos sísmicos va de 2.4 a 5.4 en M_L .

De la Figura 35, notamos una amplitud de 3 a 2.3 Hz de frecuencia; en las frecuencias restantes se mantiene amplitud ≤ 2 . Llama la atención el que las curvas de los cocientes H/V no están dispersas, lo cual sugiere que se trata de un sitio en roca (Bard, 1998).

En la siguiente sección mostraremos los resultados de comparación espectral utilizando nuestro “sitio de referencia”.

III.4.1 Comparación entre cocientes espectrales

Ya que hemos seleccionado un sitio sobre roca, en este caso a CUC, tendremos comparaciones entre espectros, estos se muestran en la Figura 36.

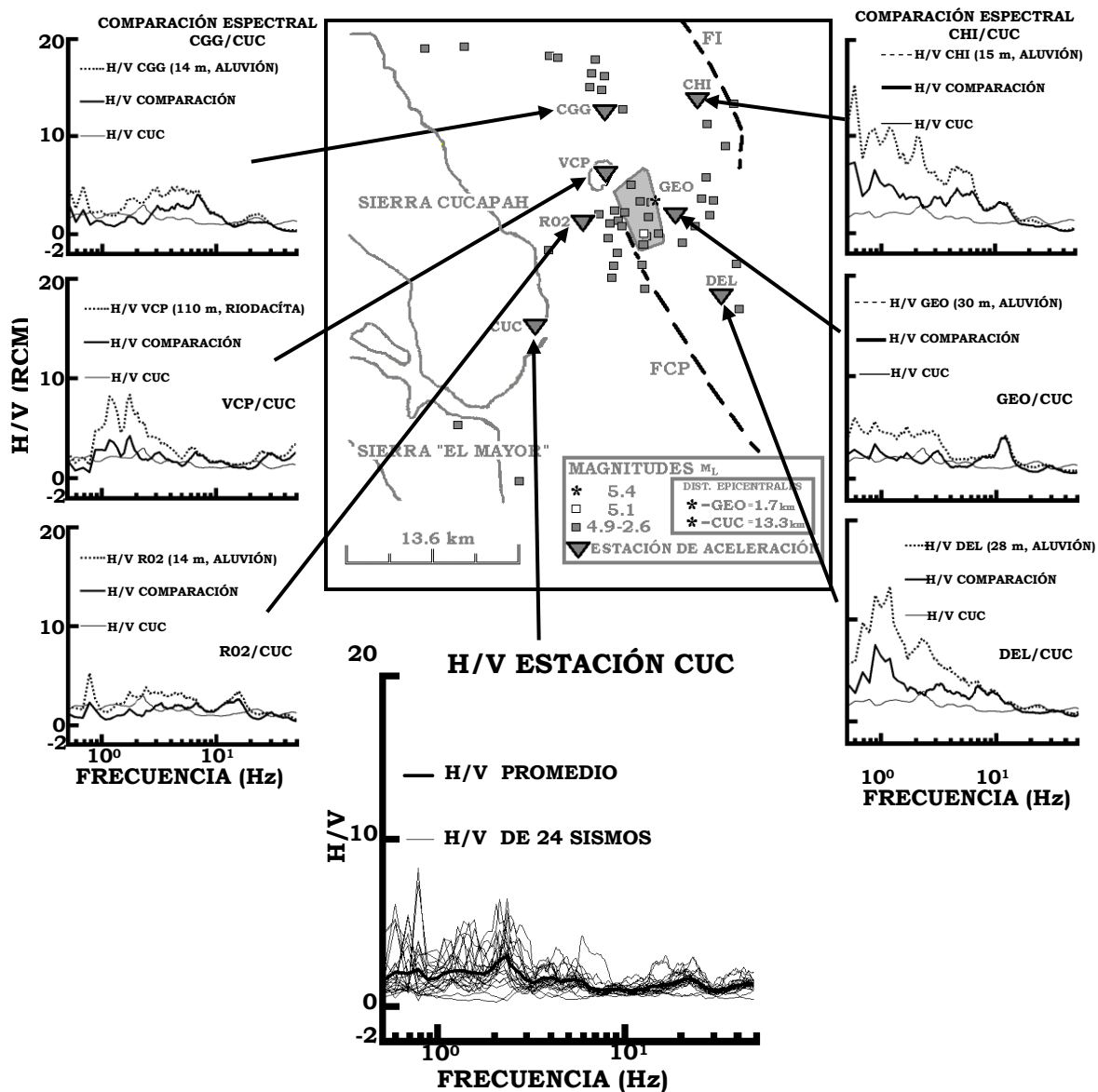


Figura 36. Comparación espectral de cocientes H/V de onda S de cada una de las 6 estaciones con el cociente H/V promedio de CUC y cocientes H/V de 24 acelerogramas en CUC.

La comparación espectral VCP/CUC (Figura 36) nos da una amplificación de 4 a 1.7 Hz, la frecuencia sigue siendo parecida y la amplitud se redujo a la mitad, aunque sigue estando dentro de los límites de “amplitud alta” (> 4) del presente trabajo.

Tomaremos con reservas a nuestro sitio de referencia (Figura 35), debido a las distancias epicentrales que existen entre la estación CUC y los epicentros. Es decir, la señal sísmica

una vez que se genera en el foco, no sigue la misma trayectoria (como es requerida por el método) para llegar a la estación en sedimentos y a la estación sobre roca.

Los resultados de la comparación espectral de cocientes H/V de onda P, S y coda entre el promedio de VCP y CUC (Figura 36), nos indican que, existe una amplificación de 4 a frecuencia de 1.7 Hz aproximadamente. Recordar que la estación CUC está entre 5 y 19 km del área de epicentros.

Los resultados de la Figura 36, nos indican que en CHI, VCP y DEL muestran amplificación que va desde 4 hasta 7 en un intervalo de frecuencias relativamente pequeño: 0.6 a 1.8 Hz. En el cociente CGG/CUC, la amplitud máxima obtenida fue de 4 a 7 Hz de frecuencia. Por lo que respecta a GEO, también obtenemos amplificación de 3.4 a 0.9 Hz. En el caso del resultado R02/CUC, no es muy claro observar una frecuencia fundamental y los valores H/V no rebasan 2.5 en el rango de frecuencias analizado. Para ver más detalles consultar la siguiente tabla.

Tabla IX. Comparación espectral de cocientes H/V de onda S.

COMPARACIÓN ESPECTRAL	H/V	FRECUENCIA FUNDAMENTAL f_n (Hertz)
CGG/CUC	3.6	0.5
VCP/CUC	4.2	1.8
R02/CUC	-	-
CHI/CUC	7.3	0.6
GEO/CUC	3.4	0.9
DEL/CUC	7.6	0.9

De la Figura 36 podemos decir en general, que las amplificaciones altas en las estaciones acelerograficas CGG, VCP, CHI, GEO y DEL comparadas con un sitio de referencia (CUC) se siguen presentando, pero reducidas aproximadamente 30%.

Los resultados mostrados en las Tablas VII, VIII y IX nos indican que:

- Para la Mayoría de los sitios la frecuencia fundamental se encuentra entre 0.5 y 1.8 Hz.
- Encontramos algunas diferencias importantes en los cocientes espectrales solo en dos sitios; CGG y R02 (Tablas VII y VIII).
- En el sitio R02 no se observa en forma clara un cociente H/V que sobresalga ni se distingue una frecuencia fundamental (Tabla VIII).

Los resultados de la comparación espectral mostrados en la Tabla IX, son de mucha utilidad debido a que nos demostró que la variante del método de Nakamura, utilizado para el análisis de ruido sísmico es robusto y confiable para la estimación de la frecuencia fundamental en valles aluviales. La frecuencia fundamental promedio de nuestro trabajo la estimamos en 0.9 Hz (de acuerdo con los resultados de las Tablas VII, VIII y IX), comparando este resultado vemos que es consistente con los reportados en otras investigaciones (Bard, 1998; González *et al.*, 2001; Castro, 1998).

En el siguiente Capítulo mostraremos los resultados del modelado de los cocientes H/V para los sitios de interés, que nos ayuden a contestar las dudas planteadas en esta sección.

Capítulo IV. MODELADO DE LOS COCIENTES H/V

Modelar, en términos geofísicos, significa poder obtener un sistema simplificado que represente en forma general y aproximada al subsuelo.

IV.2 Matrices de rigidez

Una vez obtenidos los cocientes espectrales, a partir de datos de ruido y aceleración, lo que sigue es modelar en una dimensión estos cocientes para los sitios de interés. Estos sitios son: CRT y GEOv (H/V obtenidos a partir de ruido sísmico), GEO, VCP, CGG, CHI, R02 y DEL (H/V obtenidos a partir de acelerogramas). El modelado lo realizaremos usando el método de propagación de matrices de rigidez (Kausel and Roesset, 1981). A continuación damos una descripción breve del método.

IV.2.1 Caso de una capa

Las matrices de rigidez es una técnica matemática que nos permite modelar como se propaga una señal sísmica a través de un medio formado por capas. En esta metodología definimos vectores y matrices, ya que son las herramientas adecuadas para estudiar los esfuerzos y desplazamientos que se presentan a raíz del viaje de las ondas en un medio deformable.

De manera breve, el método consiste en lo siguiente (sólo consideramos el caso en el plano):

Primeramente definimos un vector de condiciones (vector de estado) en un sistema de coordenadas adecuado, en este caso, cartesianas. Este vector transpuesto (T) es el que define los desplazamientos y esfuerzos internos que se presentan en las interfaces (Kausel and Roesset, 1981), es decir:

$$\mathbf{Z} = \left\{ \bar{u}_x, \bar{u}_y, i\bar{u}_z, \bar{\tau}_{xz}, \bar{\tau}_{yz}, i\bar{\sigma}_z \right\}^T \quad (19)$$

Donde:

$\bar{u}_x, \bar{u}_y, i\bar{u}_z$; son los desplazamientos en la dirección indicada por el subíndice. La barra nos indica que estos desplazamientos son funciones solamente de la dirección z . El número imaginario $i = \sqrt{-1}$ se introduce en la dirección z por conveniencia (Kausel *et al.* 1981).

$\bar{\tau}_{xz}, \bar{\tau}_{yz}, i\bar{\sigma}_z$; son las componentes de esfuerzo en la dirección indicada por el subíndice. La barra nos indica que estos esfuerzos son funciones solamente de la dirección z (Figura 37).

Las componentes de esfuerzo representan la fuerza por unidad de área que actúan sobre una superficie cualquiera, en donde tenemos una normal a dicha superficie (Figura 37).

