



01161
15
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**RESPUESTA SÍSMICA Y POSIBLE
COMPORTAMIENTO NO LINEAL DEL SUELO
EN LA CIUDAD DE ACAPULCO**

Tesis presentada por:

LUIS FERNANDO LÁZARES LA ROSA

como requisito para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA
(ESTRUCTURAS)**

Director: Dr. MARIO ORDAZ SCHROEDER

Ciudad Universitaria
México D.F., febrero del 2003



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: LUIS FERNANDO LAZARES LA ROSA

FECHA: Febrero 17 del 2003

FIRMA: [Firma manuscrita]

A mis padres Pilar y Lucho
por el cariño y esfuerzo que siempre me brindan

A mis hermanos Rita y Jorge
A mi sobrina Marcia

A la memoria de mi hermano
Licenciado en Historia
GUSTAVO LÁZARES LA ROSA †
(1970-2001)

"Murió viviendo, murió amando, murió de humano"

AGRADECIMIENTO ESPECIAL

Dr. MARIO GUSTAVO ORDAZ SCHROEDER

por la gran oportunidad que me brindó de poder aprender
de su sabiduría y experiencia en la ingeniería sísmica,
por su apoyo constante, loable paciencia y amistad.

AGRADECIMIENTOS

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, por los conocimientos y facilidades que me brindó durante mis estudios de posgrado así como la oportunidad de permitirme ser parte de ella.

Instituto de Ingeniería, en especial a los integrantes de la coordinación de Ingeniería Sismológica, por todo el apoyo que recibí durante mi estancia como uno de sus becarios.

Dr. Francisco Sánchez-Sesma, Dr. Efraín Ovando Shelley, Dr. Eduardo Reinoso Angulo y Dr. Javier Avilés López por la revisión y comentarios críticos a este trabajo.

Y a los siguientes amigos:

Dr. Jorge Aguirre Gonzalez por su gran colaboración y enseñanzas.

Patricia Contreras, por el apoyo invaluable que me brindaste al empezar mis estudios.

Gabriel Valdivieso y Raquel Machicao, por los momentos excelentes que pasamos juntos.

Sandra Santa Cruz y Antonio Zevallos, por toda la ayuda y el tiempo que compartimos y disfrutamos de extraordinaria amistad la cual permanecerá por siempre. Mi eterno agradecimiento.

Arabella Zapata, por tu constante aliento para terminar mi tesis y tu presencia y apoyo en el momento más triste de mi vida. Millones de gracias.

Roberto Montes, por la oportunidad de ser amigos y tu permanente actitud a ayudarme.

Patricia Valdez, por la gran amistad que nació en nosotros y las vivencias muy gratas que compartimos.

Hortencia Flores, Leonardo Ramírez, Moisés Contreras y Juan Carlos Montalvo, por la disposición a ser amigos y la constante discusión sobre nuestros trabajos y la vida.

Walter Kemper, Henry Kemper, Armando Aguilar, Mauricio Gallego, Omar Pineda y Arturo Pérez, por haber compartido gratamente la vida de becario en el Tapanco.

Zuny Celestino, Ernesto Heredia y Maca Zevallos, por haberlos conocido y haber pasado vivencias llenas de enorme amistad.

Luz Piedad Hoyos, Eduardo Botero y Alvaro Celestino, por compartir no solo un departamento, sino un hogar. Gracias por todo el gran apoyo y amistad que me brindaron.

Javier Lermo, por tu apoyo y oportunidades que me brindaste para aprender de la ingeniería sísmica.

Tatiana Millán, por la amistad que nació en corto tiempo pero para siempre.

Esteban Flores, con quien pude compartir una parte de mi vida dedicada al espacio-tiempo temporal, con base en una excelente amistad. Larga Vida y Prosperidad guerrero.

Teresa Becerril y Agustín Muñoz, por la gran disposición para ayudarme y apoyarme durante mi estancia como becario y haber organizado gratos momentos de confraternidad en nuestra área.

Y por último, y no por ello menos importante, a MÉXICO LINDO Y QUERIDO!, mi eterna gratitud por todo lo que me brindó, siempre me sentiré mexicano de corazón.

"Mucho se ha hablado de las coincidencias de las que la vida está hecha, tejida y compuesta, pero casi nada de los encuentros que, día a día, van aconteciendo en ella y son los que orientan y determinan la misma vida.....un encuentro es, en su más riguroso sentido, una coincidencia, lo que no significa, claro está, que todas las coincidencias tengan que ser encuentros"

El Evangelio Según Jesucristo
José Saramago

Y habrá notado amigo lector.....que esta etapa de mi vida estuvo llena de encuentros.....gracias a Dios.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	
1.1	Alcances	2
1.2	Antecedentes	3
1.3	Resumen	4
2.	EL EFECTO DE SITIO	
2.1	El efecto de sitio	7
2.2	Métodos para estimar el efecto de sitio	9
2.2.1	Métodos teóricos	9
2.2.2	Métodos experimentales	9
2.3	Cociente espectral	10
2.4	Respuesta unidimensional del terreno	11
3.	GEOLOGÍA Y GEOTÉCNIA DE ACAPULCO	
3.1	Aspectos geológicos	13
3.1.1	Geología	13
3.1.1.1	Rocas metamórficas	13
3.1.1.2	Stock granítico	13
3.1.2	Tectónica	16
3.1.2.1	Rocas metamórficas	16
3.1.2.2	Stock granítico	17
3.1.2.3	Trinchera de Acapulco	17
3.1.3	Sedimentos del pleistoceno reciente	18
3.1.4	Conclusión	21
3.2	Aspectos geotécnicos	22
3.2.1	Estratigrafías típicas	22
3.2.1.1	Bahía de Icacos	22
3.2.1.2	Bahía Farallón del Obispo-Hornos	24
3.2.2	Propiedades de los suelos	24
3.2.2.1	Propiedades índice	24
3.2.2.2	Propiedades mecánicas	28
3.2.3	Estratigrafía del suelo de la estación Diana	29

4. ESTIMACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE SITIO		
4.1	Sismos utilizados	31
4.1.1	Sismo del 25 de abril de 1989	33
4.1.2	Sismo del 15 de junio de 1999	33
4.1.3	Sismo del 30 de septiembre de 1999	34
4.1.4	Sismo del 08 de octubre del 2001	35
4.2	Estaciones acelerográficas	35
4.2.1	Estación Diana	35
4.2.2	Estación Diana Pozo	36
4.2.3	Estación La Venta	36
4.3	Procedimiento	38
4.4	Sismos registrados simultáneamente en las estaciones Diana, Diana Pozo y La Venta	39
4.4.1	Cocientes espectrales entre estaciones Diana y La Venta	40
4.4.2	Cocientes espectrales entre estaciones Diana y Diana Pozo	47
4.4.3	Comparación de resultados obtenidos en los pares de estaciones Diana-La Venta y Diana-Diana Pozo	54
4.4.4	Análisis por regiones	57
4.4.4.1	Estaciones Diana y La Venta	57
4.4.4.2	Estaciones Diana y Diana Pozo	74
4.4.4.3	Comparación de resultados obtenidos en los pares de estaciones Diana-La Venta y Diana-Diana Pozo	90
4.5	Sismos registrados simultáneamente en los pares de estaciones Diana-La Venta y Diana-Diana Pozo	96
4.5.1	Cocientes espectrales entre estaciones Diana y La Venta	96
4.5.2	Cocientes espectrales entre estaciones Diana y Diana Pozo	103
4.5.3	Comparación de resultados obtenidos en los pares de estaciones Diana-La Venta y Diana-Diana Pozo	111
4.5.4	Análisis por regiones	113
4.5.4.1	Estaciones Diana y La Venta (50 sismos)	113
4.5.4.2	Comparación de resultados obtenidos para 33 y 50 sismos en las estaciones Diana y La Venta	130
4.5.4.3	Estaciones Diana y Diana Pozo (55 sismos)	132
4.5.4.4	Comparación de resultados obtenidos para 33 y 55 sismos en las estaciones Diana y Diana Pozo	147
4.5.5	Comparación de resultados obtenidos en los pares de estaciones Diana-La Venta (50 sismos) y Diana-Diana Pozo (55 sismos)	148
4.5.6	Conclusiones	155

5.	POSIBLE COMPORTAMIENTO NO LINEAL DEL SUELO DE LA ESTACIÓN DIANA	
5.1	Aceleraciones horizontales máximas registradas	157
5.2	Sismos registrados en las estaciones Diana, Diana Pozo y La Venta	171
5.2.1	Superposición de cocientes espectrales por evento	175
5.2.1.1	Regiones 2, 3 y 4	175
5.2.1.2	Región 5	176
5.2.1.3	Región 6	178
5.2.1.4	Región 7	180
5.2.1.5	Región 8	183
5.3	Sismos registrados en las estaciones Diana y La Venta	183
5.3.1	Superposición de cocientes espectrales por evento	187
5.3.1.1	Región 1	187
5.3.1.2	Región 2	188
5.3.1.3	Región 3	190
5.3.1.4	Región 6	194
5.3.1.5	Región 8	195
5.4	Sismos registrados en las estaciones Diana y Diana Pozo	195
5.4.1	Superposición de cocientes espectrales por evento	195
5.4.1.1	Región 5	195
5.4.1.2	Región 6	197
5.4.1.3	Región 7	198
5.4.1.4	Región 8	200
5.5	Superposición de cocientes espectrales por regiones	201
5.5.1	Regiones 2 y 3	201
5.5.2	Región 5	202
5.5.3	Regiones 1 al 5	204
5.5.4	Región 6	206
5.5.5	Región 7	209
5.5.6	Región 8	212
5.6	Conclusiones	212
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	217
7.	REFERENCIAS	221

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El 19 de septiembre de 1985 ocurrió en la ciudad de México uno de los mayores sismos registrados en la historia mundial; la magnitud de este evento fue de $M_s=8.1$. La principal lección que dejó este sismo fue que el efecto de sitio constituyó la causa principal de los graves daños que se produjeron en las edificaciones (foto 1) a pesar de la gran distancia a la que se ubicó el epicentro de este sismo (aproximadamente 300 Km de la ciudad de México).

Un ejemplo más reciente del efecto de sitio se presentó en el sismo de Arequipa, Perú del 23 junio del 2001 ($M_w=8.2$). Los mayores daños en edificaciones se concentraron en las ciudades de Moquegua y Tacna (foto 2), las cuales se encuentran a más de 250 Km de donde se ubicó el epicentro del sismo.

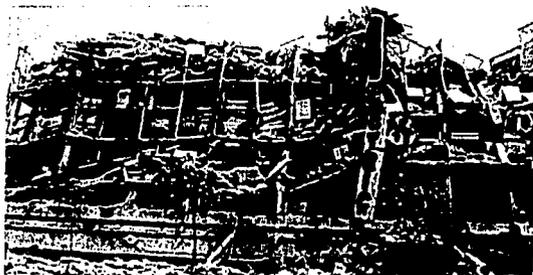


Foto 1: Colapso de un edificio. Ciudad de México.
Sismo del 19 de septiembre de 1985

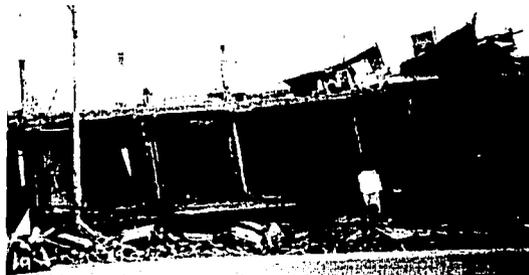


Foto 2: Colapso de una vivienda. Ciudad de Tacna.
Sismo de Arequipa, Perú del 23 de junio del 2001

Estos sismos y muchos otros acontecidos anteriormente nos indican que es muy importante el conocer el efecto de sitio de un determinado lugar, para poder determinar las características de su respuesta sísmica. Por ello, en esta tesis se propone estimar los efectos de sitio del suelo donde se ubica la estación acelerográfica Diana y así conocer de manera más precisa cómo podrá ser su respuesta, sobre todo en futuros sismos de gran magnitud.

1.1 ALCANCES

La ciudad de Acapulco tiene acelerógrafos que han sido instalados en diferentes años y están distribuidos en diversas zonas; en una de estas estaciones, llamada Diana (nombre debido a que se encuentra cerca de la glorieta Diana), se tienen registrados 253 sismos desde 1986 a 1999.

Se trabajará con datos de registros sísmicos de la estación Diana con el objetivo de determinar la respuesta sísmica del suelo donde se encuentra ubicada esta estación; para ello se empleará la técnica de los cocientes o razones espectrales. Para aplicar esta técnica es necesario tener otra estación acelerográfica que sea utilizada como referencia, en este caso se tendrán dos estaciones de referencia: una ubicada en un pozo al costado de la estación Diana e instalada en su base rocosa a 64 m de profundidad llamada estación Diana Pozo y la otra conocida como La Venta que se encuentra a 9.44 Km de la estación Diana y está instalada sobre una superficie rocosa. Se utilizarán en total 72 sismos registrados en la estación Diana de los cuales 50 han sido registrados simultáneamente con la estación La Venta y 55 han sido registrados simultáneamente con Diana Pozo. Los resultados obtenidos para cada par de estaciones (Diana/La Venta y Diana/Diana Pozo) serán comparados y se señalarán las similitudes y diferencias encontradas, de manera de poder determinar con qué estación de referencia se están obteniendo mejores resultados.

En los 72 eventos registrados en la estación Diana se tienen movimientos con diferentes intensidades, los cuales pueden involucrar que el suelo presente un comportamiento del tipo lineal o no lineal; por ello en este trabajo también se plantea identificar si algunos de estos eventos provocaron en este suelo un comportamiento del tipo no lineal y determinar el nivel de aceleración máxima a partir del cual empieza a presentarse este comportamiento. Esto permitirá predecir, con base en la aceleración, cuándo es posible que se presente un comportamiento no lineal en este suelo.

Se elaborarán gráficas que relacionen las aceleraciones máximas de la estación Diana con las aceleraciones máximas de las estaciones La Venta y Diana Pozo, así como también gráficas que muestren las relaciones de los factores de amplificación de la aceleración máxima (de la estación Diana respecto a las estaciones La Venta y Diana Pozo) y de las amplificaciones relativas máximas obtenidas de los cocientes espectrales con las aceleraciones horizontales máximas de las estaciones La Venta, Diana Pozo y Diana. Estas gráficas permitirán conocer cómo varían los valores de la aceleración máxima y los factores de amplificación en la estación Diana respecto a las estaciones La Venta y Diana Pozo.

1.2 ANTECEDENTES

Gutiérrez et al (1989), para determinar la microzonificación sísmica de la ciudad de Acapulco, obtuvieron registros de microtemores de diversas partes de la ciudad con las que elaboraron curvas de isoperiodos; también analizaron razones espectrales de aceleración de varias estaciones acelerográficas usando como estación de referencia a La Venta, en estas estaciones también se midieron microtemores. Una de las estaciones fue Diana, en donde los valores de frecuencia fundamental (o periodo fundamental) estimados por microtemores estuvieron en un intervalo de 4 a 5 Hz (de 0.20 a 0.25 s), mientras que las razones espectrales de aceleración de 4 sismos registrados en esta estación ubican esta frecuencia entre 4 y 6 Hz (0.17 a 0.25 s).

Mena et al (1989), estudiaron los efectos locales observados en la ciudad de Acapulco durante temblores fuertes, trabajando para ello con datos de 6 sismos de magnitudes entre 4.3 y 7.6 registrados en 7 estaciones, entre ellas Diana; utilizan las razones espectrales para determinar los efectos de sitio teniendo como estaciones de referencia a las estaciones ACAP (Acapulco Pellandini) y VNTA (La Venta). Concluyen que las ampliaciones de 25 veces observadas en ACAD respecto a VNTA para 3.5 Hz son representativas de los efectos de sitio más graves que pueden ocurrir en suelos de la zona de Acapulco. También mencionan que durante el sismo del 19/03/78 ($M_s=6.4$) se alcanzaron aceleraciones en la estación ACAS (Acapulco SOP, cercana a Diana) de aproximadamente 0.8 g sin que se tenga evidencia de licuación en el área de Acapulco, lo que indica un comportamiento lineal de las arenas en un amplio intervalo de amplitudes.

Ovando y Romo (1992) hacen una reevaluación de la información geotécnica y geológica disponible en la ciudad de Acapulco las cuales pertenecen a tres zonas cada una definidas con diferentes características geotécnicas, luego estiman valores promedio de propiedades dinámicas para estratigrafías típicas utilizando valores de periodos predominantes del suelo obtenidas con vibración ambiental. Utilizando un modelo de propagación de onda unidimensional obtienen una muy buena estimación del periodo dominante para algunos sitios pero subestimando ordenadas espectrales en la alta frecuencia; también utilizan curvas esfuerzo deformación que caracterizan el comportamiento no lineal del suelo y son utilizados para obtener espectros de diseño en cada una de las tres zonas.

Gutiérrez et al (1992), realizan un estudio de efecto de sitio en la ciudad de Acapulco haciendo una comparación de las razones o cocientes espectrales utilizando datos de microtemores y acelerogramas; esto se aplica en 6 estaciones acelerográficas, entre ellas la estación Diana. Se emplean 8

eventos sísmicos de magnitudes entre 4.2 y 6.9 para las razones espectrales y se hacen medidas de microtemores en horas de intenso y bajo tráfico. Al analizar los cocientes y compararlos, llegan a la conclusión de que la técnica de microtemores sólo puede dar una estimación gruesa de la respuesta de sitio en Acapulco. En la estación Diana, esta comparación es calificada como pobre, siendo los resultados de los microtemores muy lejanos a los de los sismos registrados. También mencionan que en Diana, el sismo del 25/04/89 ($M_s=6.9$) que es el mayor en magnitud y aceleración (0.3 g) registrado del grupo de sismos empleados, no presenta en su cociente espectral alguna evidencia clara de comportamiento no lineal.

Singh et al (1988), estudian la amplificación de las ondas sísmicas en el valle de México con respecto a una zona rocosa. Estimando cocientes espectrales entre las estaciones Central de Abastos (CDAO) ubicado en la zona de lago y Ciudad Universitaria (CU) ubicada en zona rocosa y utilizando registros de tres sismos de magnitud pequeña y del sismo del 19 de septiembre de 1985 ($M_s=8.1$), concluyen que hubo un claro comportamiento no lineal de las arcillas en la estación CDAO durante el sismo del 19 de septiembre de 1985.

Idriss (1991), hace un estudio de los movimientos sísmicos en sitios de suelo blando utilizando para ello sismos registrados durante el sismo de Loma Prieta del 17 de octubre de 1989 ($M_w=7$); con estos datos construye una gráfica que relaciona los sismos registrados simultáneamente en roca y en suelo blando, la cual presenta la característica de representar un comportamiento no lineal.

Pérez-Rocha y Sánchez-Sesma (1992), utilizan dos técnicas para la estimación de la respuesta sísmica unidimensional de un medio estratificado con comportamiento no lineal. Una de ellas usa diferencias finitas y la integración en el tiempo paso a paso, la otra es un método equivalente lineal. Concluyen que ambos métodos confirman que las características principales de respuesta no lineal son: a) reducción relativa de la amplitud de respuesta con respecto al caso lineal y b) corrimiento de las ordenadas espectrales hacia bajas frecuencias. Los resultados también muestran que el método equivalente lineal provee resultados muy buenos con un relativamente costo computacional menor.

Beresnev et al (1996), tratan de determinar si es una realidad la respuesta no lineal del suelo; presentan un resumen, comentan y realizan una comparación de varios artículos con resultados positivos o negativos de respuesta no lineal en el suelo estimados con base en observaciones sismológicas, siendo la técnica del cociente espectral aplicada a movimientos sísmicos la más usada en estos trabajos. Concluyen que existen observaciones sismológicas en diferentes partes del mundo que proporcionan una evidencia

clara de la ocurrencia e importancia de los efectos no lineales; que el intervalo donde la no linealidad empieza a ser perceptible de 100 a 200 gal, dependiendo del tipo de suelo. En este intervalo de aceleración la reducción de la amplificación ocurre debido a la dependencia de la amplitud con el amortiguamiento.

De estos antecedentes, se observa que en los trabajos de Gutiérrez et al (1989 y 1992) y Mena et al (1989) se estudia de manera parcial, en función de datos de aceleración registrados, la respuesta sísmica del suelo donde se ubica la estación Diana. Debido a que a la fecha de realizada esta tesis se cuenta con mayor número de registros de aceleración, era necesario realizar un estudio más completo de la respuesta sísmica en este sitio y así estimar el efecto de sitio.

No se llega a determinar de manera completa un comportamiento no lineal en el suelo de la estación Diana, los trabajos de Mena et al (1989) y Gutiérrez (1992) indican un comportamiento lineal de las arenas en Acapulco en eventos de gran magnitud. Por ello también se propone en esta tesis identificar, si hubo, eventos sísmicos que presentaron un comportamiento de este tipo en este suelo.

1.3 RESUMEN

En el capítulo II se hace una breve descripción teórica de lo que son los efectos de sitio, así como del método empleado para su estimación, o sea las razones o cocientes espectrales.

En el capítulo III se presenta la geología y geotécnica de la ciudad de Acapulco. El aspecto geológico comprende la descripción geológica, tectónica y sedimentos del pleistoceno reciente. El aspecto geotécnico presenta estratigrafías típicas para la bahía de Acapulco, propiedades de los suelos y la estratigrafía correspondiente al suelo donde se encuentra ubicado la estación acelerográfica Diana. Toda esta información permite tener una idea clara del tipo de suelo que se está analizando.

La estimación de la respuesta sísmica del suelo se basa en la determinación de la frecuencia o periodo fundamental del suelo así como de la máxima amplificación relativa respecto a las estaciones de referencia; estos parámetros se obtienen de la aplicación de las razones o cocientes espectrales a los pares de estaciones Diana/La Venta y Diana/Diana Pozo lo cual se presenta en el capítulo IV. Se trabaja primero con acelerogramas de 33 sismos que han sido registrados simultáneamente en las tres estaciones, obteniéndose la frecuencia o periodo fundamental promedio, así como las amplificaciones relativas promedio en cada par de estaciones, comparándose los resultados obtenidos. Luego se vuelven a calcular la frecuencia y las amplificaciones relativas pero esta vez para 50 sismos registrados simultáneamente en las estaciones Diana y La Venta y 55 sismos registrados simultáneamente en Diana y Diana Pozo,

comparándose nuevamente los resultados entre estos pares de estaciones y con los obtenidos de los anteriores 33 sismos.

El análisis para identificar si en algunos de los 72 eventos registrados en la estación Diana se presentó posiblemente un comportamiento no lineal del suelo se realiza en el capítulo V. Se elaboran para los pares de estaciones Diana/La Venta y Diana/Diana Pozo gráficas que relacionan las aceleraciones máximas registradas en cada estación, así como también gráficas que relacionan el factor de aceleración máxima en Diana con respecto a las aceleraciones en La Venta y Diana Pozo y las aceleraciones máximas en Diana; y por último gráficas que relacionan las amplificaciones máximas relativas obtenidas de los cocientes espectrales para la estación Diana con las aceleraciones máximas en esta misma estación. Estas gráficas nos permiten identificar qué eventos presentan menores factores de amplificación con aceleraciones altas en la estación Diana lo cual es un indicio de un posible comportamiento no lineal. Luego, la comprobación se realiza mediante la superposición de los cocientes espectrales de los eventos con posible comportamiento no lineal con los que presentan un comportamiento lineal. Como consecuencia se identifican intervalos de aceleración máxima donde se presentan el comportamiento lineal y no lineal del suelo. El comportamiento no lineal se presenta cuando el sismo produce aceleraciones que provocan deformaciones angulares del suelo mayores a 10^{-3} % (arenas y arcillas), involucrando una disminución del módulo de cortante dinámico y un aumento en la relación del amortiguamiento crítico.

En el capítulo VI se presentan las conclusiones y recomendaciones finales producto del trabajo de esta tesis.

CAPITULO II

EL EFECTO DE SITIO

Desde hace muchos años, sismólogos e ingenieros han reconocido que las condiciones locales del suelo o también conocidas como efectos de sitio influyen en la intensidad del movimiento sísmico. Seed (1986) hace referencia a MacMurdo quien describe los efectos del sismo ocurrido en 1819 cerca del Runn of Cutch, India, señalando: "Los edificios situados sobre roca no fueron afectados por el terremoto como aquellos cuya cimentación no alcanzó el fondo del suelo".

Es después del sismo del 19 de septiembre de 1985 en la ciudad de México cuando a nivel mundial se empieza a dar mayor importancia a los efectos de sitio debido a que éstos fueron los que provocaron los daños graves en las edificaciones. Muchos trabajos han estudiado, interpretado y modelado los efectos de sitio; en este capítulo se hará un resumen sobre este tema, enfocando en el método que se utiliza en esta tesis.

2.1 EL EFECTO DE SITIO

Seed (1986) resume que la mayoría de sismólogos e ingenieros especialistas están de acuerdo en que las características del movimiento sísmico en un sitio dado durante un particular evento dependen de numerosos factores, incluyendo entre otros:

- El mecanismo de origen del sismo.
- La magnitud del sismo.
- La distancia del sitio a la fuente principal de liberación de energía.
- Las características geológicas de las formaciones rocosas a través de las cuales las ondas sísmicas deberán propagarse desde el foco hasta el área general del sitio.
- Las condiciones locales del suelo subyacente al sitio particular.
- Los posibles efectos de enfoque o de superposición de ondas.

La energía que se libera desde la fuente se propaga en forma de ondas sísmicas, posiblemente a muchos kilómetros por debajo de la superficie del terreno; en el proceso de propagación se atraviesan

muchas fronteras y dislocaciones dentro de la estructura geológica, reflejándose y refractándose hasta llegar a la superficie. La energía que las ondas retengan dependerá de la capacidad de absorción de energía (características de amortiguamiento) de las formaciones rocosas a través del cual viajan las ondas sísmicas; debido a esto los movimientos desarrollados en estas rocas varían dependiendo del tipo de región geológica involucrado.

Cuando las ondas están cercanas a la superficie, estos movimientos vuelven a modificarse al pasar de las formaciones subyacentes de roca a los diferentes depósitos de suelo, los cuales también son variables tanto en tipo como en profundidad. Por ello el movimiento que llega a la superficie del terreno tiene diversas características de un punto a otro dentro de un área específica. Esto ha quedado demostrado por los registros de movimiento de estaciones sísmicas, los cuales inclusive han producido registros que varían grandemente aún perteneciendo a estaciones ubicadas cerca unas de otras.

Seed (1986), debido a los efectos observados durante el sismo del 19 de septiembre de 1985 en la ciudad de México, en donde los movimientos del terreno registrados en diferentes partes de la ciudad mostraron grandes variaciones en sus características, reconoce que las condiciones locales de suelo pueden tener efectos importantes en las características de los movimientos del terreno y en la extensión de los daños en edificios. Por ello, recién en los últimos años, los ingenieros han llegado a apreciar la gran importancia de las condiciones locales del suelo en el diseño sismorresistente.

Los efectos de las condiciones locales, pueden definirse en forma general como la respuesta que tiene cada lugar ante un evento sísmico, la cual va depender de sus características geológicas, geotécnicas y topográficas. Reinoso (2000) define los efectos de sitio como los ocasionados por las características de las primeras decenas de metros de la superficie terrestre capaces de modificar localmente las características del movimiento sísmico; además, clasifica los principales efectos de la siguiente manera:

- Topografía del terreno, la cual puede provocar amplificación o deamplificación del movimiento dependiendo de lo irregular que pueda ser la superficie y del tipo y ángulo de incidencia de las ondas sísmicas.
- Presencia de depósitos de arena que puedan ser factibles de presentar el fenómeno de licuación o de que puedan producir asentamientos.
- Presencia de depósitos de arcillas en valles aluviales o lacustres, los cuales presentan amplificación dinámica debido al contraste de la velocidad del suelo superficial con respecto a los depósitos más profundos.

- Deslizamientos y deslaves que en la mayoría de los casos causan daños en las vías de comunicación.
- Cambios en la estructura superficial debidos a la heterogeneidad de los materiales y sus propiedades que forman la superficie del terreno en sitios poco distantes entre sí.

Lermo (1992) propone de manera muy simplificada idealizar las condiciones geológicas locales para reducir a un modelo sencillo como una capa plana sobre un semiespacio homogéneo y elástico, el efecto de sitio estará caracterizado por dos parámetros: una frecuencia de resonancia y sus múltiplos, y un valor de amplificación con respecto al movimiento sísmico en roca. Esto se interpreta como un modelo unidimensional del cual se expondrá mas adelante.

2.2 MÉTODOS PARA ESTIMAR EL EFECTO DE SITIO

Los métodos que existen son teóricos (numéricos y analíticos) y experimentales. Reinoso (2000) menciona que ninguno de estos métodos es excluyente de los otros e indica que un estudio completo de efectos de sitio debe comprender la mayoría de estos métodos; también hace una descripción de los métodos que se detalla a continuación.

2.2.1 Métodos Teóricos

- Analíticos, basados en modelos matemáticos y resueltos analíticamente o mediante procesos numéricos. Las soluciones analíticas son las más sencillas, tienen soluciones exactas y no se requieren de procesos numéricos ni de computadoras.
- Numéricos, que se basan en formulaciones de elementos finitos, diferencias finitas (ecuaciones diferenciales) y elementos de frontera (ecuaciones integrales con condiciones de frontera).

2.2.2 Método Experimentales

- Microtemblores o microtemblores, instrumentos muy sensibles que miden velocidad causada por ruido ambiental provocado por tráfico, sismos lejanos o pequeños y vibraciones terrestres. En general sirve para obtener periodos dominantes del suelo; funciona mejor con periodos dominantes del suelo largos ($T_s > 1$ s)

- Movimientos débiles, causados por explosiones artificiales, nucleares, réplicas, sismos pequeños. No es muy eficiente cuando el suelo tiene comportamiento no lineal ya que los valores de amplitud serán mayores y los periodos menores que los que se presentan durante sismos intensos.
- Movimientos fuertes: es el movimiento sísmico durante terremotos intensos. Se obtienen registros de aceleración. Es la mejor alternativa para medir efectos de sitio aunque resulta costoso y de cuidadoso mantenimiento.

Una de las técnicas que estima el efecto de sitio y trabaja con datos de registros de aceleración es el de razones o cocientes espectrales que a continuación se detalla.

2.3 COCIENTE ESPECTRAL

Consiste en dividir el espectro de amplitud de Fourier observado en el sitio de interés entre el espectro de amplitud de Fourier de un sitio de referencia cercano (figura 2.1); si los dos sitios tienen los mismos términos de fuente y de trayecto, entonces el cociente espectral resultante será una estimación de la respuesta del sitio de interés.

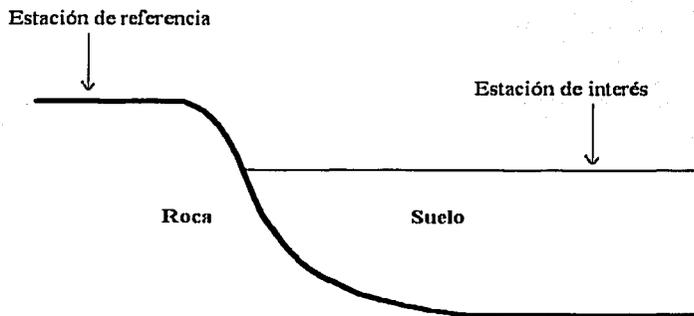


Figura 2.1

Steidl et al (1996) describe que un sismograma puede ser calculado como la convolución de la fuente, trayectoria, efecto de sitio y respuesta instrumental como:

$$A_{ij}(\theta) = S_i(\theta) P_{ij}(\theta) G_j(\theta) I_j(\theta) \quad (2.1)$$

donde $S_i(f)$ es el término de la fuente del evento i , $P_{ij}(f)$ es el término de la trayectoria entre la estación j y el evento i , $G_j(f)$ es el término de sitio para la estación j , y $I_j(f)$ es el término de la respuesta instrumental para la estación j . El cociente espectral es obtenido de dividir el espectro de amplitudes de Fourier de aceleración en la estación j entre el espectro de amplitudes de Fourier de aceleración en la estación de referencia k de la siguiente manera:

$$\frac{A_{ij}(f)}{A_{ik}(f)} = \frac{S_i(f) P_{ij}(f) G_j(f) I_j(f)}{S_i(f) P_{ik}(f) G_k(f) I_k(f)} = \frac{G_j(f)}{G_k(f)} \quad (2.2)$$

Como el cociente espectral es tomado para un solo evento, el término de fuente $S_i(f)$ es el mismo para ambas estaciones j y k (asumiendo que ellos están en el mismo azimut con respecto a la fuente). Además la respuesta instrumental debe ser removida desde el primer dato. Si la separación entre las estaciones j y k es mucho menor que sus distancias hipocentrales desde la fuente, es probablemente una buena suposición que los términos de trayectoria serán cancelados. Por lo tanto, sólo queda el cociente de los términos correspondientes a los efectos de sitio de cada estación, es decir la división del espectro de amplitud de Fourier de aceleración de la estación de interés i entre el espectro de amplitud de Fourier de aceleración de la estación de referencia k .

2.4 RESPUESTA UNIDIMENSIONAL DEL TERRENO

La técnica de los cocientes espectrales estará adecuadamente aplicada si se identifica que la respuesta sísmica del terreno es predominantemente del tipo unidimensional.

Los intentos por evaluar la respuesta sísmica de valles aluviales y los métodos utilizados para ello han sido varios, partiendo de modelos simplistas del tipo unidimensional hasta modelos bi y tridimensionales que intentan interpretar la distribución irregular de la estratigrafía (Reinoso, 2000). Varios autores han reconocido la gran importancia de los efectos de tipo unidimensional en la amplificación del movimiento sísmico en valles aluviales (Chavez-Garcia et al, 1994; Sánchez Sesma et al, 1995; Reinoso, 2000).

El modelo unidimensional se basa en la suposición de incidencia vertical de ondas S (planas tipo SH) en un paquete de estratos elástico-lineales horizontales, homogéneos e isotropos con extensión infinita en sentido horizontal que sobreyace a un semiespacio elástico (Santoyo, 1991).

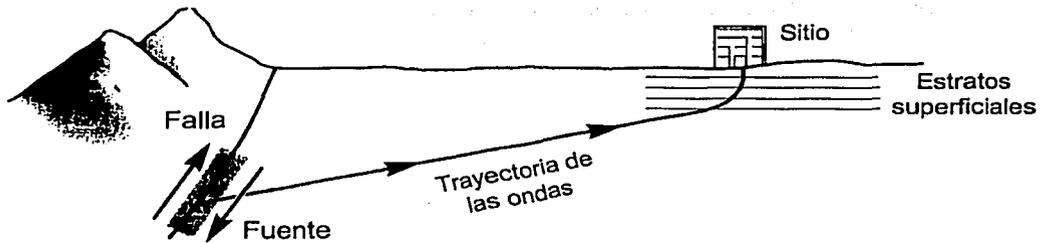


Figura 2.2: Refracción de ondas sísmicas con incidencia vertical en la superficie (Kramer, 1996)

Teniendo en consideración la ley de Snell, la onda SH a medida que se propaga de un medio de mayor velocidad a otro de menor velocidad, su trayectoria se convertirá en una incidencia vertical a medida que se aproxime a la superficie (Figura 2.2).

Como este modelo sólo toma en cuenta las variaciones de las propiedades dinámicas de los depósitos del suelo en el sentido vertical, es necesario tener cuidado al momento de su aplicación, sobre todo por la influencia que los efectos provocados por los bordes del valle pueden llegar a tener en la respuesta en un sitio.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPÍTULO III

GEOLOGÍA Y GEOTÉCNIA DE ACAPULCO

3.1 ASPECTOS GEOLÓGICOS

3.1.1 GEOLOGÍA

La geología del lugar de estudio se basa en el Informe Geológico en Relación al Riesgo Sísmico de la Región de Acapulco, desarrollado por Montiel et al (1988); sólo se presenta la parte correspondiente a la zona de interés de este trabajo.

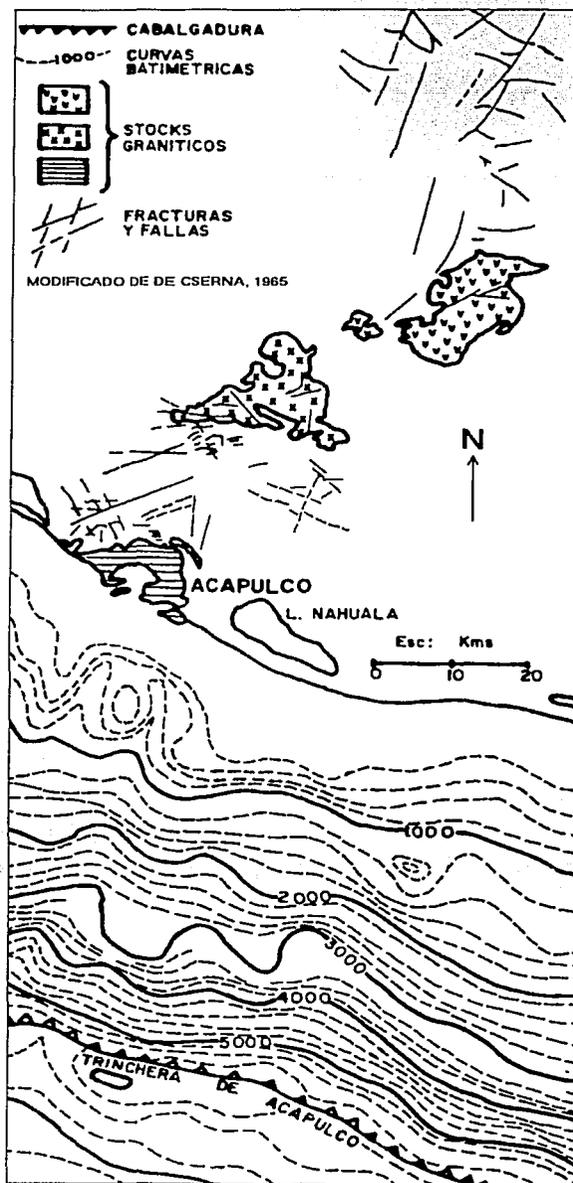
En el área que rodea a la bahía de Acapulco afloran rocas del Complejo Xolapa, de edad Paleozoica, que junto con rocas calizas del Cretácico rodean al intrusivo de Acapulco, uno de los tres importantes stocks graníticos que afloran en la región (figura 3.1). Sobre el granito, en la zona costera, se presente una secuencia de depósitos aluviales, lacustro-aluviales y de barra que son de edad Pleistoceno-Reciente.

3.1.1.1 Rocas Metamórficas

Se agrupa bajo esta denominación una potente secuencia de rocas metasedimentarias del tipo esquisto de biotita y gneiss de biotita, con algunos horizontes muy locales de cuarcita y mármol. Estas rocas pertenecen al Complejo Xolapa; se asigna una edad Paleozoico-Mesozoico.

3.1.1.2 Stock Granítico

El intrusivo granítico de Acapulco está fechado en 97 millones de años, su afloramiento mide unos 100 Km², tiene textura de grano medio a grueso, la roca es generalmente de color claro, aunque una fase muy grande es de color gris verdoso, la cual corresponde a una roca del tipo sienita. Un análisis morfológico y estructural del complejo granítico sugiere que consiste de seis unidades separadas por sedimentos metamórficos, que se muestran en la figura 3.2 en la que también se muestra la traza de seis secciones geológicas estructurales. Se presentan a continuación, en las figuras 3.3, 3.4 y 3.5, los perfiles de las secciones III, V y VI ya que describen la zona donde se ubica la estación acelerográfica Diana.



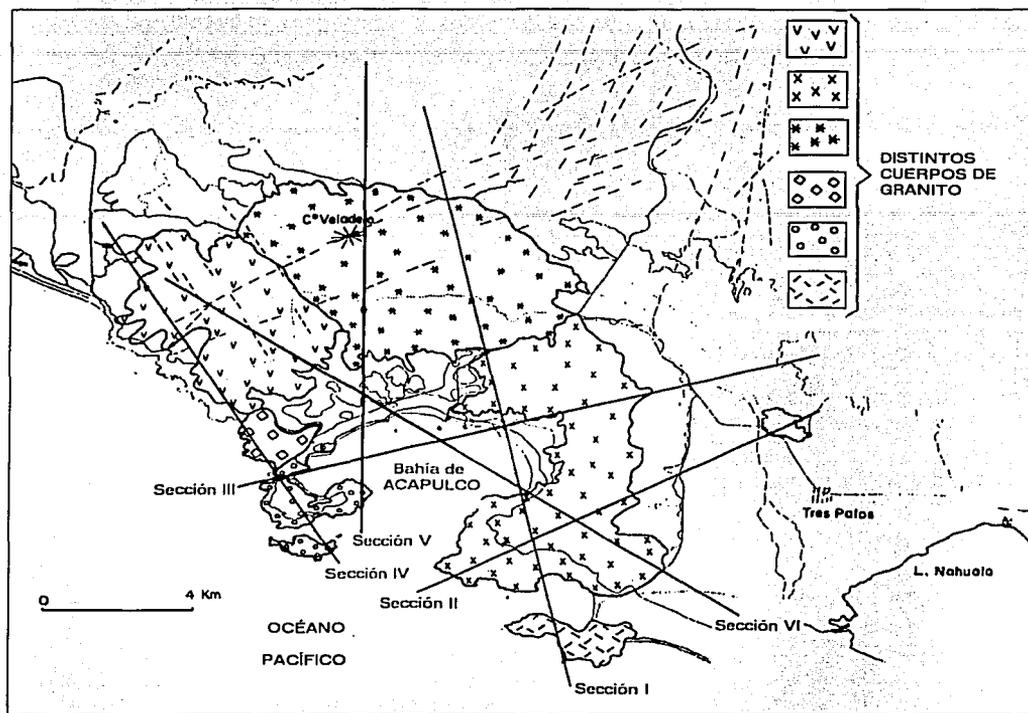


Figura 3.2: Mapa Geológico del Intrusivo (Montiel et al, 1988)

Sección III: Este corte está en dirección casi EW y muestra la evidencia del desarrollo de dos cuerpos graníticos intercalados en metamórfico (figura 3.3).



Figura 3.3 (Montiel et al, 1988)

Sección V: Esta sección N-S muestra dos cuerpos graníticos intrusionados a lo largo de planos inclinados al S, asociados posiblemente a planos de cabalgadura de rumbo NW-SE (figura 3.4).

Sección V: Esta sección N-S muestra dos cuerpos graníticos intrusionados a lo largo de planos inclinados al S, asociados posiblemente a planos de cabalgadura de rumbo NW-SE (figura 3.4).

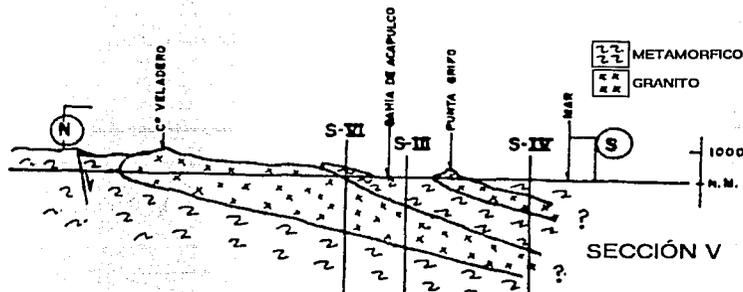


Figura 3.4 (Montiel et al, 1988)

Sección VI: Corte con rumbo NW-SE perpendicular a la dirección de emplazamiento del granito (figura 3.5)

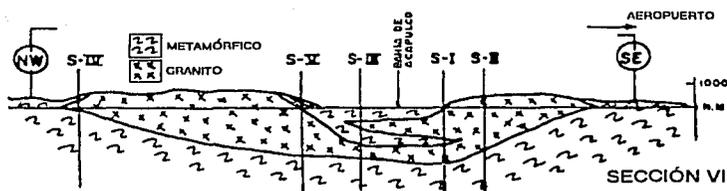


Figura 3.5 (Montiel et al, 1988)

3.1.2 TECTÓNICA

La relación entre los lineamientos tectónicos regionales, las rocas metamórficas y el cuerpo granítico determinan la edad relativa de cada uno de ellos

3.1.2.1 Rocas Metamórficas

Estas rocas están afectadas por los tres lineamientos tectónicos regionales del área (figura 3.6), denominados sistema El Aguacate, con dirección NW-SE, sistema El Veladero, con dirección NE-SW y sistema La Venta con orientación NNE-SSW al cual pertenece la falla La Venta, que es el elemento de mayor expresión fisiográfica en el área cercana a la bahía de Acapulco. La falla La Venta esta desplazada

3.1.2.2 Stock Granítico

El granito está afectado solamente por los sistemas El Veladero y El Aguacate lo cual hace al sistema La Venta como el mas antiguo, ya que afecta sólo a las rocas metamórficas, siendo por ello del Cretácico Temprano. Los sistemas El Veladero y El Aguacate probablemente corresponden al Terciario.

3.1.2.3 Trinchera de Acapulco

Esta marcado por el sitio donde se produce la subducción de la Placa de Cocos bajo la Placa de Norteamérica (figura 3.7) con una velocidad de 7.5 cm por año. Representa lo que en tectónica de placas se define como una margen activa.