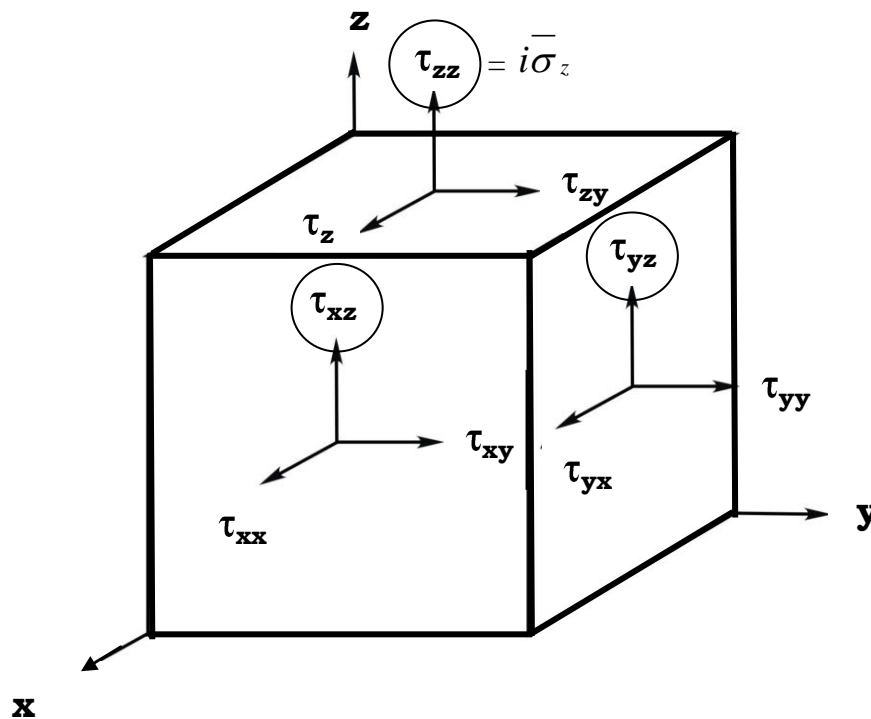


Figura 37. Fuerzas que definen las componentes de esfuerzos que actúan sobre una superficie. Los esfuerzos en la dirección vertical están indicados por círculos.

Para obtener el desplazamiento y esfuerzo en un instante de tiempo dado, la ecuación (19) se tendrá que multiplicar por el factor exponencial siguiente:

$$e^{i(\omega t - kx)} \quad (20)$$

Donde:

ω , frecuencia angular en radianes

$k = \frac{\omega}{c}$, número de onda sin dimensiones

t , tiempo en segundos

x , desplazamiento en el eje equis

Hay que señalar que cada interfase z_j presenta un vector de condiciones, los cuales se relacionan por medio de una matriz llamada de “transferencia” H_j , porque hace una especie de liga entre los vectores de condiciones. Lo anterior se observa claramente en la siguiente ecuación:

$$Z_{j+1} = H_j Z_j \quad (21)$$

La matriz de transferencia está caracterizada por las variables físicas de la capa, esto es, frecuencia fundamental, el número de onda, la densidad, el módulo de corte, el amortiguamiento y el espesor de la capa.

A continuación intentemos pasar del ambiente teórico al ambiente práctico, es decir, aplicar esta metodología para un caso real en donde tengamos un medio estratificado, como el mostrado en la siguiente figura.

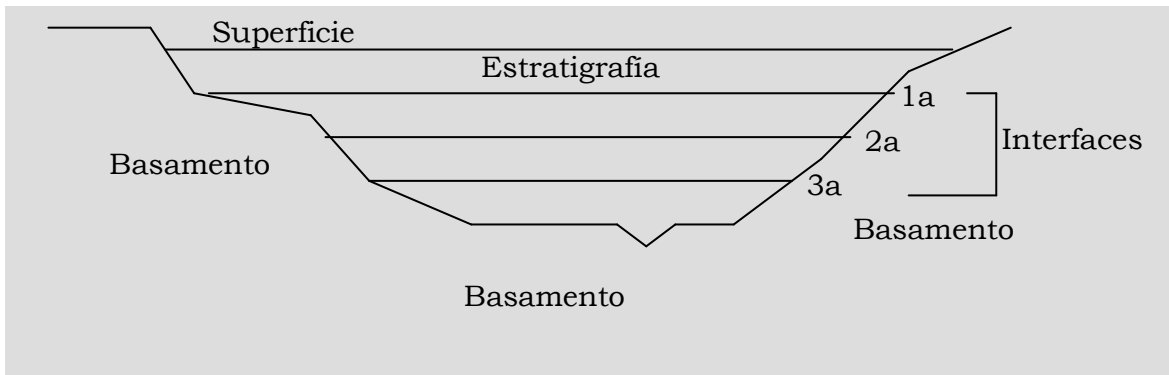


Figura 38. Diferentes capas en un medio estratificado descansando sobre basamento.

Veamos entonces, como obtenemos la matriz de rigidez a partir de lo anteriormente visto, es decir, con base en las ecuaciones (19), (20), (21) y (22).

Por simplificación escojamos una capa y supongamos que descansa sobre un semiespacio, como se ve a continuación (Huerta *et al.*, 2005):

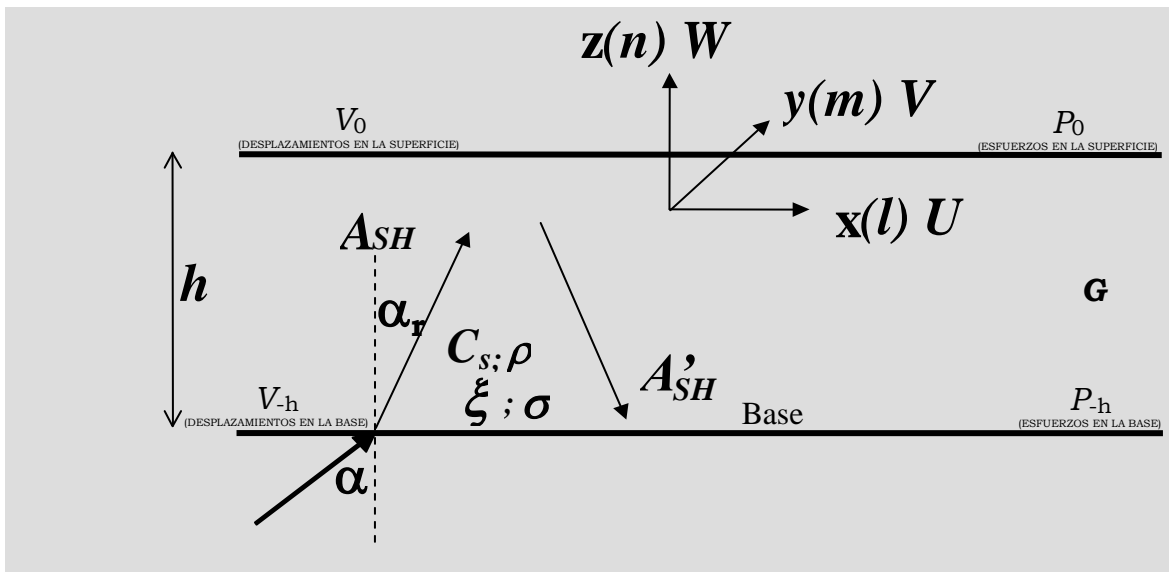


Figura 39. Una onda SH propagándose a través de un espacio unidimensional. Abreviaturas utilizadas: h , espesor de la capa; α , α_r ángulo de la onda incidente y ángulo de refracción; l , m , y n cosenos directores de los desplazamientos U , V y W de la onda SH; A_{SH} y A'_{SH} amplitudes de la onda SH viajando en el sentido positivo y negativo con respecto al eje z y C_s , ρ , ξ , σ , G velocidad de ondas de corte, densidad, amortiguamiento, razón Poisson, módulo de corte respectivamente.

Apliquemos una carga \bar{P}_1 en la base de la capa, que se compense con el esfuerzo correspondiente \bar{S}_1 , es decir:

$$\bar{P}_1 = \bar{S}_1 \quad (22)$$

Pongamos atención a la base de la capa de la Figura 39, y a partir de la ecuación (21) obtenemos el vector de desplazamientos y cargas siguientes:

$$\begin{Bmatrix} \bar{U}_2 \\ -\bar{P}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{U}_1 \\ -\bar{P}_1 \end{Bmatrix} \quad (23)$$

Donde:

H_{ij} , submatrices de la matriz de liga o de transferencia

$-\bar{P}_{1,2}$, cargas en la base y semiespacio respectivamente, el signo negativo es debido a que la carga se aplica de abajo hacia arriba

$\bar{U}_{1,2}$, desplazamientos en la base y semiespacio respectivamente

Resolviendo la ecuación (23), obtenemos el vector de cargas externo, a partir de la matriz de rigidez de la capa analizada y del vector de desplazamientos. Como se ve a continuación.

De (23) tenemos que:

$$\bar{U}_2 = H_{11}\bar{U}_1 - H_{12}P_1. \quad (24)$$

Despejando P_1

$$P_1 = -H_{12}^{-1}H_{11}U_1 - H_{12}^{-1}U_2. \quad (25)$$

Hasta aquí ya tenemos a la carga P_1 dependiente de los desplazamientos U_1 y U_2 .

De la misma manera de (23) decimos que:

$$-P_2 = H_{21}U_1 + H_{22}P_1 \quad (26)$$

Notamos que aún no tenemos a la carga P_2 en función de los desplazamiento U_2 , lo que haremos es aprovechar que este desplazamiento lo tenemos en (25). Entonces sustituyendo (25) en (26) obtendremos finalmente el valor de P_2 en función de los desplazamientos U_1 y U_2 .

$$-P_2 = H_{21}U_1 + H_{22}(-H_{12}^{-1}H_{11}U_1 - H_{12}^{-1}U_2), \quad (27)$$

Efectuando el producto

$$-P_2 = H_{21}U_1 - (H_{22}H_{12}^{-1}H_{11}U_1) - (H_{22}H_{12}^{-1}U_2), \quad (28)$$

Sacando como factor común a U_1 y multiplicando por -1

$$P_2 = (H_{22}H_{12}^{-1}H_{11} - H_{21})U_1 + H_2H_{12}^{-1}U_2 \quad (29)$$

Ordenando (25) y (29) en forma matricial obtenemos el vector de cargas externo, apartir de la matriz de rigidez de la capa analizada y del vector de desplazamientos.

$$\begin{Bmatrix} \bar{P}_1 \\ \bar{P}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -H_{12}^{-1}H_{11} & H_{12}^{-1} \\ H_{22}H_{12}^{-1}H_{11} - H_{21} & -H_{22}H_{12}^{-1} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \end{Bmatrix} \quad (30)$$

En forma compacta este último resultado lo escribimos de la siguiente forma

$$\bar{P} = K\bar{U} \quad (31)$$

Si deseamos calcular los desplazamientos en función de las cargas, entonces de (31) hacemos

$$\bar{U} = K^{-1}\bar{P} \quad (32)$$

si

$$K = \begin{Bmatrix} -H_{12}^{-1}H_{11} & H_{12}^{-1} \\ H_{22}H_{12}^{-1}H_{11} - H_{21} & -H_{22}H_{12}^{-1} \end{Bmatrix}, \quad (33)$$

entonces

$$K^{-1} = [(-H_{12}^{-1}H_{11})(-H_{22}H_{12}^{-1}) - (-H_{12}^{-1})(H_{22}H_{12}^{-1}H_{11} - H_{21})]^{-1} \begin{Bmatrix} -(-H_{12}^{-1}H_{11}) & H_{22}H_{12}^{-1}H_{11} - H_{21} \\ -H_{12}^{-1} & -(-H_{22}H_{12}^{-1}) \end{Bmatrix}. \quad (34)$$

Resolviendo (34) y multiplicando por el vector de cargas obtenemos el vector de desplazamientos en función de las cargas.