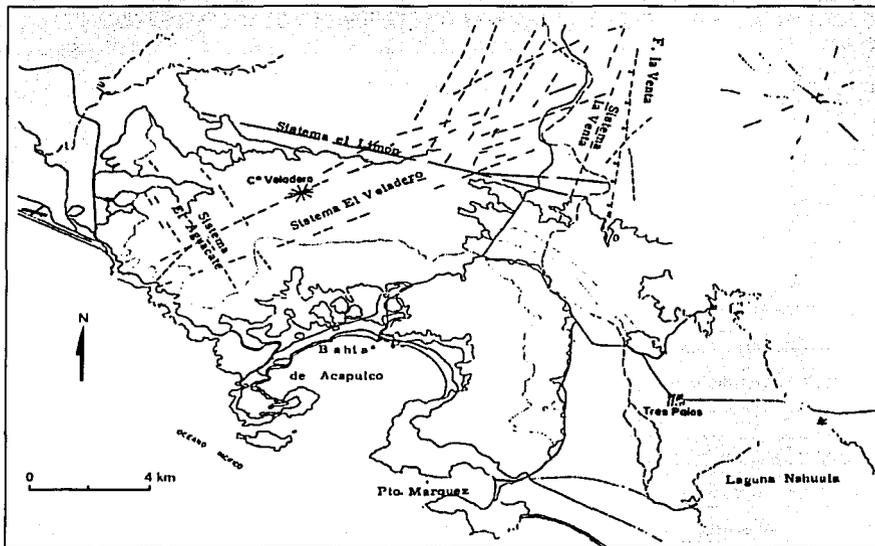


Figura 3.6: Lineamientos Tectónicos (Montiel et al, 1988)

La distancia horizontal entre el puerto de Acapulco y la Trinchera es de 64 Km. La distancia más corta entre la interfase de subducción, inclinada 11° y Acapulco es de 20 Km. Es la estructura tectónica mas importante para este estudio ya que es la fuente donde se generan grandes sismos que afectan a la ciudad de Acapulco.

mas importante para este estudio ya que es la fuente donde se generan grandes sismos que afectan a la ciudad de Acapulco.

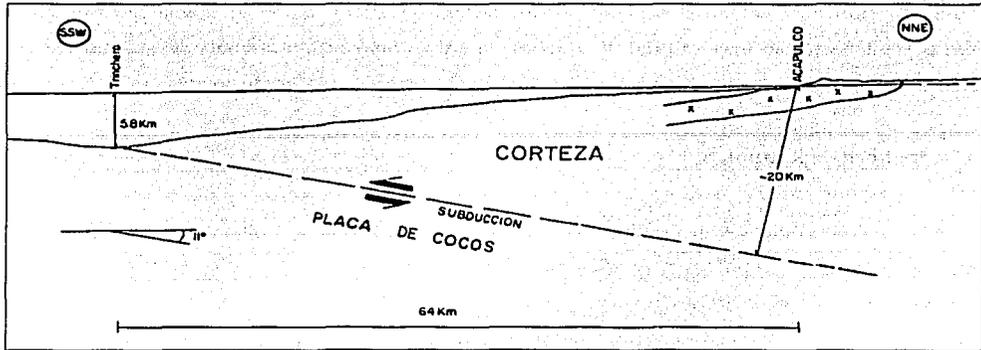


Figura 3.7: Sección Acapulco – Trinchera (Montiel et al, 1988)

3.1.3 SEDIMENTOS DEL PLEISTOCENO RECIENTE

Dentro de la bahía de Acapulco se han determinado nueve secciones geológicas-litológicas que permiten diferenciar los depósitos aluviales y lagunares que cubren el granito a lo largo de la costa de la bahía de Acapulco.

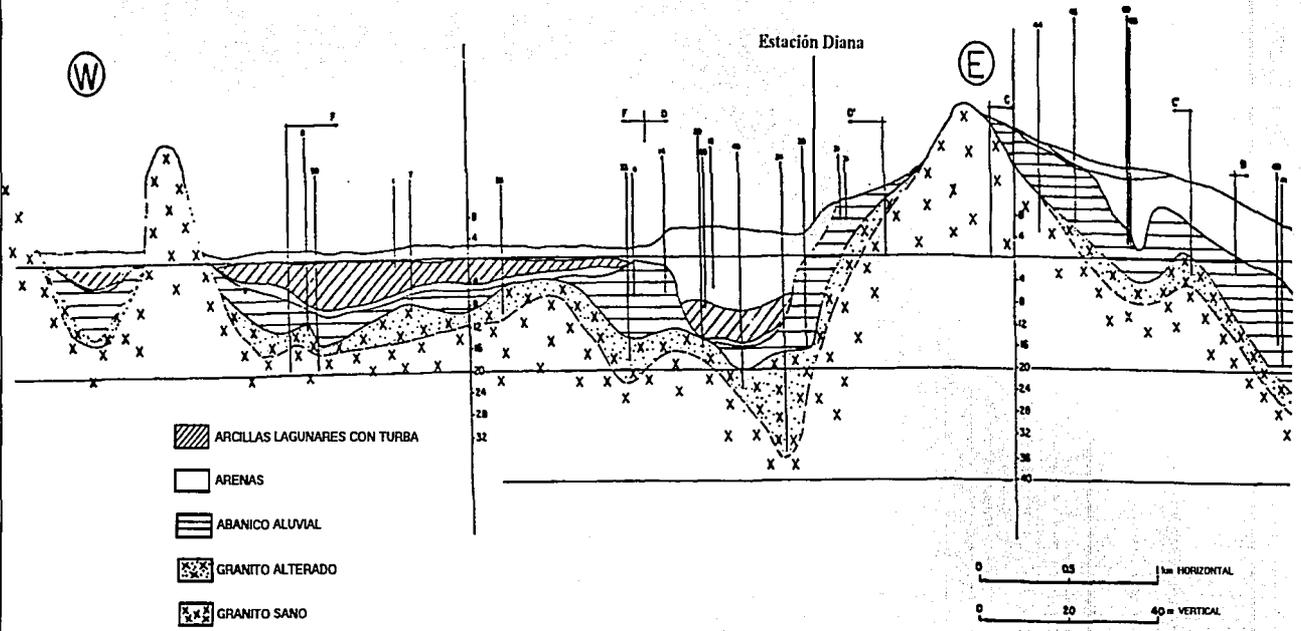
La figura 3.8 (corte general perpendicular a la bahía) muestra como base de la secuencia al granito sano, el cual se altera en su parte externa por intemperismo a grava, arena y algunas veces arcilla, contiene a menudo bloques exfoliados de granito de muy distintos tamaños.

Sobre este horizonte de espesor variable existe un depósito de abanico aluvial de gravas, arenas y limos, por lo general endurecido, de color rojo claro, con intercalaciones de suelos aún mas rojos, arcillosos, blandos. Se sobrepone al abanico aluvial una secuencia escalonada de arenas aluviales sueltas y depósitos lagunares limo-arcillosos. Esta unidad es típicamente, o de color verdoso, gris claro o negro, indicando por un lado una posición muy cercana al nivel freático y por el otro, el alto contenido de materia orgánica en los depósitos lagunares.

Los depósitos de abanico aluvial de gravas, arenas y limos y los depósitos de arenas aluviales sueltas y depósitos lagunares limo-arcillosos tienen su menor espesor, de 0 a 11 m., en la parte occidental de la bahía, en su parte media tiene de 12 a 20 m. y en su parte oriental alcanza un máximo de 40 m.

Respuesta sísmica y posible comportamiento no lineal del suelo

Fernando Lázares



NOTA: Esta sección se preparó principalmente con datos contenidos en la publicación:
 VI REUNION NACIONAL DE MECANICA DE SUELOS, ACAPULCO, 1977.
 Informe de Flamand, C. et al. Se usó el dato estratigráfico proporcionado por TGC.
 * Secciones F.F, D.D, C.C, B.B, provienen de Flamand, C. et al 1977.

Figura 2.8: Sección Geológica Bahía de Acapulco: Obispo Hornos e Icaos (Montiel et al, 1988)

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Cubriendo los depósitos aluviales y lagunares, sólo en la parte submarina, existen depósitos marinos recientes, que contienen arenas sueltas con coquinas.

De las nueve secciones geológico-litológicas mencionadas al inicio, siete conforman el perfil mostrado en la figura 3.8. A continuación se describen y se muestran en las figuras 3.9 y 3.10 las secciones D-D' y E-E que corresponden a los depósitos que se encuentran debajo de la estación acelerográfica Diana.

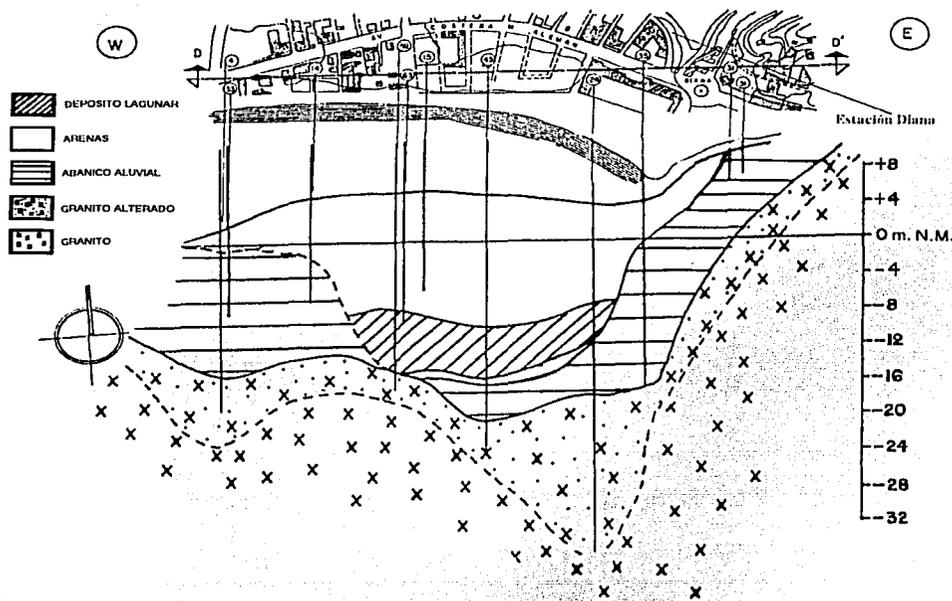


Figura 3.9: Sección Geológico-Litológica D-D' (Montiel et al, 1988)

Sección D-D': Trazo paralelo a la costa en la playa Hornitos; se observan 2 valles poco pronunciados con un relleno lacustre (arenas y depósito lagunar) de 20 m. de espesor máximo y acuñaéndose a los extremos de la línea. El abanico aluvial tiene un espesor máximo de 14 m. en la parte occidental; se acuña en la parte media y oriental de la línea. El granito aflora en la parte alta (lado derecho) de la sección y se encuentra alterado a profundidades variables de 16 a 24 m. El granito alterado mide de 8 a 18 m. de espesor, apareciendo abajo el granito sano.

Sección E-E': Sección perpendicular a la costa en la playa de Hornitos, cruza la línea D-D. En la parte alta de la sección norte, existe un depósito lagunar de 12 m. de espesor, el cual se acuña hacia la parte media; los depósitos aluviales de esta unidad tienen un espesor promedio de 14 m. con una base inclinada hacia el mar. El abanico aluvial tiene 16 m. de espesor en la parte baja y se acuña hacia arriba. El granito alterado, al cual se le estiman de 6 a 8 m. de espesor, se encuentra a una profundidad de 12 m. directamente bajo depósitos lagunares en la parte norte de la sección y a 32 m. bajo el abanico aluvial en la parte sur. El granito sano se encuentra a 22m. y 40 m. de profundidad en las partes alta y baja de la sección respectivamente.

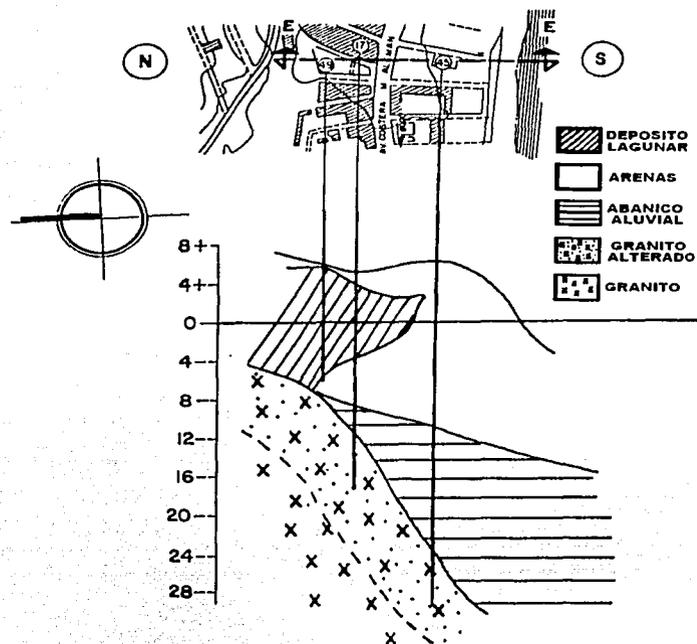


Figura 3.10: Sección Geológico-Litológica E-E' (Montiel et al, 1988)

3.1.4 CONCLUSION

Las rocas graníticas de la Bahía de Acapulco corresponden a un stock complejo del Cretácico superior, compuesto de seis cuerpos individuales. La roca encajonante del intrusivo, o sea del granito, es el complejo metamórfico Xolapa del Paleozoico o Mesozoico inferior. Sobre el granito de la bahía de

Acapulco afloran granito alterado, abanicos aluviales, depósitos aluviales, sedimentos de estero y depósitos marinos. Los sedimentos del Pleistoceno y Reciente, que cubren al granito sano y al granito alterado en la bahía de Acapulco, consisten principalmente de suelos duros que son la capa de granito alterado y abanicos aluviales; y de suelos blandos que son los depósitos aluviales, lagunares y marinos. El máximo espesor de suelos blandos se encuentra en la bahía de Icacos.

La figura 3.11 muestra el mapa geológico regional de la bahía de Acapulco (Gutiérrez, 1991), que presenta en resumen 5 zonas que corresponden a depósitos arcillo-arenosos, aluvión, barra de arena, arcilla y limo, granito (las 6 variedades que existen en una sola) y gneiss granítico, que es la roca metamórfica que pertenece al complejo Xolapa.

Tomando en cuenta la información de las figuras 3.9 y 3.10 que son un corte paralelo y otro perpendicular a la costa, la estación acelerográfica Diana se encuentra sobre un depósito de arenas al cual subyace el abanico aluvial y siguiendo luego el granito alterado y sano. Según la figura 3.9, estos depósitos yacen sobre un talud de granito alterado, forma de talud que se mantiene en las respectivas zonas de contacto de los depósitos.

3.2 ASPECTOS GEOTECNICOS

La descripción geotécnica que a continuación se presenta se basa en el informe Recopilación y Análisis de Datos Geotécnicos de Acapulco desarrollado por Ovando et al (1989); sólo se presenta la parte que corresponde a la zona donde se ubica la estación acelerográfica Diana, y que, como se vio anteriormente, se encuentra en donde se juntan las bahías de Icacos y Farallón del Obispo Hornos.

3.2.1 ESTRATIGRAFIAS TÍPICAS

3.2.1.1 Bahía de Icacos

Se localiza entre la base naval de Icacos y el peñón del Farallón del Obispo. Esta zona contiene los depósitos más profundos de suelo en el área de la Bahía de Acapulco. Los suelos están constituidos por arenas de playa hasta profundidades que van de 5 a 7 m.; subyaciendo a estas profundidades se encuentran arcillas negras o turbas de origen lagunar cuyos espesores máximos son del orden de 8 m. Estas arcillas de consistencia blanda suelen tener contenidos naturales de agua superiores al 100%. Bajo estas

secuencias se encuentran depósitos aluviales antiguos constituidos por materiales en los que predominan las arenas. Intercaladas con éstos se han encontrado suelos arcillosos tropicales muy consolidados.

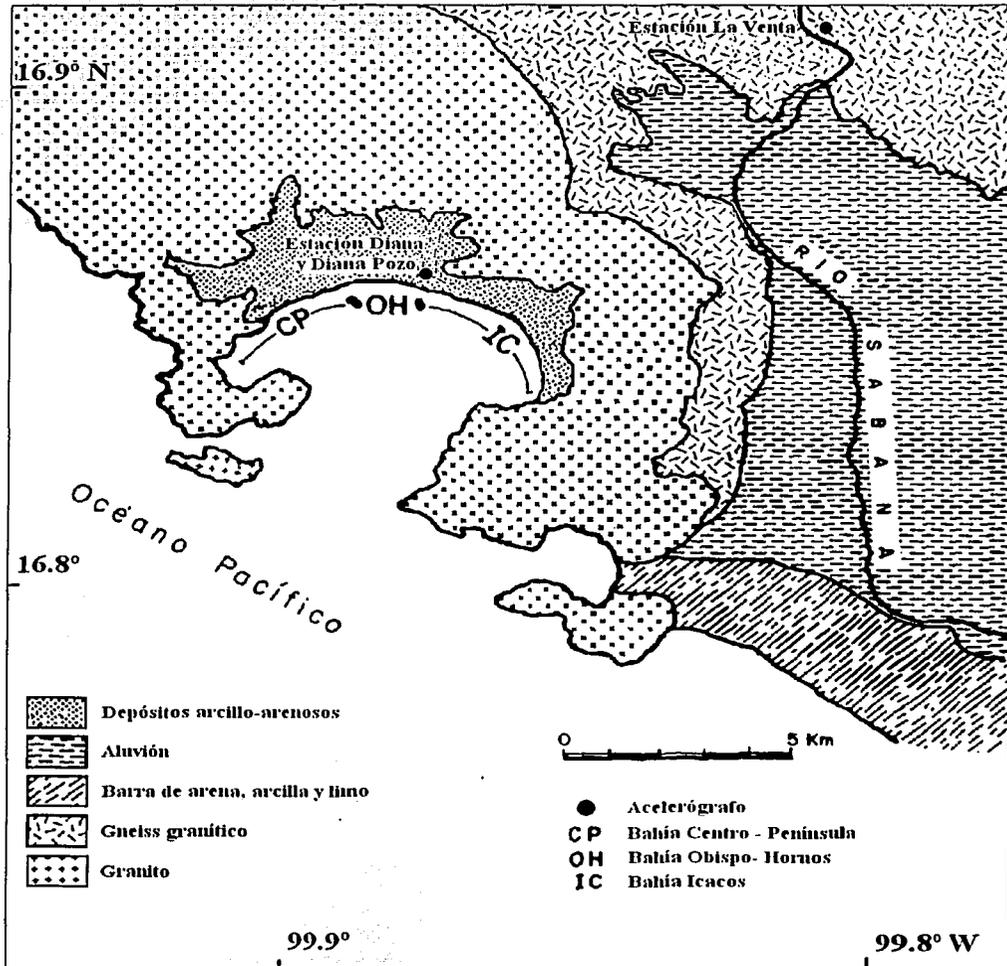


Figura 3.11: Geología Regional de Acapulco y ubicación de Estaciones Acelerográficas (Gutierrez, 1991)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

En las figuras 3.12 y 3.13 se presentan la ubicación de los perfiles estratigráficos representativos de esta zona. Se observa que ninguno de los sondeos alcanza la roca basal. La secuencia de suelos anteriormente descrita se modifica conforme aumenta la altitud del terreno natural con respecto al nivel del mar. En las faldas de las eminencias orográficas que circundan a la Bahía de Icacos, los suelos están constituidos por depósitos de arena que empaca a los bloques de granito o "bloques", algunos de gran tamaño.

3.2.1.2 Bahía Farallón del Obispo-Hornos

Se localiza entre la Roca Farallón del Obispo y la de San Lorenzo y está ubicada aproximadamente en la parte central de la Bahía de Acapulco. La extensión de esta sub-bahía y la profundidad de la roca basal son menores que en la Bahía de Icacos. Típicamente la roca basal se encuentra a profundidades que varían de 15 a 20 m. en las zonas centrales y disminuye hacia las partes altas.

La estratigrafía es similar cualitativamente a la de la Bahía de Icacos. Superficialmente se localizan arenas de playa y limos compactos y semi compactos de origen aluvial. Luego aparecen depósitos de arcillas y turbas lagunares que en esta zona solamente tienen espesores máximos de un par de metros, y que se presentan erráticamente formando lentes que en algunas ocasiones aparecen en dos o más capas delgadas. Bajo estos depósitos lagunares se encuentran los antiguos depósitos aluviales en donde predominan las arenas limosas y en donde también se han localizado lentes o paquetes de arcillas tropicales de consistencia dura. Los perfiles de esta zona se muestran en las figuras 3.14 y 3.15.

3.2.2 PROPIEDADES DE LOS SUELOS

3.2.2.1 Propiedades Índice

A excepción de las arcillas y las turbas compresibles que se depositaron en las lagunas de las sub-bahías de Icacos y de Farallón de Obispo-Hornos, y en algunos sitios del centro viejo del puerto, la mayor parte de los suelos puede clasificarse como arenas limosas que en su mayoría contienen arcillas en porcentajes muy variables. En los suelos de la bahía predominan los grupos SM y SP del sistema unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y son menos frecuentes las arenas arcillosas, SC. Las turbas y las arcillas orgánicas lagunares se han clasificado como materiales OH o CH.

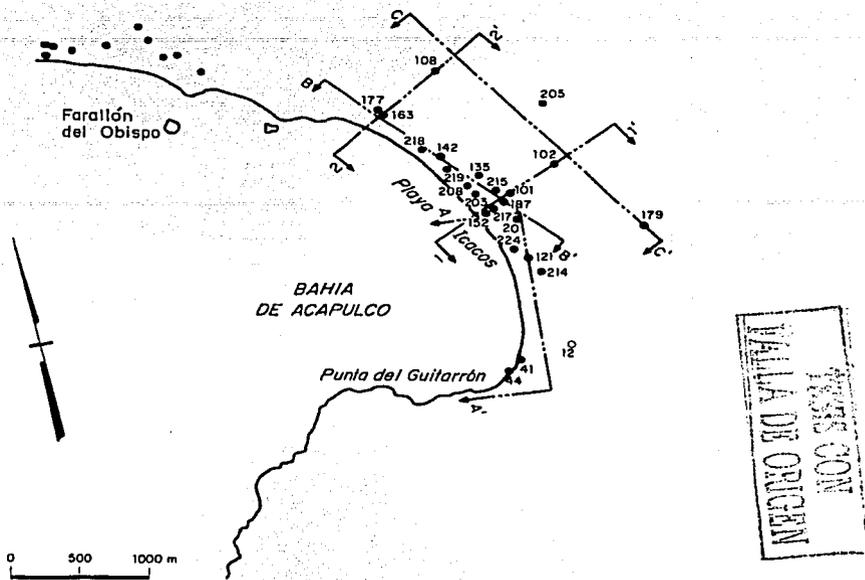


Figura 3.12: Ubicación de perfiles en la Bahía de Icacos (Ovando et al, 1989)

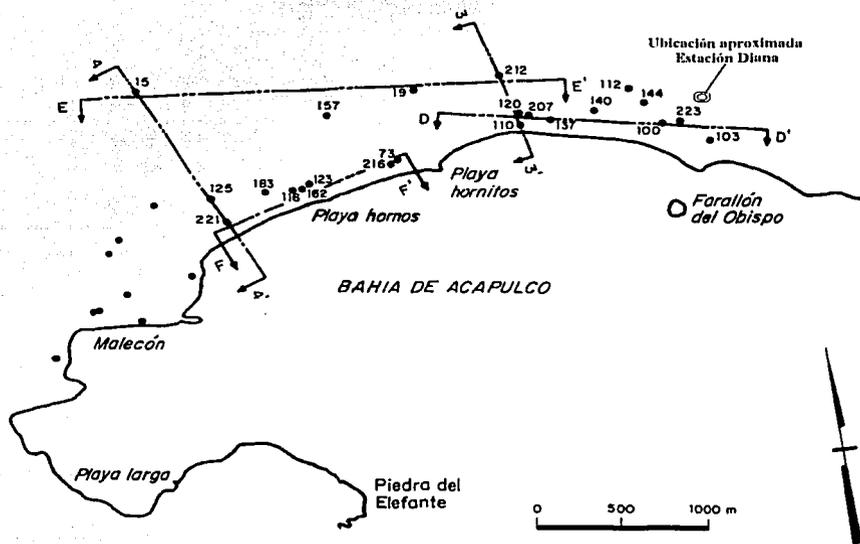


Figura 3.13: Ubicación de Perfiles en la Bahía de Obispo – Hornos (Ovando et al, 1989)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

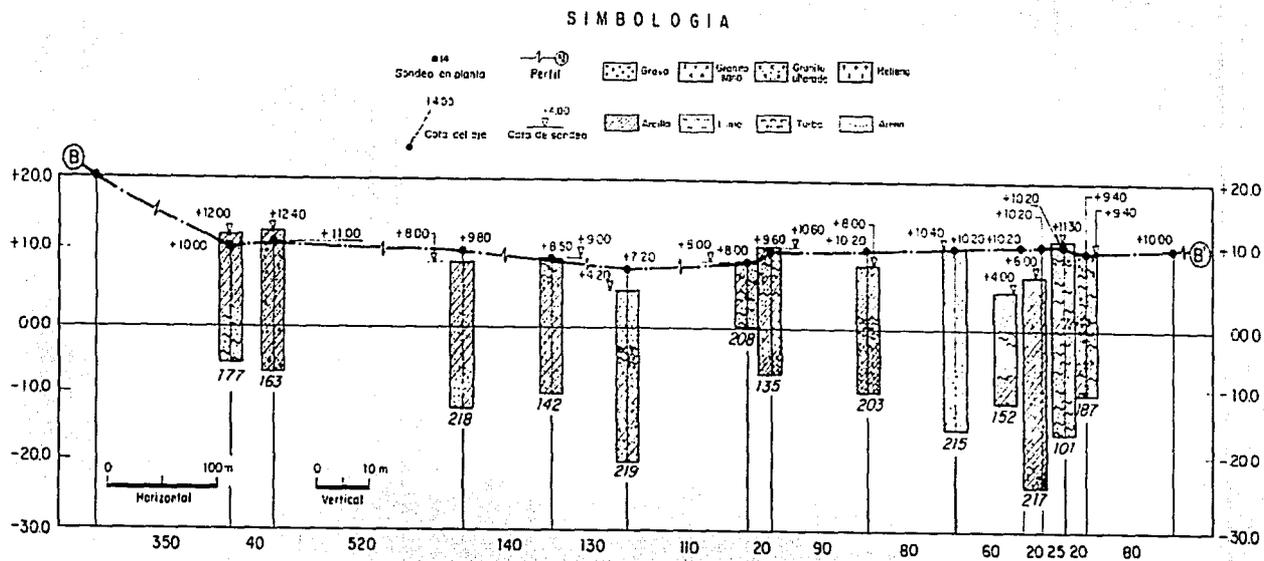


Figura 2.14: Perfiles Estratigráficos de la Balda de Icaos (Ovando et al, 1989)

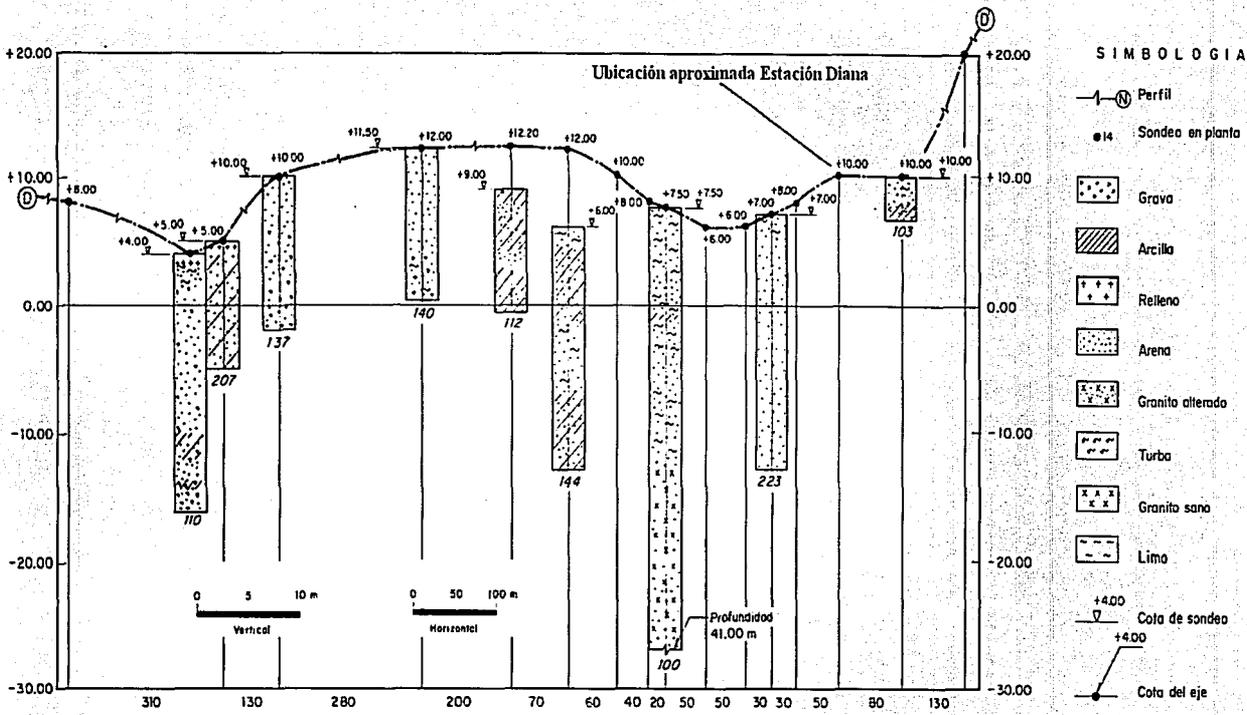


Figura 2.15: Perfiles Estratigráficos de la Bahía de Obispo - Hornos (Ovando et al, 1984)

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Respuesta sísmica y posible comportamiento no lineal del suelo

Fernando Lázares

Contenido Natural de Humedad. Para los suelos arenosos varía de 5 a 40% aproximadamente y depende no sólo de la posición de los suelos con respecto al nivel freático sino del porcentaje de finos que tengan. En las turbas y los suelos arcillosos orgánicos de origen lagunar se han reportado contenidos de agua de más de 250 %.

Relación de Vacíos. En los suelos arenosos con cantidades despreciables de finos se tienen relaciones de vacíos del orden de 0.5 a 0.7 mientras que en aquellos con porcentajes de finos superiores al 10 %, las relaciones de vacíos son ligeramente mayores que 1.0. En las turbas se encuentra con frecuencia materiales con relaciones de vacíos de 10.0 o más.

Índices de Plasticidad. En los suelos que contienen materiales granulares y finos varían entre 10 % y 60 %. Las arcillas y turbas lagunares suelen tener índices de plasticidad mayores de 200 %.

3.2.2.2 Propiedades Mecánicas

La información sobre las propiedades mecánicas determinadas por ensayos de laboratorio es muy escasa; existe una preferencia por parte de los ingenieros en mecánica de suelos hacia los sondeos de penetración en el campo en lugar del uso de ensayos de laboratorio, por lo que la información más abundante proviene de sondeos de penetración estándar (prueba SPT). Estas pruebas presentan inconvenientes desde el punto de vista técnico, entre los que se cuentan:

- a) Deficiencias en la ejecución de la prueba por falta de supervisión adecuada y
- b) La estimación de las propiedades mecánicas de los suelos a partir de correlaciones que no han sido verificadas para los suelos de Acapulco.

Una idea cualitativa de los órdenes de magnitud y rangos de valores de los parámetros de resistencia son:

Resistencia a la compresión no confinada. Lo valores para los suelos areno-limosos varían en un rango de entre 14 y 18.4 t/m², lo que refleja las diferencias en contenidos de agua, en finos, en el grado de saturación y en compacidad. En las turbas y arcillas lagunares, las resistencias varían entre 7.6 y 12.4 t/m².

Angulo de Fricción Interna. Los valores reportados se refieren a valores de ϕ para los suelos arenosos obtenidos en términos de esfuerzos efectivos a partir de pruebas CD que varían entre 42 y 26 grados, dependiendo fundamentalmente de la compacidad de los materiales.

Compresibilidad. A pesar de que el número de sondeos existentes es grande, solamente tres de ellos contienen datos provenientes de pruebas odométricas, esto debido a:

- a) Baja compresibilidad de las arenas limosas y arcillosas de los depósitos fluviales que resulta de su alta compacidad, por lo que en general no se tienen problemas de asentamientos en estructuras de pocos niveles de altura.
- b) La gran mayoría de estructuras importantes y/o altas se apoyan sobre los estratos compactos profundos mediante pilas o pilotes de punta, lo que hace innecesario la obtención de parámetros de compresibilidad de los estratos superficiales.

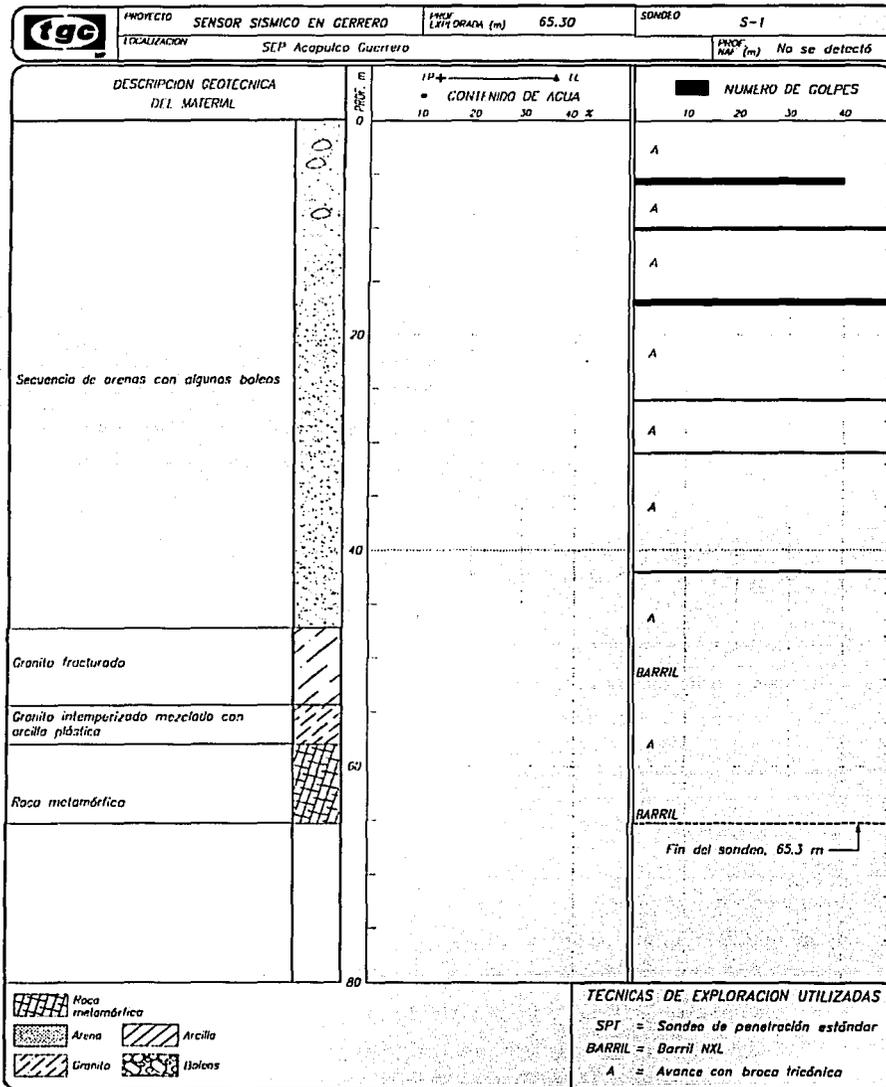
Los depósitos de turbas y arcillas lagunares son materiales de muy alta compresibilidad según se desprende de los altos porcentajes de humedad que contienen y de los valores de sus relaciones de vacíos típicos.

3.2.3 ESTRATIGRAFÍA DEL SUELO DE LA ESTACIÓN DIANA

En febrero de 1994 se instaló junto a la estación Diana un sensor sísmico ubicado en un pozo que alcanza roca; esta nueva estación se llama Diana Pozo 63. La información de la estratigrafía obtenida del pozo se muestra a continuación y se basa en el informe "Trabajo Geotécnico para la Instalación de un Sensor Sísmico, Acapulco, Gro, (TGC Geotecnia, 2000).

La figura 3.16 muestra el perfil estratigráfico, el cual nos indica que hasta los 47.4 m. se tiene una secuencia de suelos arenosos aluviales, bajo los cuales se encuentra roca granítica fracturada de 7.1 m. de espesor. Continúa luego una capa de 3.1 m. de granito intemperizado (tucuruquay) mezclado con arcilla plástica, la cual cubre una mylonita metamórfica del complejo Xolapa de Acapulco, material sobre el cual se colocó el sensor sísmico. Esta estratigrafía no coincide con la descripción geológica mostrada anteriormente para esta zona en la figura 3.9, esto debido a que esta figura fue elaborada con información disponible hasta 1988, por lo que será necesario actualizarla sobre todo en la zona correspondiente a la glorieta Diana.

Como este pozo se encuentra junto a la estación Diana, podemos asumir que la estratigrafía descrita es representativa para el suelo de esta estación.



TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Figura 3.16: Estratigrafía del Suelo donde se ubica la Estación Diana Pozo (TGC Geotecnia, 2000)

CAPITULO IV

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

ESTIMACIÓN DE LA RESPUESTA SÍSMICA DE SITIO

4.1 SISMOS UTILIZADOS

Se utilizaron 72 sismos que pertenecen al periodo 1988 al 2001; las características de estos sismos se presenta en la tabla 4.1. La fuente de datos es la Base Mexicana de Sismos Fuertes, Volumen 2 (Instituto de Ingeniería – UNAM et al, 2000); sólo para el sismo del 08/10/01 los datos de magnitud corresponden a Harvard CTM Catalog. La ubicación de los epicentros se muestra en la Figura 4.1 De los 72 sismos 33 han sido registrados simultáneamente en las tres estaciones, 17 simultáneamente en Diana y La Venta y 22 simultáneamente en Diana y Diana Pozo. En total se tienen 50 sismos para las estaciones Diana y La Venta y 55 para las estaciones Diana y Diana Pozo. La fuente de los acelerogramas también es la Base Mexicana de Sismos Fuertes Volumen N° 2. Puede observarse que los sismos son de diferentes tipos, tanto de subducción, que son la mayoría, como intraplaca.

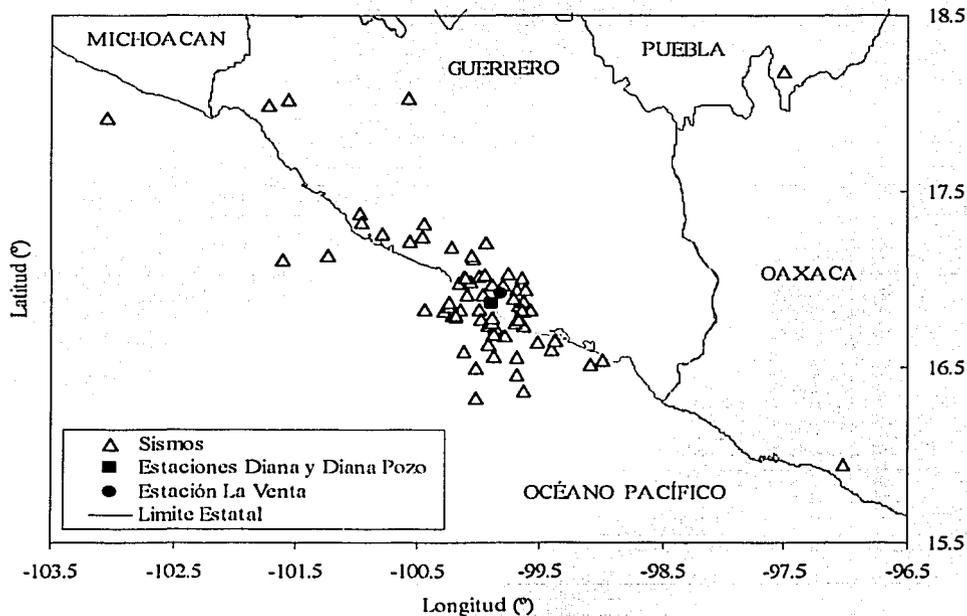


Figura 4.1: Epicentros de Sismos Utilizados

Tabla 4.1: Características de los 72 sismos empleados
(Fuente: Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes, 2000)

Nº	SISMO	HORA (GMT)	LATITUD (°)	LONGITUD (°)	PROFUND. (km)	M _b	M _s	M _w
1	16/08/88	04:20:50.3	16.97	-99.80	21.1	4.2	-	4.6
2	25/04/89	14:29:00.4	16.60	-99.40	19.0	6.3	6.9	6.5
3	02/05/89	09:30:16.7	16.64	-99.51	13.4	5.4	4.9	5.1
4	17/08/89	00:54:03.2	17.12	-100.04	25.6	4.9	-	4.8
5	08/10/89	22:32:40.6	17.19	-100.21	36.0	5.0	4.1	5.0
6	09/11/89	08:36:40.9	16.84	-99.65	9.9	5.1	4.1	5.1
7	13/01/90	02:07:27.6	16.82	-99.63	12.2	5.3	5.0	5.0
8	04/04/90	17:08:17.1	16.65	-99.37	15.4	4.3	4.3	5.0
9	09/07/90	03:04:23.9	16.86	-99.67	16.2	-	-	4.5
10	10/07/90	06:44:50.6	16.83	-99.57	17.9	4.5	-	4.8
11	09/01/92	04:03:18.8	17.01	-99.65	32.0	4.7	-	4.3
12	15/05/92	08:35:09.2	16.83	-99.98	23.0	4.2	-	4.2
13	24/10/93	07:52:18.2	16.54	-98.98	19.0	6.2	6.6	6.5
14	15/04/94	04:48:19	16.74	-99.63	5.0	4	-	4.7
15	23/05/94	01:41:46	18.03	-101.57	23.0	-	-	5.6
16	29/10/94	16:44:04.3	16.97	-99.89	24.0	-	-	5.1
17	10/12/94	16:17:40.9	18.02	-101.56	20.0	-	-	6.3
18	22/12/94	10:38:21	16.63	-99.92	5.0	-	-	4.3
19	02/01/95	21:54:51.2	16.68	-99.79	20.0	-	-	4.2
20	15/05/95	22:36:15	16.50	-100.02	5.0	-	-	4.6
21	12/07/95	21:43:50	17.02	-99.99	26.0	-	-	4
22	22/09/95	08:36:17.5	16.37	-99.62	24.0	-	-	4.6
23	09/12/95	22:40:23	16.88	-99.63	23.0	-	-	4.3
24	01/01/96	17:15:16.8	16.95	-99.69	55.0	-	-	4.4
25	13/03/96	21:04:19.8	16.52	-99.08	18.0	5.2	4.4	5.1
26	15/04/96	13:17:53	16.80	-100.21	3.0	-	-	4.1
27	23/04/96	06:53:35	17.11	-101.60	17.0	5.3	4.9	5.3
28	08/05/96.1	01:24:43.5	16.83	-100.21	5.0	4	-	4.6
29	08/05/96.2	13:32:19.7	16.82	-100.29	7.0	4.1	-	4.6
30	08/06/96	00:57:22	16.46	-99.68	15.0	-	-	4.4
31	11/06/96	01:59:35.5	16.74	-99.92	16.0	-	-	4
32	03/09/96	11:45:04.8	16.72	-99.85	9.0	4.6	-	4.9
33	19/11/96	14:49:56	17.38	-100.98	51.0	-	-	3.9
34	11/01/97	20:28:27.2	17.91	-103.04	16.0	6.5	6.9	-
35	22/03/97.1	03:49:16	17.04	-99.76	30.0	4.7	-	4.6
36	22/03/97.2	05:21:42.9	16.31	-100.02	16.0	4.1	-	4.3
37	08/05/97	15:58:29.7	17.32	-100.44	12.0	5	4.3	4.8
38	19/05/97	11:23:53.7	17.24	-100.46	40.0	-	-	4.2
39	26/06/97	19:01:05.9	16.77	-99.97	10.0	-	-	4.1
40	11/07/97	22:23:34.4	16.76	-99.70	10.0	-	-	4.5
41	19/07/97	07:34:37	17.22	-100.56	51.0	4.6	3.8	4.9
42	14/08/97	19:25:43.2	16.79	-100.18	6.0	-	-	4.1
43	25/08/97	13:05:43.9	16.69	-99.87	3.0	-	-	3.9
44	27/08/97	00:13:26.1	16.76	-99.88	28.0	5	-	4.6
45	14/10/97	16:23:31.6	16.83	-99.64	5.0	-	-	4.2
46	21/10/97	17:38:06.6	16.57	-99.87	16.0	-	-	4
47	31/10/97	12:02:18.8	17.14	-100.05	28.0	-	-	4.3
48	22/12/97	05:22:07.8	17.14	-101.24	5.0	5.1	5	4.6
49	28/01/98.1	03:56:06.8	16.78	-99.89	28.0	-	-	4
50	28/01/98.2	20:38:47.2	16.91	-100.08	17.0	-	-	3.9
51	05/03/98	14:51:04.3	16.85	-100.25	9.0	-	-	4.3
52	11/03/98	14:13:12.1	17.01	-100.11	30.0	-	-	4.2
53	01/06/98	07:59:32.2	16.83	-100.14	5.0	4.5	-	4.8
54	12/07/98	08:11:27.5	16.83	-100.44	4.0	5.1	4.6	4.8
55	17/07/98	11:18:04	16.98	-100.16	27.0	-	-	4.6
56	09/08/98	16:18:06.6	16.87	-100.25	3.0	4.2	-	4.5
57	07/09/98	06:53:17.8	16.77	-99.67	12.0	-	-	4.1
58	27/11/98	08:20:28.6	16.59	-100.11	3.0	-	-	4.3
59	02/03/99	20:45:13.3	16.95	-99.61	41.0	4.2	-	4.2
60	04/03/99	07:57:18.7	16.80	-100.18	7.0	-	-	3.8
61	06/04/99	01:35:09.1	16.91	-99.96	6.0	-	-	3.9
62	08/04/99	22:19:50	16.99	-100.06	6.0	-	-	4
63	30/05/99	02:58:42.7	17.26	-100.79	53.0	4.4	-	4.6
64	15/06/99	20:42:07.1	18.18	-97.51	69.0	6.4	6.5	-
65	21/06/99	17:43:06	17.99	-101.72	54.0	6.0	5.8	5.8
66	16/08/99	04:09:45.7	17.03	-99.94	55.0	-	-	4.3
67	30/09/99	16:31:14.8	15.95	-97.03	16.0	6.5	7.5	5.2
68	27/10/99	02:53:54	16.90	-99.71	35.0	-	-	4.2
69	08/11/99	02:46:46.2	17.33	-100.96	23.0	4.7	4.1	4.6
70	19/11/99	04:56:29.5	16.56	-99.69	15.0	-	-	4.4
71	07/12/99	16:25:31.6	17.21	-99.93	42.0	-	-	3.7
72	08/10/01	03:39:25.6	17.01	-100.1	16.0	5.6*	5.4*	-

*Fuente: Harvard CTM Catalog

TESIS CON
 FALLA DE CALIFICACION

Las distancias epicentrales a la estación Diana varían de 9.7 a 369.4 Km., las profundidades de 3 a 69 Km. y las magnitudes de 3.5 a 7.5. A continuación se hace una breve referencia de los sismos más importantes.

4.1.1 SISMO DEL 25 DE ABRIL DE 1989

Este sismo ocurrió a las 14:29 horas GMT (08:29, hora local), con magnitud $M_s = 6.9$, sentido con intensidad de grado V aproximadamente en la ciudad de México. El epicentro se determinó dentro de la brecha sísmica de Guerrero, en el área de San Marcos; esta zona tiene un periodo de recurrencia aproximado de 50 años para sismos con $M_s > 7.5$ (Nishenko & Singh, 1987). Las coordenadas del epicentro fueron 16.60° de latitud Norte y 99.40° longitud Oeste y tuvo una profundidad de 19 Km. El área de réplicas de este sismo fue de 900 Km^2 , el momento sísmico fue de $M_0 = 2.2 \times 10^{26}$ dinas-cm, considerando una rigidez $\mu = 5 \times 10^{11}$ dinas/cm² y un desplazamiento promedio de 49 cm. La caída de esfuerzo promedio Δs fue de 7 bares. El mecanismo focal muestra un buzamiento de 28° con dirección N 26° E. El área de ruptura se observa entre las áreas correspondientes a los sismos de 1950 y 1957, dentro de una pequeña zona que no había mostrado actividad significativa desde 1907 (Coyoli et al, 1989). La Universidad de Harvard (<http://www.seismology.harvard.edu/CMTsearch.html>) presenta para este sismo una latitud = 16.83, longitud = -99.12, profundidad de 15 Km., $M_s = 6.9$, $M_b = 6.3$ y $M_w = 6.9$.

Este sismo, al igual que los ocurridos en la brecha de Guerrero desde 1937, tiene su epicentro muy cerca de la costa. Es posible que se trate de un evento que forme parte de la secuencia de ruptura de algún segmento de la brecha en particular, como ha sucedido con otros eventos (Nishenko & Singh, 1987).

Se reportaron las siguientes aceleraciones máximas en la estación Diana: $A_{maxNS} = 335$ gal y $A_{maxEO} = 331.5$ gal, y en La Venta: $A_{maxNS} = 29.1$ gal y $A_{maxEO} = 62$ gal. En esta época la estación Diana Pozo aún no existía.

4.1.2 SISMO DEL 15 DE JUNIO DE 1999

Conocido como el sismo de Tehuacán, se localizó aproximadamente 200 Km. tierra adentro de la costa, afectando un área similar a la del sismo de Huajuapán de León del 24 de octubre de 1980. La ciudad más importante cerca al epicentro es Tehuacán. El Servicio Sismológico Nacional reportó los siguientes parámetros de este sismo: latitud = 18.18° , longitud = -97.51° , profundidad de 69 Km., $M_s = 5.8$, $M_b = 6.0$

y $M_w = 7.0$; la Universidad de Harvard propone para este evento una latitud = 18.44, longitud = -97.38, profundidad de 61.2 Km., $M_s = 6.5$, $M_b = 6.4$ y $M_w = 6.9$

El mecanismo focal corresponde a una falla normal de profundidad intermedia en la placa de Cocos. Singh et al (1999) proponen las siguientes características: rumbo de 308°, buzamiento de 49° y ángulo de deslizamiento de -92°. La Universidad de Harvard estima un rumbo de 309°, buzamiento de 40° y ángulo de deslizamiento de -83°.

Este sismo provocó daños moderados a ligeros en el área epicentral, causando daños considerables al sur de Puebla, norte de Oaxaca y sur de Morelos. Daños severos de tipo estructural se concentraron mayormente en monumentos históricos, sobre todo iglesias y conventos construidos en la época colonial; en viviendas, las construidas con adobe también sufrieron daños severos. Edificaciones de mampostería sufrieron daños estructurales significativos. Edificaciones bien construidas sean de mampostería o concreto reforzado se comportaron satisfactoriamente.

Las aceleraciones máximas registradas en la estación Diana fueron: $A_{maxNS} = 24.4$ gal y $A_{maxEO} = 22.5$ gal, en Diana Pozo $A_{maxNS} = 6.2$ gal y $A_{maxEO} = 7.4$ gal en La Venta: $A_{maxNS} = 5.1$ gal y $A_{maxEO} = 4.5$ gal

4.1.3 SISMO DEL 30 DE SEPTIEMBRE DE 1999

Este evento ocurrió casi debajo de la costa. Es similar en algunos aspectos al gran sismo intraplaca de Oaxaca del 15 de Enero de 1931 ($M=7.8$), que causó gran destrucción en la ciudad de Oaxaca.

Según el Servicio Sismológico Nacional, las coordenadas del epicentro son: latitud = 15.95°, longitud = -97.03°, profundidad de 16 Km., $M_s = 7.5$ y $M_b = 6.5$; la Universidad de Harvard propone para este evento una latitud = 16.20, longitud = -96.96, profundidad de 46.8 Km., $M_s = 7.5$ y $M_w = 7.4$

El mecanismo focal, determinado de análisis de datos telesísmicos, corresponde a una falla normal con rumbo paralelo a la trinchera. (Singh et al, 1999). Según la Universidad de Harvard se tuvo un rumbo 300°, buzando a 49°, con un ángulo de deslizamiento de -78°.

Este sismo causó serios daños en el estado de Oaxaca: cientos de edificaciones de diversos tipos (viviendas, colegios, hospitales, iglesias, etc.) fueron afectadas con diferentes tipos de daños.

Las aceleraciones máximas que se registraron en las estaciones fueron: Diana: $A_{maxNS} = 39.3$ gal y $A_{maxEO} = 45.8$ gal, en Diana Pozo $A_{maxNS} = 6.2$ gal y $A_{maxEO} = 7.4$ gal en La Venta: $A_{maxNS} = 7.7$ gal. y $A_{maxEO} = 7.6$ gal

4.1.4 SISMO DEL 08 DE OCTUBRE DEL 2001

Este sismo se localizó 30 Km. al noroeste de la ciudad de Acapulco, cercano a la ciudad de Coyuca de Benitez. Ocurrió a las 09:39 pm hora local (03:39:25.5 GTM), fue sentido por una gran parte de la población de Acapulco y del Distrito Federal.

Según el Servicio Sismológico Nacional, las coordenadas del epicentro son: latitud = 17.01, longitud = -100.10, profundidad de 16 Km. y una magnitud = 6.1; la Universidad de Harvard informa para este evento una latitud = 17.32, longitud = -99.89, profundidad = 15 Km., $M_s = 5.4$, $M_w = 5.8$.

El mecanismo de falla determinado por el Servicio Sismológico Nacional revela un fallamiento normal sobre una falla de rumbo 281° , buzando a 57° , con un ángulo de deslizamiento de -85° ; éste es parecido al obtenido por la Universidad de Harvard, con valores rumbo 267° , buzando a 43° , con un ángulo de deslizamiento de -85° .

No se presentaron daños graves en la ciudad de Acapulco ni en el Distrito Federal; la zona más afectada fue el Municipio de Coyuca de Benitez: viviendas, colegios, mercados y centros de salud tuvieron daños severos y colapsos parciales sobre todo en edificaciones de adobe.

Las aceleraciones máximas horizontales que se registraron en las estaciones fueron en Diana: $A_{maxNS} = 334.5$ gal, $A_{maxEO} = 221.1$ gal, en Diana Pozo $A_{maxNS} = 37$ gal, $A_{maxEO} = 41.1$ gal y en La Venta $A_{maxNS} = 38.6$ gal, $A_{maxEO} = 26.6$ gal

4.2 ESTACIONES ACELEROGRÁFICAS

4.2.1 ESTACIÓN DIANA

La estación Acapulco Escuela Diana (ACAD) se localiza en la Escuela Secundaria Federal N° 1, cerca de la glorieta Diana, con coordenadas 16.867 latitud Norte y 99.88 longitud Oeste y altitud de 6 m.s.n.m. Se ubica sobre un depósito de suelo de tipo arenoso. Actualmente se encuentra funcionando un

acelerógrafo modelo IDS-3602 digital, de 3 canales, con velocidad de muestreo de 250 muestras/s y umbral de disparo de 6 gal, que reemplazó en 1994 a un acelerógrafo DCA-333 digital que fue instalado en 1986.

4.2.2 ESTACIÓN DIANA POZO

La estación Acapulco Diana Pozo 63 m. (ACPD), se localiza junto a la estación Acapulco Escuela Diana por lo que tiene sus mismas coordenadas, se encuentra ubicada en un pozo de 65.3 m profundidad cuyo fondo alcanza roca (ver figura 3.16). El acelerógrafo es un modelo IDS-3602 digital y se encuentra ubicado a 63 m. de profundidad, tiene 3 canales, velocidad de muestreo de 250 muestras/s y umbral de disparo de 2 gal. Se instaló en Febrero de 1994.

4.2.3 ESTACIÓN LA VENTA

La estación La Venta (VNTA) funciona desde 1985, se ubica en el poblado La Venta a 2 km de ciudad Renacimiento, con coordenadas 16.923 latitud Norte y 99.816 longitud Oeste. Se encuentra a una altitud de 60 msnm, y está instalado sobre roca. Desde junio de 1997 funciona un acelerógrafo modelo K2 digital de 3 canales, con velocidad de muestreo de 200 muestras/s y umbral de disparo de 2 gal; anteriormente existieron acelerógrafos ALTUS ETNA y DSA-1, ambos digitales.

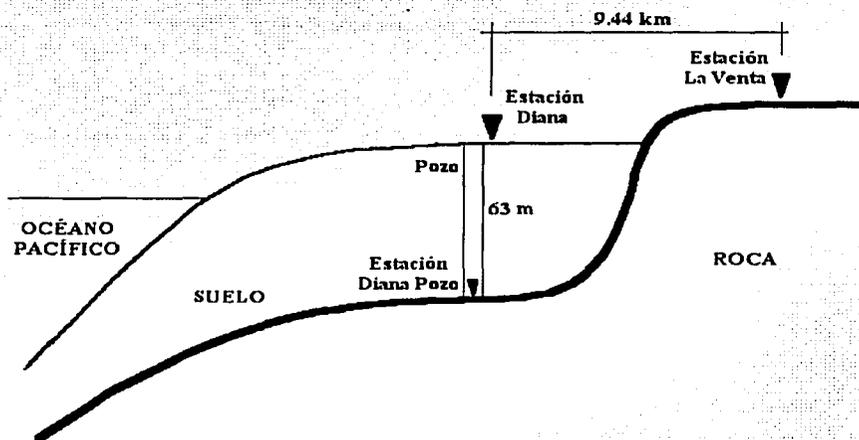


Figura 4.2: Ubicación de las Estaciones

La figura 4.2 muestra un esquema de la localización de las estaciones; en superficie se tiene la estación Diana, junto a ella en un pozo la estación Diana Pozo y a 9.44 Km. de allí con dirección NO la estación en superficie La Venta. Estas tres estaciones pertenecen al Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Las figuras 4.3 y 4.4 muestran en una misma escala de tiempo y amplitud los acelerogramas que corresponden al sismo del 8 de octubre del 2001 (magnitudes $M_b = 5.4$ y $M_s = 5.4$) registrados en las estaciones Diana, Diana Pozo y La Venta respectivamente. Se puede observar cómo en ambas direcciones las amplitudes en roca son menores que en el suelo.

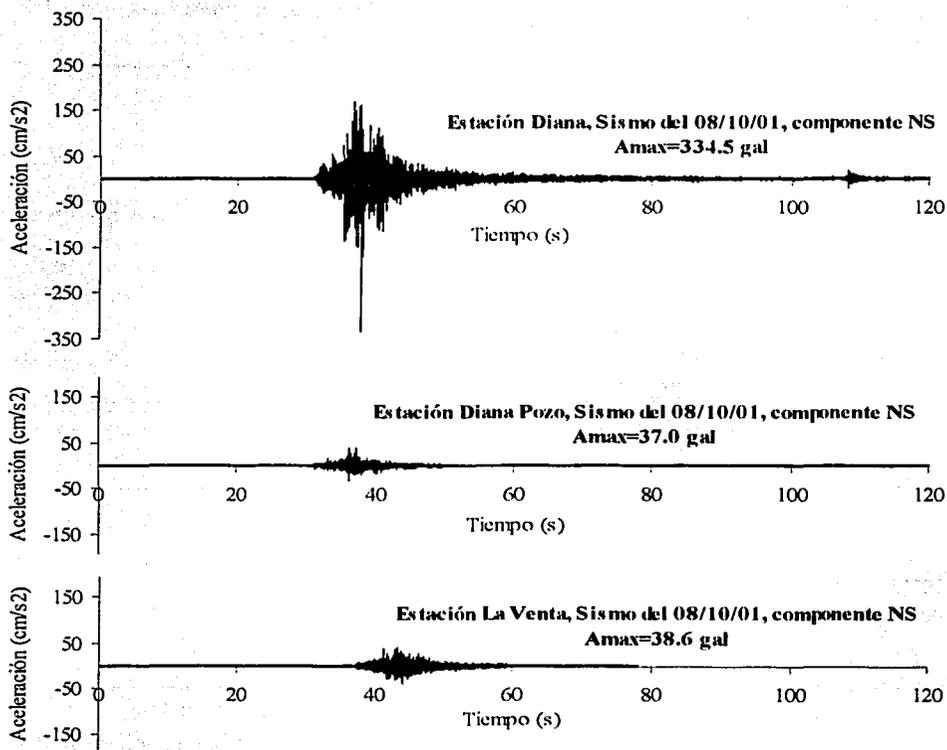


Figura 4.3

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

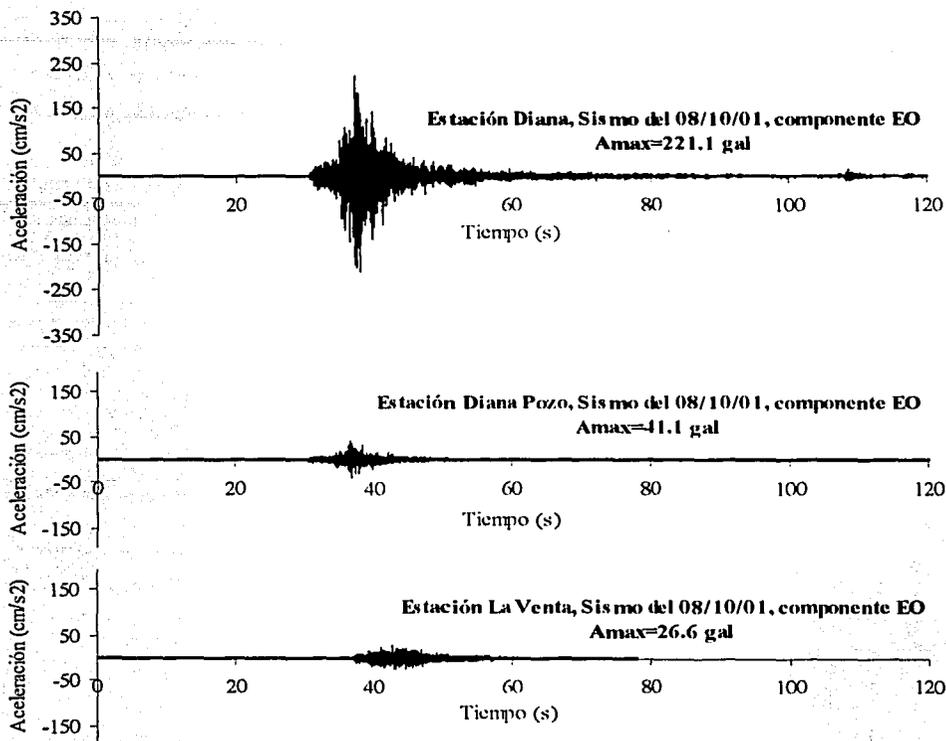


Figura 4.4

4.3 PROCEDIMIENTO

A continuación se estimarán la frecuencia y el periodo fundamental del suelo de la estación Diana, así como la amplificación relativa máxima respecto a las estaciones La Venta y Diana Pozo; el procedimiento será:

- 1° Se estimarán los efectos de sitio considerando los 33 sismos que se han registrado simultáneamente en las tres estaciones, determinando cocientes espectrales de aceleración para los pares de estaciones Diana - La Venta y Diana - Diana Pozo. Luego se analizará si existe influencia en la respuesta de sitio debido al acimut, profundidad, distancia epicentral y magnitud de los sismos. Se compararán los resultados obtenidos en cada par de estaciones.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2° Se estimarán los efectos de sitio, esta vez considerando los 50 sismos para el par de estaciones Diana – La Venta y los 55 sismos para Diana – Diana Pozo. Nuevamente se analizará si existe influencia en la respuesta respecto al acimut, profundidad y magnitud y se compararán los resultados obtenidos en cada par de estaciones.

3° Se compararán obtenidos los resultados del primer y segundo procedimiento.

4.4 SISMOS REGISTRADOS SIMULTÁNEAMENTE EN LAS ESTACIONES DIANA, DIANA POZO Y LA VENTA

En la tabla 4.2 se presentan las características de los eventos registrados simultáneamente en estas estaciones y en la figura 4.5 se muestran sus epicentros.

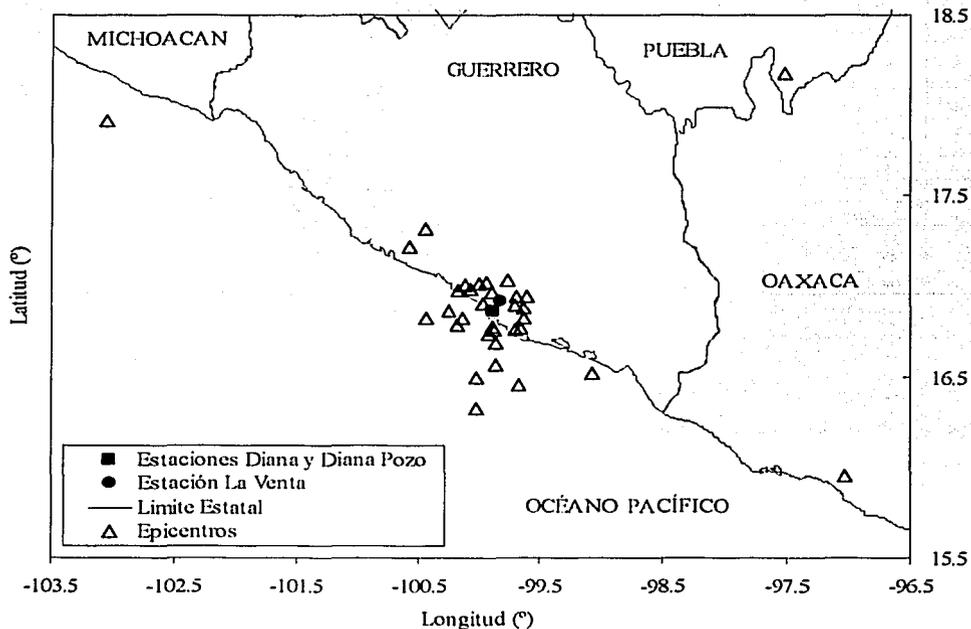


Figura 4.5: Epicentros de sismos registrados simultáneamente en las estaciones Diana, Diana Pozo y La Venta

Tabla 4.2: Características de 33 sismos registrados simultáneamente en las estaciones Diana, Diana Pozo y La Venta (fuente: Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes, 2000)

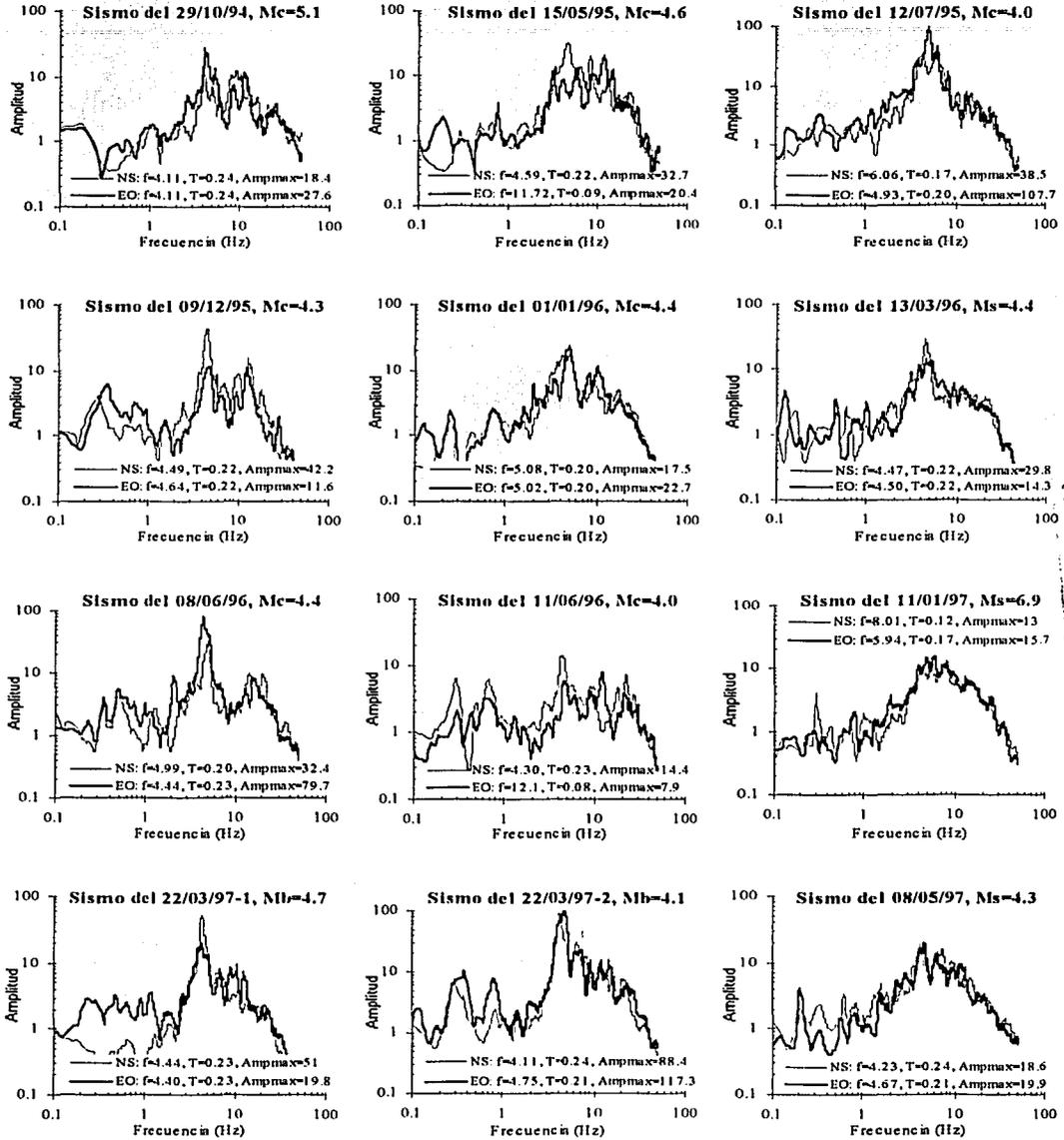
#	SISMO	HORA (GMT)	LATITUD (°)	LONGITUD (°)	PROFUND. (km)	M _b	M _s	M _c
1	29/10/94	16:44:04.3	16.97	-99.89	24.0	-	-	5.1
2	15/05/95	22:36:15	16.50	-100.02	5.0	-	-	4.6
3	12/07/95	21:43:50	17.02	-99.99	26.0	-	-	4
4	09/12/95	22:49:23	16.88	-99.63	23.0	-	-	4.3
5	01/01/96	17:15:16.8	16.95	-99.69	55.0	-	-	4.4
6	13/03/96	21:04:19.8	16.52	-99.08	18.0	5.2	4.4	5.1
7	08/06/96	00:57:22	16.46	-99.68	15.0	-	-	4.4
8	11/06/96	01:59:35.5	16.74	-99.92	16.0	-	-	4
9	11/01/97	20:28:27.2	17.91	-103.04	16.0	6.5	6.9	-
10	22/03/97-1	03:49:16	17.04	-99.76	30.0	4.7	-	4.6
11	22/03/97-2	05:21:42.9	16.33	-100.02	16.0	4.1	-	4.3
12	08/05/97	15:58:29.7	17.32	-100.44	12.0	5	4.3	4.8
13	11/07/97	22:23:34.4	16.76	-99.70	10.0	-	-	4.5
14	19/07/97	07:34:37	17.22	-100.56	51.0	4.6	3.8	4.9
15	14/08/97	19:25:43.2	16.79	-100.18	6.0	-	-	4.1
16	25/08/97	13:05:43.9	16.69	-99.87	3.0	-	-	3.9
17	27/08/97	00:13:26.1	16.76	-99.88	28.0	5	-	4.6
18	14/10/97	16:23:31.6	16.83	-99.64	5.0	-	-	4.2
19	21/10/97	17:38:06.6	16.57	-99.87	16.0	-	-	4
20	28/01/98-1	03:56:06.8	16.78	-99.89	28.0	-	-	4
21	01/06/98	07:59:33.2	16.83	-100.14	5.0	4.5	-	4.8
22	12/07/98	08:11:27.5	16.83	-100.44	4.0	5.1	4.6	4.8
23	17/07/98	11:18:04	16.98	-100.16	27.0	-	-	4.6
24	09/08/98	16:18:06.6	16.87	-100.25	3.0	4.2	-	4.5
25	07/09/98	06:53:17.8	16.77	-99.67	12.0	-	-	4.1
26	02/03/99	20:45:13.3	16.95	-99.61	41.0	4.2	-	4.2
27	06/04/99	01:35:09.1	16.91	-99.96	6.0	-	-	3.9
28	08/04/99	22:19:50	16.99	-100.06	6.0	-	-	4
29	15/06/99	20:42:07.1	18.18	-97.51	69.0	6.4	6.5	-
30	16/08/99	04:09:45.7	17.03	-99.94	55.0	-	-	4.3
31	30/09/99	16:31:14.8	15.95	-97.03	16.0	6.5	7.5	5.2
32	27/10/99	02:53:54	16.90	-99.71	35.0	-	-	4.2
33	08/10/01	03:39:25.6	17.01	-100.1	16.0	5.6*	5.4*	-

*Fuente: Harvard CTM Catalog

Se calcularon espectros de amplitudes de Fourier de aceleración para todo el movimiento. Estos espectros, así como los cocientes espectrales, fueron calculados usando el programa DEGTRA (Ordaz et al, 2001); los acelerogramas fueron corregidos y filtrados, si era necesario, con este mismo programa.

4.4.1 COCIENTES ESPECTRALES ENTRE ESTACIONES DIANA Y LA VENTA

Se obtuvieron en total 33 cocientes espectrales en la dirección EO y otros 33 en la NS. Las figuras 4.6, 4.7 y 4.8 muestran los cocientes obtenidos para cada sismo; en línea delgada se tiene la componente NS y la línea gruesa presenta la componente EO.



INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA
 CALLA DE ORO

Figura 4.6: Cocientes espectrales entre estaciones Diana y La Venta

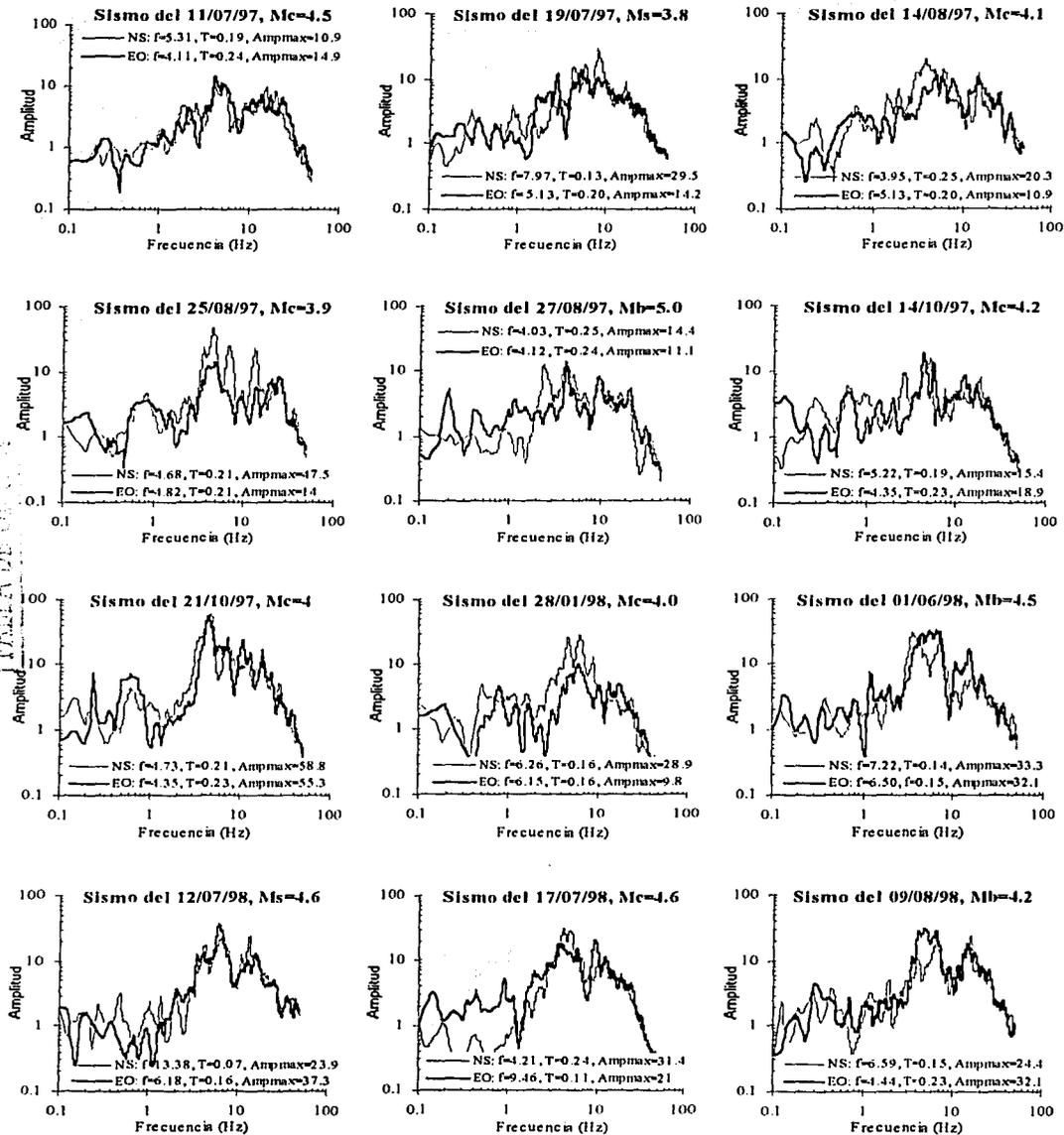


Figura 4.7: Cocientes espectrales entre estaciones Diana y La Venta

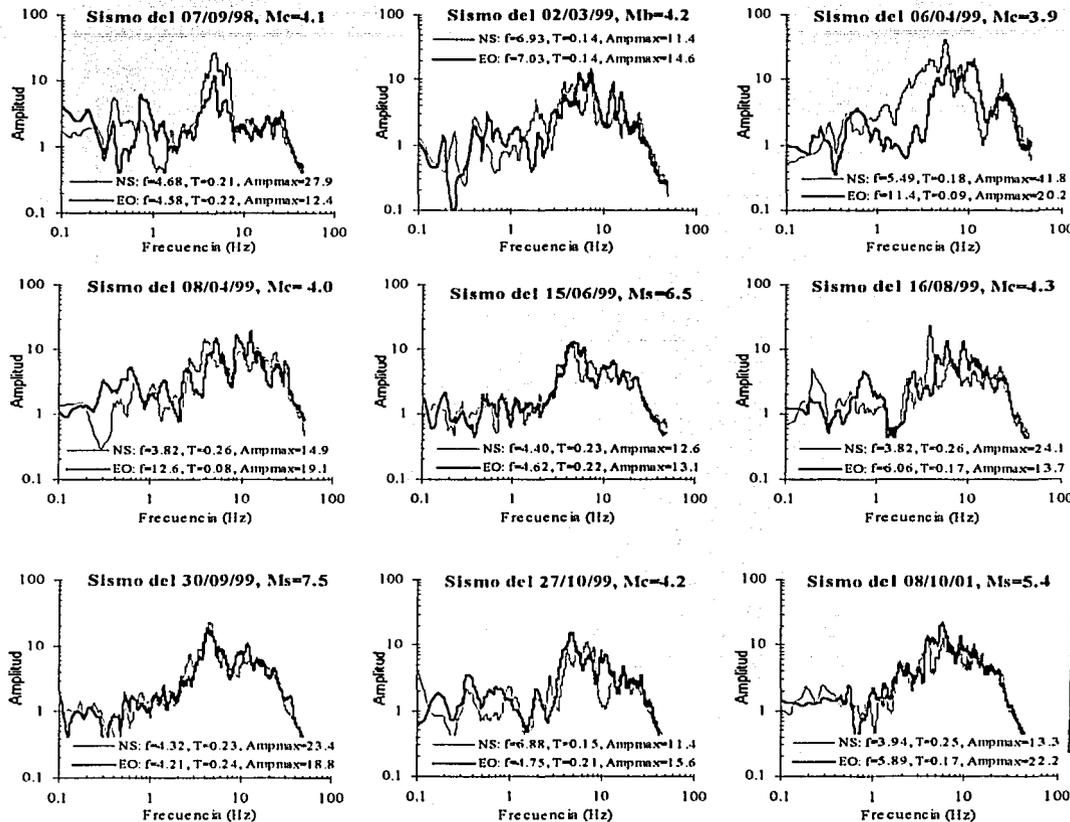


Figura 4.8: Cocientes espectrales entre estaciones Diana y La Venta

Los valores de frecuencia y periodo fundamental del suelo, así como la amplitud relativa máxima respecto a la estación La Venta obtenidos de cada cociente espectral se muestran en la tabla 4.3.

Los cocientes espectrales de cada evento sísmico muestran resultados muy variados para ambas componentes, respecto al periodo. Sólo en 8 eventos de los 33 los periodos en ambas direcciones fueron iguales; éstos son: 29/10/94 ($T = 0.24$ s.), 22/03/97-1 ($T = 0.23$ s.), 09/12/95 ($T = 0.22$ s.), 13/03/96 ($T = 0.22$ s.), 25/08/97 ($T = 0.21$ s.), 01/01/96 ($T = 0.20$ s.), 28/01/98 ($T = 0.16$ s.) y 02/03/99 ($T = 0.14$ s.). En otros 5 sismos la variación del periodo en ambas direcciones es de 0.01 s. lo que se podría considerar

Tabla 4.3: Frecuencias y periodos fundamentales y amplificaciones máximas relativas obtenidas para el suelo de la estación Diana (33 sismos respecto a La Venta)

SISMO	Frecuencia (Hz)	Periodo (Seg.)	Amplitud Max.	Frecuencia (Hz)	Periodo (Seg.)	Amplitud Max.
29/10/94	4.11	0.24	18.4	4.11	0.24	27.6
15/05/95	4.59	0.22	32.7	11.72	0.09	20.4
12/07/95	6.06	0.17	38.5	4.93	0.20	107.7
09/12/95	4.49	0.22	42.2	4.64	0.22	11.6
01/01/96	5.08	0.20	17.5	5.02	0.20	22.7
13/03/96	4.47	0.22	29.8	4.50	0.22	14.3
08/06/96	4.99	0.20	32.4	4.44	0.23	79.7
11/06/96	4.30	0.23	14.4	12.10	0.08	7.9
11/01/97	8.01	0.12	13.0	5.94	0.17	15.7
22/03/97-1	4.44	0.23	51.0	4.40	0.23	19.8
22/03/97-2	4.11	0.24	88.4	4.75	0.21	117.3
08/05/97	4.23	0.24	18.6	4.67	0.21	19.9
11/07/97	5.31	0.19	10.9	4.11	0.24	14.9
19/07/97	7.97	0.13	29.5	5.13	0.20	14.2
14/08/97	3.95	0.25	20.3	5.13	0.20	10.9
25/08/97	4.68	0.21	47.5	4.82	0.21	14.0
27/08/97	4.03	0.25	14.4	4.12	0.24	11.1
14/10/97	5.22	0.19	15.4	4.35	0.23	18.9
21/10/97	4.73	0.21	58.8	4.35	0.23	55.3
28/01/98	6.26	0.16	28.9	6.15	0.16	9.8
01/06/98	7.22	0.14	33.3	6.50	0.15	32.1
12/07/98	13.38	0.07	23.9	6.18	0.16	37.3
17/07/98	4.21	0.24	31.4	9.46	0.11	21.0
09/08/98	6.59	0.15	24.4	4.44	0.23	32.1
07/09/98	4.68	0.21	27.9	4.58	0.22	12.4
02/03/99	6.93	0.14	11.4	7.03	0.14	14.6
06/04/99	5.49	0.18	41.8	11.40	0.09	20.2
08/04/99	3.82	0.26	14.9	12.60	0.08	19.1
15/06/99	4.40	0.23	12.6	4.62	0.22	13.1
16/08/99	3.82	0.26	24.1	6.06	0.17	13.7
30/09/99	4.32	0.23	23.4	4.21	0.24	18.8
27/10/99	6.88	0.15	11.4	4.75	0.21	15.6
08/10/01	3.94	0.25	13.3	5.89	0.17	22.2

como un periodo similar y éstos son 27/08/97 ($T_{NS} = 0.25$ s. y $T_{EO} = 0.24$ s.), 01/06/98 ($T_{NS} = 0.14$ s. y $T_{EO} = 0.15$ s.), 07/09/98 ($T_{NS} = 0.21$ s. y $T_{EO} = 0.22$ s.), 15/06/99 ($T_{NS} = 0.23$ s. y $T_{EO} = 0.22$ s.) y 30/09/99 ($T_{NS} = 0.23$ s. y $T_{EO} = 0.24$ s.); en los otros 20 eventos los valores del periodo varían en las dos componentes con una diferencia mayor de 0.01 s.

Respecto a la forma del cociente espectral de aceleración, es similar en la mayoría de los eventos; se puede observar que en el intervalo de frecuencia de 0.1 a 1 o 2 Hz. hay uno o varios máximos de amplitud relativos, decayendo luego y llegando siempre a un mínimo en 1 o 2 Hz.; luego la amplitud relativa empieza a crecer hasta alcanzar el mayor máximo relativo o pico máximo, en la mayoría de los casos alrededor de los 4 y 5 Hz., después la amplitud relativa decrece y en algunos casos hay otro máximo relativo alrededor de los 10 Hz. para luego decrecer hasta los 50 Hz. Sólo en 9 eventos un pico espectral

define la frecuencia predominante claramente en ambas direcciones, coincidiendo en la forma del pico, diferenciándose sólo en la posición exacta de la frecuencia. En el resto de eventos se tiene, a parte de este pico espectral, otros máximos relativos asociados a frecuencias cercanas a la fundamental. En ningún evento se obtienen valores iguales en ambas direcciones, en 13 eventos la diferencia entre las amplitudes máximas relativas es menor a cinco unidades, lo que podríamos considerar como una respuesta similar en ambas direcciones, mientras que el resto de eventos presenta una diferencia mayor.

La figura 4.9 presenta la superposición de todos los cocientes espectrales obtenidos para cada dirección; se muestra el intervalo de valores, tanto de amplitud relativa como de frecuencia, entre los que fluctúan y que corresponde a la descripción anterior.

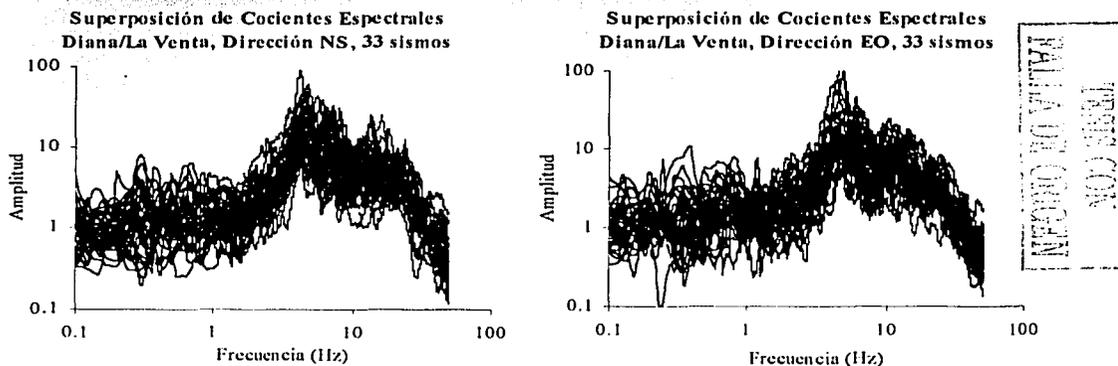


Figura 4.9

La figura 4.10 muestra las frecuencias y los periodos fundamentales que se obtuvieron de los 33 cocientes espectrales; en las abscisas se tiene el valor en la dirección NS y en las ordenadas el valor en la EO. Se observa una gran dispersión; para la frecuencia hay una concentración entre 4 y 6 Hz. en la dirección NS y entre 4 y 5 Hz. en la EO. De igual manera en los valores de periodos correspondientes a estas frecuencias, la concentración se realiza entre 0.20 y 0.25 s. en ambas direcciones.

Para obtener un promedio representativo de los cocientes espectrales en cada dirección, éste se estimará mediante un promedio logarítmico, el cual debido a la dispersión de valores en las frecuencias o periodos, será ponderado o pesado, siendo el peso el valor de la aceleración máxima registrada en cada dirección en la estación La Venta; la ecuación (1) representa lo descrito para este cálculo. Se elige un promedio del tipo pesado debido a que se desea tener en cuenta la aceleración máxima en roca como un

valor de referencia respecto a la respuesta obtenida en el suelo; además, el valor obtenido utilizando el promedio pesado es algo mayor en comparación con un promedio simple.

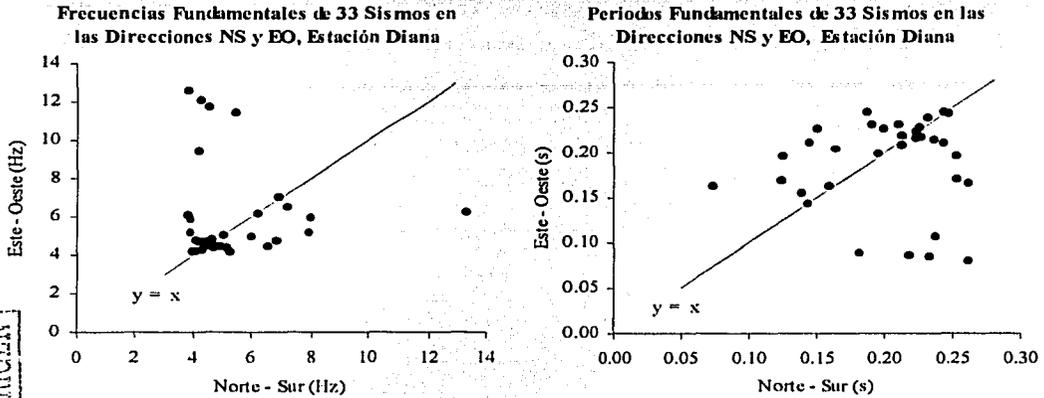


Figura 4.10

$$AMPROM_i = \left(\frac{\sum_{e=1}^n (AmaxVNTA_e) (\log AMP_{ie})}{\sum_{e=1}^n AmaxVNTA_e} \right)^{10} \tag{1}$$

donde:

$AmaxVNTA_e$ = Aceleración máxima registrada en el evento "e" en una dirección en La Venta

AMP_i = Amplificación relativa para una frecuencia "i" del evento "e"

n = Número de eventos.

$AMPROM_i$ = Amplificación relativa promedio de todos los eventos para la frecuencia "i"

La figura 4.11 presenta el promedio logaritmico obtenido para cada dirección, y se incluye también la desviación estándar. Estos promedios presentan un pico que define claramente la máxima amplitud relativa y la frecuencia fundamental asociada a este máximo para cada dirección. Para la NS se tiene una amplitud máxima de 14.2 y una frecuencia fundamental promedio $f_0 = 4.23$ y para la EO una amplitud máxima de 12.4 y una frecuencia fundamental promedio $f_0 = 4.39$. Los periodos fundamentales promedio para estas frecuencias son de 0.24 s. y 0.23 s. respectivamente. Puede observarse cómo la desviación estándar disminuye para el intervalo de frecuencias de 2 a 4 Hz. aproximadamente y también para las frecuencias mayores a 30 Hz.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

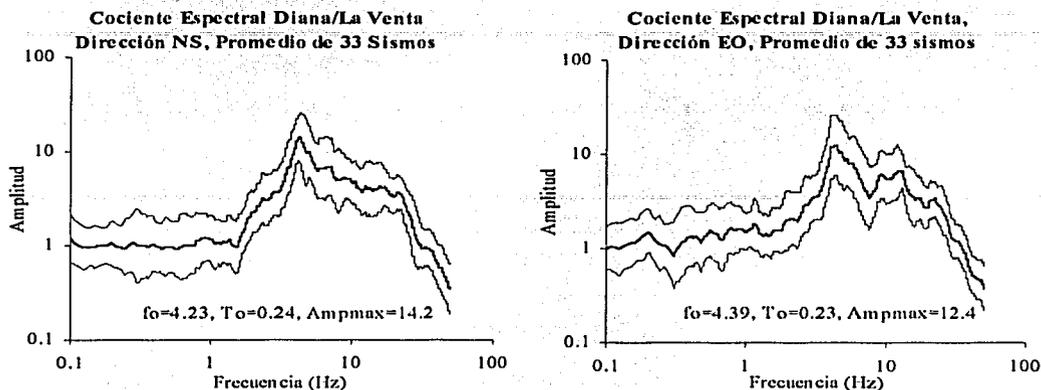


Figura 4.11

La figura 4.12 muestra la superposición de todos los cocientes espectrales obtenidos para cada dirección y el promedio logarítmico que se muestra en línea blanca; se nota que el promedio se ajusta adecuadamente a todos los cocientes espectrales.