Presentamos en forma más detallada y apoyándonos en la ecuación (30), la matriz de rigidez para el caso de una onda SH viajando a través de la capa de la Figura 39 (Huerta, 2001).

$$\begin{Bmatrix} P_0 \\ P_{-h} \end{Bmatrix} = \frac{Gks}{e^{ksh} - e^{-ksh}} \begin{bmatrix} e^{ksh} + e^{-ksh} & -2 \\ -2 & e^{ksh} + e^{-ksh} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_0 \\ V_{-h} \end{Bmatrix}. \quad (35)$$

En el presente trabajo los sitios donde nos interesa obtener un modelo superficial, es muy probable que no estén conformados por una sola capa, por lo tanto, el seguimiento algebraico anterior nos puede servir parcialmente. Según Kausel *et al.* (1981) en el caso de un suelo que consista de muchas capas (como el mostrado en la Figura 38), la matriz de rigidez global se construye con base en la contribución de las capas en cada interfase del sistema.

IV.3 Procesamiento

Con base en la metodología de matrices de rigidez, Huerta López (1999) elaboró un programa llamado “*gomsite*” para obtener resultados de modelado de cocientes H/V, en sitios del Golfo de México. El siguiente diagrama de flujo nos indica su funcionamiento.

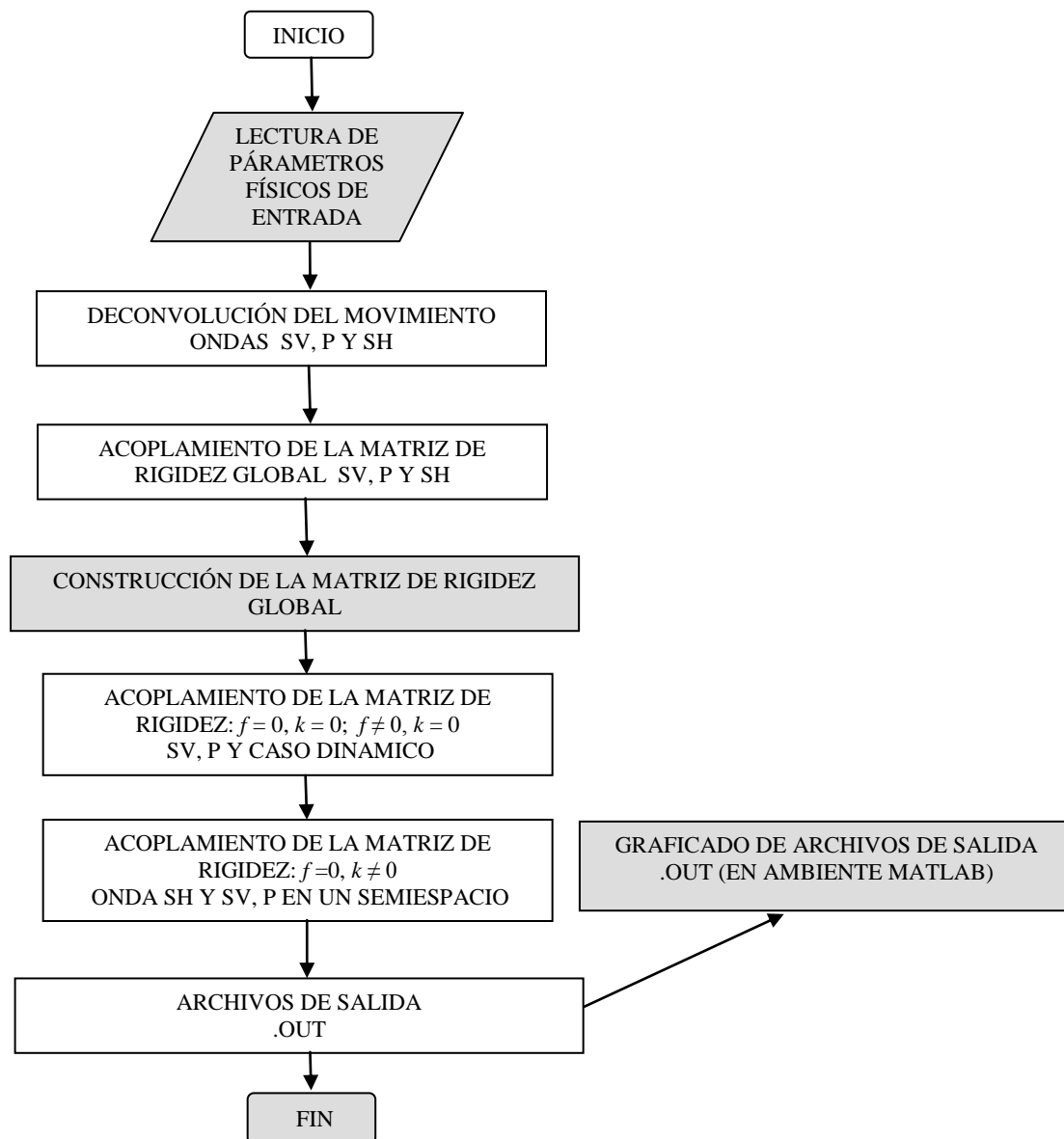


Figura 40. Diagrama del procesamiento semiautomático para obtener la función de transferencia de los sitios CGG, CRT, R02, CHI, GEO y DEL a partir de los cocientes espectrales de onda S.

El programa funciona de la siguiente manera: introducimos los parámetros de entrada, es decir aquella información que contiene las características físicas del modelo. Esta información esta contenida en el archivo “*dmodpcctesi*” y es la siguiente:

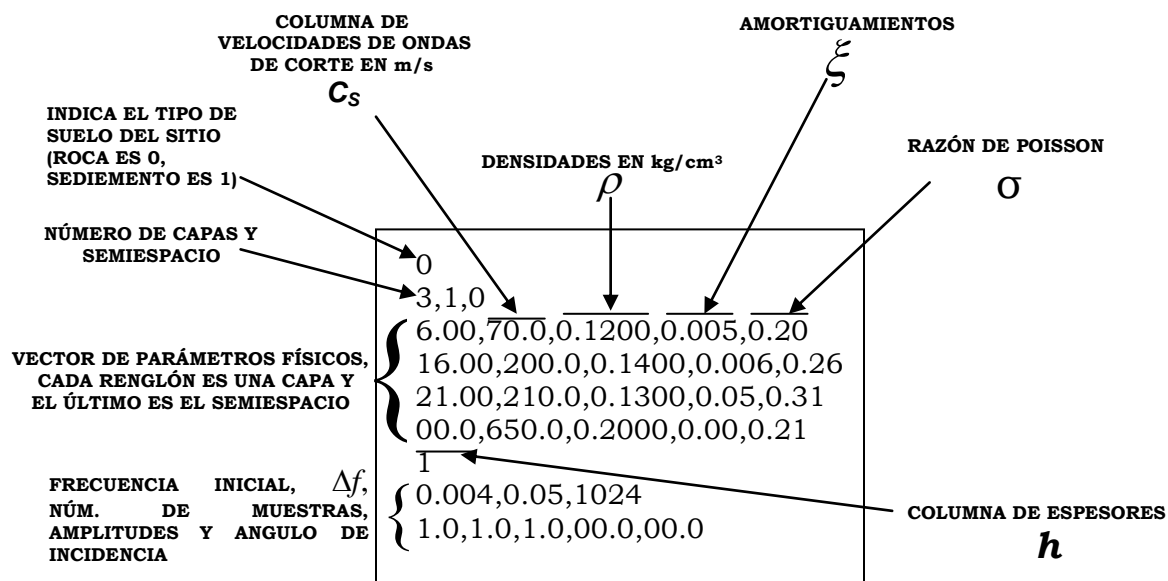


Figura 41. Formato de entrada del conjunto de propiedades físicas del modelo.

Las propiedades para cada capa (mostradas en la Figura 41), no las seleccionamos al azar. Lo que se hace es llevar a cabo una investigación geológica directa en el sitio, o también revisar si existen resultados previos, con esto proponemos los parámetros de entrada del modelo (Vidal Villegas, comunicación personal 2010).

Una vez que los datos físicos (Figura 41) son procesados por el programa, éste genera 4 archivos de salida (que en nuestro caso corresponden a tres capas y un semiespacio), es decir uno por capa. Cada archivo está formado por una matriz (1024 x 8) que contiene información acerca de frecuencias y desplazamientos de las ondas SV, SH y P (Tabla X). Además, crea otro archivo en donde podemos ver la misma información junto con datos complementarios (Tabla XI), pero organizada por segmentos de frecuencia (Δf). A continuación mostramos las Tablas X y XI para una mejor comprensión.

Tabla X. Vista parcial de un archivo de salida de frecuencias y desplazamientos de las ondas SV, SH y P.