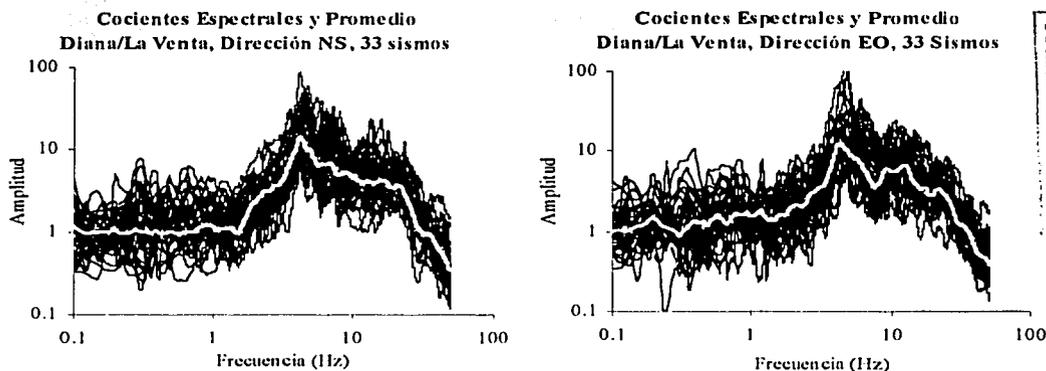


Figura 4.12

4.4.2 COCIENTES ESPECTRALES EN ESTACIONES DIANA Y DIANA POZO

A continuación se repetirá el procedimiento anterior pero aplicado al par de estaciones Diana y Diana Pozo. Al igual que en Diana y La Venta, se obtuvieron 33 cocientes espectrales en la dirección NS y otros 33 en la dirección EO. Las figuras 4.13, 4.14 y 4.15 muestran los cocientes espectrales calculados

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

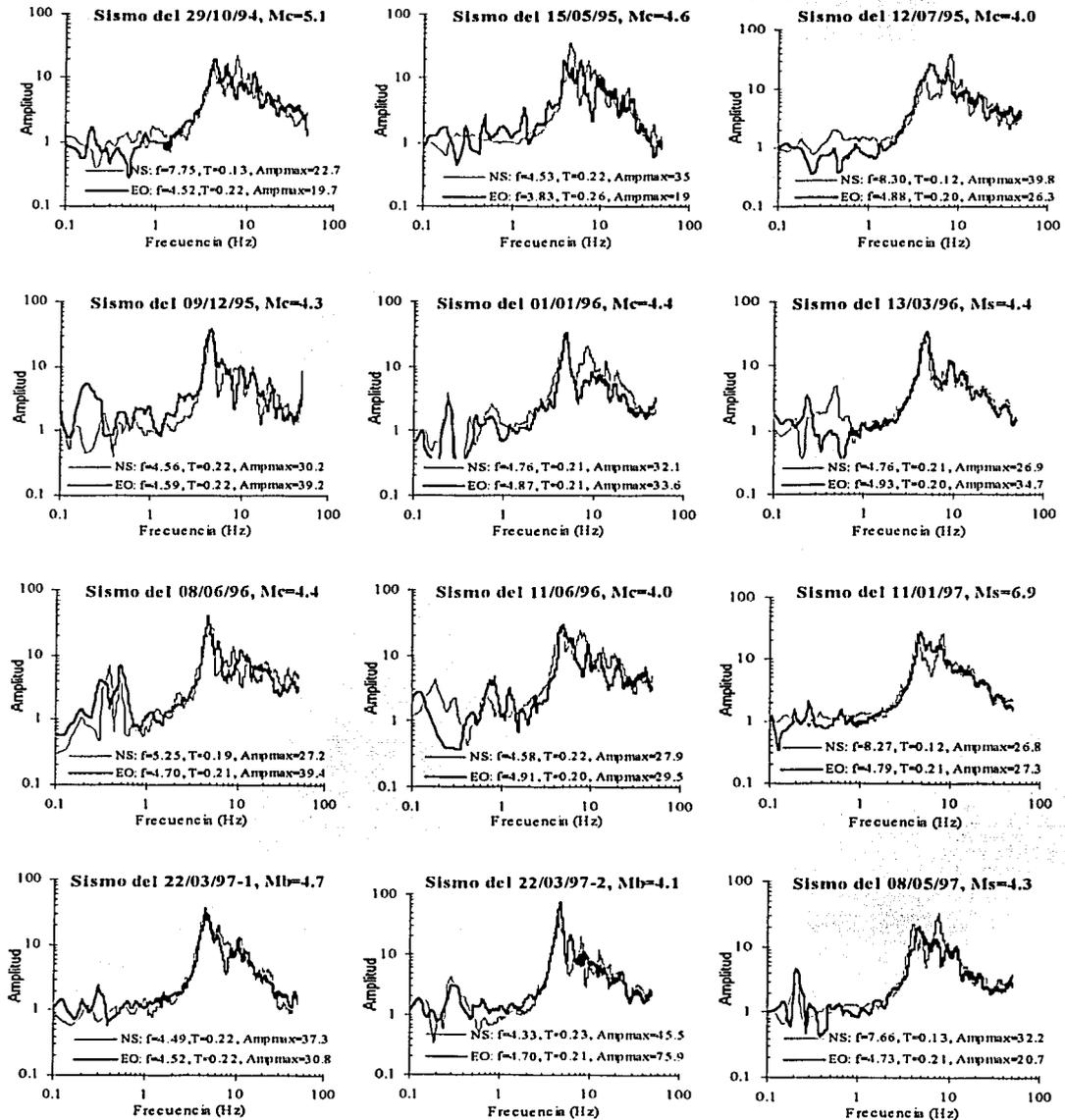


Figura 4.13: Cocientes espectrales entre estaciones Diana y Diana Pozo

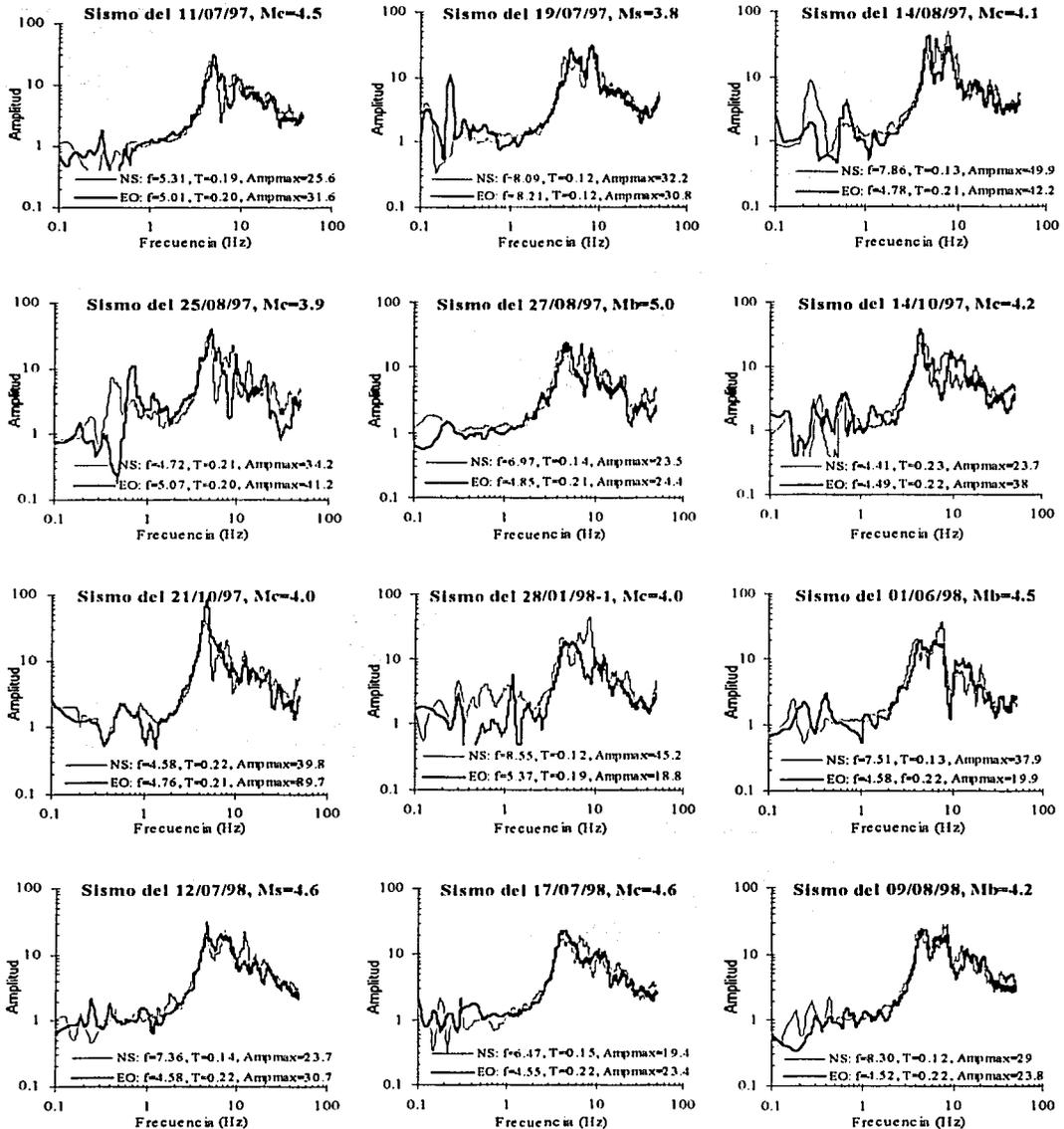


Figura 4.14: Cocientes espectrales entre estaciones Diana y Diana Pozo

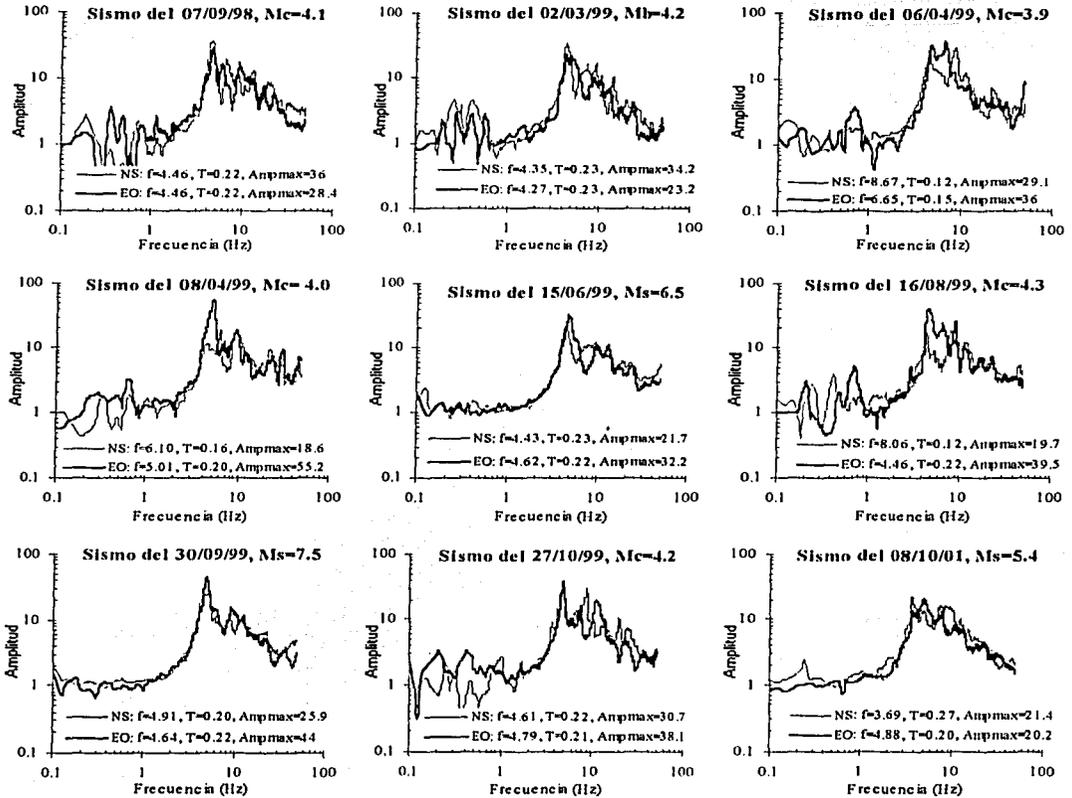


Figura 4.15: Cocientes espectrales entre estaciones Diana y Diana Pozo

para cada evento; nuevamente la línea delgada representa el cociente espectral de aceleración en la dirección NS y la línea gruesa en la dirección EO.

Sólo en 6 de los 33 sismos los periodos en ambas direcciones fueron iguales; estos eventos son 02/03/99 ($T = 0.23$ s.), 09/12/95 ($T = 0.22$ s.), 22/03/97-1 ($T = 0.22$ s.), 07/09/98 ($T = 0.22$ s.), 01/01/96 ($T = 0.21$ s.), 19/07/97 ($T = 0.12$ s.). En otros 7 sismos la variación del periodo en ambas direcciones es de 0.01 s. lo que se podría considerar como un periodo similar y éstos son 13/03/96 ($T_{NS} = 0.21$ s. y $T_{EO} = 0.20$ s.), 11/07/97 ($T_{NS} = 0.19$ s. y $T_{EO} = 0.20$ s.), 25/08/97 ($T_{NS} = 0.21$ s. y $T_{EO} = 0.20$ s.), 14/10/97 ($T_{NS} = 0.23$ s. y $T_{EO} = 0.22$ s.), 21/10/97 ($T_{NS} = 0.22$ s. y $T_{EO} = 0.21$ s.), 15/06/99 ($T_{NS} = 0.23$ s. y $T_{EO} = 0.22$ s.) y

27/10/99 ($T_{NS} = 0.22$ s. y $T_{EO} = 0.21$ s.); en los otros 20 eventos el periodo varía en las dos componentes, de manera similar a la respuesta de Diana y La Venta, con una diferencia mayor de 0.01 s.

En la tabla 4.4 se muestran los valores de frecuencia y periodo fundamentales del suelo así como las amplificaciones relativas máximas respecto a la estación Diana Pozo.

Tabla 4.4: Frecuencias y periodos fundamentales y amplificaciones máximas relativas obtenidas para el suelo de la estación Diana (33 sismos respecto a Diana Pozo)

SISMO	Norte - Sur			Este - Oeste		
	Frecuencia (Hz)	Periodo (Seg.)	Amplitud Max.	Frecuencia (Hz)	Periodo (Seg.)	Amplitud Max.
29/10/94	7.75	0.13	22.7	4.52	0.22	19.7
15/05/95	4.53	0.22	35.0	3.83	0.26	19.0
12/07/95	8.30	0.12	39.8	4.88	0.20	26.3
09/12/95	4.56	0.22	30.2	4.59	0.22	39.2
01/01/96	4.76	0.21	32.1	4.87	0.21	33.6
13/03/96	4.76	0.21	26.9	4.93	0.20	34.7
08/06/96	5.25	0.19	27.2	4.70	0.21	39.4
11/06/96	4.58	0.22	27.9	4.91	0.20	29.5
11/01/97	8.27	0.12	26.8	4.79	0.21	27.3
22/03/97-1	4.49	0.22	37.3	4.52	0.22	30.8
22/03/97-2	4.33	0.23	45.5	4.70	0.21	75.9
08/05/97	7.66	0.13	32.2	4.73	0.21	20.7
11/07/97	5.31	0.19	25.6	5.01	0.20	31.6
19/07/97	8.09	0.12	32.2	8.21	0.12	30.8
14/08/97	7.86	0.13	49.9	4.78	0.21	42.2
25/08/97	4.72	0.21	34.2	5.07	0.20	41.2
27/08/97	6.97	0.14	23.5	4.85	0.21	24.4
14/10/97	4.41	0.23	23.7	4.49	0.22	38.0
21/10/97	4.58	0.22	39.8	4.76	0.21	89.7
28/01/98-1	8.55	0.12	45.2	5.37	0.19	18.8
01/06/98	7.51	0.13	37.9	4.58	0.22	19.9
12/07/98	7.36	0.14	23.7	4.58	0.22	30.7
17/07/98	6.47	0.15	19.4	4.55	0.22	23.4
09/08/98	8.30	0.12	29.0	4.52	0.22	23.8
07/09/98	4.46	0.22	36.0	4.46	0.22	28.4
02/03/99	4.35	0.23	34.2	4.27	0.23	23.2
06/04/99	8.67	0.12	29.1	6.65	0.15	36.0
08/04/99	6.10	0.16	18.6	5.01	0.20	55.2
15/06/99	4.43	0.23	21.7	4.62	0.22	32.2
16/08/99	8.06	0.12	19.7	4.46	0.22	39.5
30/09/99	4.91	0.20	25.9	4.64	0.22	44.0
27/10/99	4.61	0.22	30.7	4.79	0.21	38.1
08/10/01	3.69	0.27	21.4	4.88	0.20	20.2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La forma de los cocientes espectrales es similar a las obtenidas para las estaciones Diana y La Venta, pero con mayor definición: la amplificación presenta picos en el intervalo de frecuencia de 0.1 a 2 Hz. en ambas direcciones; luego hay un crecimiento de la amplificación relativa hasta alcanzar el máximo, en la mayoría de los casos, entre 4 y 5 Hz. después la amplitud relativa decrece para luego alcanzar otro pico espectral, en algunos casos alrededor de los 10 Hz. para luego decrecer nuevamente hasta los 50 Hz.

En 20 eventos se observa un pico espectral máximo que define la frecuencia predominante en ambas direcciones, coincidiendo en forma y diferenciándose sólo en la posición exacta de esta frecuencia. En ningún sismo se obtienen valores iguales de amplificación relativa máxima en ambas direcciones, en 9 la diferencia entre ellas es de hasta cinco unidades, lo que podríamos considerar como una respuesta similar en ambas direcciones; el resto de eventos presenta una diferencia mayor:

La figura 4.16 muestra la superposición de todos los cocientes espectrales obtenidos para cada dirección. La forma descrita anteriormente para los cocientes espectrales se confirma en estas figuras. Se debe destacar que la diferencia con la superposición hecha para las estaciones Diana y La Venta está en la notoria disminución de la dispersión de valores de amplificación entre los 2 y 5 Hz. en ambas direcciones.

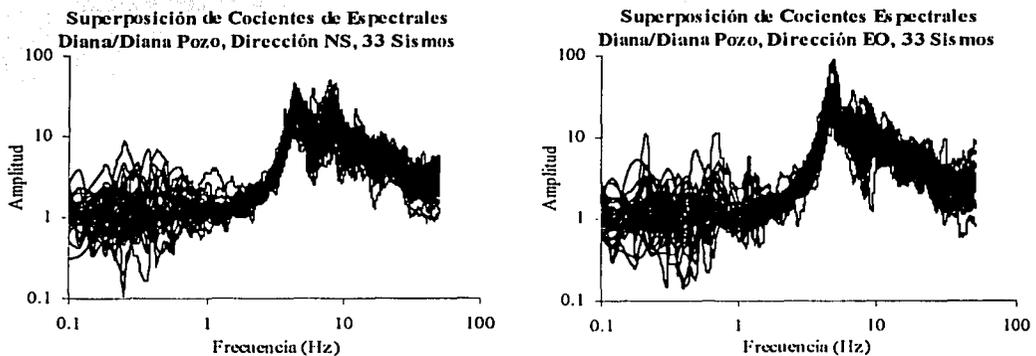


Figura 4.16

La figura 4.17 muestra las frecuencias y los periodos fundamentales obtenidos de los cocientes espectrales para los 33 eventos en cada dirección, en las abscisas el valor de la frecuencia y periodo en la dirección NS y en las ordenadas en la dirección EO. Al igual que se observó en las estaciones Diana y La Venta, se identifica una dispersión en los valores de frecuencia y periodo pero esta vez con una tendencia: para la mayoría de eventos se tiene que para una frecuencia entre 4 y 6 Hz. (0.20 y 0.24 s. en periodo) en la dirección EO la frecuencia en la NS varía entre 4 y 9 Hz. (0.11 y 0.24 s. en periodo), hay una concentración significativa de valores en la frecuencia para un intervalo de la frecuencia entre 4 y 6 Hz. (0.20 y 0.24 s. en periodo) en ambas direcciones así como para la frecuencia entre 7 y 9 Hz. (0.11 y 0.14 s. en periodo) en la dirección NS y 4 y 5 Hz. (0.20 y 0.23 s. en periodo) en la dirección EO.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

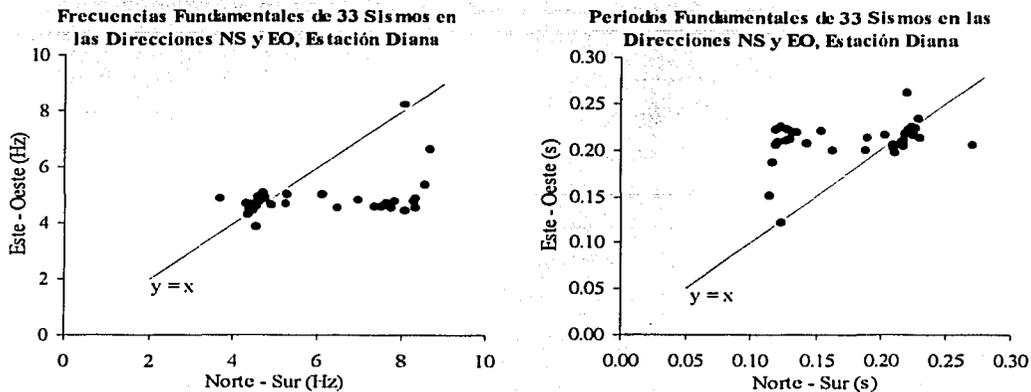


Figura 4.17

Para obtener un cociente espectral promedio que represente a los obtenidos en cada dirección, se usa nuevamente el promedio logarítmico descrito anteriormente y que se define en la ecuación (1). Esta vez en lugar de usar como el peso la aceleración máxima registrada en La Venta, se utiliza la aceleración máxima registrada en Diana Pozo. La figura 4.18 muestra los cocientes espectrales promedio obtenidos.

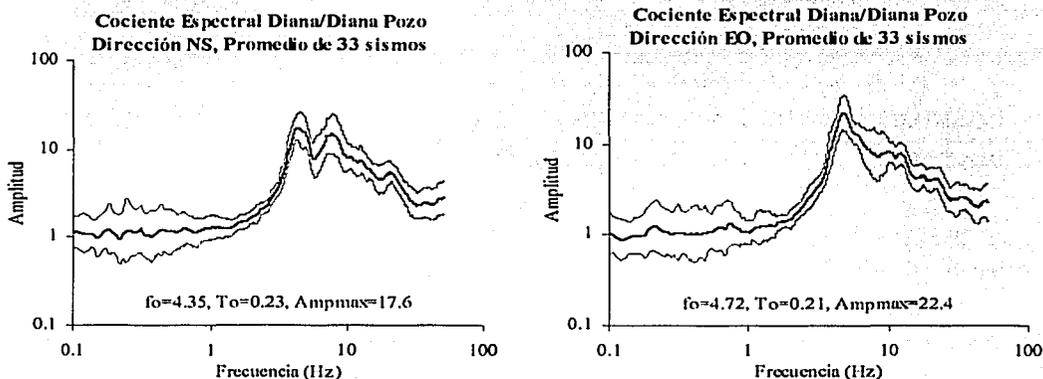


Figura 4.18

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Lo primero que se puede notar es cómo la desviación estándar de la amplificación relativa disminuye respecto a la obtenida para Diana y La Venta, sobre todo en el intervalo de frecuencia entre 2 y 5 Hz. Luego el promedio refleja claramente otro máximo relativo entre 7 y 9 Hz., siendo mas pronunciado en la dirección NS. Los máximos relativos o picos espectrales definen los siguientes valores: en la dirección NS una amplitud relativa máxima de 17.6, una frecuencia fundamental promedio $f_0 = 4.35$ y un periodo fundamental promedio $T_0 = 0.23$ s.; en la dirección EO una amplitud relativa máxima de 22.4, una frecuencia fundamental promedio $f_0 = 4.72$ y un periodo fundamental promedio $T_0 = 0.21$ s. La Figura 3.19 presenta la superposición en cada dirección de todos los cocientes espectrales y el promedio logarítmico que se muestra en línea blanca, el cual se ajusta adecuadamente al total de cocientes.

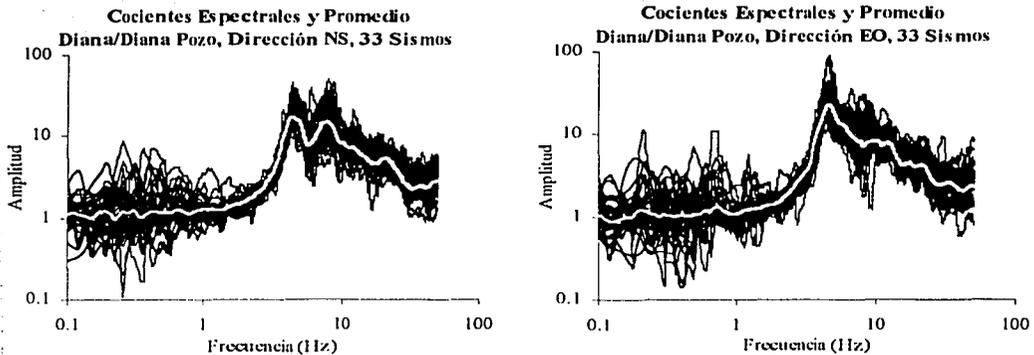


Figura 4.19

4.4.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS PARES DE ESTACIONES DIANA/LA VENTA Y DIANA/DIANA POZO

La figura 4.20 muestra para cada dirección la superposición de los cocientes espectrales promedio obtenidos para Diana/La Venta y Diana/Diana Pozo.

De esta superposición, lo primero que se observa es la mayor amplificación relativa, en ambas direcciones, del cociente espectral Diana/Diana Pozo comparada con el de Diana/La Venta a partir de aproximadamente 4 Hz. En la dirección NS de 0.1 a 1.9 Hz., la amplificación relativa Diana/Diana Pozo es ligeramente mayor que la Diana/La Venta, de 1.9 a 3.2 Hz. es ligeramente menor y de 3.2 a 4.2 Hz. son prácticamente iguales. En la dirección EO la amplificación relativa Diana/La Venta es ligeramente menor

entre 0.1 y 2.5 Hz., de 2.5 a 4.1 Hz. estas ampliificaciones son iguales. A partir de los 4 Hz. aproximadamente las ampliificaciones relativas de Diana/Diana Pozo se mantienen mayores a las de Diana/La Venta en ambas direcciones, por un factor que varía dependiendo de la frecuencia; esta variación se acorta aproximadamente en 20 Hz. en la dirección NS y en 30 Hz. en la EO, para después crecer nuevamente a partir de estas frecuencias.

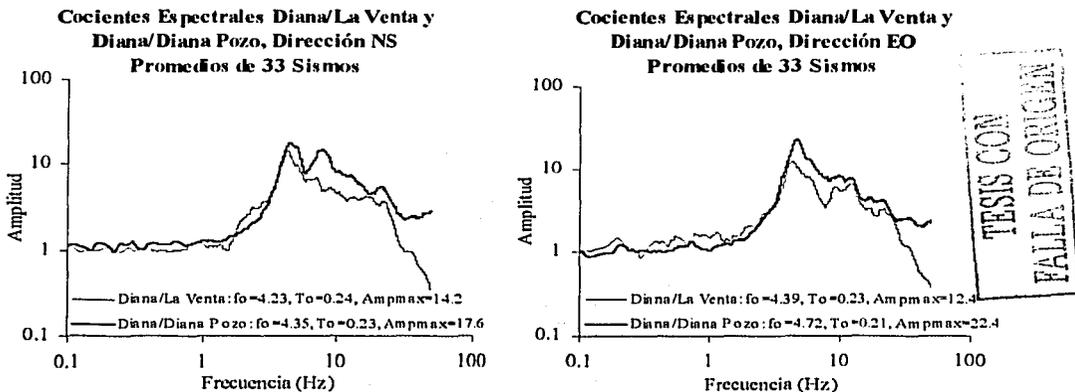


Figura 4.20

La figura 4.21 presenta los espectros de amplitudes de Fourier de aceleración en ambas direcciones de los sismos 11/06/96, 22/03/97-2, 16/08/99 y 08/10/01 correspondientes a los registros de las estaciones La Venta y Diana Pozo, o sea las estaciones utilizadas como referencia. Estos sismos tienen diferente acimut, magnitud y distancia epicentral.

En esta figura podemos observar cómo varían las amplitudes de estos espectros de Fourier en estos cuatro sismos registrados en roca, en los sismos 11/06/96 y 16/08/99, las amplitudes de la estación La Venta son mayores a las de la estación Diana Pozo en ambas direcciones. Para el primer sismo esto se presenta a partir de 1 Hz. y en el segundo entre los 3 y 4 Hz.; para el sismo 22/03/97-2 las amplitudes en algunas bandas de frecuencia son iguales y en otras la amplitud de la estación Diana Pozo es algo mayor. Por último para el sismo 08/10/01, en la dirección NS las amplitudes son similares salvo en el intervalo de frecuencia de 3 a 10 Hz. donde las amplitudes de la estación La Venta son mayores; y en la dirección EO también son similares menos en el intervalo de 1 a 4 Hz. donde la amplitud de la estación Diana Pozo es mayor.

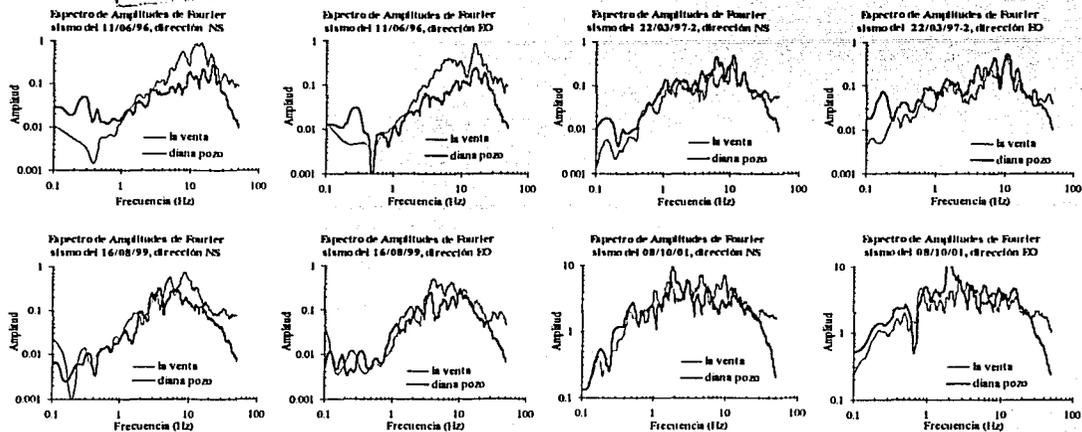


Figura 4.21

Estos espectros correspondientes a 4 sismos son un ejemplo de los valores de amplitudes de Fourier obtenidos en estas estaciones de referencia; los promedios de la figura 4.20 nos indican que mayoritariamente han primado las amplitudes mayores en la estación La Venta a las de la Diana Pozo, sobre todo en la alta frecuencia; motivando que en promedio las ampliificaciones relativas de los cocientes espectrales de la estación Diana Pozo sean mayores a las de La Venta, a partir aproximadamente de 4 Hz.. La diferencia en las amplitudes de los espectros de amplitudes de Fourier en estas estaciones se debe a que en La Venta (afloramiento de roca basal) se tiene un campo incidente y un campo reflejado de ondas (efectos de superficie libre) además de baja impedancia debido al intemperismo, provocando que tenga amplitudes mayores a las de Diana Pozo (roca basal) donde se tiene un campo difractado de ondas (producto de una reflexión y una refracción); esta diferencia es observada sobre todo en alta frecuencia.

Steidl et al (1996), obtuvieron resultados similares para estaciones de referencia en superficie rocosa y en pozo con fondo rocoso con profundidad de 300 m.; los espectros de amplitudes de Fourier de aceleración de estas estaciones presentan características similares a las obtenidas en La Venta y Diana Pozo.

Debido a esta diferencia de amplitud de los espectros de Fourier, los cocientes espectrales que se obtienen de usar como estación de referencia a La Venta presentan una subestimación de la ampliificación relativa para frecuencias altas, posiblemente partir de aproximadamente 4 Hz., según lo observado de los cocientes espectrales promedio de la figura 4.20.

Respecto a las frecuencias y periodos promedio fundamentales, las frecuencias son mayores en Diana/Diana Pozo que en Diana/La Venta para ambas direcciones, siendo las diferencias de 0.12 Hz. en la dirección NS y de 0.33 Hz. en la EO, variaciones que no son grandes y que muestran que estos valores de frecuencia y periodos obtenidos de cada par de estaciones son representativos del suelo de la estación Diana.

4.4.4 ANÁLISIS POR REGIONES

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Se realizará un análisis de los resultados buscando alguna relación de la respuesta del suelo en función del acimut, profundidad y magnitud de los sismos. Para ello se distribuirá los sismos en relación a su ubicación respecto a la estación Diana. La figura 4.20 muestra 8 regiones definidas por los puntos cardinales, o sea NNE, ENE, ESE, SSE, SSO, OSO, ONO y NNO, regiones del 1 al 8 respectivamente.

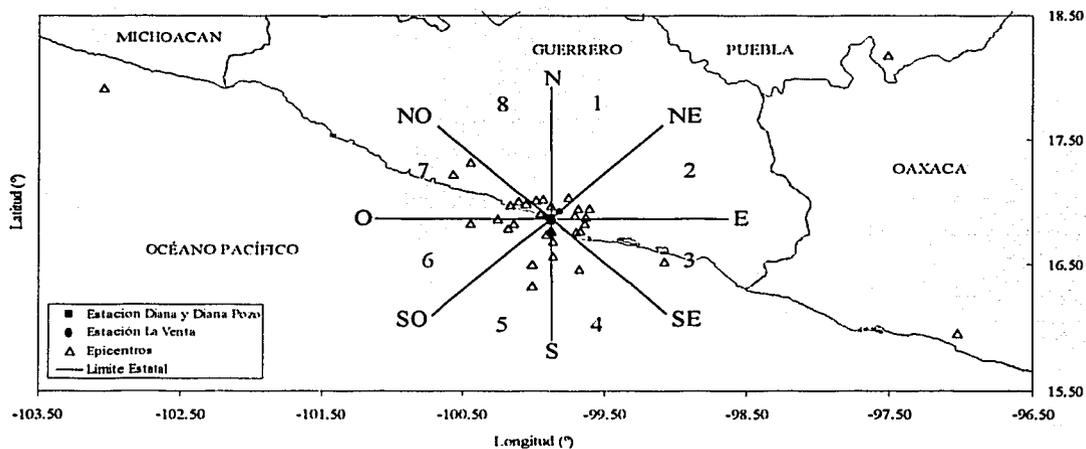


Figura 4.22: Distribución por regiones de 33 sismos registrados simultáneamente en estaciones Diana, Diana Pozo y La Venta

4.4.4.1 Estaciones Diana y La Venta

Las figuras 4.23 al 4.27 muestran a la izquierda la superposición de los cocientes espectrales para cada región y a la derecha su respectivo cociente espectral promedio y desviación estándar.

Las figuras 4.28 y 4.29 muestran un corte transversal a las regiones, de manera de poder visualizar la distribución en profundidad y distancia epicentral de los sismos respecto a la estación Diana, los cuales

se señalan por su fecha y magnitud; se muestran junto a cada sismo los resultados obtenidos de amplificaciones máximas relativas (A_{ns} y A_{co}) y periodos fundamentales (T_{ns} y T_{co}) en cada dirección, esta figura permite analizar si la ubicación de los sismos y su magnitud influyen en la respuesta obtenida en cada región.

Región 1

La región 1 (figuras 4.23 y 4.28), presenta sólo un sismo, el 22/03/97-1, con distancia epicentral de 23.4 Km. y profundidad de 30 Km.; se muestra el cociente espectral de cada dirección, que indican un periodo similar de $T = 0.23$ s., la amplificación relativa máxima es mayor en la dirección NS por un factor de 2.5.

Regiones 2 y 3

Las figuras 4.23 y 4.24 muestran cocientes espectrales muy semejantes, diferenciándose en que los promedios de la región 2 presentan un segundo pico espectral después del máximo, más pronunciado que en la región 3. Los valores promedio máximo de amplificación relativa y periodo de cada región son muy cercanos para cada dirección. Las desviaciones estándar son menores en el intervalo de 2 a 5 Hz.

La región 2 (figura 4.28) presenta 5 sismos que se encuentran a una profundidad de entre 20 y 70 Km., el más superficial 09/12/95 tiene la mayor amplificación siendo de 42.2 veces en la dirección NS; los demás sismos tienen una diferencia entre sus amplificaciones relativas máximas de hasta 5.2 veces. Por lo planteado anteriormente podemos considerarlos como respuestas similares para cada dirección; cuatro eventos presentan periodos iguales en ambas direcciones (incluye al 15/06/99 que se diferencian sólo en 0.01 s.), los periodos del 27/10/99 se diferencian en 0.06 s.; los periodos varían de 0.14 s a 0.23 s.

La región 3 (figura 4.28) presenta también 5 sismos con profundidades entre los 5 y 20 Km.; los dos más superficiales y el más alejado tienen una diferencia entre sus amplificaciones relativas máximas de hasta 4.6 veces, considerándolos como respuestas similares para cada dirección; las amplificaciones de los otros dos sismos se diferencian en 15.5 veces, y tienen la mayor en la dirección NS. Similar a la región 2, en cuatro eventos los periodos en ambas direcciones son iguales; los valores del 11/07/097 se diferencian en 0.06 s., pero son más estables, variando de 0.19 s. a 0.24 s.

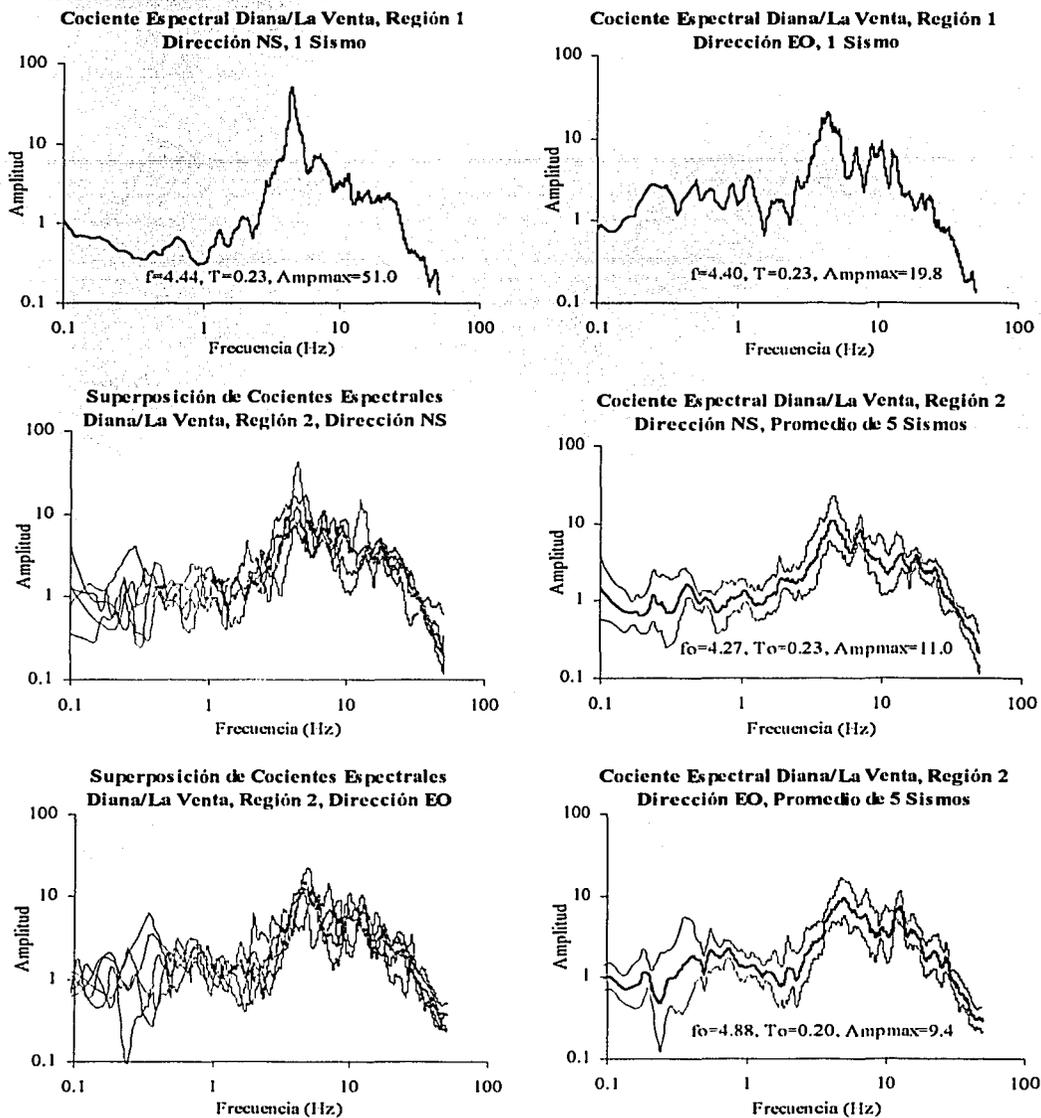


Figura 4.23: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en regiones 1 y 2.

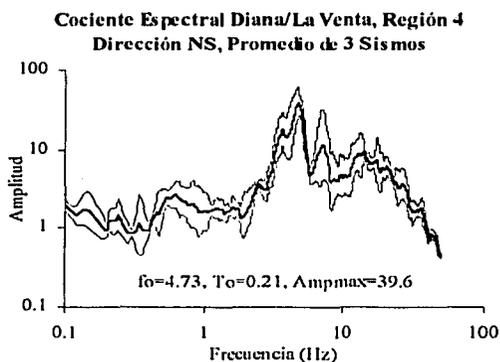
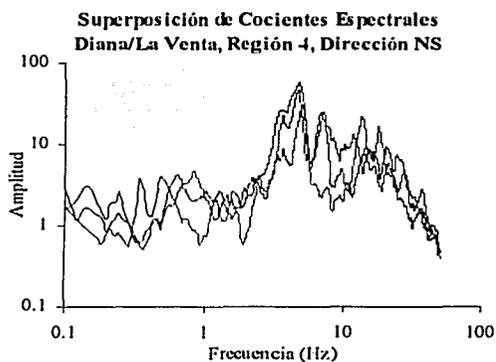
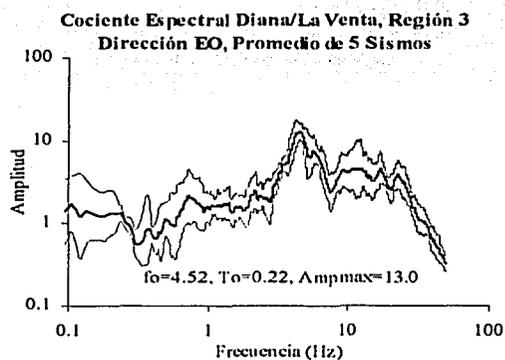
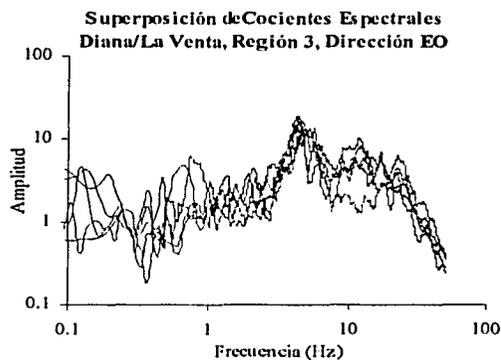
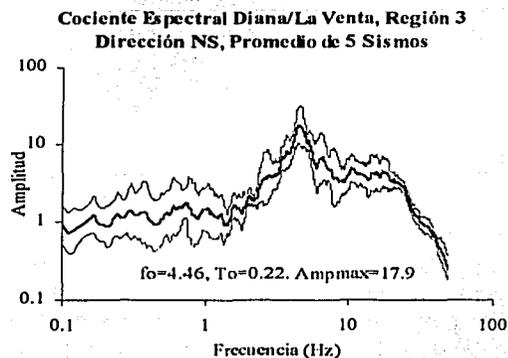
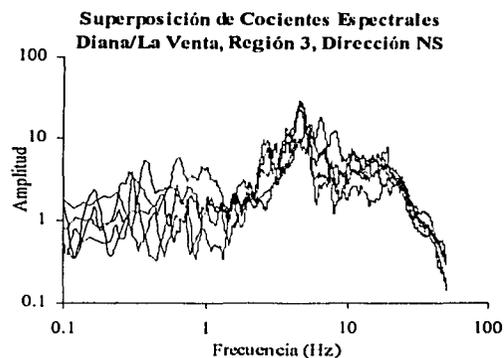


Figura 4.24: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en regiones 3 y 4.

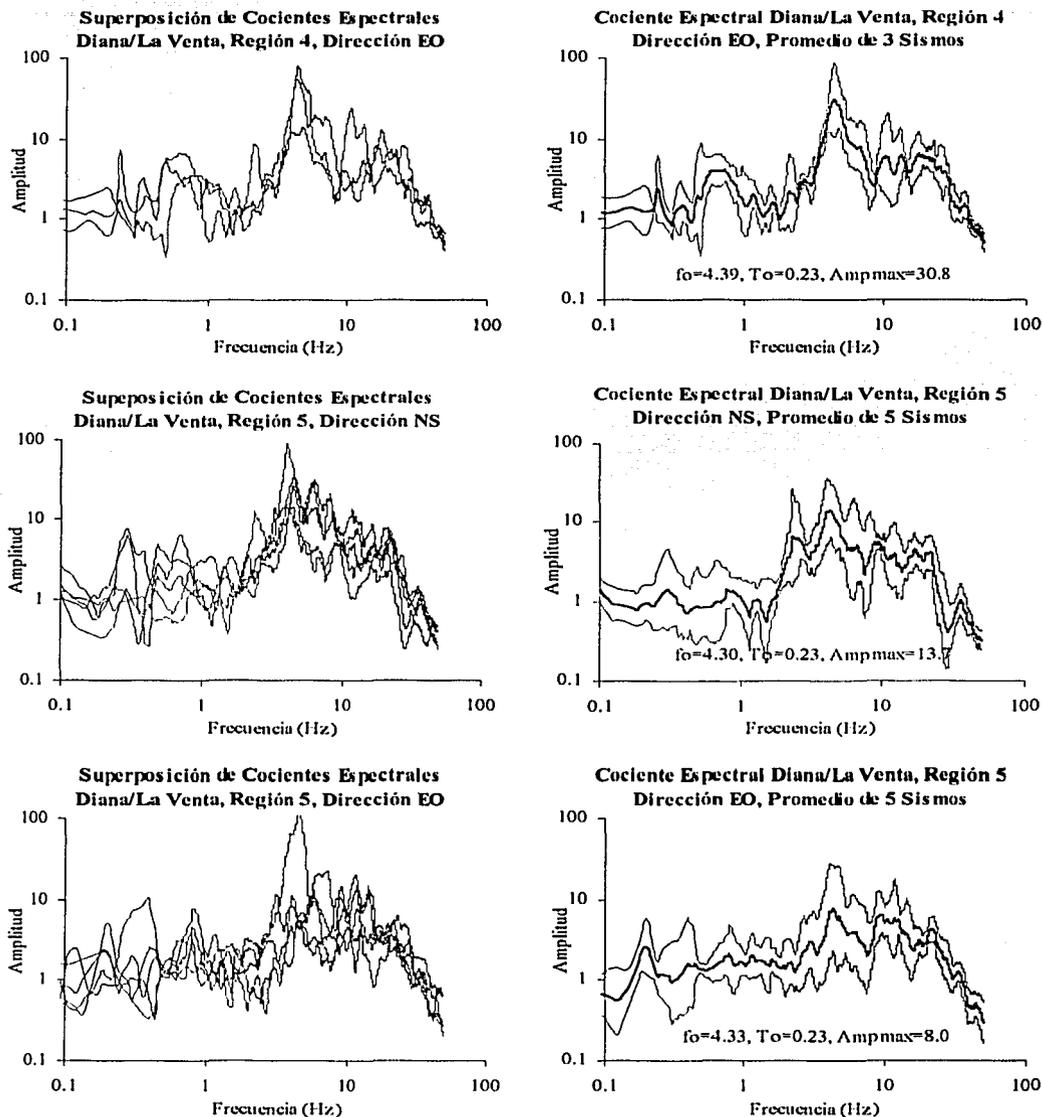


Figura 4.25: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en regiones 4 y 5.

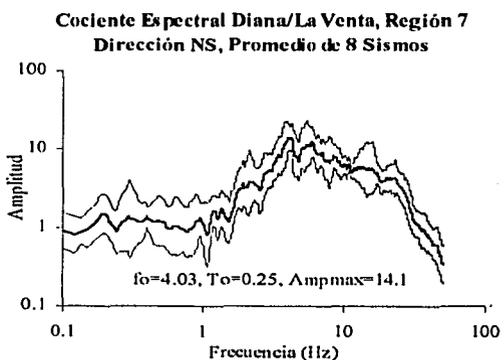
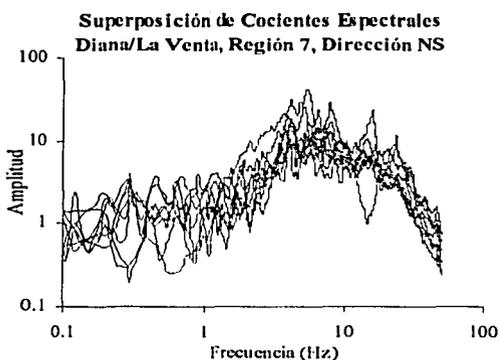
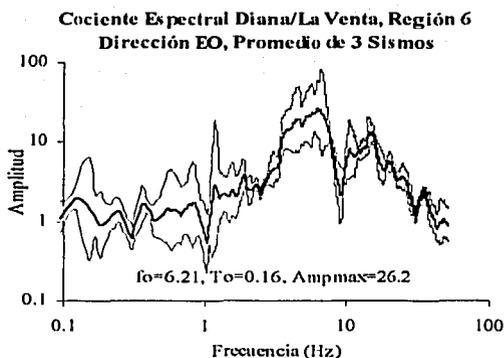
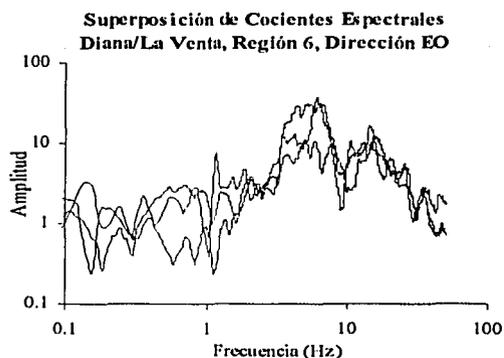
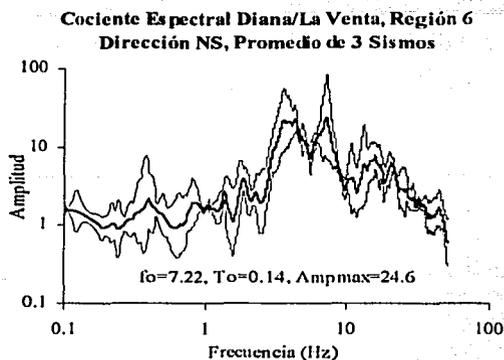
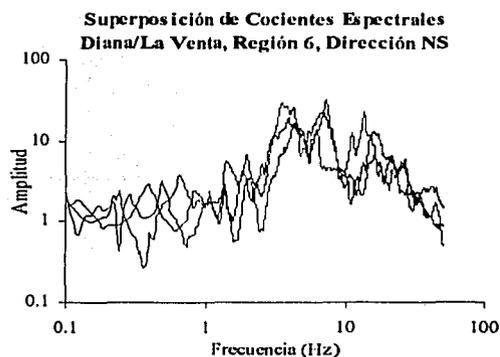


Figura 4.26: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en regiones 6 y 7.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

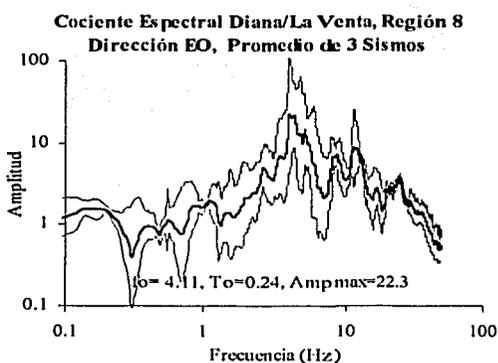
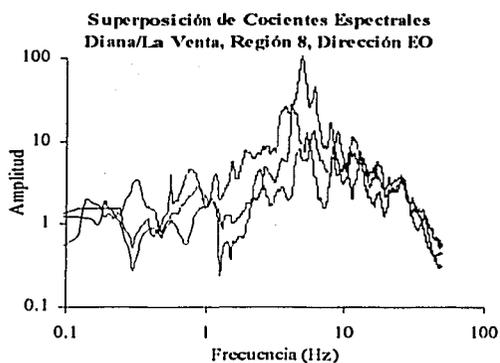
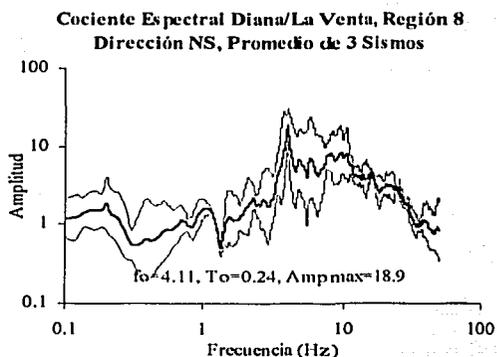
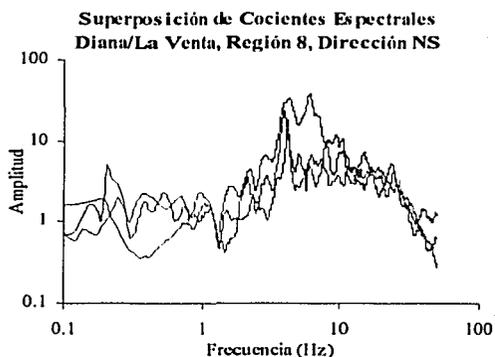
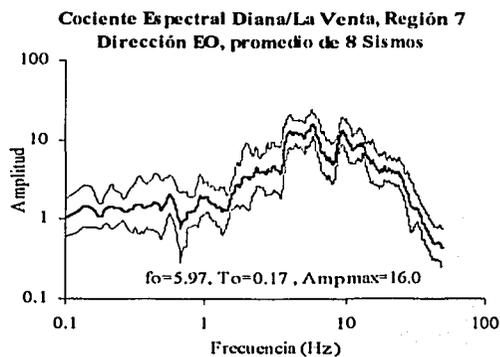
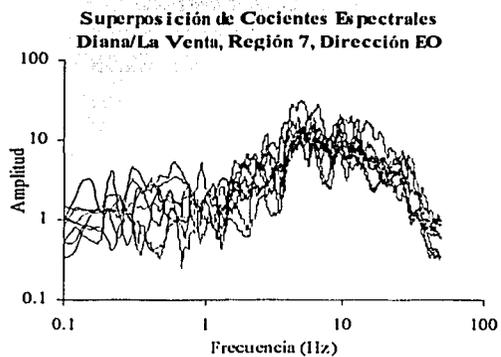


Figura 4.27: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en regiones 7 y 8.

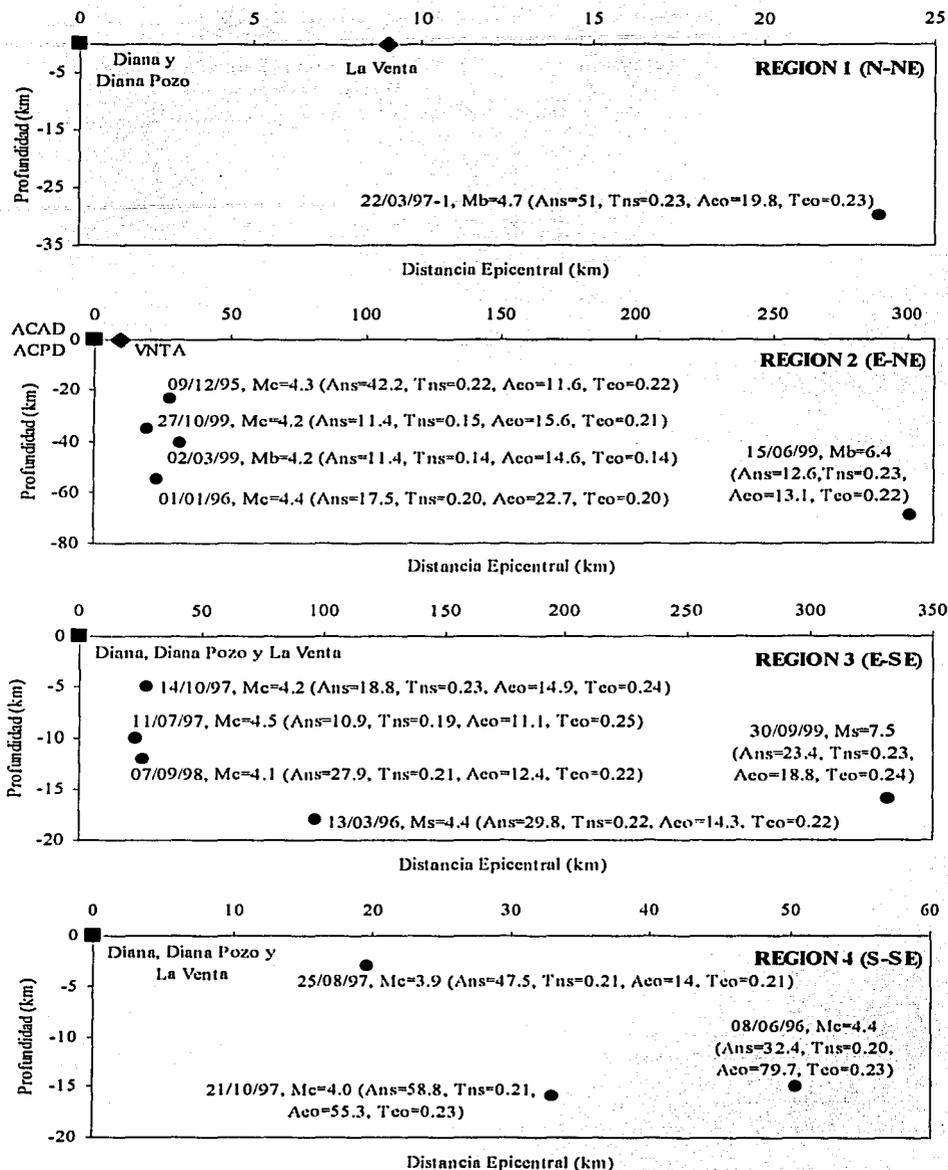


Figura 4.28: Corte Transversal de regiones 1 al 4, estaciones Diana y La Venta

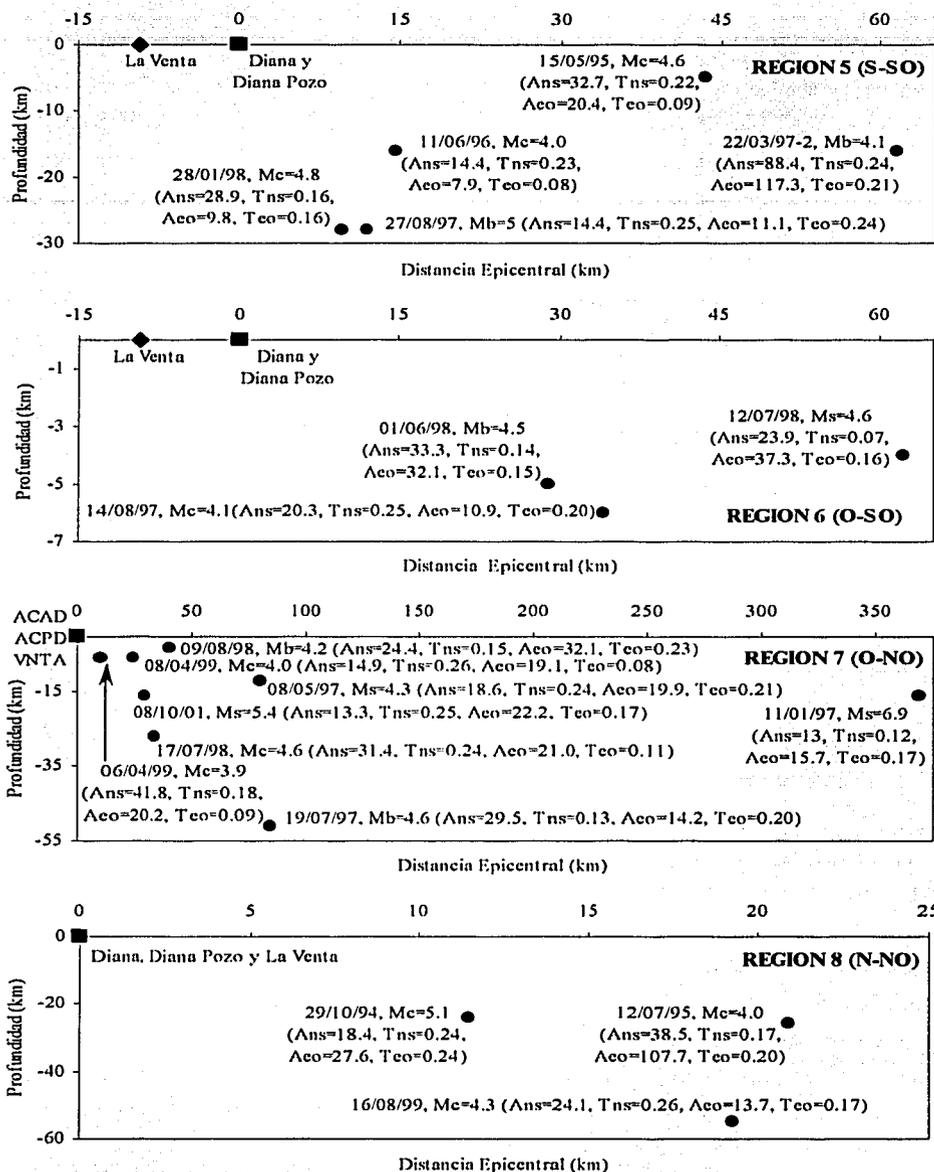


Figura: 4.29: Corte transversal de regiones 5 al 8, estaciones Diana y La Venta

Región 4

Se tienen 3 sismos muy superficiales, con profundidades entre los 3 y 16 Km. La superposición de los cocientes espectrales y los cocientes promedio (figuras 4.24 y 4.25) indican semejanza con los de las regiones 2 y 3, pero con amplificaciones relativas máximas mayores; los valores de periodos fundamentales promedio también son cercanos a estas regiones 2 y 3. La desviación estándar también es menor en el intervalo de 2 a 5 Hz.

Las amplificaciones del sismo 25/08/97, que es el más superficial (figura 4.28), se diferencian en 33.5 veces siendo mayor en la dirección NS; las del sismo más profundo 21/10/97 son similares y por último el sismo más alejado presenta una diferencia entre las amplificaciones de 47.3 veces siendo mayor en la dirección EO. Este cambio en la dirección respecto al sismo más superficial podría deberse a la influencia de la distancia epicentral. Los periodos muestran valores más estables, variando sólo de 0.21 a 0.23 s., similares a las regiones anteriores.

Región 5

Esta región tiene 5 sismos con profundidades de entre 5 y 28 Km. Observando la figura 4.25, los cocientes espectrales muestran picos máximos y sus respectivas frecuencias de valores variados, resaltando por ser mayores en ambas direcciones las amplificaciones del sismo del 22/03/97-2. El promedio de los cocientes presenta una forma diferente a las anteriores regiones, mostrando un pico espectral máximo claro en la dirección NS, pero muy ambiguo en la EO en donde podría interpretarse la respuesta en amplificación como una banda en el intervalo de 2 a 25 Hz. en la que hay varios picos de respuesta. La desviación estándar no varía mucho, manteniendo un valor casi constante, sólo en la dirección NS se reduce en un intervalo pequeño cercano a los 2 Hz.

La figura 4.29, presenta 4 sismos que tienen una distancia epicentral menor a 45 Km.; todos ellos tienen la amplificación relativa máxima mayor en la dirección NS, aunque el sismo del 27/08/97 las tiene similares en ambas direcciones diferenciándose sólo en 3.3 veces; el sismo del 22/03/97-2 tiene las mayores amplificaciones de esta región, siendo la mayor en la dirección EO, a pesar de ser el más alejado y tener magnitud menor que algunos de los otros sismos. Posiblemente la distancia epicentral influye en el cambio de la dirección de la amplificación mayor. Los periodos no presentan estabilidad siendo más variable en la dirección EO; los valores están en un intervalo de 0.08 s. a 0.25 s.

Región 6

La figura 4.26 muestra la superposición de cocientes espectrales que corresponden a 3 sismos, los más superficiales de todas las regiones, ya que se encuentran entre los 4 y 6 Km. de profundidad; las formas de estos cocientes son totalmente diferentes a las de las anteriores regiones; tanto estos cocientes como los respectivos promedios presentan, en la dirección NS, primero una banda pequeña de amplificación espectral y después un pico espectral, ambos de valores cercanos; en la dirección EO sólo una banda de amplificación espectral creciente. La desviación estándar es menor en la dirección EO en los intervalos de 2 a 4 Hz. y a partir de los 10 Hz.

En la figura 4.29, el sismo del 01/06/98 presenta amplificaciones relativas máximas similares, el 14/08/97 tiene la amplificación mayor en la dirección NS y el 12/07/98, que es el más alejado, presenta la mayor amplificación en la EO. Como en la región anterior, probablemente la distancia epicentral influye en el cambio de dirección de la mayor amplificación relativa. El periodo no es estable, variando de 0.07 s. a 0.25 s.

Región 7

Esta región tiene 8 sismos, la mayor cantidad en todas las regiones. Las figuras 4.26 y 4.27 muestran que los cocientes espectrales promedio se asemejan a los de la región 6, pero con menores amplificaciones relativas máximas; en la dirección NS se tiene primero una pequeñísima banda de amplificación y después un pequeño pico espectral sin buena definición, descripción parecida a la de la región anterior; en la dirección EO hay una banda de amplificación que se distingue como respuesta, con una forma creciente que finaliza en un pequeño pico espectral, similar a la anterior región en esta dirección. La desviación estándar es casi constante, siendo algo menor en la alta frecuencia.

De la figura 4.29, se interpreta que los sismos 08/04/99, 08/05/97 y 11/01/97 tienen una respuesta similar de amplificación relativa máxima en ambas direcciones, debido a que la diferencia entre ellas es menor de 5 veces. Los sismos ubicados hasta los 16 Km. de profundidad, a excepción del 06/04/99, presentan en la dirección EO mayor amplificación relativa máxima, cambiando a la dirección NS para los sismos con profundidad a partir de los 27 Km. Posiblemente la profundidad influye en la tendencia de la dirección para la mayor amplitud. Los periodos no muestran estabilidad, variando de 0.08 s. a 0.26 s.

Región 8

Presenta 3 sismos (figura 4.27); la superposición de los cocientes espectrales indica, respecto a la forma, mayor semejanza en la dirección EO; en la NS el sismo 12/07/95 es diferente por tener dos picos espectrales y mayores amplificaciones entre los 2 y 8 Hz. Los cocientes promedio presentan valores de amplificación máxima cercanas en ambas direcciones; las frecuencias y periodos fundamentales promedio son iguales. La forma de los cocientes promedio se asemeja a la del evento de la región 1 y a los promedios de las regiones 2 al 4. La desviación estándar disminuye a partir de los 10 Hz.

La figura 4.29 muestra para esta región que los dos eventos más superficiales (29/10/94 y 12/07/95) presentan mayores amplificaciones relativas máximas en la dirección EO; ambos tienen la misma profundidad, aunque el 12/07/95 presenta mayores amplificaciones a pesar de tener mayor distancia epicentral y menor magnitud. El sismo del 16/08/99, con mayor profundidad, tiene la mayor amplificación en la dirección NS. El periodo en esta región varía de 0.17 a 0.26 s. Similar a la anterior región, es probable que la profundidad influya en la tendencia de la dirección para la mayor amplitud.

La tabla 4.5 muestra en resumen los valores de frecuencia y periodo fundamental, así como de amplificación relativa máxima, para cada evento sísmico y los promedios de cada región.

Comparación de la desviación estándar total y el cociente espectral promedio de cada región

Otra forma de determinar si hay influencia del acimut en la respuesta del suelo es superponer la desviación estándar total (de los 33 sismos) con el cociente espectral promedio de cada región. Si éste cociente se encuentra dentro de los límites de la desviación, los sismos de esa región presentan cocientes con características similares a las del promedio total, o sea que no habría influencia del acimut; lo contrario significaría que tienen cocientes diferentes por efecto del acimut. Las figuras 4.30 al 4.32 muestran las superposiciones, en línea delgada la desviación estándar total y la gruesa el cociente promedio regional.

De la figura 4.30: los cocientes espectrales de la región 3 se ajustan adecuadamente dentro de la desviación estándar total. El cociente de la región 1 pertenece al sismo del 22/03/97-1, en varios intervalos de frecuencia supera o bordea el límite superior o se ubica por debajo o bordea del límite inferior de la desviación estándar, esto en ambas direcciones.

En la región 2, dirección NS, el cociente se ubica ajustadamente dentro de la desviación estándar; en la EO supera el límite inferior en 0.2, 1.5 y 2 Hz., y luego lo bordea a partir de 20 Hz.

Tabla 4.5: Frecuencias y periodos fundamentales y amplificaciones relativas máximas obtenidas para cada sismo y región en la estación Diana (33 sismos respecto a La Venta)

SISMO	Norte Sur				Este Oeste			
	Frecuencia (Hz)	Periodo (Seg)	Amp. Rel. Max.	Promedio	Frecuencia (Hz)	Periodo (Seg)	Amp. Rel. Max.	Promedio
Región 1 (N-NE)								
22/03/97-1	4.44	0.23	51.0		4.40	0.23	19.8	
Región 2 (NE-E)								
09/12/95	4.49	0.22	42.2	fo=4.27, To=0.23 Ampmax=11.0	4.64	0.22	11.6	fo=4.88, To=0.20 Ampmax=9.4
01/01/96	5.08	0.20	17.5		5.02	0.20	22.7	
02/03/99	6.93	0.14	11.4		7.03	0.14	14.6	
15/06/99	4.40	0.23	12.6		4.62	0.22	13.1	
27/10/99	6.88	0.15	11.4		4.75	0.21	15.6	
Región 3 (E-SE)								
13/03/96	4.47	0.22	29.8	fo=4.46, To=0.22 Ampmax=17.9	4.50	0.22	14.3	fo=4.52, To=0.22 Ampmax=13.0
11/07/97	5.31	0.19	10.9		4.00	0.25	11.1	
14/10/97	4.33	0.23	18.8		4.11	0.24	14.9	
07/09/98	4.68	0.21	27.9		4.58	0.22	12.4	
30/09/99	4.21	0.23	23.4		4.21	0.24	18.8	
Región 4 (SE-S)								
08/06/96	4.99	0.20	32.4	fo=4.73, To=0.21 Ampmax=39.6	4.44	0.23	79.7	fo=4.39, To=0.23 Ampmax=30.8
25/08/97	4.68	0.21	47.5		4.82	0.21	14.0	
21/10/97	4.73	0.21	58.8		4.35	0.23	55.3	
Región 5 (S-SO)								
15/05/95	4.59	0.22	32.7	fo=4.30, To=0.23 Ampmax=13.7	11.72	0.09	20.4	fo=4.33, To=0.23 Ampmax=8.0
11/06/96	4.30	0.23	14.4		12.10	0.08	7.9	
22/03/97-2	4.11	0.24	88.4		4.75	0.21	117.3	
27/08/97	4.03	0.25	14.4		4.12	0.24	11.1	
28/01/98	6.26	0.16	28.9		6.15	0.16	9.8	
Región 6 (SO-O)								
14/08/97	3.95	0.25	20.3	fo=7.22, To=0.14 Ampmax=24.6	5.13	0.20	10.9	fo=6.21, To=0.16 Ampmax=26.2
01/06/98	7.22	0.14	33.3		6.50	0.15	32.1	
12/07/98	13.38	0.07	23.9		6.18	0.16	37.3	
Región 7 (O-NO)								
11/01/97	8.01	0.12	13.0	fo=4.03, To=0.25 Ampmax=14.1	5.94	0.17	15.7	fo=5.97, To=0.17 Ampmax=16.0
08/05/97	4.23	0.24	18.6		4.67	0.21	19.9	
19/07/97	7.97	0.13	29.5		5.13	0.20	14.2	
17/07/98	4.21	0.24	31.4		9.46	0.11	21.0	
09/08/98	6.59	0.15	24.4		4.44	0.23	32.1	
06/04/99	5.49	0.18	41.8		11.40	0.09	20.2	
08/04/99	3.82	0.26	14.9		12.60	0.08	19.1	
08/10/01	3.94	0.25	13.3		5.89	0.17	22.2	
Región 8 (NO-N)								
29/10/94	4.11	0.24	18.4	fo=4.11, To=0.24 Ampmax=18.9	4.11	0.24	27.6	fo=4.11, To=0.24 Ampmax=22.3
12/07/95	6.06	0.17	38.5		4.93	0.20	107.7	
16/08/99	3.82	0.26	24.1		5.89	0.17	13.7	

De la figura 4.31: en la región 5 los cocientes se ubican de manera ajustada a los límites de la desviación estándar. En las regiones 4 y 6, para ciertos intervalos de frecuencia, hay picos o bandas de amplificación que supera el límite superior o se encuentra por debajo del límite inferior de la desviación. Se resalta los picos espectrales máximos de las regiones 4 y 6 que sobrepasan el límite superior de la desviación. Además, el cociente de la región 6 presenta una banda de amplificación como respuesta máxima en la dirección NS y una banda y un pico espectral máximo en la EO, formas diferentes al pico espectral máximo de la desviación estándar.

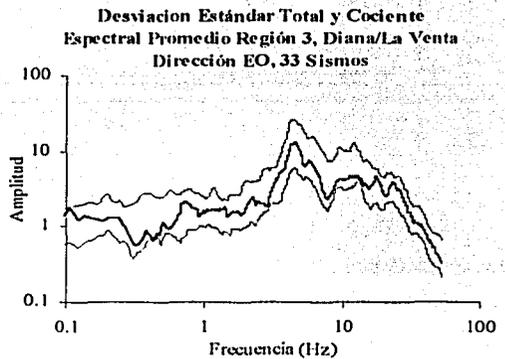
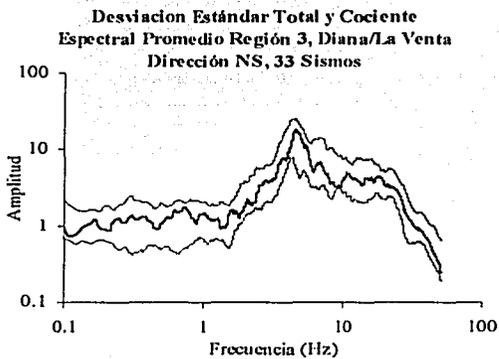
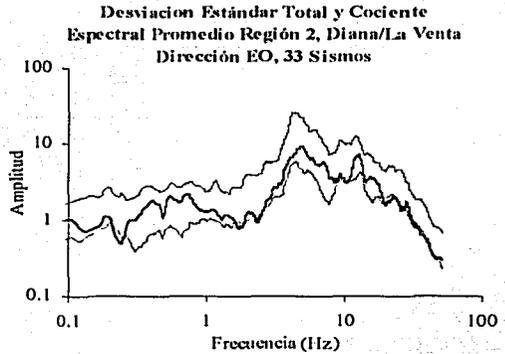
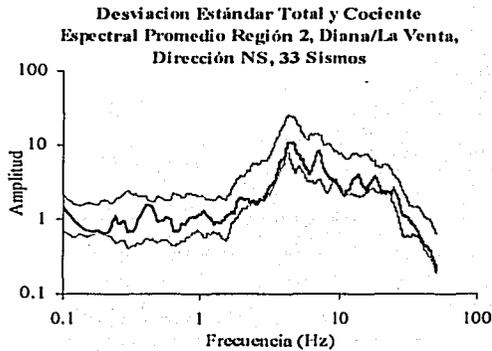
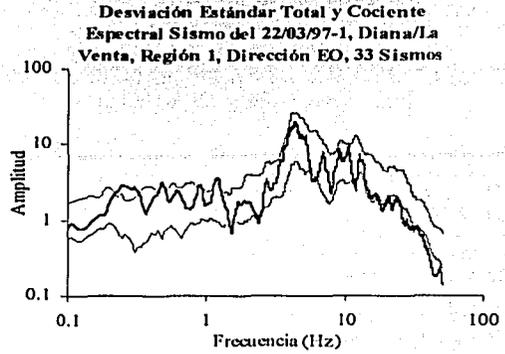
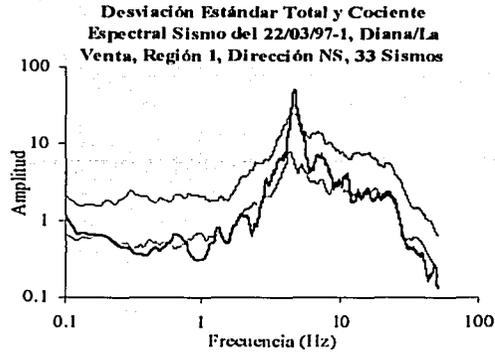
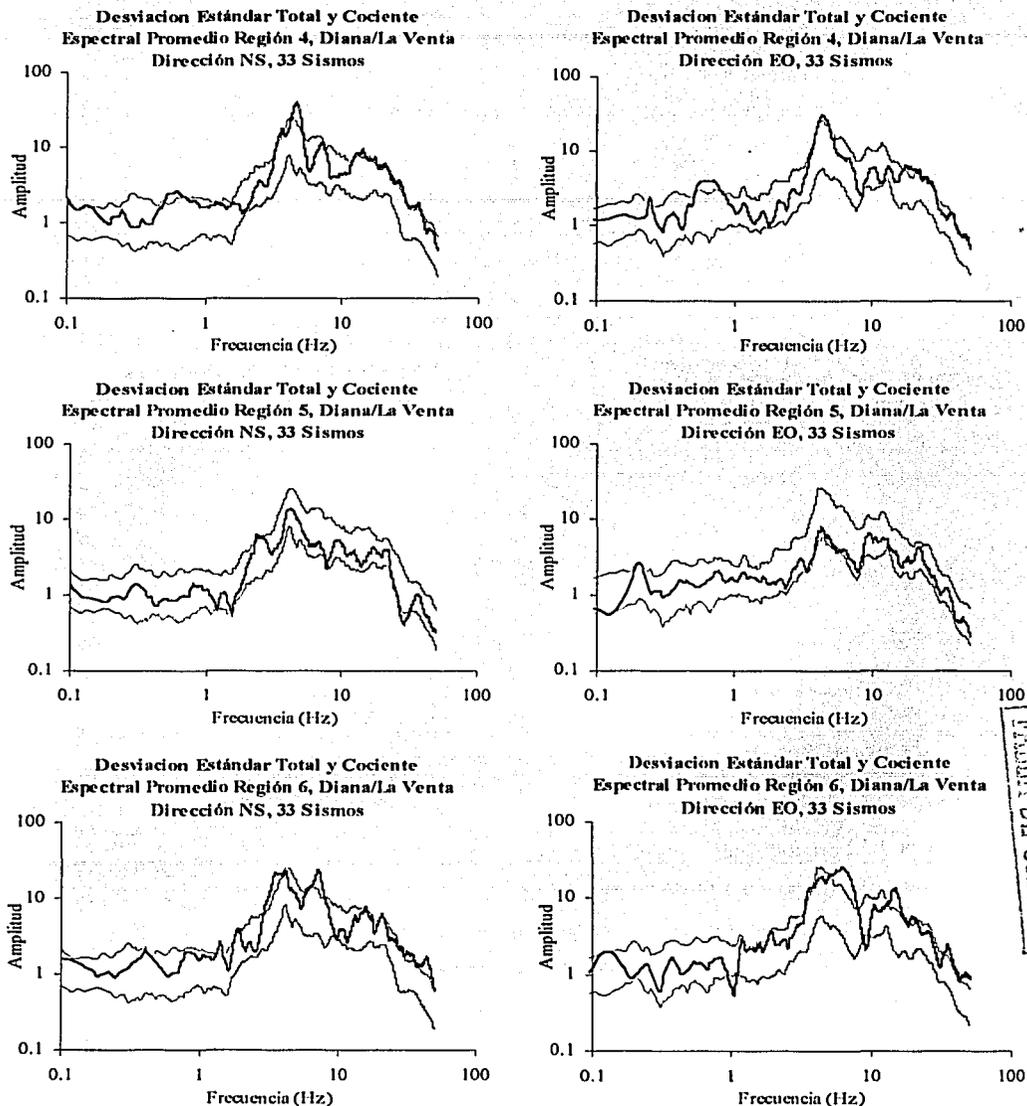


Figura 4.30: Superposición de las desviaciones estándar de 33 sismos y el cociente espectral promedio de regiones 1 al 3, Diana/La Venta



TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN

Figura 4.31: Superposición de las desviaciones estándar de 33 sismos y el cociente espectral promedio de regiones 4 al 6, Diana/La Venta

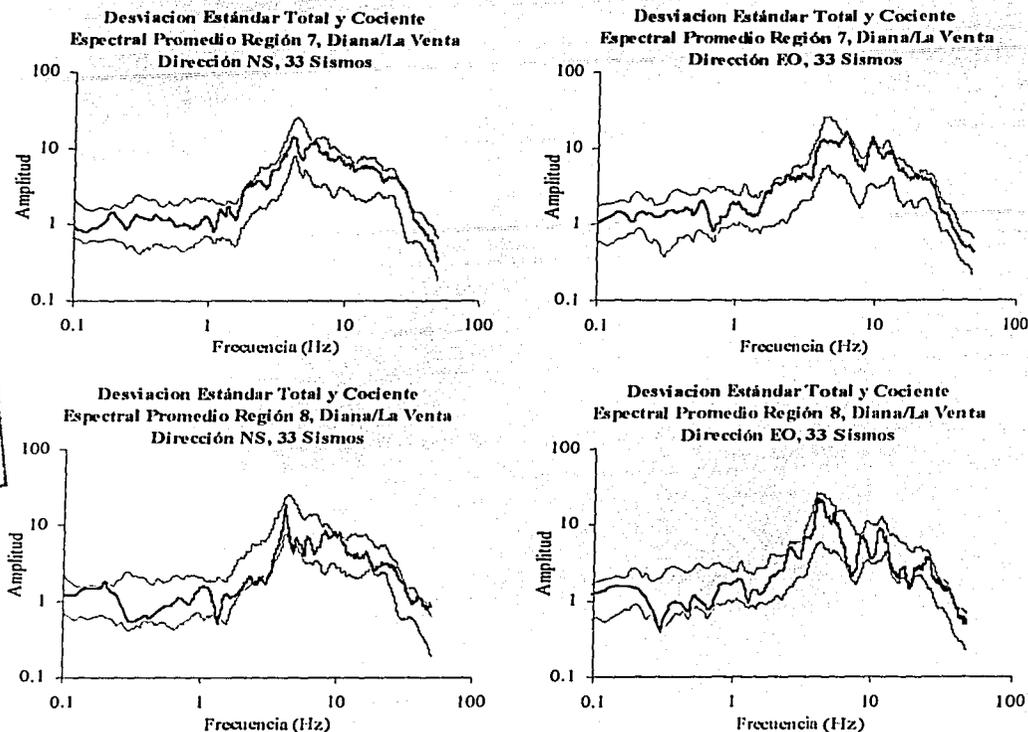


Figura 4.32: Superposición de las desviaciones estándar de 33 sismos y el cociente espectral promedio de regiones 7 y 8, Diana/La Venta

De la figura 4.32: el cociente promedio de la región 7 en la dirección NS se ajusta aceptablemente a la desviación; sin embargo en la EO dos picos espectrales máximos superan el límite superior. En la región 8 el cociente promedio en la dirección EO encaja ajustadamente en la desviación estándar; en la NS se encuentra por debajo del límite inferior en 1.5 Hz. y de 3 a 4 Hz.

De lo anterior, se concluye que el acimut está influyendo en la respuesta del suelo, de cierta manera en la región 4 donde el cociente espectral promedio sobrepasa en la amplificación máxima a la desviación estándar, pero sobre todo en las regiones 6 y 7 (dirección EO) donde las amplificaciones relativas máximas sobrepasan la desviación estándar en frecuencias diferentes al promedio fundamental total. No se puede hacer una conclusión de la región 1 debido a que se hace la comparación con un solo

sismo, el cual notoriamente difiere de la desviación estándar total, pero no se puede tomar como una característica representativa para toda la región.

CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE LAS REGIONES

1° El parámetro que no ha sido afectado en todas las regiones, ya sea por distancia epicentral o profundidad, es la frecuencia o periodo fundamental del suelo; en cambio el acimut sí influye como ya se determinó al superponer la desviación estándar y los cocientes espectrales regionales. Hace el valor más estable, o sea con la menor variación entre 0.21 s. a 0.23 s., en la región 4. Las regiones 2, 3 y 8 presentan una variación algo mayor, desde 0.14 s. a 0.26 s. Las regiones 5, 6 y 7 son las que tienen los valores más variados en el periodo, desde 0.07 s. a 0.26 s. Sin embargo, al momento de obtener los periodos promedio para cada región, viendo la tabla 3.5, se observa que las regiones 2, 3, 4, 5, y 8 presentan valores entre 0.20 s. y 0.24 s, en ambas direcciones, valores aceptables dentro del promedio total obtenido de 0.24 s. y 0.23 s en las direcciones NS y EO respectivamente; esto indica que estas regiones son la que pesan más en el valor del periodo promedio obtenido. Las regiones 6 y 7 presentan valores promedio de entre 0.14 s. y 0.16 s., salvo el periodo promedio de la región 7 en la dirección NS que es de 0.25 s., similar a las anteriores regiones; esto nos indica que debemos esperar valores de periodo diferentes al promedio para el suelo de estas regiones. La forma en que el acimut influye podría deberse a irregularidades laterales que producen efectos del tipo bidimensional o tridimensional en la respuesta del suelo.

2° La forma del cociente espectral promedio varía en cada región. En las regiones 1, 3, 4 y 8 ésta forma en ambas direcciones presenta un pico espectral que define claramente la amplificación relativa máxima y el correspondiente valor de la frecuencia y periodo fundamental. En las regiones 2 y 5 la forma del cociente espectral promedio no muestra un solo pico espectral máximo, sino varios, siendo más ambigua la definición de un máximo en la región 5, sobre todo en la dirección EO. Las regiones 6 y 7 presentan formas diferentes de cociente espectral para cada dirección sobre todo en la respuesta máxima; en la región 6, en la dirección NS, se muestra una pequeña banda de amplificación y un pico espectral y en la EO una banda de amplificación creciente, ambas respuestas en un mismo intervalo de frecuencia; en la región 7, esta vez en la dirección NS, tenemos una banda de amplificación que desde una amplitud relativa máxima va decreciendo a medida que aumenta la frecuencia y en la EO dos bandas de amplificación, una con una respuesta casi plana que luego crece hasta llegar a un máximo y la otra que comienza a decrecer desde otro pico espectral máximo. Estas diversas formas de los cocientes espectrales promedio indican que el acimut está influyendo en la variación de la amplificación con la frecuencia, nuevamente se podría suponer que se debe a irregularidades laterales en el subsuelo que originan efectos del tipo bidimensional o tridimensional.

3° Por lo anterior, se puede indicar que las regiones 3, 4 y 8 son las que más pesan en la forma del cociente espectral promedio total. Las regiones 2 y 5 tienen una forma similar a la de este promedio pero con menores amplificaciones, sin mostrar un pico espectral contundente. Se debe esperar un cociente espectral promedio con forma diferente al promedio total para las regiones 6 y 7.

4° De acuerdo con los resultados obtenidos, no hay tendencias claras de direcciones predominantes para las amplificaciones relativas máximas. En la región 2 sólo el sismo más superficial presenta la mayor amplificación en la dirección NS, el resto de eventos muestra amplificaciones máximas similares; algo similar y también no contundente por el poco número de sismos, ocurre en la región 8 donde los dos sismos más superficiales presentan la mayor amplificación en la dirección EO, el tercer sismo y más profundo tiene la mayor amplificación en la NS. En el resto de regiones, o sea 3, 4, 5, 6 y 7, las mayores amplificaciones relativas máximas cambian de dirección con la profundidad y distancia epicentral sin alguna tendencia definida.

5° Los sismos más superficiales tienen la mayor amplificación relativa máxima en la dirección NS en las regiones 2, 4 y 5, y en la EO en las regiones 6, 7 y 8. Los periodos varían para estos valores de amplificación entre 0.09 s. y 0.23 s. en la dirección NS y entre 0.07 s. y 0.24 s. en la EO.

6° Los sismos más alejados de las estaciones, es decir con distancia epicentral igual o mayor a 300 Km. los cuales son 15/06/99 con $M_b = 6.4$, 30/09/99 con $M_s = 7.5$ y 11/01/97 con $M_s = 6.9$, cada uno con acimut diferente, no presentan grandes factores de amplificación relativa, estando los valores entre 12.6 y 23.4 veces; los periodos muestran estabilidad para los dos primeros sismos, variando de 0.22 a 0.24 s. mientras que el último sismo presenta periodos en la dirección NS de 0.12 s. y en la EO de 0.17 s. esto debido a que este sismo pertenece a la región 7 donde estos valores varían grandemente.

4.4.4.2 Estaciones Diana y Diana Pozo

Las figuras que a continuación se presentan son similares a las mostradas para las estaciones Diana y La Venta, de manera de poder realizar el mismo tipo de análisis y comparar luego los resultados.

Las figuras 4.33 al 4.37 muestran a la izquierda la superposición de los cocientes espectrales que existen en cada región, y a la derecha su respectivo cociente espectral promedio y desviación estándar.

Las figuras 4.38 y 4.39 muestran un corte transversal a las regiones, de manera de poder visualizar la distribución en profundidad y distancia epicentral de los sismos respecto a Diana, los cuales se señalan

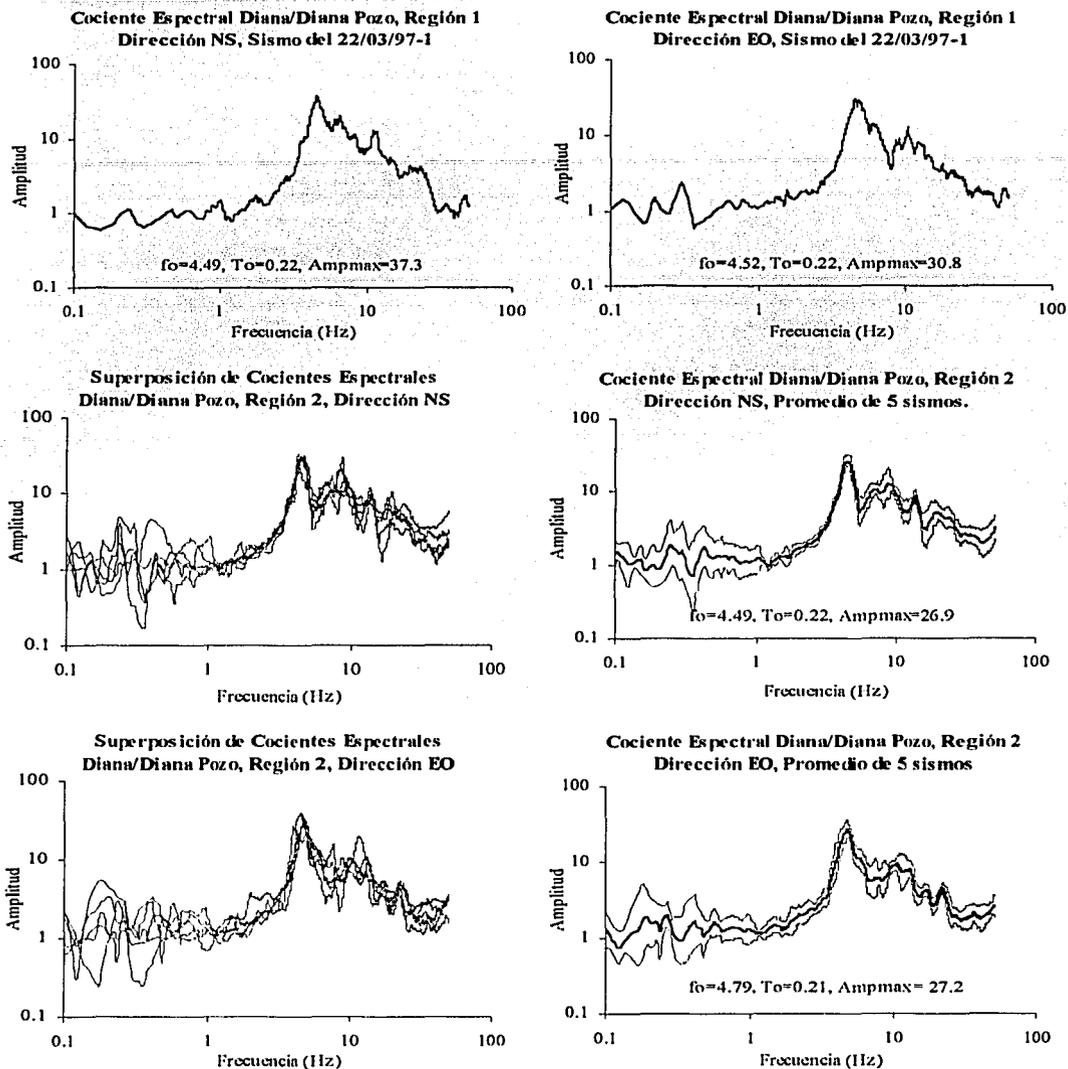


Figura 4.33: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en regiones 1 y 2.