	A1	F1	A2	F2	A3	F3	A4	F4
1	0.400000E-02	0.2000E+01	-0.1947E-02	0.2000E+01	-0.1116E-02	-0.2000E+01	0.2004E-02	
1	0.540000E-01	0.2003E+01	-0.2630E-01	0.2001E+01	-0.1502E-01	-0.2003E+01	0.2629E-01	
1	0.104000E+00	0.2010E+01	-0.5174E-01	0.2002E+01	-0.2914E-01	-0.2010E+01	0.5174E-01	
1	0.154000E+00	0.2022E+01	-0.7860E-01	0.2005E+01	-0.4353E-01	-0.2022E+01	0.7860E-01	
1	0.204000E+00	0.2039E+01	-0.1072E+00	0.2009E+01	-0.5824E-01	-0.2039E+01	0.1072E+00	
1	0.254000E+00	0.2060E+01	-0.1380E+00	0.2014E+01	-0.7331E-01	-0.2060E+01	0.1380E+00	
1	0.304000E+00	0.2086E+01	-0.1714E+00	0.2020E+01	-0.8878E-01	-0.2086E+01	0.1714E+00	
1	0.354000E+00	0.2118E+01	-0.2079E+00	0.2027E+01	-0.1047E+00	-0.2118E+01	0.2079E+00	
1	0.404000E+00	0.2155E+01	-0.2482E+00	0.2035E+01	-0.1211E+00	-0.2155E+01	0.2482E+00	
1	0.454000E+00	0.2197E+01	-0.2930E+00	0.2044E+01	-0.1381E+00	-0.2197E+01	0.2930E+00	
1	0.504000E+00	0.2246E+01	-0.3431E+00	0.2054E+01	-0.1556E+00	-0.2246E+01	0.3431E+00	
1	0.554000E+00	0.2301E+01	-0.3997E+00	0.2066E+01	-0.1739E+00	-0.2301E+01	0.3997E+00	
1	0.604000E+00	0.2362E+01	-0.4640E+00	0.2078E+01	-0.1928E+00	-0.2362E+01	0.4640E+00	
1	0.654000E+00	0.2430E+01	-0.5375E+00	0.2092E+01	-0.2126E+00	-0.2430E+01	0.5375E+00	
1	0.704000E+00	0.2505E+01	-0.6222E+00	0.2107E+01	-0.2333E+00	-0.2505E+01	0.6222E+00	
1	0.754000E+00	0.2588E+01	-0.7203E+00	0.2123E+01	-0.2549E+00	-0.2588E+01	0.7203E+00	
1	0.804000E+00	0.2678E+01	-0.8349E+00	0.2140E+01	-0.2775E+00	-0.2678E+01	0.8349E+00	

De la Tabla X, A1 es la interface, F1 vector de frecuencias. A2, F2, A3, F3 partes real e imaginaria del espectro de Fourier del desplazamiento producido por las ondas SV y P, respectivamente. A4 y F4 vectores de desplazamiento antiplano partes real e imaginaria de la onda SH, respectivamente.

Tabla XI. Contenido del archivo llamado “*smodpctesi*” con datos organizados por segmentos Δf e interfases.

THE SOIL STRATUM CONSISTS OF 3 LAYERS RESTING ON AN ELASTIC HALF SPACE

layer	Hi	Cs	density	G	beta	Poisson s	Cs/Cp
1	5.00	180.00	0.10	0.3240E+04	0.03	0.40	0.408
2	15.00	230.00	0.11	0.5819E+04	0.09	0.30	0.535
3	20.00	240.00	0.13	0.7200E+04	0.07	0.35	0.480
4	0.00	600.00	0.20	0.7344E+05	0.00	0.25	0.577

AMPLITUDE OF INCIDENT P-WAVE = 1.000 INCIDENCE ANGLE= 0.000
 PHASE ANGLE= 0.000
 AMPLITUDE OF INCIDENT SV-WAVE= 1.000 INCIDENCE ANGLE= 0.000
 AMPLITUDE OF INCIDENT SH-WAVE= 1.000 INCIDENCE ANGLE= 0.000

DISPLACEMENTS AT OUTCROPPING OF LEVEL= 4
 HORIZONTAL MOTION= -2.000 0.000 (2.000)
 VERTICAL MOTION = 2.000 0.000 (2.000)
 ANTIPLANE MOTION = 2.000 0.000 (2.000)
 SLOWNESS = 0.000E+00

AMPLITUDE OF REFLECTED P-WAVE = 0.1000E+01 PHASE OF REFLECTED P-WAVE = -180.00
 AMPLITUDE OF REFLECTED S-WAVE = 0.1000E+01 PHASE OF REFLECTED S-WAVE = -180.00

FREQUENCY= 0.0040 HZ = 0.0251 RAD/SEC.

INTERFACE	HORIZONTAL DISPLACEMENT	VERTICAL DISPLACEMENT	ANTIPLANE DISPLACEMENT
1	-0.2000E+01 0.1947E-02 (0.2000E+01)	0.2000E+01 -0.1116E-02 (0.2000E+01)	
2	-0.2000E+01 0.1947E-02 (0.2000E+01)	0.2000E+01 -0.1116E-02 (0.2000E+01)	
3	-0.2000E+01 0.1946E-02 (0.2000E+01)	0.2000E+01 -0.1115E-02 (0.2000E+01)	
4	-0.2000E+01 0.1944E-02 (0.2000E+01)	0.2000E+01 -0.1115E-02 (0.2000E+01)	

ANTIPLANE DISPLACEMENT

1	0.2000E+01 -0.2004E-02 (0.2000E+01)
2	0.2000E+01 -0.2004E-02 (0.2000E+01)
3	0.2000E+01 -0.2003E-02 (0.2000E+01)
4	0.2000E+01 -0.2002E-02 (0.2000E+01)

FREQUENCY= 0.009 HZ = 0.3393 RAD/SEC.

INTERFACE	HORIZONTAL DISPLACEMENT	VERTICAL DISPLACEMENT	ANTIPLANE DISPLACEMENT
1	-0.2003E+01 0.2630E-01 (0.2003E+01)	0.2001E+01 -0.1502E-01 (0.2001E+01)	
2	-0.2003E+01 0.2629E-01 (0.2003E+01)	0.2001E+01 -0.1502E-01 (0.2001E+01)	
3	-0.2002E+01 0.2615E-01 (0.2002E+01)	0.2000E+01 -0.1498E-01 (0.2000E+01)	
4	-0.2000E+01 0.2581E-01 (0.2000E+01)	0.2000E+01 -0.1490E-01 (0.2000E+01)	

ANTIPLANE DISPLACEMENT

1	0.2003E+01 -0.2629E-01 (0.2003E+01)
2	0.2003E+01 -0.2629E-01 (0.2003E+01)
3	0.2002E+01 -0.2614E-01 (0.2002E+01)
4	0.2000E+01 -0.2581E-01 (0.2000E+01)

El contenido del archivo “*smodpctesi*” (Tabla XI) proporciona los parámetros de entrada para un suelo de 3 capas sobre un semiespacio elástico, como son el espesor de cada capa, la velocidad de las ondas de corte, la densidad, el módulo de corte G, el amortiguamiento,

la razón de Poisson y una razón de velocidades entre la onda S y P. A continuación proporciona las amplitudes de las ondas P, SH y SV incidentes así como los ángulos de incidencia, además de diferentes datos que se pueden consultar en la misma tabla.

Las partes real e imaginaria del espectro de Fourier de los desplazamientos (onda SV), contenidos en las columnas A2 y F2 de la Tabla X, y los contenidos (onda SH) en las columnas A4 y F4 de la misma tabla; los utilizamos para calcular el módulo respectivo y éste lo graficamos contra el vector de frecuencias F1. Como resultado se obtiene la curva señalada como “H/V TEÓRICO” de la Figura 42. Observamos solamente una curva teórica debido a que el valor del ángulo de incidencia es igual a cero.

En cuanto a las curvas “H1/V” y “H2/V” de la misma Figura 42, son los cocientes H/V experimentales del sitio CRT, es decir componente longitudinal entre vertical (H1/V) y componente transversal (H2/V).

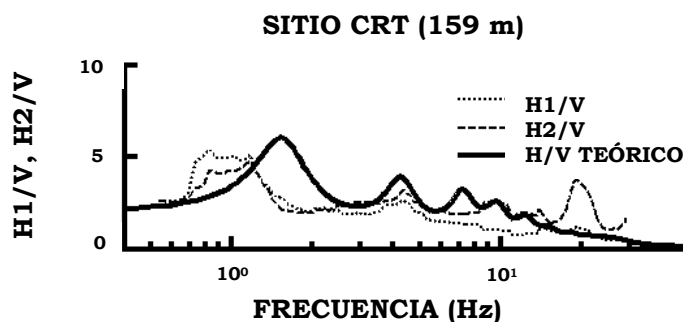


Figura 42. Resultados de las pruebas realizadas para obtener los cocientes espectrales H/V teóricos y experimentales del sitio CRT con el uso del programa “gomsite” en combinación con el programa de graficado “3capas” en ambiente MATLAB 7.0.0.

En la Figura 42, observamos que existe poca correlación entre las curvas teóricas (H/V teórico) y experimentales (H1/V y H2/V), lo cual significa que los datos de entrada (Figura 41) no son los adecuados. Como parte del proceso, y para mejorar el ajuste, se realiza un cambio de parámetros hasta llegar a un ajuste aceptable entre las curvas y así obtener un modelo definitivo para el sitio de interés. Durante el proceso de proponer los datos físicos y repetirlos, es necesario tomar en cuenta lo que representa cada uno de los parámetros de

entrada (densidades, amortiguamientos, razón de Poisson, etc.). Esto es, hay que tener en cuenta la definición de cada uno y correlacionar con la información geológica del sitio donde nos interesa obtener el modelo. Esto último quiere decir que no podemos cambiar al azar estos parámetros físicos.

IV.4 Resultados

En la Figura 43 presentamos los resultados del modelado de los cocientes H/V para los sitios CRT y GEOv obtenidos con el uso de datos de ruido y VCP y GEO con aceleración. El procedimiento que se siguió es el descrito en el apartado IV.3.