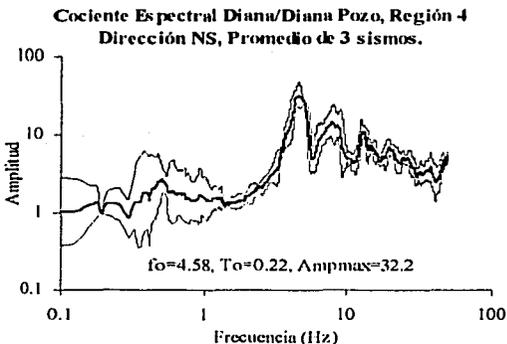
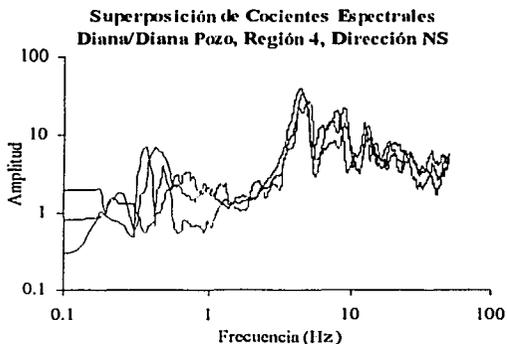
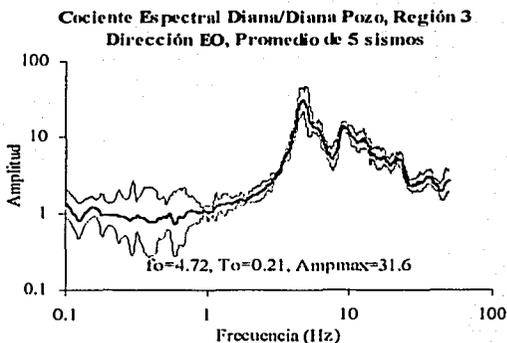
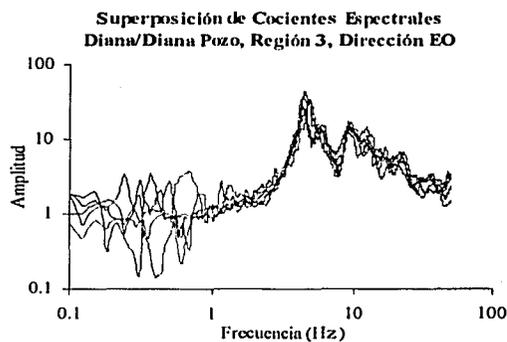
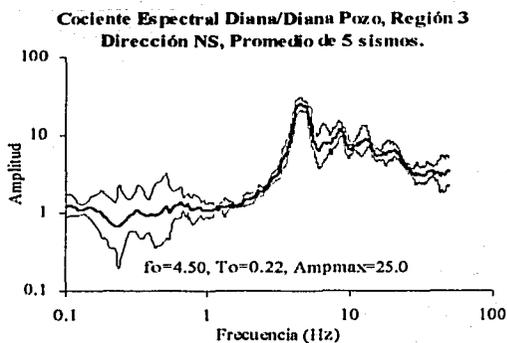
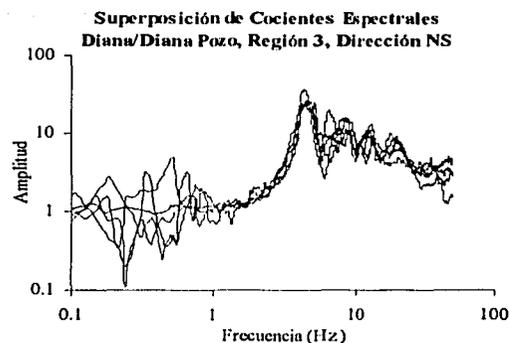


Figura 4.34: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en regiones 3 y 4.

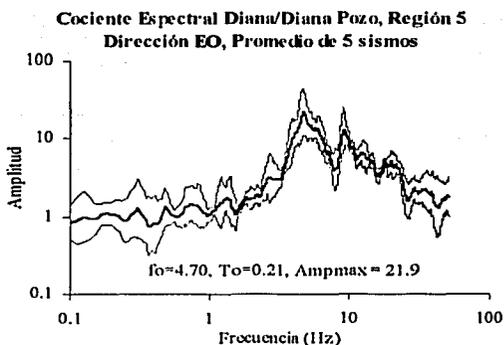
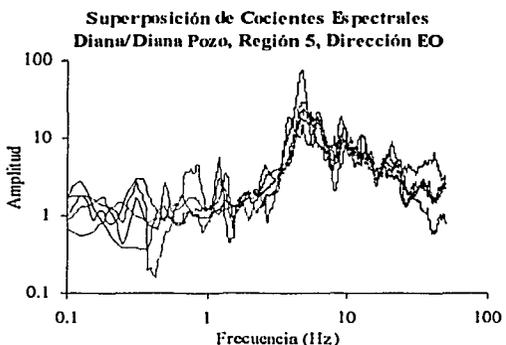
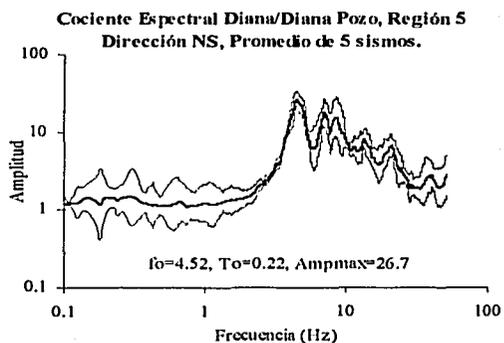
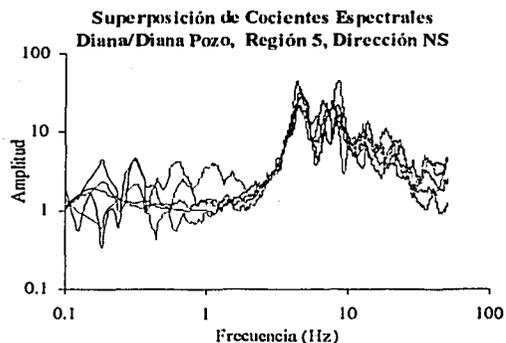
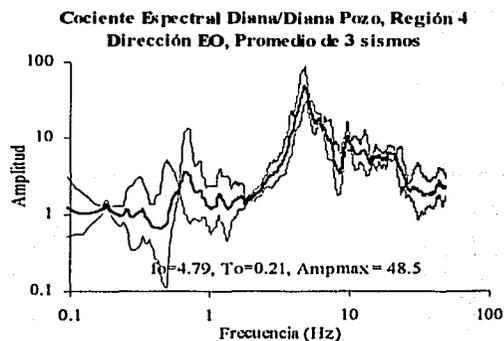
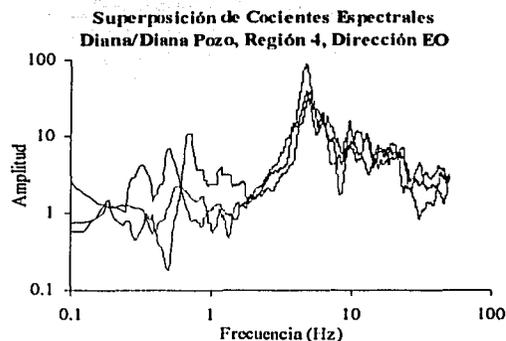


Figura 4.35: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en regiones 4 y 5.

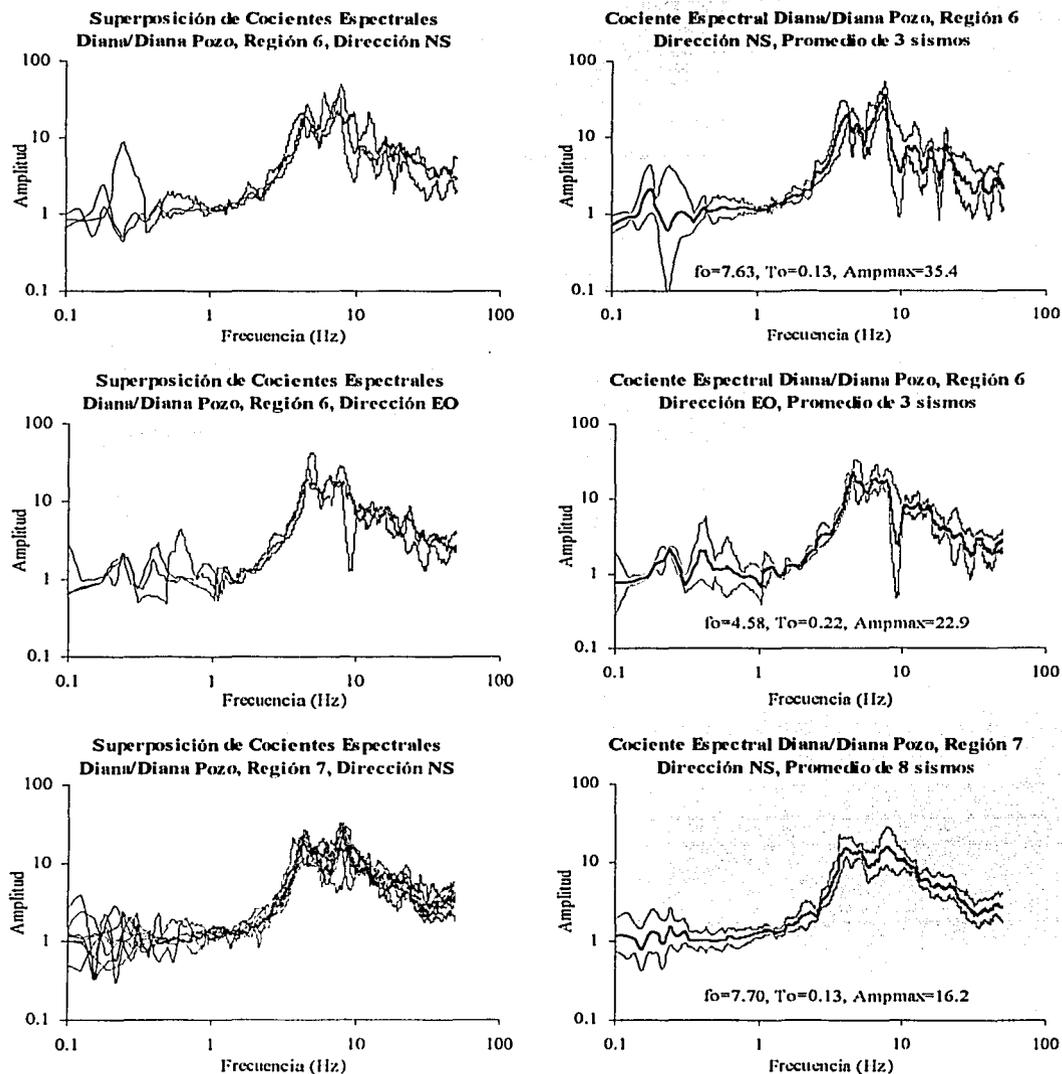


Figura 4.36: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en regiones 6 y 7.

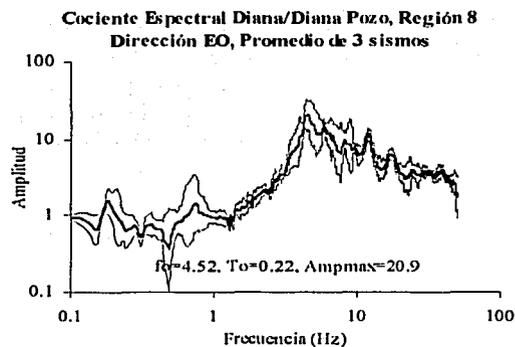
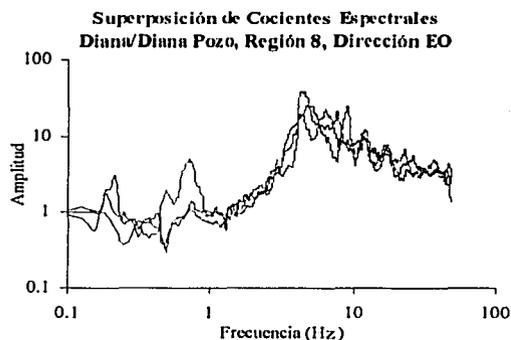
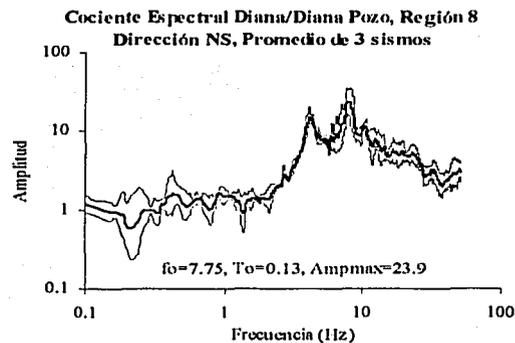
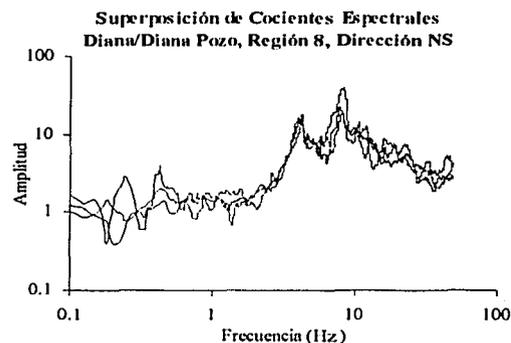
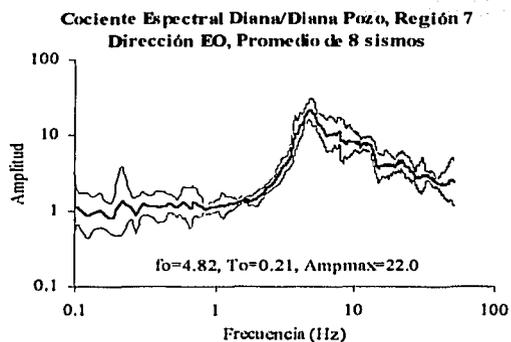
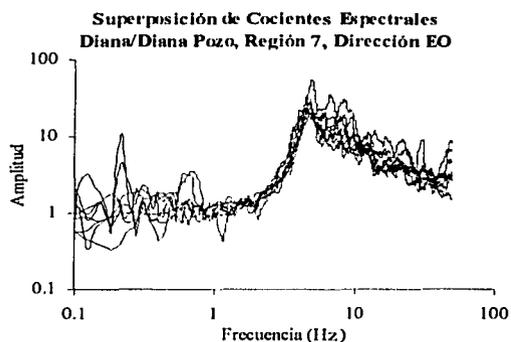


Figura 4.37: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en regiones 7 y 8.

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

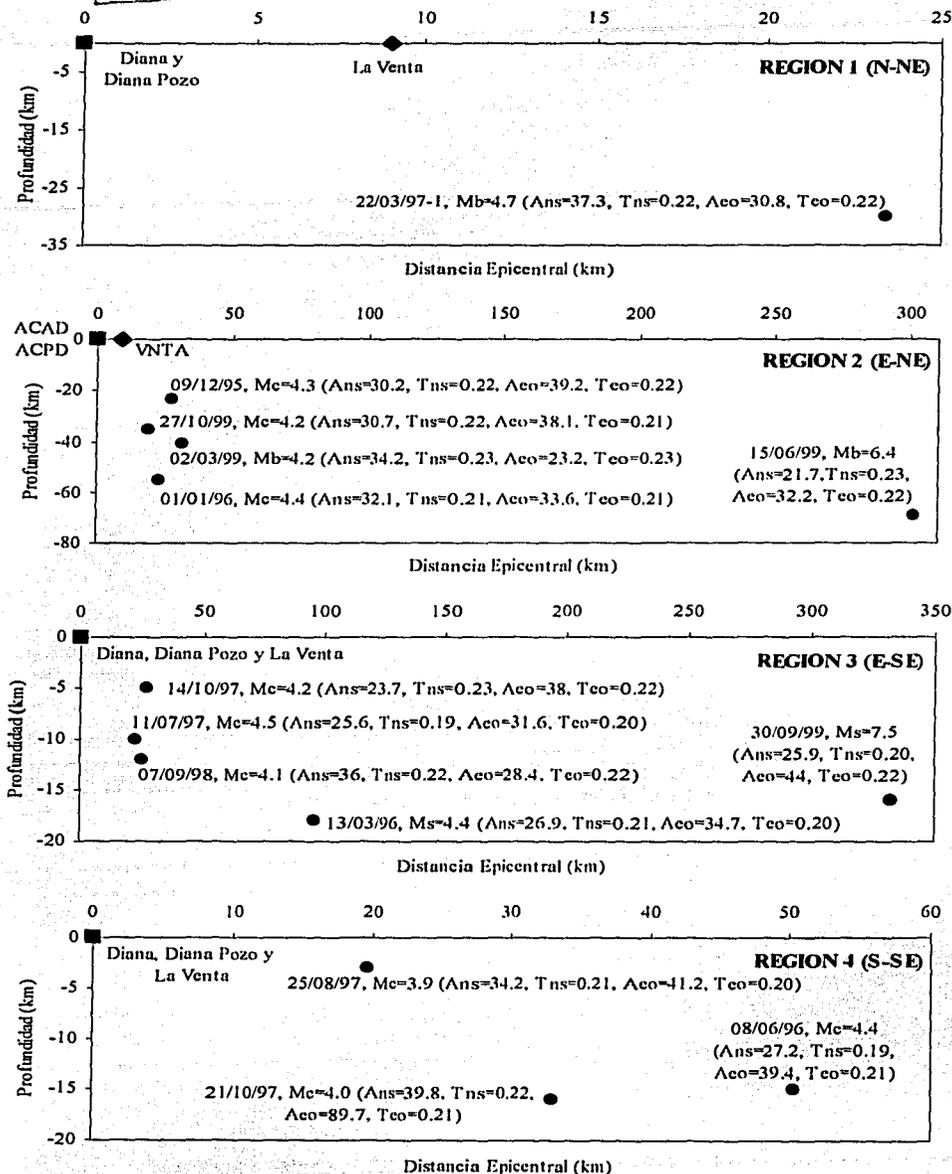


Figura 4.38: Corte transversal de regiones 1 al 4, estaciones Diana y Diana Pozo

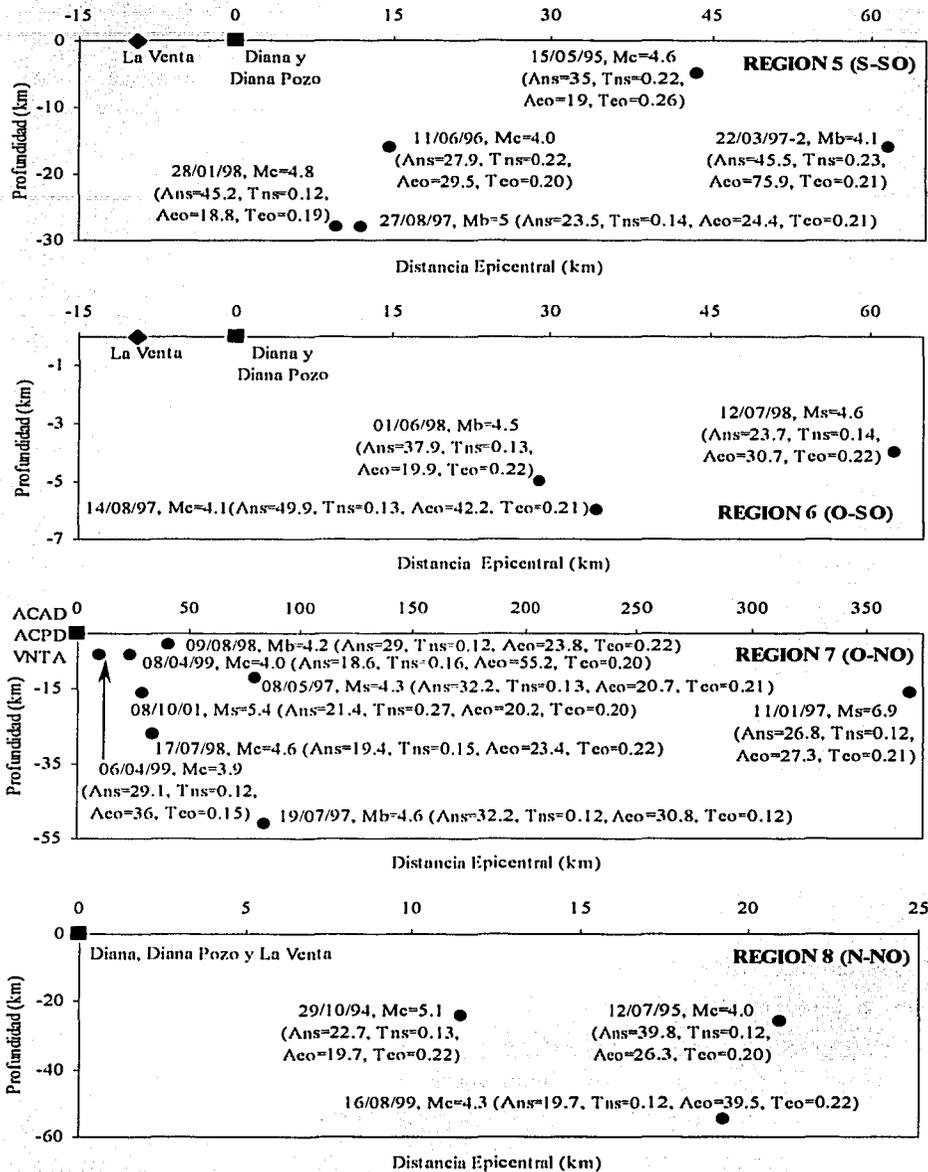


Figura 4.39: Corte transversal de regiones 5 al 8, estaciones Diana y Diana Pozo

por su fecha y magnitud; se muestran junto a cada sismo los resultados obtenidos de amplificaciones máximas relativas (A_{NS} y A_{EO}) y periodos fundamentales (T_{NS} y T_{EO}) promedio en cada dirección. Esta figura permite analizar si la ubicación de los sismos y su magnitud influyen en la respuesta obtenida en cada región.

Región 1

La región 1 (figuras 4.33 y 4.38), tiene sólo el sismo del 22/03/97-1, con $M_b = 4.7$ y $M_c = 4.6$, distancia epicentral de 23.4 Km. y profundidad de 30 Km. Se muestra el cociente espectral en ambas direcciones, y ambos indican un periodo similar de $T = 0.22$ s., la amplificación relativa máxima es mayor en la dirección NS que la EO y son respectivamente 37.3 y 30.8 veces.

Regiones 2, 3, 4 y 5

Estas regiones (figuras 4.33 al 4.35) presentan formas similares en los cocientes espectrales y en los respectivos promedios, sobre todo en el intervalo de frecuencia entre 2 y 5 Hz.; en las regiones 2, 3 y 4 los periodos fundamentales de los eventos varían solo de 0.19 s. a 0.23 s., lo que muestra un gran estabilidad de este parámetro en estas regiones; en la región 5 los cinco eventos muestran valores de periodo fundamental entre 0.12 s. y 0.26 s. Si se observan sólo los valores promedio de periodos fundamentales, la variación entre ellos es pequeña (de 0.21 s. a 0.22 s.) o sea prácticamente iguales en ambas direcciones y en todas las regiones. Estos cocientes sólo se diferencian en el valor de la amplificación máxima relativa, variando de 21 a 48 veces. Se señala la presencia de un segundo pico espectral en todas estas regiones, pero que es siempre menor que el primer pico máximo. La desviación estándar se muestra similar en todas las regiones, mostrando sus menores valores entre los 2 y 5 Hz.

De las figuras 4.38 y 4.39, un evento en la región 2 y dos eventos en la región 3 tienen amplificaciones relativas máximas en cada dirección con una diferencia menor que 5 veces, lo que se considera como una respuesta similar; el resto de eventos presenta una diferencia mayor. La tendencia en estos eventos es a mostrar la amplificación relativa máxima mayor en la dirección EO, salvo cuatro eventos, uno en las regiones 2 y 3 y dos en la región 5. No se encuentra algún tipo de relación entre los valores de amplificación y las profundidades o magnitudes de los sismos; por ejemplo en la región 2, se tienen cuatro sismos con variación no muy grande en magnitud y distancia epicentral, variando sólo en profundidad; sin embargo, los valores de amplificación no muestran una gran diferencia entre ellos, aparentemente se puede decir que disminuye, pero no de manera contundente; algo similar ocurre en la región 4: el sismo 21/10/97 es el más profundo pero tiene la mayor amplificación.

Región 6

Los cocientes espectrales y cocientes promedio (figura 4.36) presentan formas diferentes a las anteriores regiones, inclusive en cada dirección. La NS presenta dos picos espectrales bien definidos, siendo mayor el segundo y que por su ubicación define la frecuencia fundamental promedio diferente a las anteriores regiones; la EO presenta una banda de respuesta de amplificación relativa máxima, entre los 4 y 8 Hz., mostrando un pequeño pico que se puede considerar como máximo al inicio de esta banda. La desviación estándar es menor nuevamente en el intervalo de 1 a 6 Hz.

Nuevamente en esta región (figura 4.39) se presenta que el sismo más profundo tiene las mayores amplificaciones relativas máximas, a pesar de tener magnitud menor a los otros dos sismos. El sismo más alejado presenta una amplificación mayor en la dirección EO, los otros dos en la NS, tendencia contraria a las regiones anteriores.

Región 7

La región 7 (figuras 4.36 y 4.37) presenta una forma espectral en cierta manera similar a la región 6; en la dirección NS aparecen dos picos espectrales, siendo mayor el segundo, pero por un mínima diferencia respecto a la primera; podría decirse que presenta la misma forma que la región 6 pero con amplitud menor para el segundo pico espectral, lo que determina que en esta dirección se tiene una banda de respuesta de amplificación máxima que contiene dos picos espectrales. En la dirección EO se tiene un pico espectral máximo que define la frecuencia fundamental promedio, pero luego aparecen bandas casi planas de amplificación en forma escalonada, siendo la primera banda quizás la que se presenta en la región 6 junto al mayor pico espectral, lo que se puede interpretar que este cociente es similar al de la región 6 pero con menores amplitudes para algunas bandas de frecuencia, sobre todo después del pico espectral mayor.

La figura 4.39, nos muestra que esta región no presenta una tendencia definida para la orientación de la mayor amplificación relativa máxima. Los periodos varían de 0.12 s. a 0.27 s. Esta región muestra una gran variedad tanto en la amplificación como en el periodo.

Región 8

En la región 8 (figura 4.37) se presenta en la dirección NS un cociente espectral promedio con dos picos bien definidos siendo mayor el segundo, similar en forma y periodo fundamental promedio a la

región 6. En la dirección EO se tiene un pico espectral máximo definido, luego aparecen ciertos picos en pequeñas bandas de amplificación, algo similar a lo observado en la región 7. La desviación estándar es menor en la dirección EO que la NS.

La figura 4.39 muestra que el sismo más profundo presenta mayor amplificación relativa máxima en comparación con el más cercano y de mayor magnitud. Aparentemente la tendencia en la dirección de la mayor amplificación está relacionada con la profundidad: los sismos más superficiales la presentan en la dirección NS y el más profundo en la EO.

La tabla 4.6 muestra en resumen los valores de frecuencia y periodo fundamental así como de amplificación relativa máxima tanto para cada evento sísmico como los promedios de cada región.

Tabla 4.6: Frecuencias y periodos fundamentales y amplificaciones relativas máximas obtenidas para cada sismo y región en la estación Diana(33 sismos respecto a Pozo Diana)

SISMO	Norte Sur				Este Oeste			
	Frecuencia (Hz)	Periodo (Seg)	Amp.Rel.Max	Promedio	Frecuencia (Hz)	Periodo (Seg)	Amp.Rel.Max	Promedio
Región 1 (N-NE)								
22/03/97-1	4.49	0.22	37.3		4.52	0.22	30.8	
Región 2 (NE-E)								
09/12/95	4.56	0.22	30.2	fo=4.49, To=0.22 Ampmax=26.9	4.59	0.22	39.2	fo=4.79, To=0.21 Ampmax=27.2
01/01/96	4.76	0.21	32.1		4.87	0.21	33.6	
02/03/99	4.35	0.23	34.2		4.27	0.23	23.2	
15/06/99	4.43	0.23	21.7		4.62	0.22	32.2	
27/10/99	4.61	0.22	30.7		4.79	0.21	38.1	
Región 3 (E-SE)								
13/03/96	4.76	0.21	26.9	fo=4.50, To=0.22 Ampmax=25.0	4.93	0.20	34.7	fo=4.72, To=0.21 Ampmax=31.6
11/07/97	5.31	0.19	25.6		5.01	0.20	31.6	
14/10/97	4.41	0.23	23.7		4.49	0.22	38.0	
07/09/98	4.46	0.22	36.0		4.46	0.22	28.4	
30/09/99	4.91	0.20	25.9		4.64	0.22	44.0	
Región 4 (SE-S)								
08/06/96	5.25	0.19	27.2	fo=4.58, To=0.22 Ampmax=32.2	4.70	0.21	39.4	fo=4.79, To=0.21 Ampmax=48.5
25/08/97	4.72	0.21	34.2		5.07	0.20	41.2	
21/10/97	4.58	0.22	39.8		4.76	0.21	89.7	
Región 5 (S-SO)								
15/05/95	4.53	0.22	35.0	fo=4.52, To=0.22 Ampmax=26.7	3.83	0.26	19.0	fo=4.70, To=0.21 Ampmax=21.9
11/06/96	4.58	0.22	27.9		4.91	0.20	29.5	
22/03/97-2	4.33	0.23	45.5		4.70	0.21	75.9	
27/08/97	6.97	0.14	23.5		4.85	0.21	24.4	
28/01/98-1	8.55	0.12	45.2		5.37	0.19	18.8	
Región 6 (SO-O)								
14/08/97	7.86	0.13	49.9	fo=7.63, To=0.13 Ampmax=35.4	4.78	0.21	42.2	fo=4.58, To=0.22 Ampmax=22.9
01/06/98	7.51	0.13	37.9		4.58	0.22	19.9	
12/07/98	7.36	0.14	23.7		4.58	0.22	30.7	
Región 7 (O-NO)								
11/01/97	8.27	0.12	26.8	fo=7.70, To=0.13 Ampmax=16.2	4.79	0.21	27.3	fo=4.82, To=0.21 Ampmax=22.0
08/05/97	7.66	0.13	32.2		4.73	0.21	20.7	
19/07/97	8.09	0.12	32.2		8.21	0.12	30.8	
17/07/98	6.47	0.15	19.4		4.55	0.22	23.4	
09/08/98	8.30	0.12	29.0		4.52	0.22	23.8	
06/04/99	8.67	0.12	29.1		6.65	0.15	36.0	
08/04/99	6.10	0.16	18.6		5.01	0.20	55.2	
08/10/01	3.69	0.27	21.4		4.88	0.2	20.2	
Región 8 (NO-N)								
29/10/94	7.75	0.13	22.7	fo=7.75, To=0.13 Ampmax=23.9	4.52	0.22	19.7	fo=4.52, To=0.22 Ampmax=20.9
12/07/95	8.30	0.12	39.8		4.88	0.20	26.3	
16/08/99	8.06	0.12	19.7		4.46	0.22	39.5	

Comparación de la desviación estándar total y el cociente espectral promedio de cada región

Como ya se realizó en la parte correspondiente a las estaciones Diana y La Venta, se van a superponer la desviación estándar total estimada para los 33 sismos de las estaciones Diana y Diana Pozo con el cociente espectral promedio de cada región. Las figuras 4.40 al 4.42 presentan la superposición, la desviación estándar de las regiones se muestra en línea delgada y en línea gruesa los cocientes espectrales.

La figura 4.40 presenta las regiones 1 al 3. Nuevamente en la región 1 se tiene un solo sismo, el 22/03/97-1, cuyo cociente espectral en la dirección NS supera la desviación estándar sólo en las frecuencias 1.2 Hz., 4 a 4.5 Hz. y mayor a 30 Hz.; en la dirección EO se ubica ajustadamente dentro de la desviación. Los cocientes espectrales de las regiones 2 y 3, en ambas direcciones, se encuentran dentro de los límites de la desviación estándar.

Respecto a las regiones 4, 5 y 6 (figura 4.41), los cocientes espectrales de la región 5 se mantienen dentro de la desviación estándar. Los cocientes de la región 4 superan en ambas direcciones en dos frecuencias al límite superior de la desviación estándar, en la NS en 0.7 Hz. y 4 a 4.5 Hz., y en la EO en 0.8 Hz. y 4 a 4.5 Hz.; se resalta que de 4 a 4.5 Hz. se ubica el mayor pico espectral de cada región. En la región 6 sucede algo similar, el cociente en la dirección NS supera el límite superior de la desviación de 7 a 8 Hz., que es el pico espectral máximo de esta región, y de 9 a 10 Hz., 11 Hz. y 20 Hz. en el límite inferior; en la EO supera el límite superior con una banda de amplificación relativa en el intervalo de frecuencia entre 7 y 8 Hz. y 15 y 20 Hz., y supera el límite inferior en 1 Hz. y 9 a 10 Hz. Algo similar como en la figura 4.31, el cociente espectral de la región 6 en la dirección EO presenta como respuesta máxima un pico espectral y una banda de amplificación, en forma diferente al pico espectral máximo de la desviación estándar.

La figura 4.42 muestra las regiones 7 y 8; los cocientes de la región 7 se ubican dentro de la desviación estándar. Los cocientes de la región 8 se ubican ajustadamente dentro de las desviaciones, superando sólo en algunas frecuencias la desviación; en la dirección NS en 1.5 Hz. y 5 Hz. y en la EO en 0.7 Hz.

Con lo descrito, se puede concluir que el acimut está influyendo de mayor manera en la respuesta del suelo en las regiones 4 y 6 donde el cociente espectral promedio sobrepasa la desviación estándar en la máxima amplificación relativa, siendo en la región 6 en la dirección NS en una frecuencia diferente a la que representa el promedio total. Nuevamente sobre la región 1 no se puede hacer alguna conclusión debido a que se hace la comparación con un solo sismo, no pudiéndose tomar como una respuesta representativa para toda la región.

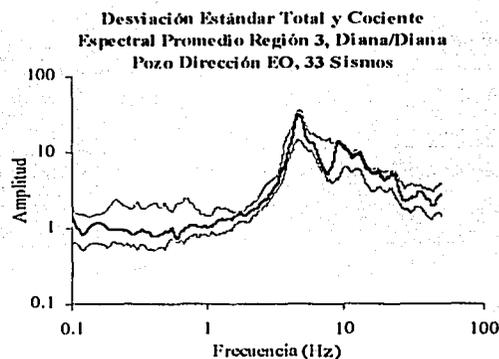
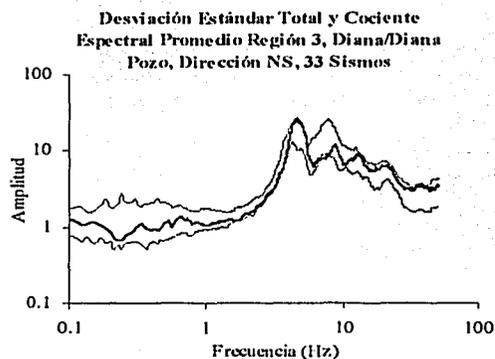
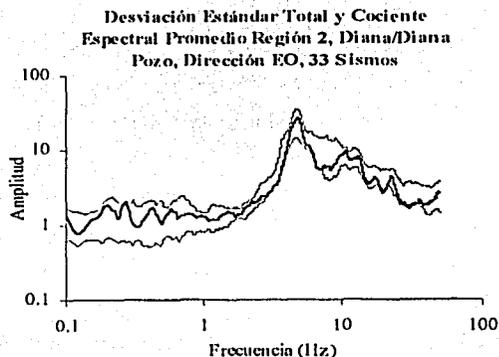
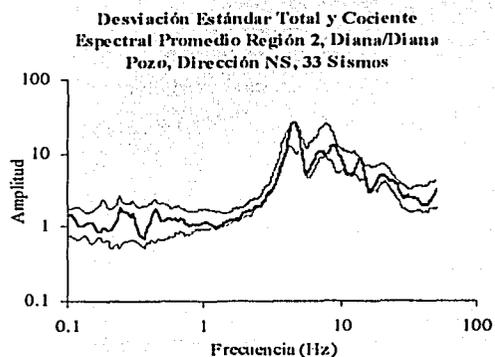
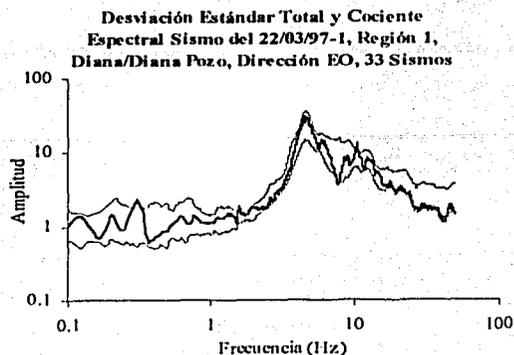
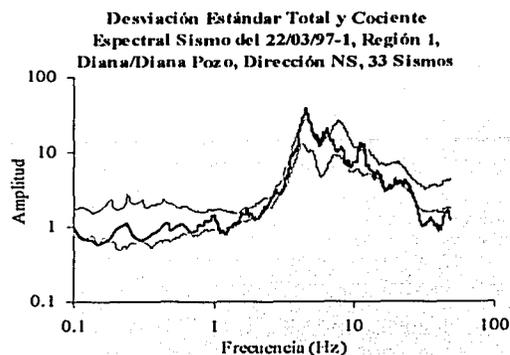


Figura 4.40: Superposición de las desviaciones estándar de 33 sismos y el cociente espectral promedio de regiones 1 al 3, Diana/Diana Pozo

TESIS CON
FALLA DE COPIEN

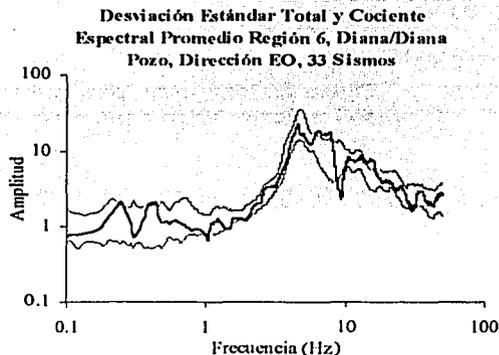
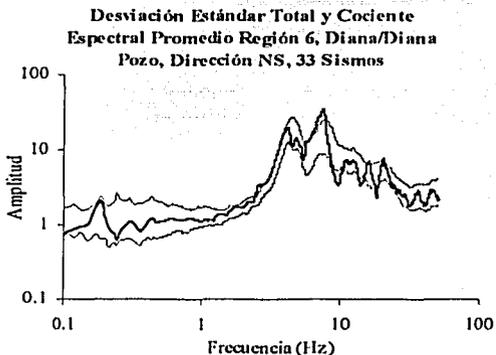
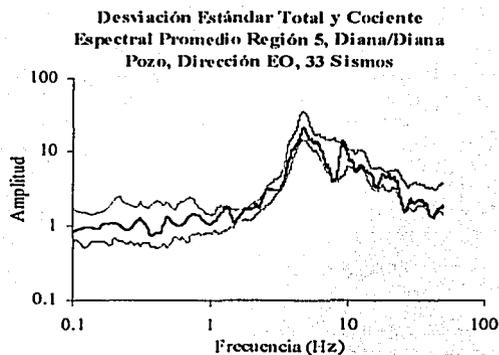
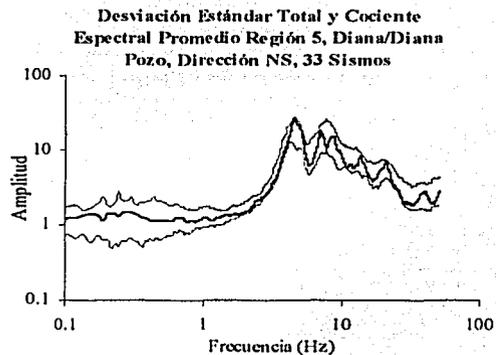
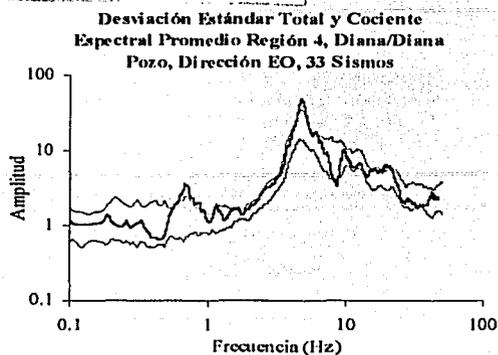
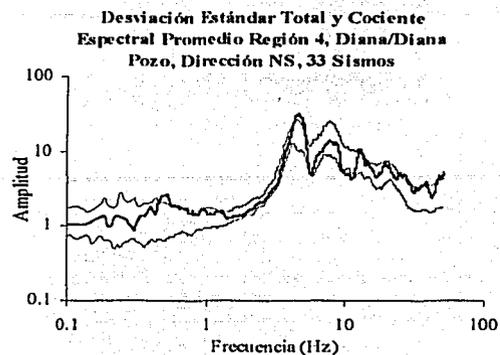


Figura 4.41: Superposición de las desviaciones estándar de 33 sismos y el cociente espectral promedio de regiones 4 al 6, Diana/Diana Pozo

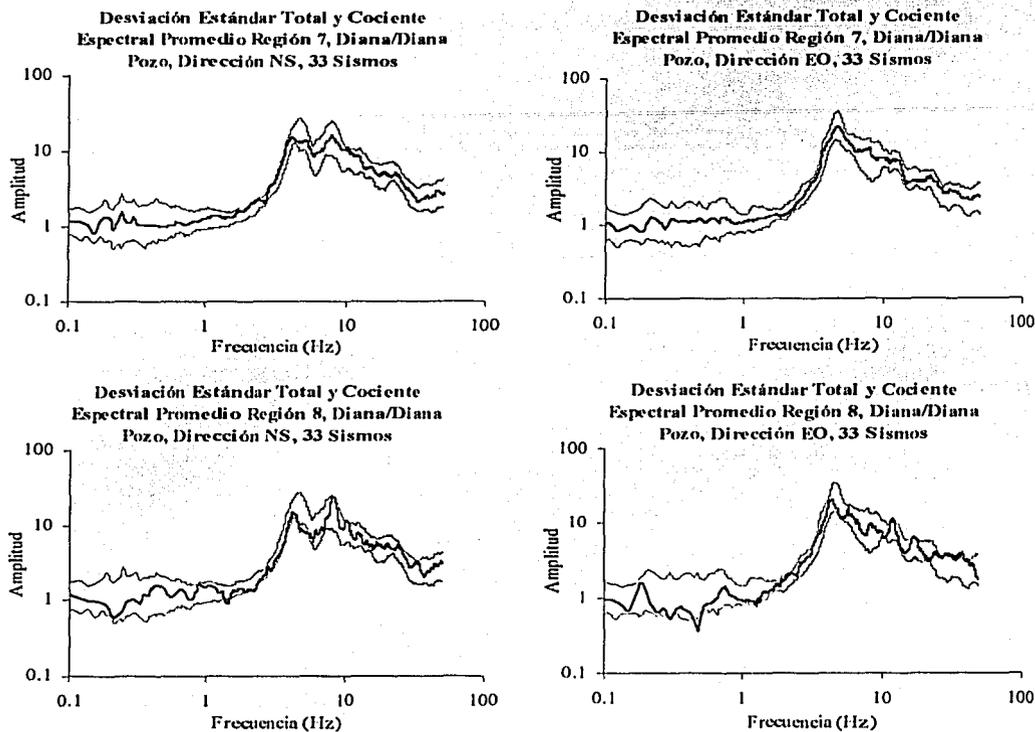


Figura 4.42: Superposición de las desviaciones estándar de 33 sismos y el cociente espectral promedio de regiones 7 y 8, Diana/Diana Pozo

Conclusiones del análisis de las regiones

1° El valor de la frecuencia o periodo fundamental promedio muestra una gran estabilidad en ambas direcciones para las regiones 2, 3, 4 y 5. Afecta de manera parcial, si observamos los promedios de la tabla 4.6, o sea sólo en una dirección, en las regiones 6, 7 y 8 siendo la región 7 donde se presentan las mayores variaciones del periodo. Se puede concluir que la zona integrada por las regiones del 2 al 5 los eventos presentarán promedios similares al promedio total, no tenciéndose la misma certeza para las otras regiones.