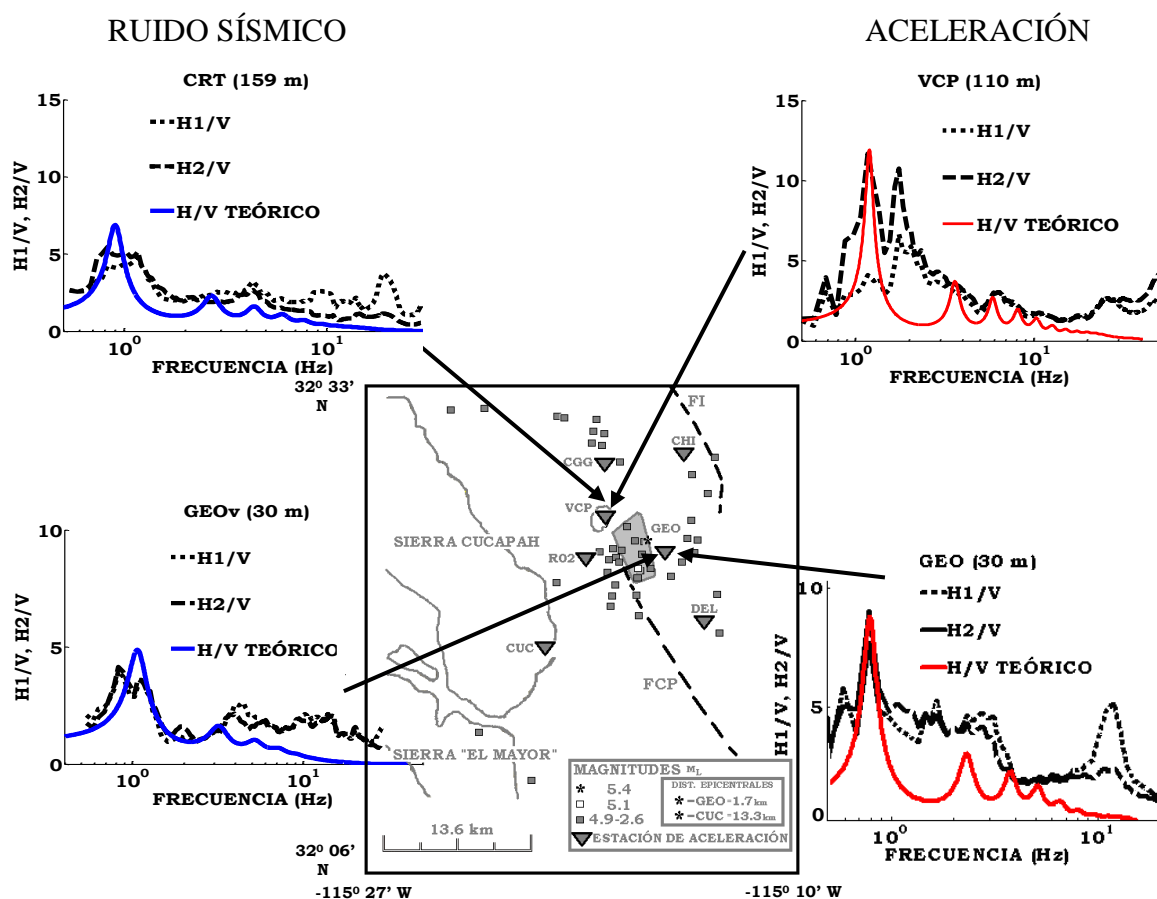


Figura 43. Resultado final de cocientes espectrales H/V teóricos y experimentales de los sitios CRT y GEO, obtenidos a partir de datos de ruido sísmico y VCP y GEO con aceleración.

En la Figura 44 presentamos modelos para los sitios CGG, CHI, R02 y DEL con datos de aceleración.

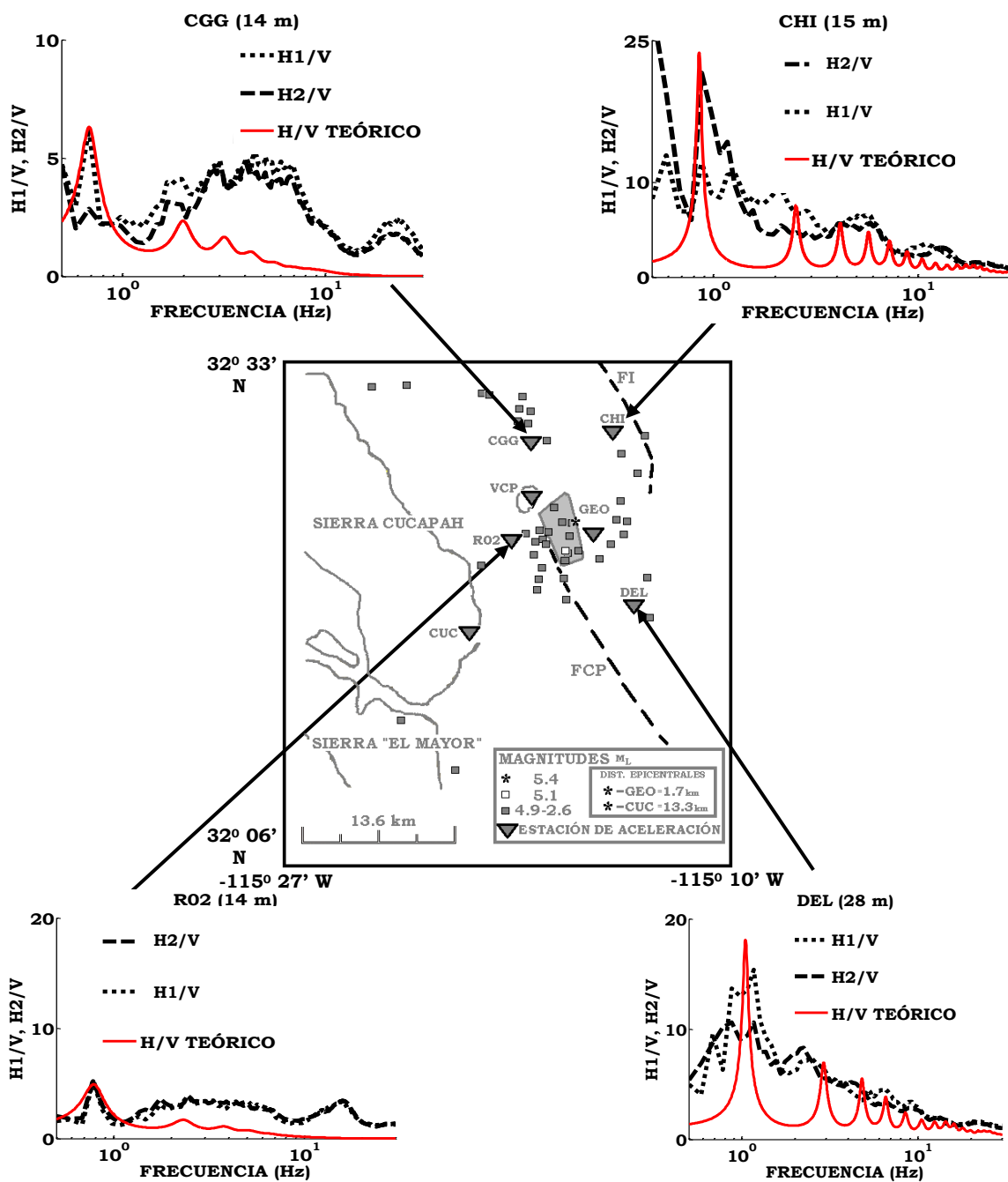


Figura 44. Resultado final de cocientes espectrales H/V teóricos y experimentales de los sitio CGG, CHI, R02 y DEL obtenidos a partir de datos aceleración.

A continuación presentamos las propiedades físicas resultantes de cada modelo, el espesor final oscila entre los 29 y 43 m para modelos de tres capas y semiespacio.

Tabla XII. Resultados del modelado unidimensional de los cocientes espectrales H/V, utilizando datos de ruido sísmico y de aceleración.

SITIO	ESPESOR h (m)	VELOCIDAD ONDA S (m/s)	DENSIDAD ρ gr/cm ³	AMORT. ξ %	RAZÓN DE POISSON σ	DATOS USADOS EN EL MODELADO
CRT						
	9	180.0	1.2	0.04	0.24	Sitio modelado con ruido sísmico
	20	200.0	1.4	0.11	0.30	
	28	210.0	1.3	0.09	0.35	
	00	650.0	2.0	0.00	0.25	
VCP						
	6	180.0	1.0	0.03	0.24	Sitio modelado con Aceleración
	16	200.0	1.5	0.07	0.30	
	21	210.0	1.4	0.05	0.35	
	00	650.0	2.1	0.00	0.25	
GEO						
	5	90.0	1.5	0.03	0.35	Sitio modelado con Aceleración
	15	120.0	1.7	0.09	0.30	
	20	130.0	1.6	0.07	0.35	
	00	570.0	2.3	0.00	0.25	
GEOv						
	6	160.0	1.3	0.07	0.35	Sitio modelado con ruido sísmico
	16	180.0	1.5	0.14	0.30	
	21	190.0	1.4	0.13	0.35	
	00	630.0	2.1	0.00	0.25	
CGG						
	7	90.0	1.5	0.06	0.35	Sitio modelado con Aceleración
	17	120.0	1.7	0.12	0.33	
	22	130.0	1.6	0.10	0.35	
	00	570.0	2.3	0.00	0.25	
DEL						
	7	140.0	1.0	0.005	0.24	Sitio modelado con Aceleración
	15	160.0	1.2	0.045	0.30	
	20	170.0	1.3	0.035	0.35	
	00	680.0	2.0	0.00	0.25	

Tabla XII. (Continuación) Resultados del modelado unidimensional de los cocientes espectrales H/V, utilizando datos de ruido sísmico y de aceleración.

SITIO	ESPESOR h (n)	VELOCIDAD ONDA S (m/s)	DENSIDAD ρ gr/cm ³	AMORT. ξ %	RAZÓN DE POISSON σ	DATOS USADOS EN EL MODELADO
CHI	4	100.0	1.3	0.005	0.30	Sitio modelado con Aceleración
	17	130.0	1.4	0.035	0.30	
	19	140.0	1.5	0.025	0.35	
	00	570.0	2.3	0.00	0.25	
R02	6	110.0	1.3	0.007	0.20	Sitio modelado con Aceleración
	16	130.0	1.5	0.14	0.22	
	21	140.0	1.4	0.13	0.30	
	00	580.0	2.1	0.00	0.25	

En la Figura 45 presentamos la litología de los pozos más cercanos a los sitios en donde determinamos la estructura superficial.