2° Se distinguen cuatro formas de cociente espectral: una para las regiones 2 al 5, y las otras tres para las regiones 6, 7 y 8 respectivamente. Se podría proponer que hay una especie de transición en la forma, siendo similar, o sea con un pico espectral definido y variando solo en amplitud, desde la región 2 hasta la 5, cambiando a dos picos espectrales o una banda de amplificación en las regiones 6 y 7 y regresando otra vez a un pico espectral y una banda de amplificación para la región 8. La forma que predomina en el cociente espectral promedio total es debido a las regiones 2 al 5, lo que significa que se debe esperar formas diferentes para las regiones 6, 7 y 8.

3° La desviación estándar presenta características similares en todas las regiones: tiene tres intervalos bien definidos de valores, variando los máximos entre los 0.1 y 2.5 Hz., los valores mínimos entre 1 y 5 Hz., y en la alta frecuencia siempre es menor el valor que en la baja frecuencia.

4° De acuerdo a los resultados obtenidos, en las regiones 2, 3 y 4 se tiene una tendencia a que las amplificaciones relativas máximas sean mayores en la dirección EO que en la dirección NS, esto si no consideramos un evento en las regiones 2 y 3 que tienen la amplificación relativa máxima en la dirección NS. En la región 5 no se puede decir de manera contundente que esta tendencia se mantenga ya que tres sismos lo cumplen, pero los otros dos no. Por el poco número de sismos en las regiones 6 y 7 no se puede definir una tendencia. En la región 7 se tiene la mayor cantidad de sismos pero tampoco se puede hablar de una tendencia de manera contundente.

5° En las regiones 2, 3 y 4 el sismo mas superficial siempre tiene una mayor amplificación relativa máxima en la dirección EO, variando el periodo para estos valores de amplificación entre 0.20 y 0.22 s.

6° En las regiones 4, 5 y 6, donde no hay una tendencia similar para determinar la dirección de la amplificación relativa máxima, los sismos más alejados de las estaciones en estas regiones, con distancias epicentrales iguales o mayores a los 50 Km., tienen la mayor amplitud relativa en la dirección EO.

7° Los sismos mas alejados de las estaciones, es decir los sismos con distancia epicentral igual o mayor a 300 Km. y que son del 15/06/99 conocido como el de Tehuacán, con $M_b = 6.4$, del 30/09/99 llamado el de Oaxaca con $M_s = 7.5$ y del 11/01/97 con $M_s = 6.9$, cada uno con acimut diferente, presentan amplificaciones relativas máximas de gran valor en la estación Diana, variando entre 21.7 y 44 veces; los periodos muestran estabilidad para los dos primeros sismos, variando de 0.20 a 0.23 s. mientras que el último sismo presenta periodos en la dirección NS de 0.12 s. y en la EO de 0.21 s. esto debido a que este sismo pertenece a la región 7 donde los valores del periodo varían grandemente.

4.4.4.3 Comparación de resultados obtenidos en los pares de estaciones Diana/La Venta y Diana/Diana Pozo

Se van a comparar los resultados mediante las figuras 4.43 al 4.45 que muestran la superposición de los cocientes espectrales promedio por cada región y la figura 4.46 que presenta los periodos obtenidos en cada región.

Como se observó en la figura 4.20, la diferencia de amplificaciones relativas en la alta frecuencia entre los cocientes espectrales promedio de Diana/Diana Pozo y Diana/La Venta se debe a los efectos de superficie libre y baja impedancia producto del intemperismo en la estación La Venta. Esta diferencia se repite al hacer la superposición de los cocientes espectrales promedio por cada región.

En la baja frecuencia, desde 0.1 a 4 Hz., las amplificaciones relativas de cada par de estaciones y en cada dirección no son en forma y tamaño exactamente iguales en todas las regiones, es interesante tener respuestas de amplificación muy similares tanto en forma y valor como es el caso de las regiones 2 (NS), 3 (NS) y 4 (EO), así como otras diferente como las regiones 5 (NS), 6, 7 y 8. En el primer caso se puede interpretar que se está obteniendo una respuesta confiable, por su similitud, al utilizar cualquiera de los pares de estaciones; pero en el segundo caso, no se puede pensar lo mismo debido a las notorias diferencias.

En la alta frecuencia, a partir de los 4 Hz., en las regiones 1, 2, 3, 5 y 8 las amplificaciones relativas de Diana/Diana Pozo son mayores a las de Diana/La Venta; la región 7 presenta solo en ciertos intervalos de frecuencia esta diferencia, siendo iguales en otras; las regiones 4 y 6 muestran amplificaciones relativas similares entre 4 y 30 Hz. a partir de la cual recién empieza la diferencia notoria entre las amplitudes. En la mayoría de las regiones las amplitudes de Diana/Diana Pozo en la alta frecuencia mantienen una forma algo similar a la de Diana/La Venta, pero amplificando la respuesta.

Si comparamos los resultados obtenidos para cada estación de referencia vemos que en la región 6, que es la región donde los cocientes promedio obtenidos son muy diferentes al resto de regiones; los cocientes de cada par de estaciones coinciden en la forma siendo mayor esta coincidencia en la dirección NS; lo que da la seguridad que esta región tiene una respuesta diferente al resto. Caso contrario es la región 7, donde los cocientes promedio obtenidos no presentan una similitud aceptable.

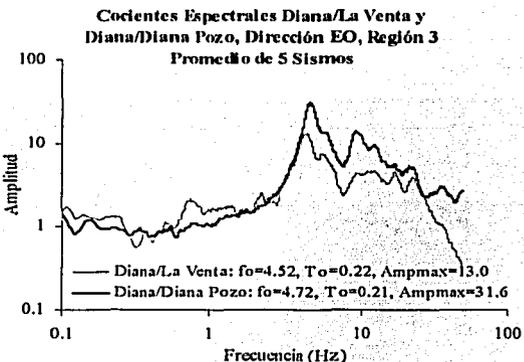
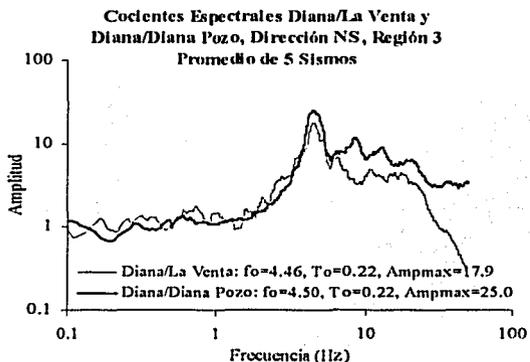
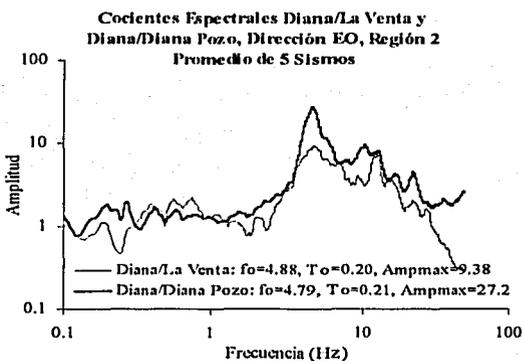
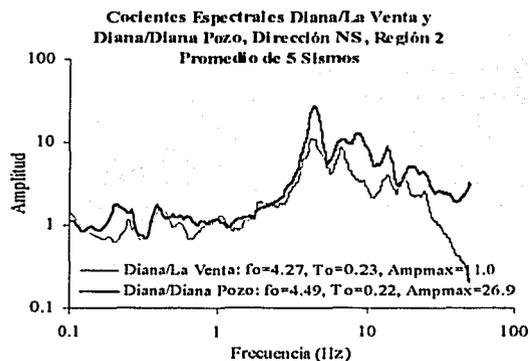
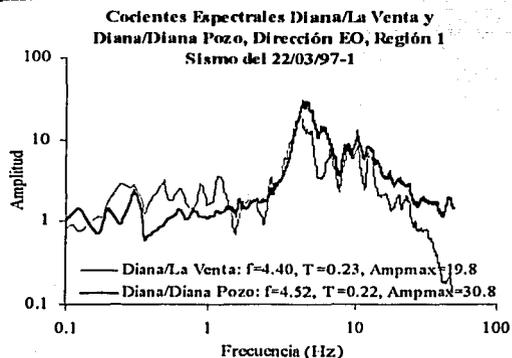
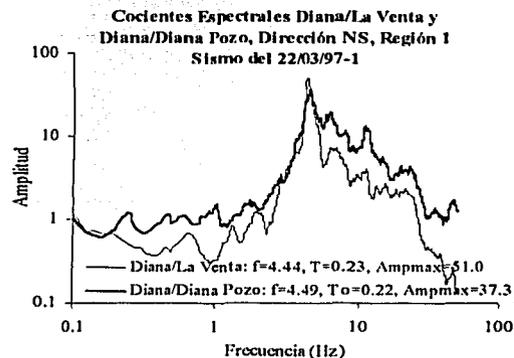


Figura 4.43

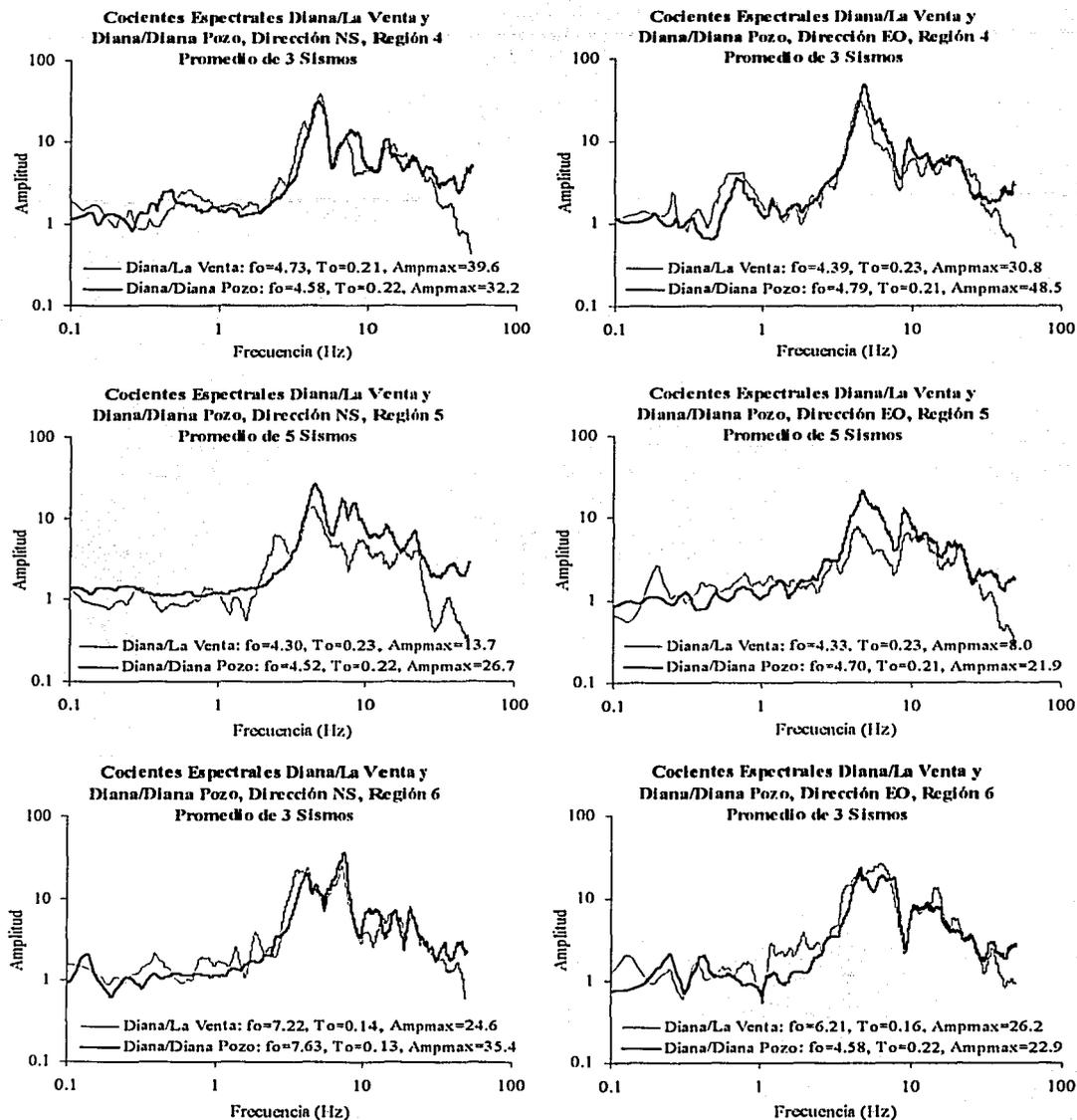


Figura 4.44

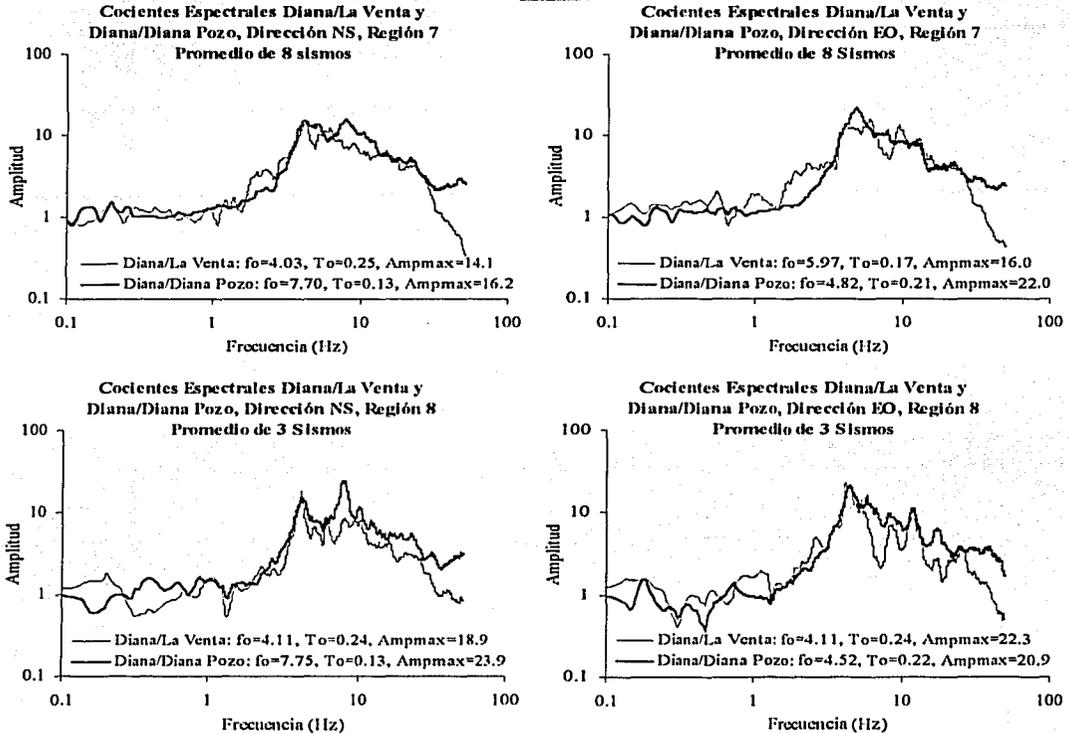


Figura 4.45

Será necesario observar los resultados a obtener para los 50 sismos simultáneos de las estaciones Diana y La Venta y los 55 para las estaciones Diana y Diana Pozo, de manera de verificar si se mantienen o cambian respecto a los obtenidos en estos 33 sismos y así poder llegar a mejores conclusiones sobre las amplitudes y la forma de los cocientes espectrales.

Respecto a la frecuencia promedio o periodo promedio fundamental de cada región, la figura 4.46 nos ayuda a determinar qué estación de referencia esta dando los mejores valores de periodo en cada región. Es notorio que los valores de periodo obtenidos de utilizar la estación Diana Pozo como referencia tiene menos dispersión que los de La Venta. Son las regiones 2, 3, 4, 6 y 8 las que presentan esta menor dispersión.

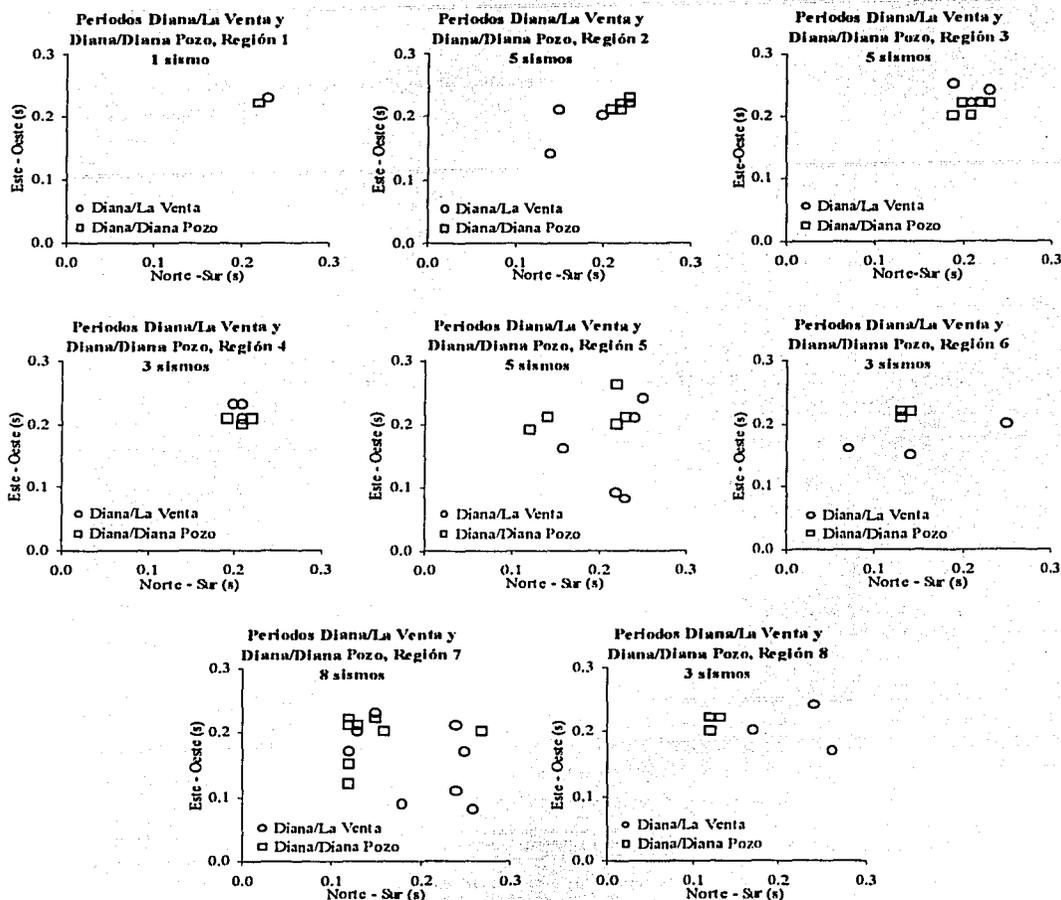


Figura 4.46

Esto lleva a concluir que en la estación Diana Pozo se tiene una señal libre de alguna interferencia que esta teniendo la estación La Venta y que influye en la respuesta tanto de amplificación como de frecuencia o periodo predominante. La degradación por intemperismo que produce una baja impedancia y el efecto de superficie libre son los factores que están interfiriendo en la respuesta en La Venta; sin embargo, éstos no estarían afectando a las ondas sísmicas en la estación La Venta cuando los sismos pertenecen a las regiones 4 y 6 por que las amplitudes de los cocientes espectrales de ambos pares de estaciones, en la baja y alta frecuencia, presentan formas y valores similares.

Como una conclusión general, de la tabla 4.7 se puede indicar que las regiones 1 al 5 presentan en ambas direcciones frecuencias o periodos promedios fundamentales similares, lo que no sucede en las regiones 6 al 8. Esto motiva que el valor promedio de frecuencia y periodo obtenido para los 33 sismos simultáneos, estarían representado solamente a las regiones 1 al 5, más no a las regiones 6 al 8 que tendrían valores diferentes a este promedio. Las amplificaciones relativas máximas son mayores al utilizar la estación Diana Pozo como referencia en la mayoría de la regiones, salvo en la 4 y 6. Al analizar los valores de periodos obtenidos en cada región para cada par de estaciones (figura 4.46), los obtenidos al utilizar como referencia la estación Diana Pozo, presentan menor dispersión que al utilizar La Venta.

Tabla 4.7: Comparación de resultados obtenidos de cocientes espectrales Diana/La Venta y Diana/Pozo

Regiones	Parametros	33 sismos Diana/La Venta		33 sismos Diana/Diana Pozo	
		NS	EO	NS	EO
Total	Frecuencia (Hz)	4.23	4.39	4.35	4.72
	Periodo (s)	0.24	0.23	0.23	0.21
	Amp.Rel.Max.	14.2	12.4	17.6	22.4
Region 1	Frecuencia (Hz)	4.44	4.40	4.49	4.52
	Periodo (s)	0.23	0.23	0.22	0.22
	Amp.Rel.Max.	51.0	19.8	37.3	30.8
Region 2	Frecuencia (Hz)	4.27	4.88	4.49	4.79
	Periodo (s)	0.23	0.20	0.22	0.21
	Amp.Rel.Max.	11.0	9.4	26.9	27.2
Region 3	Frecuencia (Hz)	4.46	4.52	4.50	4.72
	Periodo (s)	0.22	0.22	0.22	0.21
	Amp.Rel.Max.	17.9	13.0	25.0	31.6
Region 4	Frecuencia (Hz)	4.73	4.39	4.58	4.79
	Periodo (s)	0.21	0.23	0.22	0.21
	Amp.Rel.Max.	39.6	30.8	32.2	48.5
Region 5	Frecuencia (Hz)	4.30	4.33	4.52	4.70
	Periodo (s)	0.23	0.23	0.22	0.21
	Amp.Rel.Max.	13.7	8.0	26.7	21.9
Region 6	Frecuencia (Hz)	7.22	6.21	7.63	4.58
	Periodo (s)	0.14	0.16	0.13	0.22
	Amp.Rel.Max.	24.6	26.2	35.4	22.9
Region 7	Frecuencia (Hz)	4.03	5.97	7.70	4.82
	Periodo (s)	0.25	0.17	0.13	0.21
	Amp.Rel.Max.	14.1	16.0	16.2	22.0
Region 8	Frecuencia (Hz)	4.11	4.11	7.75	4.52
	Periodo (s)	0.24	0.24	0.13	0.22
	Amp.Rel.Max.	18.9	22.3	23.9	20.9

4.5 SISMOS REGISTRADOS SIMULTÁNEAMENTE EN LOS PARES DE ESTACIONES DIANA/LA VENTA Y DIANA/DIANA POZO

4.5.1 COCIENTES ESPECTRALES ENTRE ESTACIONES DIANA Y LA VENTA

Continuando con el procedimiento propuesto, se determinarán nuevamente los efectos de sitio pero ahora utilizando 50 sismos registrados simultáneamente en estas estaciones; se incluyen los 33 sismos anteriores, incorporándose 17 nuevos que sólo se registraron en las estaciones Diana y La Venta. Como se mencionó anteriormente el objetivo es comparar los resultados de estos 50 sismos y los que se obtuvieron anteriormente con los 33.

La figura 4.47 muestra la ubicación de epicentros de los 50 sismos y en la tabla 3.8 se presentan sus características principales.

Son 50 cocientes espectrales obtenidos para cada dirección. Las figuras 4.48 y 4.49 muestran los cocientes de los 17 sismos nuevos; los otros 33 ya se presentaron en las figuras 4.6 al 4.8.

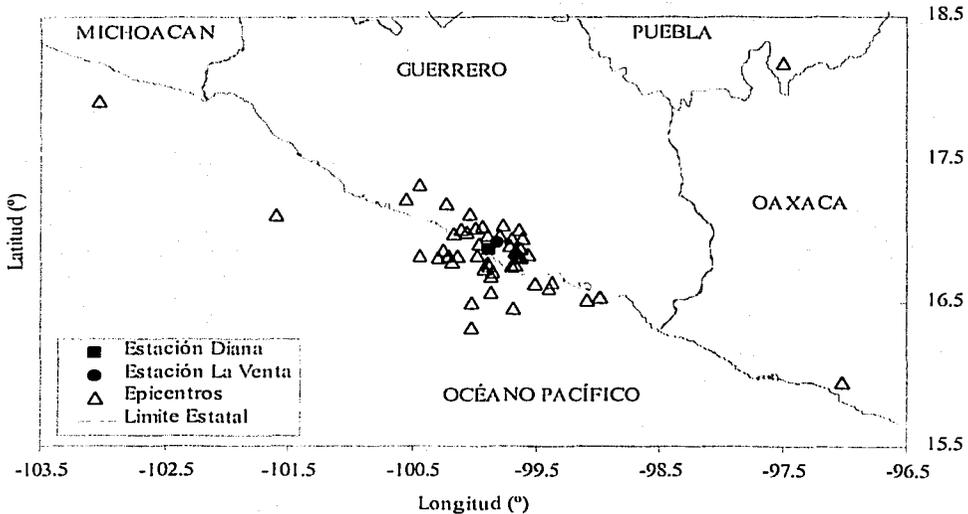


Figura 4.47: Epicentros de 50 sismos registrados simultáneamente en las estaciones Diana y La Venta

Tabla 4.8: Características de 50 sismos registrados simultáneamente en las estaciones Diana y La Venta (fuente: Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes, 2000)

Nº	SISMO	HORA(GTM)	LATITUD (°)	LONGITUD (°)	PROFUND. (Km)	Mb	Ms	Mc
1	16/08/88	04:20:50.3	16.97	-99.80	21.1	4.2	-	4.6
2	25/04/89	14:29:00.4	16.60	-99.40	19.0	6.3	6.9	6.5
3	02/05/89	09:30:16.7	16.64	-99.51	13.4	5.4	4.9	5.1
4	17/08/89	00:54:03.2	17.12	-100.04	25.6	4.9	-	4.8
5	08/10/89	22:32:40.6	17.19	-100.21	36.0	5.0	4.1	5.0
6	09/11/89	08:36:40.9	16.84	-99.65	9.9	5.1	4.1	5.1
7	13/01/90	02:07:27.6	16.82	-99.63	12.2	5.3	5.0	5.0
8	04/04/90	17:08:17.1	16.65	-99.37	15.4	4.3	4.3	5.0
9	09/07/90	03:04:23.9	16.86	-99.67	16.2	-	-	4.5
10	10/07/90	06:44:50.6	16.83	-99.57	17.9	4.5	-	4.8
11	09/01/92	04:03:18.8	17.01	-99.65	32.0	4.7	-	4.3
12	15/05/92	08:35:09.2	16.83	-99.98	23.0	4.2	-	4.2
13	24/10/93	07:52:18.2	16.54	-98.98	19.0	6.2	6.6	6.5
14	29/10/94	16:44:04.3	16.97	-99.89	24.0	-	-	5.1
15	15/05/95	22:36:15	16.50	-100.02	5.0	-	-	4.6
16	12/07/95	21:43:50	17.02	-99.99	26.0	-	-	4.0
17	09/12/95	22:49:23	16.88	-99.63	23.0	-	-	4.3
18	01/01/96	17:15:16.8	16.95	-99.69	55.0	-	-	4.4
19	13/03/96	21:04:19.8	16.52	-99.08	18.0	5.2	4.4	5.1
20	23/04/96	06:53:35	17.11	-101.60	17.0	5.3	4.9	5.3
21	08/05/96-1	01:24:43.5	16.83	-100.21	5.0	4	-	4.6
22	08/05/96-2	13:32:19.7	16.82	-100.29	7.0	4.1	-	4.6
23	08/06/96	00:57:22	16.46	-99.68	15.0	-	-	4.4
24	11/06/96	01:59:35.5	16.74	-99.92	16.0	-	-	4
25	03/09/96	11:45:04.8	16.72	-99.85	9.0	4.6	-	4.9
26	11/01/97	20:28:27.2	17.91	-103.04	16.0	6.5	6.9	-
27	22/03/97-1	03:49:16	17.04	-99.76	30.0	4.7	-	4.6
28	22/03/97-2	05:21:42.9	16.33	-100.02	16.0	4.1	-	4.3
29	08/05/97	15:58:29.7	17.32	-100.44	12.0	5.0	4.3	4.8
30	11/07/97	22:23:34.4	16.76	-99.70	10.0	-	-	4.5
31	19/07/97	07:34:37	17.22	-100.56	51.0	4.6	3.8	4.9
32	14/08/97	19:25:43.2	16.79	-100.18	6.0	-	-	4.1
33	25/08/97	13:05:43.9	16.69	-99.87	3.0	-	-	3.9
34	27/08/97	00:13:26.1	16.76	-99.88	28.0	5.0	-	4.6
35	14/10/97	16:23:31.6	16.83	-99.64	5.0	-	-	4.2
36	21/16/97	17:38:06.6	16.57	-99.87	16.0	-	-	4.0
37	28/01/98	03:56:06.8	16.78	-99.89	28.0	-	-	4.0
38	01/06/98	07:59:33.2	16.83	-100.14	5.0	4.5	-	4.8
39	12/07/98	08:11:27.5	16.83	-100.44	4.0	5.1	4.6	4.8
40	17/07/98	11:18:04	16.98	-100.16	27.0	-	-	4.6
41	09/08/98	16:18:06.6	16.87	-100.25	3.0	4.2	-	4.5
42	07/09/98	06:53:17.8	16.77	-99.67	12.0	-	-	4.1
43	02/03/99	20:45:13.3	16.95	-99.61	41.0	4.2	-	4.2
44	06/04/99	01:35:09.1	16.91	-99.96	6.0	-	-	3.9
45	08/04/99	22:19:50	16.99	-100.06	6.0	-	-	4
46	15/06/99	20:42:07.1	18.18	-97.51	69.0	6.4	6.5	-
47	16/08/99	04:09:45.7	17.03	-99.94	55.0	-	-	4.3
48	30/09/99	16:31:14.8	15.95	-97.03	16.0	6.5	7.5	5.2
49	27/10/99	02:53:54	16.90	-99.71	35.0	-	-	4.2
50	08/10/01	03:39:25.6	17.01	-100.10	16.0	5.6*	5.4*	-

*Fuente: Harvard CTM Catalog

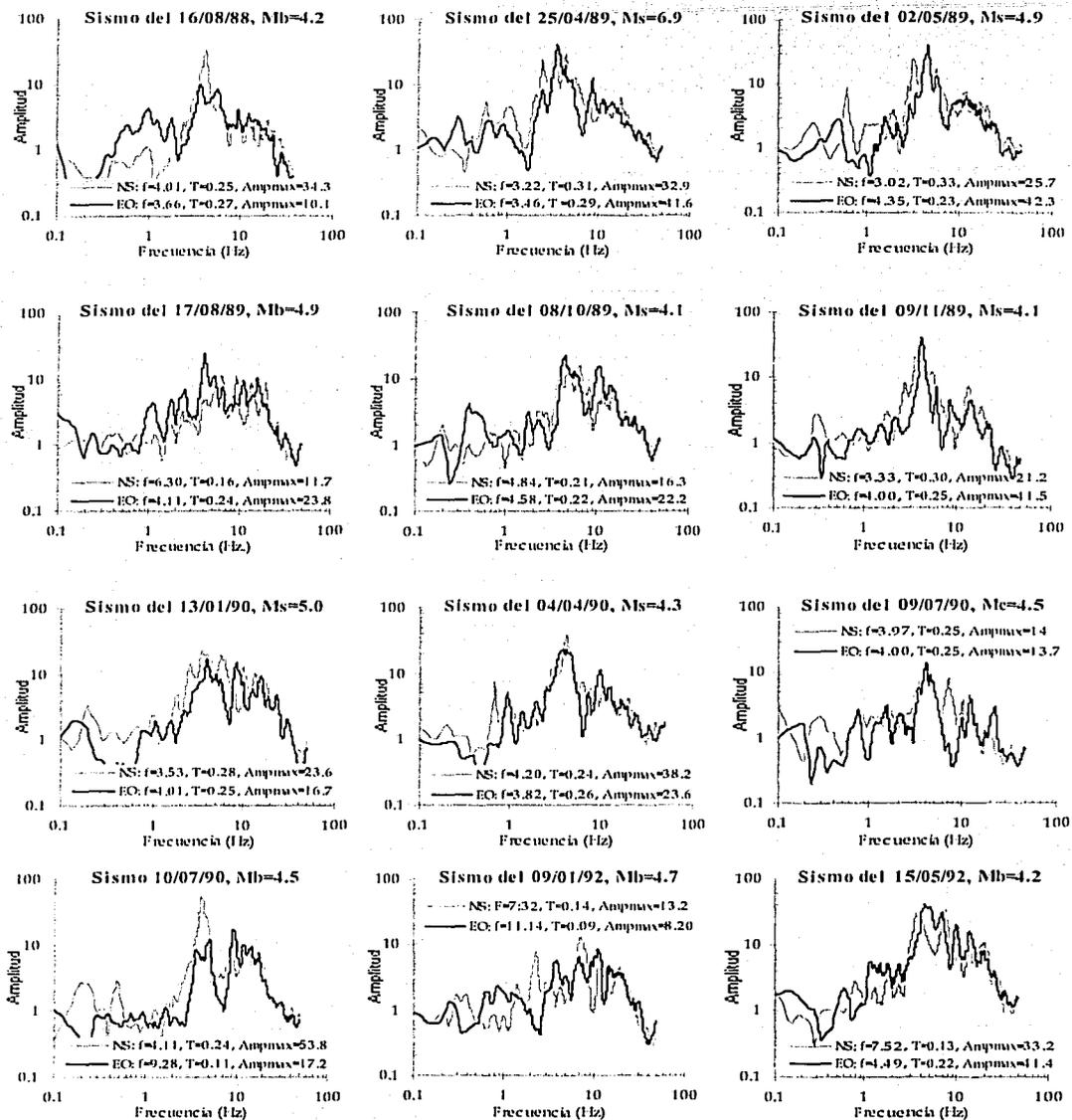


Figura 4.48: Cocientes espectrales entre estaciones Diana y La Venta

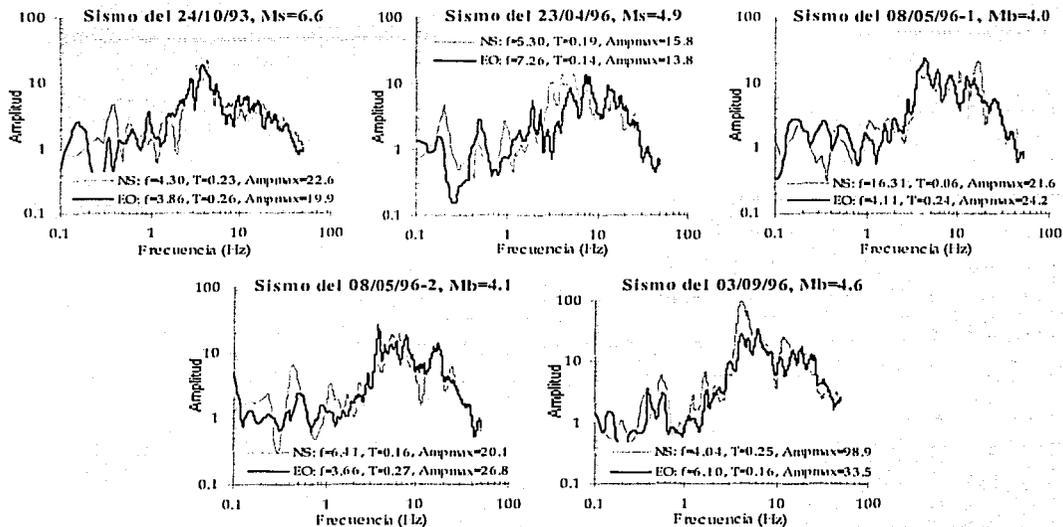


Figura 4.49: Cocientes espectrales entre estaciones Diana y La Venta

Los valores de frecuencia y periodo fundamental del suelo así como la amplitud relativa máxima obtenidas de cada cociente espectral se muestran en la tabla 3.9

De los 17 sismos nuevos, los cocientes espectrales indican que sólo el 09/07/90 tiene periodos iguales en ambas direcciones ($T = 0.25$ s.), los periodos del sismo 08/10/89 se diferencian en 0.01 s. por lo que se les puede considerar iguales ($T_{NS} = 0.21$ s. y $T_{EO} = 0.22$ s.). En los otros 15 eventos los valores del periodo varían en las dos componentes con una diferencia mayor de 0.01 s.

En ninguno de estos 17 sismos se obtienen valores iguales de amplificación relativa máxima en ambas direcciones; en 5 sismos la diferencia es de hasta cinco unidades y como ya se hizo anteriormente, se consideran como respuestas similares; el resto de eventos presentan una diferencia en los valores máximos de amplificación relativa mayor a cinco veces.

Sólo en dos sismos se observa un pico espectral que define claramente la frecuencia predominante en cada dirección, coincidiendo en la forma del pico, diferenciándose en la posición de la frecuencia dominante.

Tabla 4.9: Frecuencias y periodos fundamentales y amplificaciones relativas máximas, obtenidas para el suelo de la estación Diana (50 sismos respecto a La Venta)

SISMO	Norte-Sur			Este-Oeste		
	Frecuencia (Hz)	Periodo (Seg.)	Amplitud Max.	Frecuencia (Hz)	Periodo (Seg.)	Amplitud Max.
16/08/88	4.01	0.25	34.3	3.66	0.27	10.1
25/04/89	3.22	0.31	32.9	3.46	0.29	41.6
02/05/89	3.02	0.33	25.7	4.35	0.23	42.3
17/08/89	6.30	0.16	11.7	4.11	0.24	23.8
08/10/89	4.84	0.21	16.3	4.58	0.22	22.2
09/11/89	3.33	0.30	21.2	4.00	0.25	41.5
13/01/90	3.53	0.28	23.6	4.01	0.25	16.7
04/04/90	4.20	0.24	38.2	3.82	0.26	23.6
09/07/90	3.97	0.25	14.0	4.00	0.25	13.7
10/07/90	4.11	0.24	53.8	9.28	0.11	17.2
09/01/92	7.32	0.14	13.2	11.14	0.09	8.2
15/05/92	7.52	0.13	33.2	4.49	0.22	41.4
24/10/93	4.30	0.23	22.6	3.86	0.26	19.9
29/10/94	4.11	0.24	18.4	4.11	0.24	27.6
15/05/95	4.59	0.22	32.7	11.72	0.09	20.4
12/07/95	6.06	0.17	38.5	4.93	0.20	107.7
09/12/95	4.49	0.22	42.2	4.64	0.22	11.6
01/01/96	5.08	0.20	17.5	5.02	0.20	22.7
13/03/96	4.47	0.22	29.8	4.50	0.22	14.3
23/04/96	5.30	0.19	15.8	7.26	0.14	13.8
08/05/96-1	16.31	0.06	21.6	4.11	0.24	24.2
08/05/96-2	6.41	0.16	20.1	3.66	0.27	26.8
08/06/96	4.99	0.20	32.4	4.44	0.23	79.7
11/06/96	4.30	0.23	14.4	12.10	0.08	7.9
03/09/96	4.04	0.25	98.9	6.10	0.16	33.5
11/01/97	8.01	0.12	13.0	5.94	0.17	15.7
22/03/97-1	4.44	0.23	51.0	4.40	0.23	19.8
22/03/97-2	4.11	0.24	88.4	4.75	0.21	117.3
08/05/97	4.23	0.24	18.6	4.67	0.21	19.9
11/07/97	5.31	0.19	10.9	4.11	0.24	14.9
19/07/97	7.97	0.13	29.5	5.13	0.20	14.2
14/08/97	3.95	0.25	20.3	5.13	0.20	10.9
25/08/97	4.68	0.21	47.5	4.82	0.21	14.0
27/08/97	4.03	0.25	14.4	4.12	0.24	11.1
14/10/97	5.22	0.19	15.4	4.35	0.23	18.9
21/10/97	4.73	0.21	58.8	4.35	0.23	55.3
28/01/98	6.26	0.16	28.9	6.15	0.16	9.8
01/06/98	7.22	0.14	33.3	6.50	0.15	32.1
12/07/98	13.38	0.07	23.9	6.18	0.16	37.3
17/07/98	4.21	0.24	31.4	9.46	0.11	21.0
09/08/98	6.59	0.15	24.4	4.44	0.23	32.1
07/09/98	4.68	0.21	27.9	4.58	0.22	12.4
02/03/99	6.93	0.14	11.4	7.03	0.14	14.6
06/04/99	5.49	0.18	41.8	11.40	0.09	20.2
08/04/99	3.82	0.26	14.9	12.60	0.08	19.1
15/06/99	4.40	0.23	12.6	4.62	0.22	13.1
16/08/99	3.82	0.26	24.1	6.06	0.17	13.7
30/09/99	4.32	0.23	23.4	4.21	0.24	18.8
27/10/99	6.88	0.15	11.4	4.75	0.21	15.6
08/10/01	3.94	0.25	13.3	5.89	0.17	22.2

La figura 4.50 presenta la superposición de los 50 cocientes espectrales obtenidos en cada dirección; si comparamos con la figura 4.9 que corresponde a la superposición de los 33 sismos anteriores, se observa que aumenta la cantidad de picos de amplificaciones relativas en algunas bandas de frecuencia; en general la forma de la superposición no varía al insertar los cocientes correspondientes a 17 sismos. Esto permite concluir que la superposición en ambas direcciones representa una banda de respuesta en amplificación a través de la frecuencia, y que cocientes espectrales de sismos futuros presentarán amplificaciones relativas dentro de esta banda.

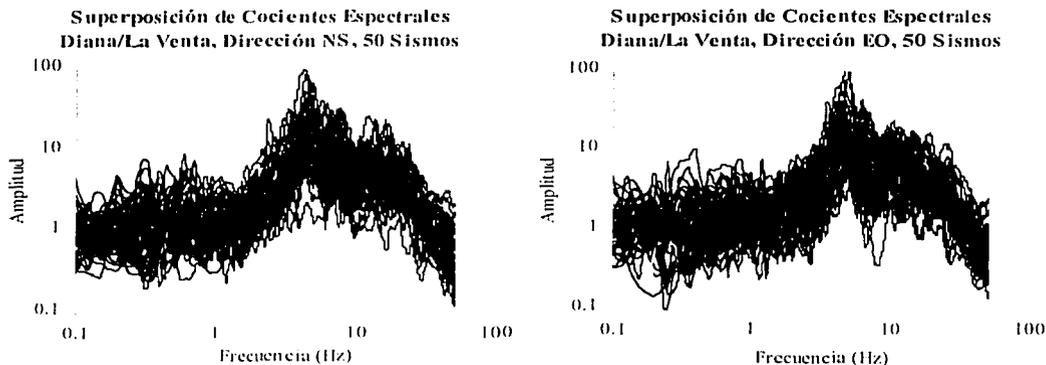


Figura 4.50

En la figura 4.51 se grafican los valores de la frecuencia y los periodos fundamentales de los 50 sismos.

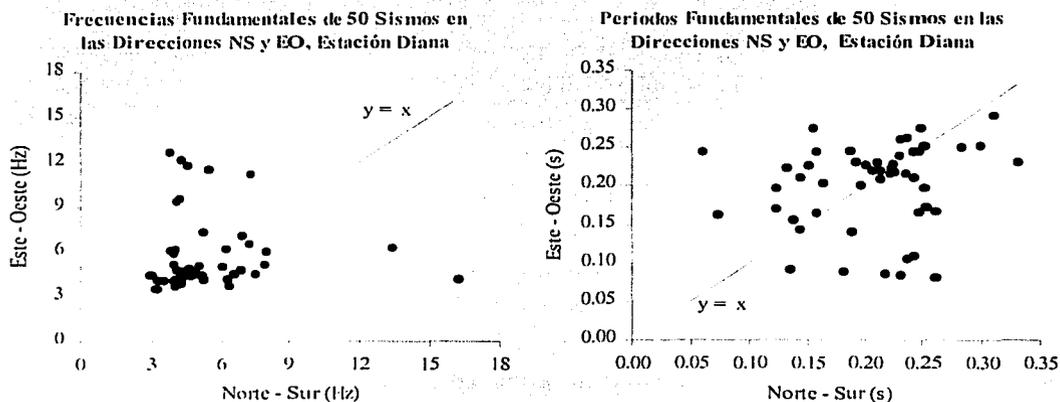


Figura 4.51

TESIS CON
FECHA: _____

Comparando la figura 4.51 con la 4.10 que corresponde a 33 sismos, se pueden hacer dos observaciones: primero hay un aumento en la dispersión de los valores de frecuencias y periodos fundamentales; y segundo también hay un aumento en la concentración de estos valores entre los 3 y 6 Hz. en ambas direcciones, que transformado a valores de periodo sería entre los 0.16 y 0.33 s.

Por ello, debido nuevamente a la dispersión de estos valores, se utilizará la ecuación (1) para obtener el cociente espectral promedio, así como el valor de la frecuencia y periodo fundamental promedio en cada dirección. Estos cocientes se presentan en la figura 4.52, se incluyen nuevamente las respectivas desviaciones estándar.

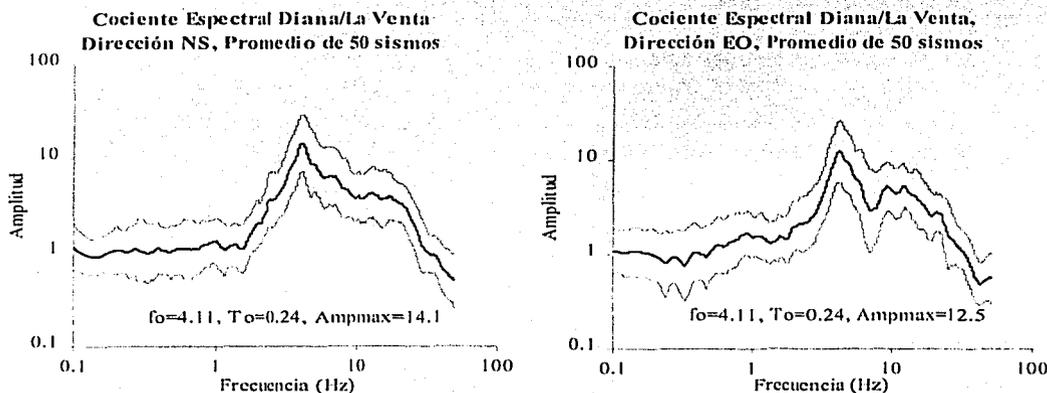


Figura 4.52

Observando estos cocientes, se nota que las frecuencias fundamentales promedio, que corresponden a la frecuencia donde se ubica la amplitud relativa máxima, son iguales y tienen como valor $f_0 = 4.11$ Hz., siendo entonces el periodo fundamental promedio $T_0 = 0.24$ s. y la amplificación máxima relativa promedio es para la dirección EO de 12.5 y para la NS de 14.1; la diferencia entre las amplificaciones máximas es de 2.4, valor que nos permite considerarlas iguales.