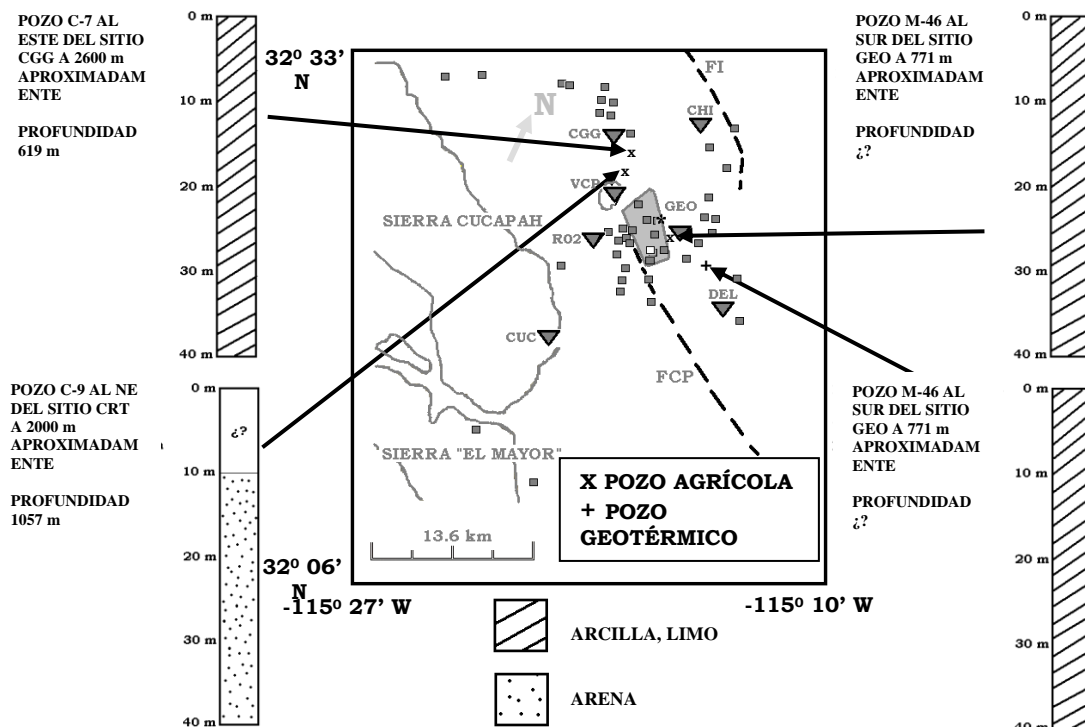


Figura 45. Localización, profundidad y litología (Martín Barajas *et al.*, 1998) de los pozos más cercanos a los sitios de modelado.

IV.5 Discusión

SITIOS CRT y VCP

Los resultados del modelado en el sitio CRT (Figura 43, Tabla XII) en el cráter del VCP, para tres capas de espesores 9, 20, 28 m y un semiespacio, nos indican claramente material compuesto a base de arenas secas semiconsolidadas. Este modelo podríamos correlacionarlo con la litología del pozo agrícola C-9 (Figura 45) que se encuentra a 2 km al noreste del VCP. La litología de este pozo en los primeros 10 m no contiene información que nos ayude, sin embargo, de los 10 a los 40 m existe material arenoso (Martín Barajas *et al.*, 1998)

Por otra parte Vidal Villegas *et al.* (2007) reportaron resultados de la función de transferencia para este mismo sitio, los cuales los presentamos para compararlos con los obtenidos en este trabajo.

Tabla XIII. Comparación de resultados del modelado de los cocientes H/V entre los presentados por Vidal Villegas *et al.*, 2007 y los del presente trabajo.

SITIO	ESPESOR h (o)	VELOCIDAD ONDA S (m/s)	DENSIDAD ρ gr/cm ³	AMORT. ξ %	RAZÓN DE POISSON σ	DATOS USADOS EN EL MODELADO
(Vidal Villegas <i>et al.</i> , 2007)						
CRT	5	220	1.2	0.01	0.24	Sitio modelado con ruido sísmico
	15	250	1.4	0.07	0.30	
	20	260	1.3	0.05	0.35	
	00	700	2.0	0.00	0.25	
CRT	9	180.0	1.2	0.04	0.24	Sitio modelado con ruido sísmico
	20	200.0	1.4	0.11	0.30	
	28	210.0	1.3	0.09	0.35	
	00	650.0	2.0	0.00	0.25	
VCP	6	180.0	1.0	0.03	0.24	Sitio modelado con aceleración
	16	200.0	1.5	0.07	0.30	
	21	210.0	1.4	0.05	0.35	
	00	650.0	2.1	0.00	0.25	

De la Tabla XIII, podemos decir que los sitios modelados con ruido prácticamente tienen similitud en un 90%, por lo que respecta al modelado del sitio VCP con datos de aceleración, también nos da resultados muy parecidos con la excepción de que las velocidades de onda S están disminuidas 50 m/s aproximadamente.

Con resultados de tres modelos a la mano, litología del pozo C-9 y recordando que en la cima del VCP la amplificación alta existe, como ya se comprobó con cocientes H/V (con ruido y aceleración), estamos en condiciones de sugerir una respuesta a la pregunta de porque la señal sísmica se amplifica en la parte alta del volcán. Sugerimos que, al menos para este sitio, esta formado principalmente por material arenoso. A pesar de que en superficie se observa material riódacítico que cubre el cuerpo volcánico.

SITIOS GEO y GEOv

Del Capítulo III, presentamos los siguientes resultados para esta estación:

- Cocientes H/V con registros de ruido: amplitud de casi 5 a 0.8 Hz (Figura 24)
- Cocientes H/V con registros de acelerogramas: amplitud de 8.6 a 0.8 Hz (Figura 32)
- Inspecciones directas en el sitio cuando se tomaron las muestras de ruido: suelo saturado de fluido

De los primeros dos puntos vemos que la frecuencia fundamental coincide para ambos resultados. Sin embargo, el valor H/V diverge en 1.7 veces para este sitio, hemos obtenido un modelo de tres capas de los primeros 43 m (Figura 43, Tabla XII) utilizando datos de ruido y aceleración y tratamos de correlacionar estos resultados con el pozo agrícola M-46 (Figura 45). El pozo se encuentra solamente a 771 m al sur del sitio.

Con base en lo anterior, proponemos que las aceleraciones altas registradas en la zona de las instalaciones del CGCP, se deben a que existe material arenoso-arcilloso parcialmente saturado de fluido, lo cual queda confirmado con la baja densidad de los primeros 5 m del

modelo. Además, los valores de σ para sedimentos no consolidados y saturados de agua las razones de Poisson toman valores cercanos a 0.5.

SITIO CGG

El modelado nos arroja para este sitio la velocidad más baja y como contraparte tenemos amortiguamientos y razones de Poisson altos, comparados con respecto a los otros 5 sitios (Tabla XII).

Con la litología del pozo C-7 (Figura 45) al este del sitio y a 2.6 km de distancia, confirmamos que el material predominante en esta zona sigue siendo la arcilla y el limo, aunque también se hacen presentes sedimentos de grano fino (Martín Barajas *et al.*, 1998)

Las densidades las asociamos con las limolitas y areniscas, ya que para éstas toman valores entre 2.5 y 2.7 gr/cm³ (Bormann, 2003), que son valores a los que se aproximan al que obtuvimos en el semiespacio. En resumen, sugerimos que el sitio tiene material arcilloso en los primeros 24 m y debajo de esta arcilla encontramos una formación geológica de limolitas.

SITIO DEL

En el lugar que ocupa la estación de aceleración DEL, sólo contamos con resultados de cocientes espectrales H/V obtenidos apartir de datos de acelerogramas (Figuras 32 y 34). Para este sitio obtuvimos un modelo somero de 42 m de espesor formado por 3 capas, el cual, correlacionamos con los resultados del pozo geotérmico M-189 ubicado a 3.6 km del sitio en dirección noroeste (Figura 45). El modelo observado nos dio unas densidades que seguimos relacionándolas con materiales arcillosos.

No podemos dar una explicación a las aceleraciones altas registradas en DEL debido a que no tenemos reconocimientos geológicos de campo y por tener litologías de pozo (M-189) ubicadas a una distancia muy alejada del sitio.

SITIO CHI

Para este sitio pusimos especial atención por ser uno donde teníamos la mayor información posible (nuestro trabajo, resultados de un estudio previo hacia el norte del sitio y resultados de pozo). Con respecto a nuestro trabajo tenemos lo siguiente:

1. Cocientes espectrales H/V obtenidos a partir del procesado de onda S con 10 acelerogramas de sismos (magnitudes entre 2.8 y 5.4, distancias epicentrales de 6.1 a 11.6 km).
2. Cocientes espectrales H/V obtenidos a partir del procesado de señal completa (onda P, S y 2/3 de coda) de 23 acelerogramas de sismos, cuyo intervalo de magnitudes fue entre 2.8 y 5.4. Las distancias epicentrales fueron entre 6.1 y 15.6 km. Todos los epicentros se ubicaron hacia las direcciones sur, este y oeste de la estación (Figura 27).
3. Un cociente espectral H/V de onda S de 17.4 (la más alta obtenida con este tipo de datos) a 1 Hz y con señal completa (23 sismos) un cociente H/V de 17 a 0.6 Hz, además, una comparación espectral con el sitio CUC (sobre roca) nos dio 15 de amplitud a 0.5 Hz. En este punto observamos una gran concordancia en los resultados de H/V y frecuencia.
4. Modelado de los cocientes espectrales H/V con base en tres capas y semiespacio, correlacionado con la información litológica del pozo C7 (Martín Barajas *et al.*, 1998) que se ubica hacia el sur de CHI a una distancia de 6 km.

Con respecto a estudios previos, en el valle Imperial, se tiene, un modelo de velocidades obtenido con el uso de la técnica REMI (*REfracción de MIcrotremores*, Louie *et al.*, 2001). El modelo se obtuvo por medio de un arreglo en línea de 200 m de longitud, el cual se encontraba a 32 km al norte del sitio CHI (a 100 m de la barda fronteriza en Mexicali en el west Bank de New River en Calexico). Los resultados de este trabajo, mostrados en la Tabla XIV, incluyen un modelo de dos capas y el semiespacio.

Tabla XIV. Resultados del modelo de velocidades obtenidos por Louie *et al.* (2001) usando la técnica de refracción de microtemores.

COORDENADAS DEL ARREGLO INICIO Y FINAL		CAPAS	ESPESORES (m)	DENSIDADES (gr/cm ³)	VELOCIDAD DE ONDA S (m/s)
LAT. N (grados)	LONG. O (grados)				
32.6659	-115.5087	3	4	2	180
32.6650	-115.5069		26	2	230
			SEMIESPACIO	2	430

Los resultados de Louie *et al.* (2001) los comparamos con cada uno de los sitios (incluido el más cercano, CHI) y vimos que se asemejan más a los reportados para el sitio CRT y VCP. Sin embargo, esta comparación es sólo una referencia ya que ambos sitios están muy alejados. En cuanto al sitio CHI observamos que en los espesores, solamente la primera capa coincide, la segunda difiere en un factor de 1.5. Las velocidades son casi el 50% más altas (en REMI) y las densidades tienen un factor de comparación, con respecto a CHI, de 1.4. Con base en lo anterior, consideramos que la región es muy compleja y la estructura no es la misma para todos los sitios. Nosotros confiamos en nuestros modelos obtenidos con base en la técnica descrita y que, para corroborar o rectificar nuestros resultados, se puede aplicar la técnica REMI, sobre todo en los sitios ubicados en zonas habitadas (CHI, DEL, CGG) o con infraestructura civil importante (GEO).

En cuanto a los resultados de litología del pozo C7, en sus primeros 40 m nos indica material arcilloso ($V_s = 294-882$ m/s, ver apéndice B) que se correlaciona con las velocidades obtenidas en la tercera capa y semiespacio (en el sitio CHI).

SITIO R02

No proporcionamos información a detalle sobre los resultados del modelado en este sitio, debido a que se encuentra en terrenos rústicos inhabitables a futuro. Lo más interesante es haber corroborado valores bajos en los cocientes espectrales H/V con los diferentes tipos de procesamiento presentados en este trabajo.

Como ya lo habíamos dicho, los valores bajos de cocientes H/V con datos de ruido (perfil de sitios), acelerogramas (estación R02) y con el modelo somero presentado, podemos sugerir que el sitio R02 es un buen lugar para la instalación permanente de equipo sísmico.

Capítulo V. CONCLUSIONES

A continuación presentamos un resumen de las conclusiones obtenidas en el presente trabajo. Iniciamos con el tema de amplificación.

- Una de nuestras primeras conclusiones es que confirmamos la existencia de amplificación de la señal sísmica en la cima del volcán Cerro Prieto. Esta amplificación, obtenida a partir de datos de ruido, es de $6.3 (\pm 2.3)$ a $1.2 (\pm 0.2)$ Hz con respecto a la parte baja. Sin embargo, decrece a un promedio de 2.7 a frecuencias mayores de 1.8 a 30 Hz. Hay similitud entre éstos resultados y los obtenidos a partir de datos de aceleración. Cuando comparamos dos sitios uno a 110 m (VCP) y otro en la parte baja a 14 m (R02) la amplitud es de $5.5 (\pm 2.6)$ a $1.3 (\pm 0.2)$ Hz.
- Para sitios ubicados en partes altas del volcán, existe concordancia en los valores altos de cocientes H/V. Es decir, en la zona del cráter en CRT (159 m) fue de $5 (\pm 1.6)$, la registrada en el sitio SITIO4 (165 m) de $6.3 (\pm 1.6)$ y en la estación VCP (110 m) $8.4 (\pm 4.2)$. Los valores mencionados concuerdan con los reportados por otros autores para sitios como CPRI (90 m) 4.4 y CPX (180 m) 13.
- En el sitio ROAD, ubicado en el inicio del perfil de ruido, cercano al sitio R02 (separados ambos 100 m); la amplificación es baja (≤ 1.2) en el intervalo de frecuencias analizado (0.5 a 30 Hz). Este resultado se confirmó cuando usamos datos de ruido y aceleración.
- Con el uso de datos de aceleración, en los sitios DEL, CGG y CHI estimamos cocientes H/V altos de $13 (\pm 7.7)$, $4.9 (\pm 2.4)$ y $15.2 (\pm 11.1)$ a frecuencias de $1 (\pm 0.3)$ Hz, $0.7 (\pm 0.4)$ Hz y $0.6 (\pm 0.2)$ Hz respectivamente. No obstante que estos valores son concordantes con los reportes de los pobladores de que “sienten muy fuerte los temblores”, consideramos que es necesario realizar estudios con mayor detalle (por ejemplo de microzonación).

- En el sitio GEO (30 m), ubicado en uno de los patios del CGCP, obtuvimos un cociente espectral de $5.3 (\pm 3.9)$ a $0.9 (\pm 0.2)$ Hz con el uso de datos de aceleración y en GEOv de $4 (\pm 1.2)$ a $0.8 (\pm 0.2)$ Hz con ruido, respectivamente. La frecuencia fundamental obtenida es igual pero los cocientes H/V difieren por un factor de 2.15. Nuestros resultados, obtenidos a partir de datos de aceleración, concuerdan con los que presentaron otros autores para el mismo sitio (cociente espectral H/V de 10.3 a 1 Hz).
- La identificación del cociente H/V máximo fue posible hacerlo en más de la mitad de los sitios estudiados (12 de 23). El cociente H/V máximo fue difícil de identificar en los sitios del perfil de ruido con excepción de CRT, F7B, SITIO4 (entre 60 y 165 m) y el sitio GEOv (30 m). Con datos de acelerogramas de onda S y señal completa (P, S y coda) fue posible identificar la frecuencia fundamental y los cocientes H/V máximos en todos los sitios con excepción de R02 (cuando se usó P, S y coda).

Con respecto a la frecuencia fundamental tenemos lo siguiente:

- La frecuencia fundamental promedio estimada en sitios cercanos al cráter (CRT, 159 m; SITIO4 165 m y VCP 110 m), fue de $1.6 (\pm 0.3)$ Hz. El valor promedio estimado por otros autores (CPRI 90 m, CPX 180 m) para sitios relativamente cercanos es de 1.5 Hz; este valor concuerda con el obtenido en el presente estudio. Por tanto, concluimos que la frecuencia fundamental está bien definida para la parte alta del volcán Cerro Prieto.
- La frecuencia fundamental del volcán Cerro Prieto (como un todo) no fue posible obtenerla, debido a las condiciones topográficas existentes (terreno accidentado) y principalmente a que no se observó esta frecuencia en la parte media (sitios FFF a 58 m, F7B a 60 m) ni tampoco en su base (F9A a 9 m).

- Con base en la experiencia obtenida, notamos que el uso de los cocientes H/V es recomendable para determinar la frecuencia fundamental de un sitio, lo cual concuerda con las conclusiones de otros autores (por ejemplo Bard, 1998; Lermo y Chávez García, 1993 entre otros).

De los resultados del modelado nuestras conclusiones son:

- Que son confiables (los cocientes H/V experimental entre modelado, entre 0.1 y 1.1 Hz, son entre 0.7 y 1). Con respecto a la frecuencia fundamental experimental y la teórica, esta resultó ser buena en los 6 sitios (las diferencias experimental menos modelado son entre 0 y 0.2 Hz). En cuanto a las razones de Poisson obtenidas en los sitios GEO (0.30 y 0.35), DEL (0.31) y CHI (0.30 y 0.32) nos sugieren suelos que contienen fluidos debido a que se aproximan a 0.5 (suelo saturado de fluido).
- Que la estructura superficial determinada (tres capas horizontales sobre un semiespacio) es confiable. Esta afirmación la hacemos con base en el modelado de los cocientes H/V (ver punto anterior). De los parámetros físicos importantes en el modelado están el amortiguamiento (entre 0.005 y 0.14), los valores de Poisson (entre 0.1 y 0.35), y las velocidades de la onda S (entre 90 m/s y 680 m/s). Con respecto este último parámetro, los valores obtenidos tienen correlación con los reportados por Huerta (2008) para arenas secas (entre 118 y 175 m/s), arcillas y aluvión (entre 294 y 882 m/s). Estos materiales son mencionados en los pozos C-7, M-46 y M-189, los cuales están comprendidos en el área de estudio.
- Que en el 99% de la zona original de estudio (círculo de 5 km de radio) domina el material arenoso, el resto es arcilla-limo. Los sitios que ocupan las estaciones acelerograficas CHI, GEO y DEL también domina el material arcilloso. Esta última conclusión también la hacemos con base en las velocidades de onda S (CHI, 100-570 m/s; GEO, 90-570 m/s y DEL, 140-680 m/s) obtenidas para las tres capas y semiespacio, el lector puede consultar el apéndice B para hacer una comparación.

V.1 Recomendaciones

- Debido a que en los sitios ROAD y R02 se obtuvieron cocientes H/V bajos con dos tipos de datos: ruido y aceleración, respectivamente; sugerimos que cualquiera de los dos pueden ser adecuados para la instalación de equipo sísmico permanente. Los registros de aceleración obtenidos en R02 son de buena calidad y este sitio pudiera ser un lugar para reubicar la estación Cerro Prieto (CPX).
- Llevar a cabo un arreglo adecuado de sitios para registrar ruido sísmico en el volcán Cerro Prieto (cubrir las partes alta, media y base), con el fin de poder estimar la frecuencia fundamental del edificio volcánico (como un cuerpo completo). Consideramos que es importante hacerlo por la infraestructura de comunicaciones instalada en el volcán.
- Hacer estudios de sísmica de refracción con la técnica de refracción de microtremores (REMI). Esto con el fin de ratificar (o rectificar) los resultados reportados en los sitios ubicados en zonas habitadas (CHI, DEL, CGG) o con infraestructura civil importante (GEO).
- Con el fin de explicar el origen de la señal de 5.1 s, recomendamos llevar a cabo un estudio con mayor detalle: utilizar un número mayor de registros de ruido en la zona y efectuar un análisis espectral. El estudio sugerido se puede complementar con registros de ruido sísmico en sitios próximos a las costas del norte del Golfo de California y del Océano Pacífico para saber si está presente el periodo mencionado y tratar de determinar si su origen es debido al movimiento del mar.

REFERENCIAS

- Akamatu, K. (1961). "On microseisms in frequency range from 1 c/s to 200 c/s". *Bulletin of the Earthquake Research Institute* 39: 23-75.
- Aki, K. y P. G. Richards. 1980. *Quantitative seismology: theory and methods*. Freeman and Co. New York, USA. I y II. 932 pp.
- Axen, G. J., Grove, M., Stockli, D., Lovera O. M., Rothstein, D. A., Fletcher, J. M., Farley, K. y Abbott, P. L. (2000). "Thermal evolution of Monte Blanco dome -late Neogene low-angle normal faulting during the Gulf of California rifting and late Eocene disruption of extraregional river systems". *Tectonics* 19 (2): 197-212.
- Bard, P. I. (1998). "Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?". The effects of surface geology on seismic motion, Irikura, Kudo, Okada and Sasatani (eds.), Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1251-1279.
- Bormann, P. (2002). IASPEI "New manual of seismological observatory practice" (NMSOP) 1 y 2 Bormann Peter (ed.), Geoforschungszentrum Postdam.
- Castro Escamilla, R. R. (1998). "An empirical model for estimating horizontal acceleration Fourier spectra for the Imperial-Mexicali Valley region". *Geofísica Internacional* 37 (1): 17-28.
- Castro, R. R. y RESNOM Working Group. (1998). "P-and S-Wave site response of the seismic network RESNOM determined from earthquakes of Northern Baja California, Mexico". *Pure and Applied Geophysics*. 152: 125-138.
- Field, E. H. y Jacob, K. H. (1995). "A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85 (4): 1127-1143.
- Flores-Estrella, H. C., Lomnitz-Aronsfrau, C. y Yussim-Guarneros, S. (2004). "Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtremores con el método SPAC". *Geos*, 24, (3): 438-445.
- Gastil, R. G., R. P. Phillips y E. C. Allison (1975). "Reconnaissance geology of the state Baja California". *Geol. Soc. Am. Menoir* 140-170.
- González, M., Munguía, L., Vidal, A., Wong, V., González, M. y Suárez, F. (2001), "Two M_w 4.8 Cerro Prieto, Baja California, México, earthquakes on 1 June and 10 September 1999: strong-motions observations". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91 (6): 1456-1470.

- Haubrich, R. A. y McCamy, K. (1969). "Microseisms: coastal and pelagic sources". *Reviews of Geophysics*, 7 (3): 539-571.
- Huerta-López, C. I., (2008). *Notas del curso de Dinámica de rocas y suelos*. CICESE, Ensenada, B. C., México.
- Huerta-López, C. I., (2001). "Determination of soil properties from earthquake data". Ph.D. Dissertation. The University of Texas at Austin, 222 pp.
- Huerta-López, C. I., Stokoe II, K. H., Pulliam, J., Valle-Molina, C. y Roesset, J. M. (2005). "Modeling of seafloor soft marine sediments and spectral characteristics of earthquakes recorded on the Gulf of Mexico". *Journal of offshore mechanics and arctic engineering*, 127: 59-67.
- Johnson, N. M., Officer, Ch. B., Opdyke, N. D., Woodard, G. D., Zeitler, P. K. y Lindsay, E. H. (1983). "Rates of the late Cenozoic tectonismo in the Vallecito-Fish Creek basin, western Imperial Valley, California". *Geology* 11: 664-667.
- Kanay, K. y Tanaka, T. (1961). "On microtremors VIII". *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, 39: 97-114.
- Kausel, E., y Roesset, J. M. (1981). "Stiffness matrices for layered soils". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71 (6): 1743-1761.
- Lermo, J. y Chávez-García, F.J. (1993). "Site effects evaluation using spectral ratios with only one station". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83 (6): 1574-1594.
- Louie, J. N. (2001). "Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91 (6): 347-364.
- Luna-Munguía M, Munguía-Orozco L, Vidal-Villegas A, Navarro-Sánchez M y Valdéz-López T. (2005). "Catálogo de Acelerogramas Registrados por la Red de Acelerógrafos del Noroeste de México durante el año 2005". Informe técnico. Comunicaciones académicas, serie sismología, CICESE 344. Ensenada, Baja California.
- Martín-Barajas, A., Vásquez-Hernández, S., (1998). "Evolución geológica del delta del río Colorado y descripción e interpretación de los depósitos recientes en las inmediaciones del campo geotérmico de Cerro Prieto". Anexo número 4, Geología, Informe técnico, 23 pp.
- Martín-Barajas, A., Vásquez-Hernández S., Carreño A. L., Helenes J., Suárez-Vidal, F. y Álvarez-Rosales J. (2001). "Late neogene stratigraphy and tectonic control on facies evolution in the Laguna Salada Basin, northern Baja California, Mexico". *Sedimentary Geology* 144: 5-35.

Munguía, L., Anderson, J. G. y Brune J. N. (1988), "The Cerro Prieto, Baja California earthquake of February 6, 1987 and processed strong-motion data". California Department of Conservation Division of Mines and Geology Office of Strong Motion Studies, report OSMS 87-04, 51 pp.

Munguía, L., Glowacka, E., Suárez-Vidal, F., Lira-Herrera, H. and Sarychikhina, O. (2009). "Near-fault strong ground motions recorded during the Morelia normal-fault earthquakes of May 2006 in Mexicali Valley, B. C., México". Bulletin of the Seismological Society of America, 99 (3): 1538-1551.

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-I.

Puente, C. I. y de la Peña, L. A. (1978). "Geología del campo geotérmico de Cerro Prieto". En First symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México, 17-37 (en Español e Inglés).

Rebollar, C. J., Reyes, L. M., Quintanar, L. y Arellano J. F. (2003), "Stress heterogeneity in the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, México". Bulletin of the Seismological Society of America, 93 (2): 783-794.

Suárez-Vidal, F., Armijo R., Morgan G., Bodin P. y Gastil R. G. (1991). "Framework of recent and active faulting in northern Baja California". En: J. P. Dauphin y B. R. T. Simoneit (eds). The Gulf and Peninsular Province of the Californias. AAPG Memoir 47, Tulsa Okla. 285-300.

Vidal-Villegas, J. A., Huerta-López, C. I., Luna-Munguía, M., Munguía-Orozco, L., Navarro-Sánchez, M. y Valdés-López, T., (2007). "Modelado de la amplificación del movimiento del terreno y de las características espectrales de sismos registrados en el volcán de Cerro Prieto, Baja California, México". Geos, 27 (1): 114.

APÉNDICES

A. Formato ASA 2.0 propuesto por el CENAPRED

```
*****
CENTRO DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y DE EDUCACION SUPERIOR DE ENSENADA
GRUPO DE SISMOLOGIA DE MOVIMIENTOS FUERTES
KM. 107, CARR. TIJUANA-ENSENADA, ENSENADA B. C., C. P. 22860
APDO. POSTAL No. 2732, TEL.: 01 (646) 175-05-00, FAX: 01 (646) 175-05-59
*****
ARCHIVO ESTANDAR DE ACELERACION      :
VERSION DEL FORMATO                   : 2.0
NOMBRE DEL ARCHIVO                    : GEO06144.A02
FECHA Y HORA DE CREACION              : 6 DE SEPTIEMBRE DEL 2006
REF. CATALOGO ACELEROGRAMAS, SMIS 1995 : Reg. Num.
```

```
=====
DATOS DE LA ESTACION:
NOMBRE DE LA ESTACION                : PLANTA GEOTERMICA DE CERRO PRIETO
CLAVE DE LA ESTACION                 : GEO
LOCALIZACION DE LA ESTACION          : Planta Geotermica, V. de Mexicali, B.C.
:
:
:
:
COORDENADAS DE LA ESTACION           : 32.400 Lat. N
: 115.240 Long. W
ALTITUD (msnm)                       : 30
TIPO DE SUELO                        : Sedimentos (aluvion)
:
:
INSTITUCION RESPONSABLE               : Departamento de Sismologia, CICESE
:
```

```
=====
DATOS DEL ACELEROGRAFO:
MODELO DEL ACELEROGRAFO              : ALTUS-K2
NUMERO DE SERIE DEL ACELEROGRAFO     : 1158
NUMERO DE CANALES                     : 3
ORIENTACION C1-C6 (rumbo;orientacion) : /N90E;+T/N00E;+L/V;+V
ORIENTACION C7-C12 (rumbo;orientacion) :
VEL. DE MUESTREO, C1-C6 (muestras/s)  : /200/200/200
VEL. DE MUESTREO, C7-C12 (muestras/s) :
ESC. COMPLETA DE SENSORES, C1-C6, (g)  : /2.00/2.00/2.00
ESC. COMPLETA DE SENSORES, C7-C12, (g) :
FREC. NAT. DE SENSORES, C1-C6, (Hz)    : /222.0/218.0/216.0
FREC. NAT. DE SENSORES, C7-C12, (Hz)   :
AMORTIGUAMIENTO DE SENSORES, C1-C6    : /0.00/0.00/0.00
AMORTIGUAMIENTO DE SENSORES, C7-C12   :
INTERVALO DE MUESTREO, C1-C6, (s)      : /0.005/0.005/0.005
INTERVALO DE MUESTREO, C7-C12, (s)     :
UMBRAL DE DISPARO, C1-C6, (Gal)        : /15/15/15
UMBRAL DE DISPARO, C7-C12, (Gal)       :
MEMORIA DE PREEVENTO (s)               : 15.80
TIEMPO DE POSEVENTO (s)                : 40.00
```

=====

DATOS DEL SISMO:

FECHA DEL SISMO (GMT) : 24 de MAYO del 2006
 HORA EPICENTRO (GMT) : 04:20:25.60
 MAGNITUD(ES) : /Mw=5.4
 COORDENADAS DEL EPICENTRO : 32.400 Lat. N
 : 115.280 Long. O
 PROFUNDIDAD FOCAL (km) : 3.9
 FUENTE DE LOS DATOS EPICENTRALES : Departamento de Sismologia, CICESE
 : Sismologia de Mov. Fuertes

=====

DATOS DE ESTE REGISTRO:

HORA DE LA PRIMERA MUESTRA (GMT) : 04:20:12.000
 EXACTITUD DEL TIEMPO (s) : 0.001
 DURACION DEL REGISTRO (s), C1-C6 : /256.00/256.00/256.00
 DURACION DEL REGISTRO (s), C7-C12 :
 NUM. TOTAL DE MUESTRAS, C1-C6 : /51200/51200/51200
 NUM. TOTAL DE MUESTRAS, C7-C12 :
 ACEL. MAX. (Gal), C1-C6 : /358.85/-421.87/492.20
 ACEL. MAX., C1-C6, EN LA MUESTRA : /3571/3502/3506
 ACEL. MAX. (Gal), C7-C12 :
 ACEL. MAX., C7-C12, EN LA MUESTRA :
 UNIDADES DE LOS DATOS : Gal (cm/s/s)
 FACTOR DE DECIMACION : 1
 FORMATO DATOS (FORTRAN,10 campos/dato) : 3F10.2

=====

CALIDAD DEL ACELEROGRAMA:

Registro digital completo. Tiempo absoluto correcto.

=====

COMENTARIOS:

=====

DATOS DE ACELERACION:

	CANAL-1	CANAL-2	CANAL-3	CANAL-4	CANAL-5	CANAL-6	CANAL-7	CANAL-8
	N90E;+T	N00E;+L	V;+V					
	-0.28	-0.57	0.11					
	-0.19	-0.52	0.12					
	-0.07	-0.38	0.09					
	-0.05	-0.20	-0.06					
	-0.05	-0.06	-0.28					
	.	.	.					
	.	.	.					
	.	.	.					

B. Valores de velocidades de ondas de cuerpo para diferentes materiales (Huerta López, 2008).

MATERIAL	VELOCIDAD DE ONDA P (m/s)	VELOCIDAD DE ONDA S (m/s)
Arena seca	200-300	118-175
Arena húmeda	300-600	175-353
Relleno seco	<1000	<588
Relleno saturado	1200-1800	706-1059
Arcilla arenosa-seca	400-600	235-353
Arcilla arenosa-saturada	1300-2400	765-1412
Arcilla y aluvi3n	500-1500	294-882
Arcillas fracturadas (relleno con material r3gido)	1000-2500	588-1471
Agua (depende de temperatura, contenido de sal y minerales)	1430-1680	-----
Agua de mar	1460-1530	-----
Limos	1500-1600	882-941
Arenas y gravas saturadas	1600-1800	941-1059
Areniscas-lutitas	1000-3500	588-2059
Yeso	500-3500	294-2059
Yeso duro tipo II	2300	1353
Yeso duro tipo IV	700	412
Calizas y dolonitas	4000-6000	2353-3529
Rocas 3gneas y rocas metam3rficas	4000-6000	2353-3529
Sal y anhidrita	4800-7000	2824-4118