La figura 4.53 muestra la superposición de los cocientes espectrales obtenidos para los 33 y 50 sismos en las dos direcciones, de esta figura podemos concluir que:

1° La forma de los cocientes espectrales promedio no varía, manteniéndose aún insertándose otros cocientes nuevos.

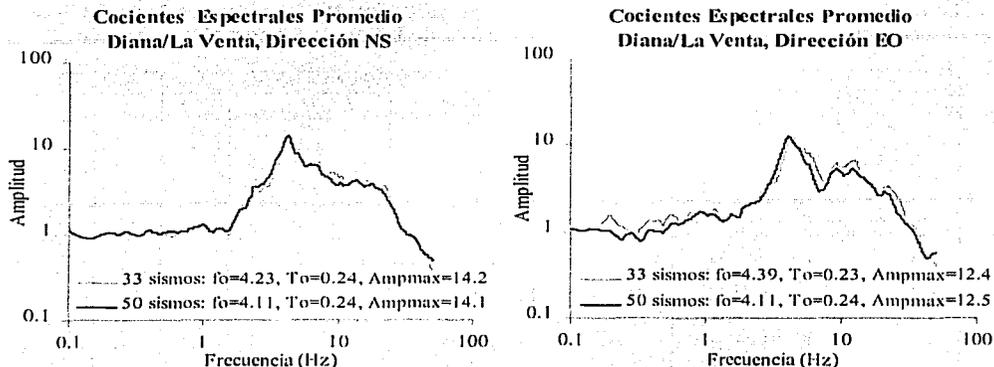


Figura 4.53: Superposición de Cocientes Espectrales

2° La amplificación relativa a través de la frecuencia es similar en la dirección NS y algo menor para los 50 sismos en la dirección EO, sobre todo en las bandas de frecuencia de 0.1 a 1 Hz. y de 4.3 a 40 Hz. Los valores máximos de amplificación relativa en ambas direcciones varían sólo en 0.1 veces por lo que los consideramos como valores prácticamente iguales.

3° La frecuencia promedio fundamental varía, siendo mayor la diferencia en la dirección EO (0.28 Hz.), sin embargo al transformarlo a valores de periodo promedio fundamental, en la dirección NS son iguales y en la EO apenas se diferencian en 0.01 s., por lo que también se consideran como respuestas similares.

Como conclusión, los cocientes espectrales promedio Diana/La Venta, obtenidos para 33 y 50 sismos, sólo presentan variaciones pequeñas en los valores de amplificaciones relativas para ciertas bandas de frecuencia en la dirección EO, por lo que estos cocientes y sus desviaciones estándar respectivas representan adecuadamente la respuesta sísmica del suelo sobre el cual se encuentra la estación Diana.

4.5.2 COCIENTES ESPECTRALES ENTRE ESTACIONES DIANA Y DIANA POZO

Se repetirá el procedimiento anterior con 55 sismos registrados simultáneamente en las estaciones Diana y Diana Pozo. Se incluyen los 33 sismos utilizados anteriormente y se agregan 22 sismos nuevos que se registraron sólo en estas estaciones. En la tabla 4.10 se presentan las características de estos sismos y en la figura 4.54 la ubicación de sus epicentros.

Tabla 4.10: Características de 55 sismos registrados simultáneamente en las estaciones Diana y Diana Pozo (fuente: Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes, 2000)

Nº	SISMO	HORA (GMT)	LATITUD (°)	LONGITUD (°)	PROFUND. (Km)	M _b	M _s	M _c
1	15/04/94	4:48:18.5	16.74	-99.63	5.0	4.0	-	4.7
2	23/05/94	01:41:46	18.03	-100.57	23.0	-	-	5.6
3	29/10/94	16:44:04.3	16.97	-99.89	24.0	-	-	5.1
4	10/12/94	16:17:40.9	18.02	-101.56	20.0	-	-	6.3
5	22/12/94	10:38:20.7	16.63	-99.92	5.0	-	-	4.3
6	02/01/95	21:54:51.2	16.68	-99.79	20.0	-	-	4.2
7	15/05/95	22:36:15	16.50	-100.02	5.0	-	-	4.6
8	12/07/95	21:43:50	17.02	-99.99	26.0	-	-	4.0
9	22/09/95	8:36:17.5	16.37	-99.62	24.0	-	-	4.6
10	09/12/95	22:49:23	16.88	-99.63	23.0	-	-	4.3
11	01/01/96	17:15:16.8	16.95	-99.69	55.0	-	-	4.4
12	13/03/96	21:04:19.8	16.52	-99.08	18.0	5.2	4.4	5.1
13	15/04/96	13:17:53	16.80	-100.21	3.0	-	-	4.1
14	08/06/96	00:57:22	16.46	-99.68	15.0	-	-	4.4
15	11/06/96	01:59:35	16.74	-99.92	16.0	-	-	4.0
16	19/11/96	14:49:56	17.38	-100.98	51.0	-	-	3.9
17	11/01/97	20:28:27.2	17.91	-103.04	16.0	6.5	6.9	-
18	22/03/97	03:49:16	17.04	-99.76	30.0	4.7	-	4.6
19	22/03/97	05:21:42.9	16.33	-100.02	16.0	4.1	-	4.3
20	08/05/97	15:58:29.7	17.32	-100.44	12.0	5.0	4.3	4.8
21	19/05/97	11:23:53.7	17.24	-100.46	40.0	-	-	4.2
22	26/06/97	19:01:05.9	16.77	-99.97	10.0	-	-	4.1
23	11/07/97	22:23:34.4	16.76	-99.70	10.0	-	-	4.5
24	19/07/97	07:34:37	17.22	-100.56	51.0	4.6	3.8	4.9
25	14/08/97	19:25:43.2	16.79	-100.18	6.0	-	-	4.1
26	25/08/97	13:05:43.9	16.69	-99.87	3.0	-	-	3.9
27	27/08/97	00:13:26.1	16.76	-99.88	28.0	5.0	-	4.6
28	14/10/97	16:23:31.6	16.83	-99.64	5.0	-	-	4.2
29	21/10/97	17:38:06.6	16.57	-99.87	16.0	-	-	4.0
30	31/10/97	12:09:19	17.14	-100.05	28.0	-	-	4.3
31	22/12/97	05:22:08	17.14	-101.24	5.0	5.1	5.0	4.6
32	28/01/98-1	03:56:06.8	16.78	-99.89	28.0	-	-	4.0
33	28/01/98-2	20:38:47.2	16.91	-100.08	17.0	-	-	3.9
34	05/03/98	14:51:04.3	16.85	-100.25	9.0	-	-	4.3
35	11/03/98	14:13:12.1	17.01	-100.11	40.0	-	-	4.2
36	01/06/98	07:59:33.2	16.83	-100.14	5.0	4.5	-	4.8
37	12/07/98	08:11:27.5	16.83	-100.44	4.0	5.1	4.6	4.8
38	17/07/98	11:18:04	16.98	-100.16	27.0	-	-	4.6
39	09/08/98	16:18:06.6	16.87	-100.25	3.0	4.2	-	4.5
40	07/09/98	06:53:17.8	16.77	-99.67	12.0	-	-	4.1
41	27/12/98	08:20:28.6	16.59	-100.11	3.0	-	-	4.3
42	02/03/99	20:45:13.3	16.95	-99.61	41.0	4.2	-	4.2
43	04/03/99	07:57:18.7	16.80	-100.18	7.0	-	-	3.8
44	06/04/99	01:35:09.1	16.91	-99.96	6.0	-	-	3.9
45	08/04/99	22:19:50	16.99	-100.06	6.0	-	-	4.0
46	30/05/99	09:58:43	17.26	-100.79	53.0	4.4	-	4.6
47	15/06/99	20:42:07.1	18.18	-97.51	69.0	6.4	6.5	-
48	21/06/99	17:43:05.5	17.99	-101.72	54.0	6.0	5.8	5.8
49	16/08/99	04:09:45.7	17.03	-99.94	55.0	-	-	4.3
50	30/09/99	16:31:14.8	15.95	-97.03	16.0	6.5	7.5	5.2
51	27/10/99	02:53:54	16.90	-99.71	35.0	-	-	4.2
52	08/11/99	02:36:46.2	17.33	-100.96	23.0	4.7	4.1	4.6
53	19/11/99	04:56:29.5	16.56	-99.69	15.0	-	-	4.4
54	07/12/99	16:25:31.6	17.21	-99.93	42.0	-	-	3.7
55	08/10/01	03:39:20	17.01	-100.10	16.0	5.6*	5.4*	-

*Fuente: Harvard CTM Catalog

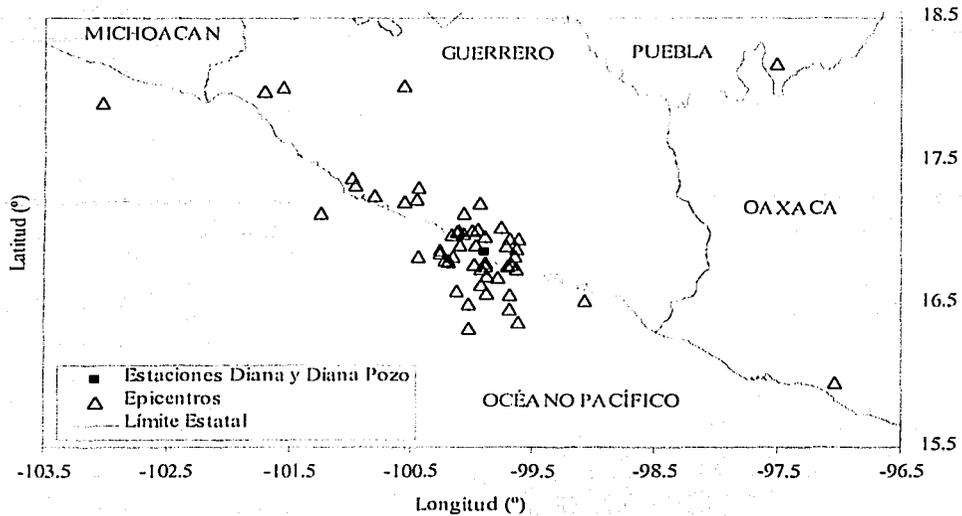


Figura 4.54: Epicentros de 55 sismos registrados simultáneamente en las estaciones Diana y Diana Pozo

Se obtuvieron 55 cocientes espectrales en cada dirección. Las figuras 4.55 y 4.56 muestran los cocientes espectrales de los 22 sismos nuevos; los 33 restantes ya se mostraron en las figuras 4.13 al 4.15.

Los valores de frecuencia y periodo fundamental del suelo así como la amplificación relativa máxima obtenida de cada cociente espectral se muestra en la tabla 4.11.

De los 22 sismos nuevos, los cocientes espectrales indican que 7 presentan periodos iguales en ambas direcciones y 3 tienen periodos que se diferencian en 0.01 s. por lo que se les puede considerar iguales. En los otros 12 eventos los valores del periodo en cada dirección varían con una diferencia mayor de 0.01 s.

Similarmente a los casos anteriores, en ningún evento se obtienen valores iguales en ambas direcciones; en 4 sismos la diferencia entre las amplificaciones relativas máximas es de cinco unidades, lo que se considera como una misma respuesta, mientras que el resto de eventos presenta diferencias mayores. En 7 eventos se observa un pico espectral que define claramente la frecuencia predominante en ambas direcciones.

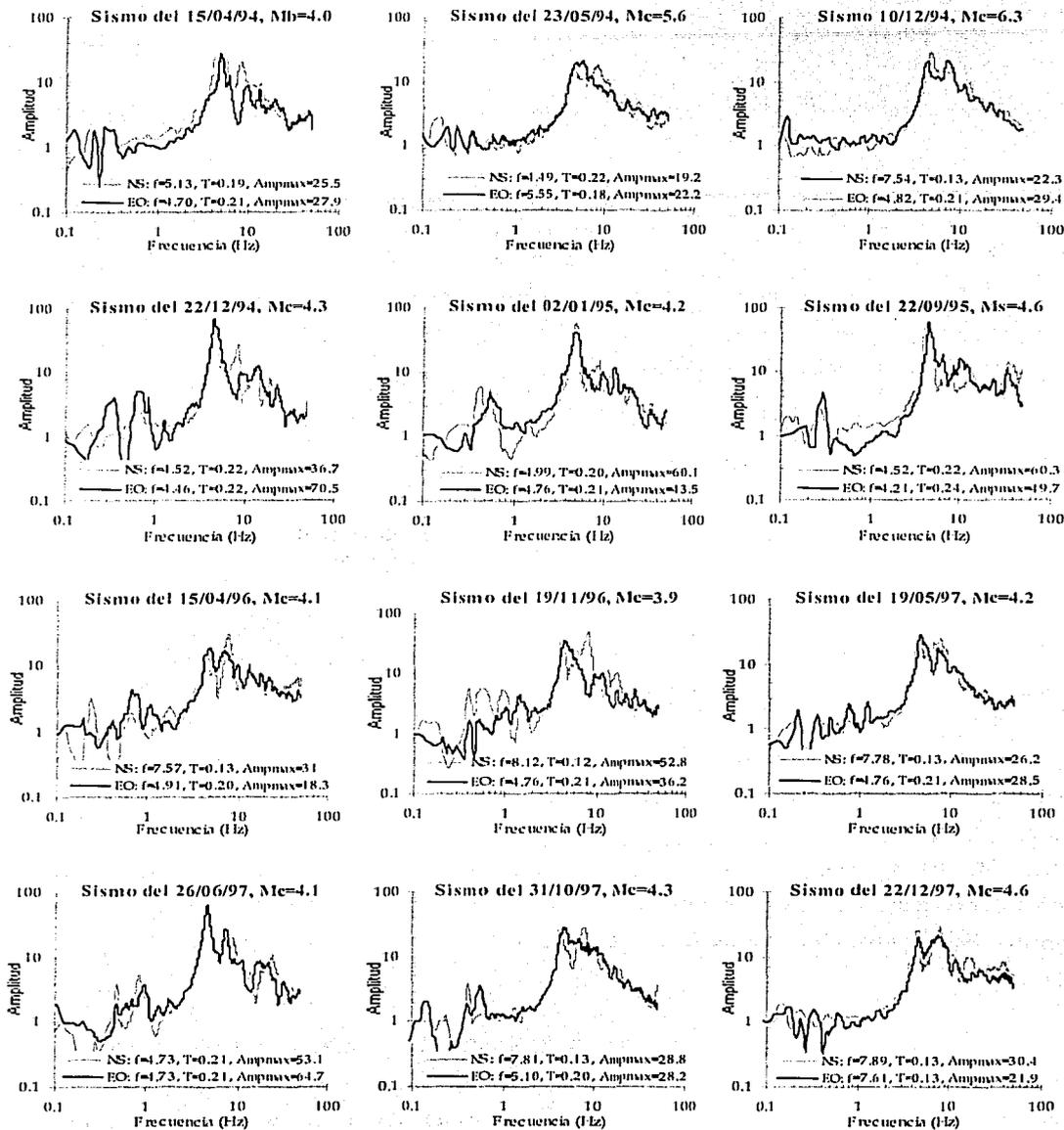


Figura 4.55: Cocientes Espectrales Estaciones Diana y Diana Pozo

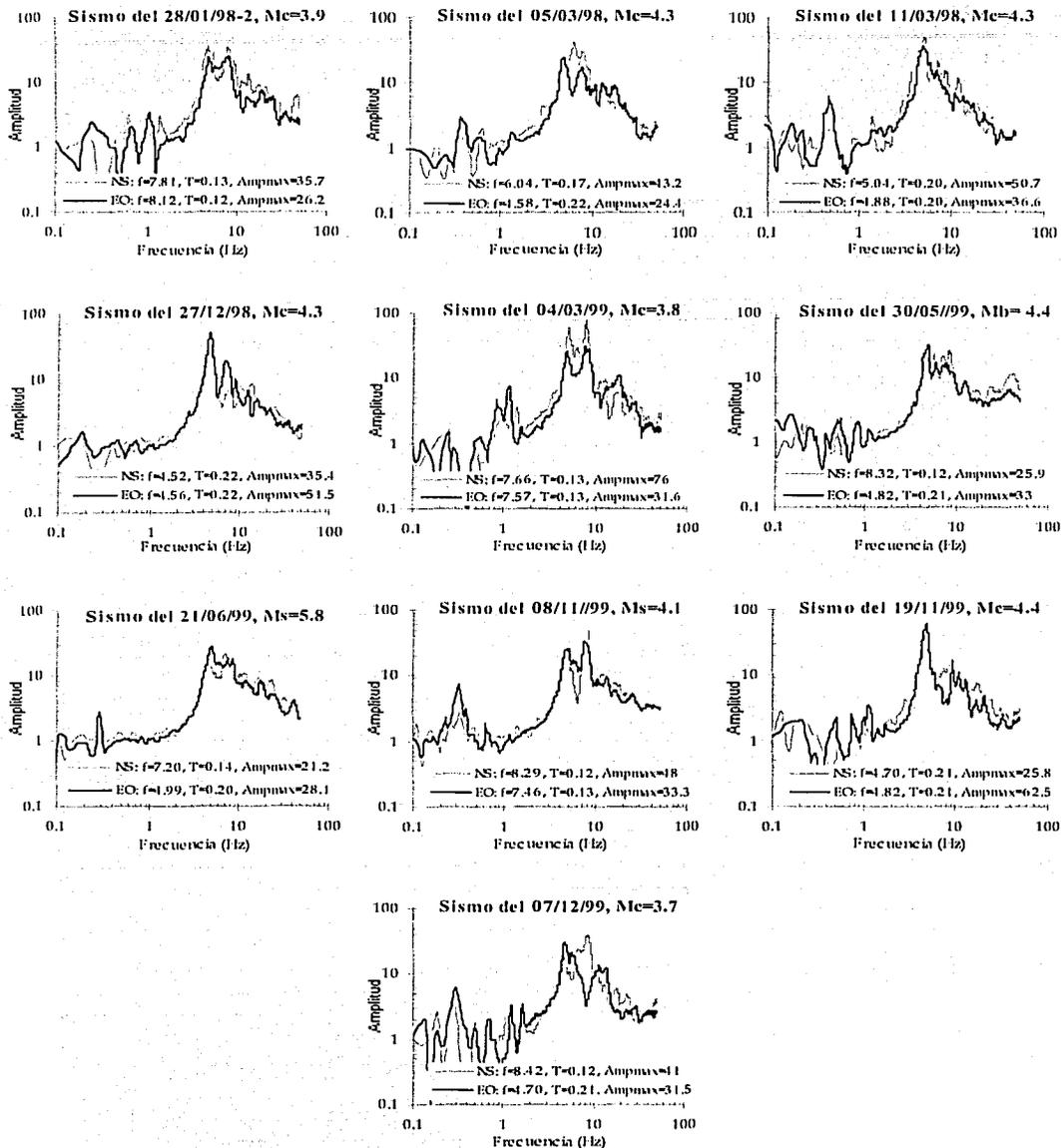


Figura 4.56: Cocientes Espectrales Estaciones Diana y Diana Pozo

Tabla 4.11: Frecuencias y periodos fundamentales y amplificaciones relativas máximas obtenidas para el suelo de la estación Diana (55 sismos respecto a Diana Pozo)

SISMO	Norte-Sur			Este - Oeste		
	Frecuencia (Hz)	Periodo (Seg.)	Amplitud Max.	Frecuencia (Hz)	Periodo (Seg.)	Amplitud Max.
15/04/94	5.13	0.19	25.5	4.70	0.21	27.9
23/05/94	4.49	0.22	19.2	5.55	0.18	22.2
29/10/94	7.75	0.13	22.7	4.52	0.22	19.7
10/12/94	7.54	0.13	22.3	4.82	0.21	29.4
22/12/94	4.52	0.22	36.7	4.46	0.22	70.5
02/01/95	4.99	0.20	60.1	4.76	0.21	43.5
15/05/95	4.53	0.22	35.0	3.83	0.26	19.0
12/07/95	8.30	0.12	39.8	4.88	0.20	26.3
22/09/95	4.52	0.22	60.3	4.21	0.24	49.7
09/12/95	4.56	0.22	30.2	4.59	0.22	39.2
01/01/96	4.76	0.21	32.1	4.87	0.21	33.6
13/03/96	4.76	0.21	26.9	4.93	0.20	34.7
15/04/96	7.57	0.13	31.0	4.91	0.20	18.3
08/06/96	5.25	0.19	27.2	4.70	0.21	39.4
11/06/96	4.58	0.22	27.9	4.91	0.20	29.5
19/11/96	8.12	0.12	52.8	4.76	0.21	36.2
11/01/97	8.27	0.12	26.8	4.79	0.21	27.3
22/03/97-1	4.49	0.22	37.3	4.52	0.22	30.8
22/03/97-2	4.33	0.23	45.5	4.70	0.21	75.9
08/05/97	7.66	0.13	32.2	4.73	0.21	20.7
19/05/97	7.78	0.13	26.2	4.76	0.21	28.5
26/06/97	4.73	0.21	53.1	4.73	0.21	64.7
11/07/97	5.31	0.19	25.6	5.01	0.20	31.6
19/07/97	8.09	0.12	32.2	8.21	0.12	30.8
14/08/97	7.86	0.13	49.9	4.78	0.21	42.2
25/08/97	4.72	0.21	34.2	5.07	0.20	41.2
27/08/97	6.97	0.14	23.5	4.85	0.21	24.4
14/10/97	4.41	0.23	23.7	4.49	0.22	38.0
21/10/97	4.58	0.22	39.8	4.76	0.21	89.7
31/10/97	7.81	0.13	28.8	5.10	0.20	28.2
22/12/97	7.89	0.13	30.4	7.61	0.13	21.9
28/01/98-1	8.55	0.12	45.2	5.37	0.19	18.8
28/01/98-2	7.81	0.13	35.7	8.12	0.12	26.2
05/03/98	6.04	0.17	43.2	4.58	0.22	24.4
11/03/98	5.04	0.20	50.7	4.88	0.20	36.6
01/06/98	7.51	0.13	37.9	4.58	0.22	19.9
12/07/98	7.36	0.14	23.7	4.58	0.22	30.7
17/07/98	6.47	0.15	19.4	4.55	0.22	23.4
09/08/98	8.30	0.12	29.0	4.52	0.22	23.8
07/09/98	4.46	0.22	36.0	4.46	0.22	28.4
27/12/98	4.52	0.22	35.4	4.56	0.22	51.5
02/03/99	4.35	0.23	34.2	4.27	0.23	23.2
04/03/99	7.66	0.13	76.0	7.57	0.13	31.6
06/04/99	8.67	0.12	29.1	6.65	0.15	36.0
08/04/99	6.10	0.16	18.6	5.01	0.20	55.2
30/05/99	8.32	0.12	25.9	4.82	0.21	33.0
15/06/99	4.43	0.23	21.7	4.62	0.22	32.2
21/06/99	7.20	0.14	21.2	4.99	0.20	28.1
16/08/99	8.06	0.12	19.7	4.46	0.22	39.5
30/09/99	4.91	0.20	25.9	4.64	0.22	44.0
27/10/99	4.61	0.22	30.7	4.79	0.21	38.1
08/11/99	8.29	0.12	48.0	7.46	0.13	33.3
19/11/99	4.70	0.21	25.8	4.82	0.21	62.5
07/12/99	8.42	0.12	41.0	4.70	0.21	31.5
08/10/01	3.69	0.27	21.4	4.88	0.20	20.2

La figura 4.57 presenta la superposición de los 55 cocientes espectrales obtenidos en cada dirección; si comparamos con la figura 4.16 que corresponde a la superposición de los 33 sismos anteriores, se observa que aumenta la cantidad de picos de amplificaciones relativas en algunas bandas de frecuencia; lo interesante es observar la banda de amplificación en el intervalo de frecuencia de 2 a 5 Hz., el cual no sufre ninguna variación aún al agregarse los 22 cocientes nuevos en ambas direcciones.

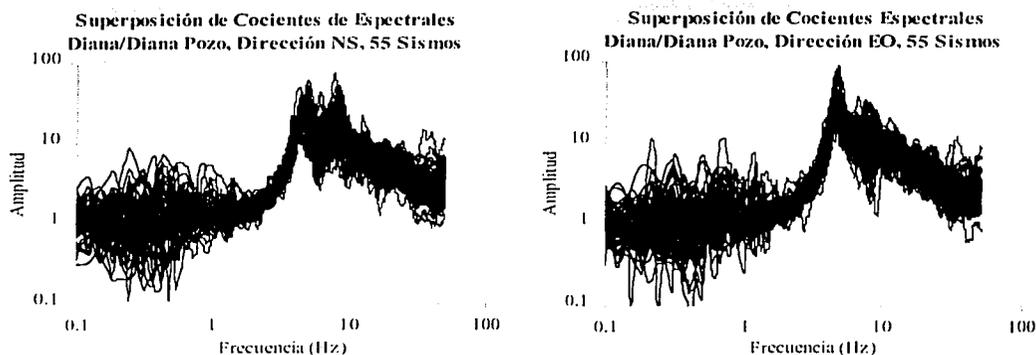


Figura 4.57

En general la forma de la superposición no varía al insertar los cocientes correspondientes a 22 sismos nuevos. Se concluye que la superposición de los cocientes en ambas direcciones representan una banda de respuesta en amplificación a través de la frecuencia, y que los cocientes espectrales de sismos futuros presentarán amplificaciones relativas dentro de esta banda.

La figura 4.58 muestra los valores de la frecuencia y los periodos fundamentales promedio de los 55 sismos en cada dirección; comparandola con la 4.17 que corresponde a los 33 sismos, se observa que se mantiene la tendencia de que la mayoría de eventos presenten la frecuencia fundamental entre 4 y 5 Hz. en la dirección EO (0.20 y 0.25 s. en periodo) y entre los 4 y 9 Hz. en la dirección NS (0.11 y 0.25 s.); dentro de este grupo se nota el incremento de concentración de valores en dos grupos de frecuencia: entre los intervalos de 4 a 5 Hz. (0.20 y 0.25 s. en periodo) en ambas direcciones y entre 4 a 5 Hz. en la dirección EO (0.20 y 0.25 s.) y de 7 a 9 Hz. en la NS (0.11 y 0.14 s.). Como conclusión: hay una fuerte tendencia a que en la dirección EO la frecuencia fundamental tenga valores de 4 a 5 Hz. y en la dirección NS de 4 a 9 Hz.

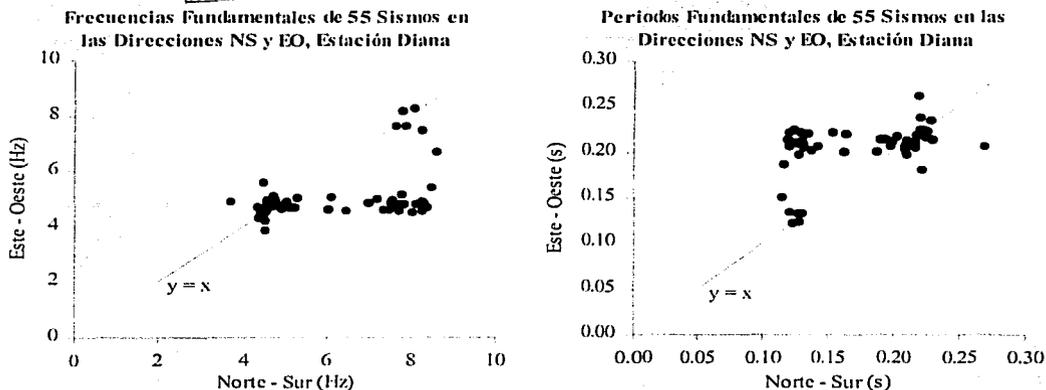


Figura 4.58

Nuevamente por la dispersión de estos valores, se utilizará la ecuación (1) para determinar el cociente espectral promedio. Estos cocientes se presentan en la figura 4.59, se incluyen nuevamente las respectivas desviaciones estándar

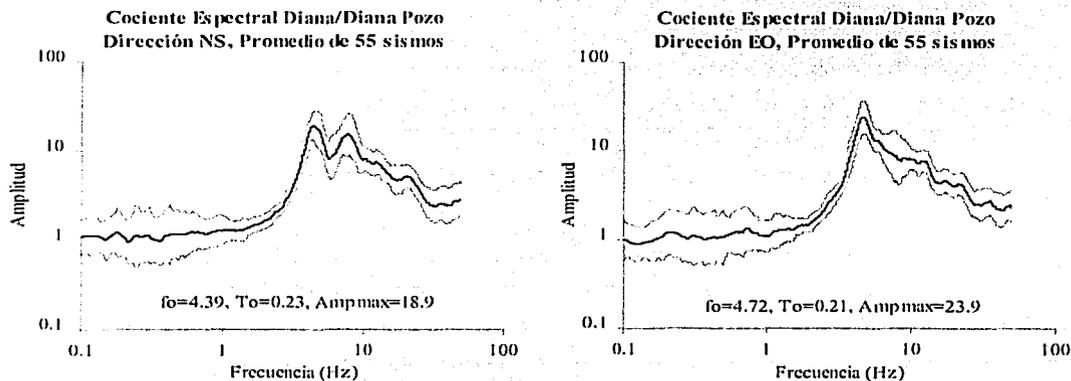


Figura 4.59

Las frecuencias fundamentales promedio, que corresponden a la frecuencia donde se ubica la amplitud relativa máxima, corresponden a $f_0 = 4.39$ Hz. y $f_0 = 4.72$ Hz. en las direcciones NS y EO respectivamente, siendo entonces los periodos fundamentales promedio correspondientes de $T_0 = 0.23$ s. y de $T_0 = 0.21$ s. Es importante notar que en la dirección NS se observa un segundo pico espectral, con

valor de amplificación relativa igual a 15.3 veces y con frecuencia de 7.80 Hz., este segundo pico corresponde en la figura 4.57 a la segunda concentración de valores de frecuencia. La amplificación máxima relativa promedio es para la dirección NS de 23.6 y para la EO de 18.9, la diferencia entre las amplificaciones máximas es de 4.7 veces lo que lleva a considerarlas similares para ambas direcciones.

La figura 4.60 muestra la superposición de los cocientes espectrales obtenidos para los 33 y 55 sismos en las dos direcciones, de esta figura podemos concluir que las formas de los cocientes espectrales promedio de 33 y 55 sismos son iguales; al agregarse al promedio de los 33 sismos los 22 nuevos cocientes, este promedio no sufre cambio.

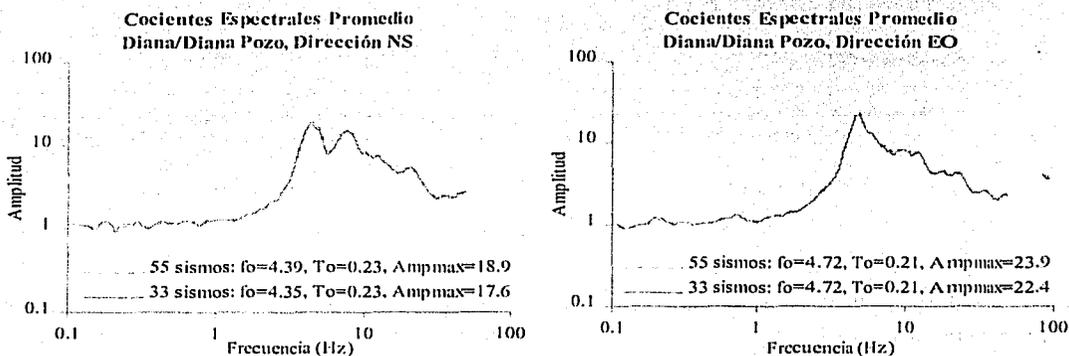


Figura 4.60

Como conclusión, los cocientes espectrales promedio Diana/Diana Pozo, obtenidos para 33 y 55 sismos, son similares, por lo que estos cocientes y sus desviaciones estándar respectivas representan adecuadamente la respuesta sísmica del suelo sobre el cual se encuentra la estación Diana.

4.5.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS EN LOS PARES DE ESTACIONES DIANA/LA VENTA Y DIANA/DIANA POZO

Se van a comparar los resultados mediante la figura 4.61 que muestran la superposición de los cocientes espectrales Diana/La Venta y Diana/Diana Pozo.

En esta figura 4.61 se observa lo que ya mostró la figura 4.20, es decir que hay una mayor respuesta de amplificación relativa a partir de aproximadamente los 4 Hz. en el cociente Diana/ Diana

TESIS CON
FALLA DE CALIFICACIÓN

Pozo que Diana/La Venta y que como ya se mencionó se debe a los efectos de superficie libre y baja impedancia que existe en la estación La Venta. La diferencia en las amplificaciones en cada caso, o sea de las figuras 4.20 y 4.61 son similares ya que se debe recordar que al comparar los respectivos cocientes espectrales promedio (figuras 4.53 y 4.60), los de Diana/La Venta son similares y los de Diana/Diana Pozo son prácticamente iguales.

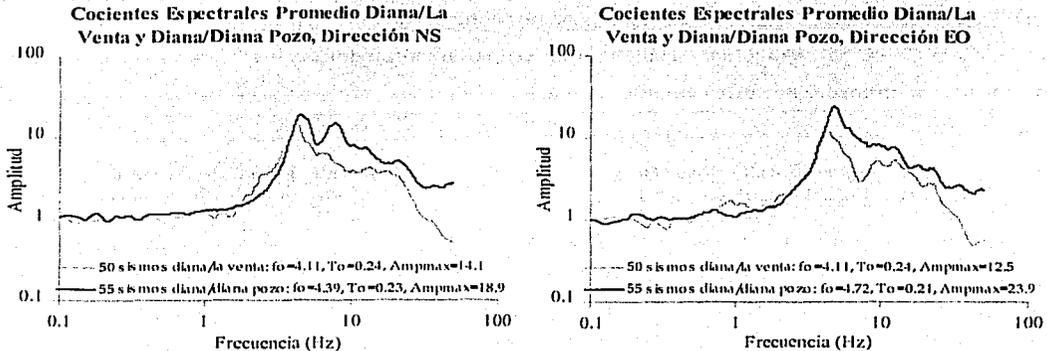


Figura 4.61

Se puede concluir que las figuras 4.20 y 4.61 representan de manera adecuada la diferencia que siempre existirá en los cocientes espectrales de estos pares de estaciones aún así se sigan aumentando cocientes de sismos futuros.

La tabla 4.12 es un resumen de los valores obtenidos de frecuencia y periodo promedio total y las amplificaciones relativas máximas para cada par de estaciones y para los dos casos analizados.

Tabla 4.12: Comparación de resultados obtenidos de cocientes espectrales Diana/La Venta y Diana/Diana Pozo

Parámetros	33 sismos		33 sismos		50 sismos		55 sismos	
	Diana/La Venta		Diana/Diana Pozo		Diana/La Venta		Diana/Diana Pozo	
	NS	EO	NS	EO	NS	EO	NS	EO
Frecuencia (Hz)	4.23	4.39	4.35	4.72	4.11	4.11	4.39	4.72
Periodo (s)	0.24	0.23	0.23	0.21	0.24	0.24	0.23	0.21
Amp.Rel.Max.	14.2	12.4	17.6	22.4	14.1	12.5	18.9	23.6

Como conclusión, los resultados en ambos pares de estaciones, 50 sismos para Diana/La Venta y 55 sismos para Diana/Diana Pozo, no presentan una gran variación respecto a los obtenidos de los 33

sismos registrados simultáneamente en estas tres estaciones; por lo tanto, los cocientes espectrales promedio obtenidos para cada par de estaciones representan adecuadamente la respuesta sísmica del suelo.

Los cocientes espectrales promedio de las estaciones Diana y Diana Pozo representan de mejor manera la respuesta del suelo ya que muestran una forma más uniforme y definida, y no tienen una diferencia grande entre los valores del periodo de cada dirección, esto a pesar que la estación Diana Pozo presenta un campo difractado de ondas y probablemente no es perfectamente rígida sino elástica. La estación La Venta presenta el efecto de superficie libre pero posiblemente la baja impedancia produce que los valores obtenidos difieran cualitativa y cuantitativamente respecto a los de Diana Pozo

4.5.4 ANÁLISIS POR REGIONES

Tal como se procedió con los 33 sismos registrados simultáneamente en las tres estaciones, ahora se analizará por regiones los cocientes espectrales de los 50 sismos de las estaciones Diana y La Venta y los 55 de Diana y Diana Pozo. En cada región se hará referencia al análisis realizado con los 33 sismos, de manera de ir comparando los resultados que se obtienen al agregar sismos nuevos en estas regiones.

4.5.4.1 Estaciones Diana y La Venta (50 sismos)

En la figura 4.62 se presenta la distribución de los 50 sismos en las ocho regiones. No se vuelve a analizar la región 5 por que de los 17 sismos nuevos, ninguno pertenece a esta región.

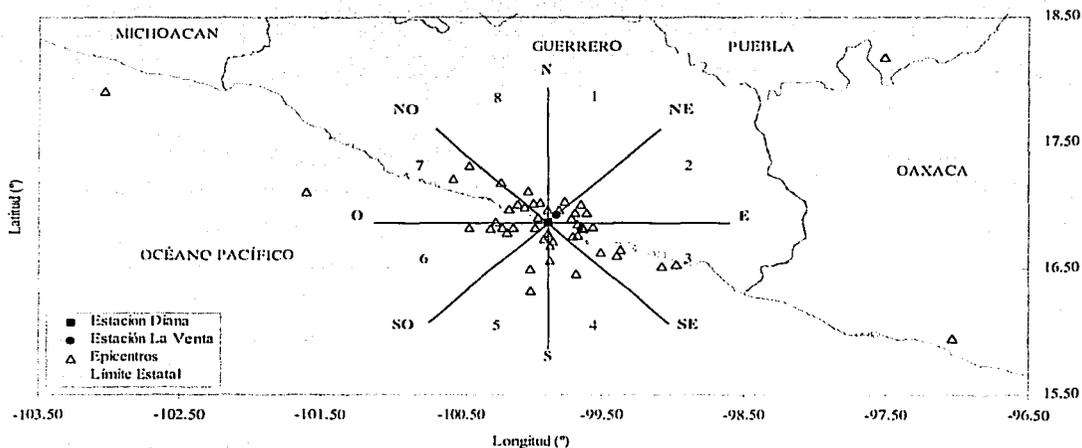


Figura 4.62: Distribución por regiones de 50 sismos registrados simultáneamente en estaciones Diana y La Venta

Las figuras 4.63 al 4.67 presentan el cociente espectral promedio y sus respectivas desviaciones estándar (derecha) y la superposición de los cocientes espectrales (izquierda) para cada región.

Las figuras 4.68 al 4.70 muestran un corte transversal a las regiones, lo que permite visualizar la distribución en profundidad y distancia epicentral de los sismos respecto a la estación Diana, los cuales se señalan por su fecha y magnitud; junto a cada sismo se presentan sus amplificaciones relativas máximas (A_{ns} y A_{eo}) y periodos fundamentales (T_{ns} y T_{eo}) en cada dirección, esta figura permite analizar si la ubicación de los sismos y su magnitud influyen en la respuesta obtenida en cada región.

Región 1

Se agrega a esta región el sismo 16/08/88, con distancia epicentral de 14 Km. y profundidad de 21 Km. Los cocientes espectrales (figura 4.63) son semejantes en la dirección NS y en la EO difieren en la forma de la respuesta máxima ya que el sismo nuevo presenta una banda de amplificación con varios picos y el otro un solo pico espectral; los cocientes espectrales promedio reflejan esta diferencia. La amplificación relativa máxima promedio es mayor en la dirección NS, los periodos fundamentales promedio se diferencian en 0.03 s.

La figura 4.68 indica que las mayores amplificaciones relativas máximas están en la dirección NS, los periodos son iguales para el sismo 22/03/97-1 y para el 16/08/88 son diferentes. Los periodos varían de 0.23 s. a 0.27 s.

Región 2

Se agrega el sismo 09/01/92, cuyos cocientes espectrales cambian significativamente la forma del cociente espectral promedio en ambas direcciones (figuras 4.63 y 4.64). En ambas direcciones este cociente promedio adopta la forma de una banda de amplificación como respuesta entre los 3 y 20 Hz.; en la dirección NS sobresale con mayor amplitud un pico espectral dentro de esta banda, en la EO los picos espectrales presentan casi la misma amplitud. Los valores de amplificación relativa máxima promedio en las direcciones NS y EO son de 9.5 y 6.7 veces y los respectivos periodos fundamentales promedio de 0.14 s. y 0.08 s.

Al observar la figura 4.69, el agregar el sismo 09/01/92 no altera la descripción realizada sobre las amplificaciones en esta región, ya que las correspondientes a este sismo son similares (se diferencian en 5 unidades), característica similar a los otros 4 sismos de esta región; como sus periodos son de 0.14 s. y

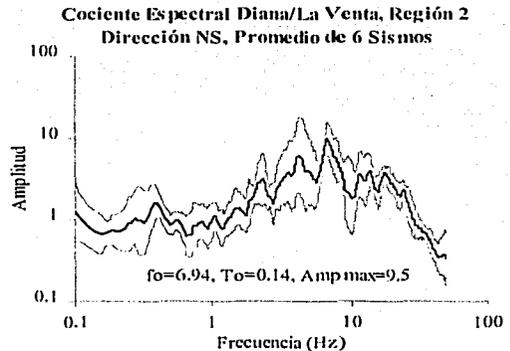
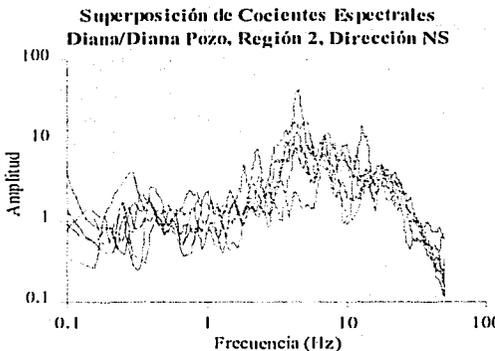
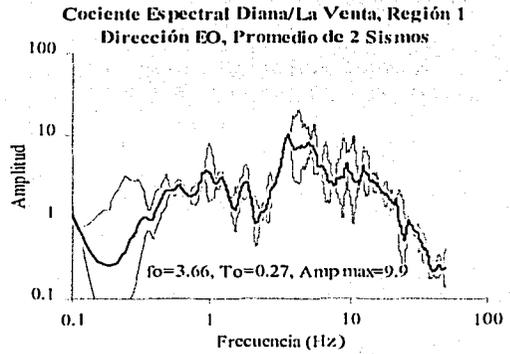
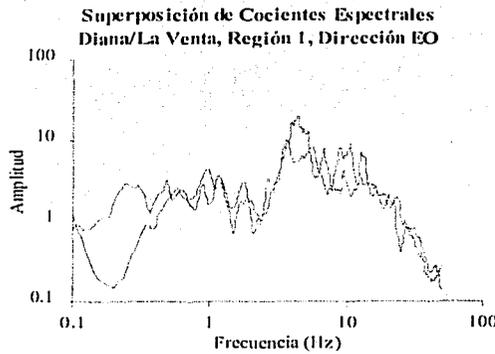
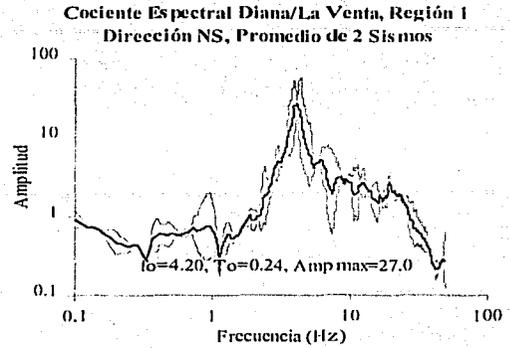
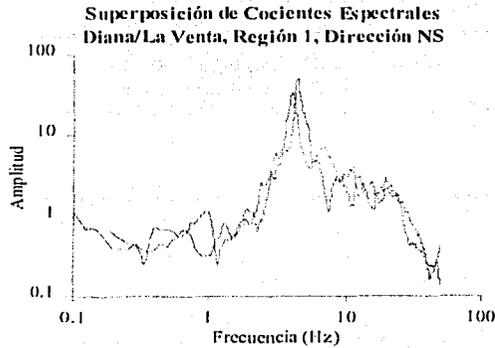


Figura 4.63: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en regiones 1 y 2

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

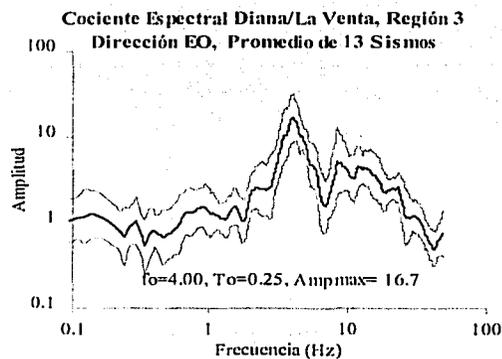
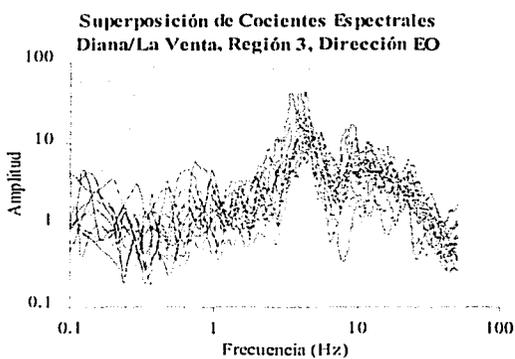
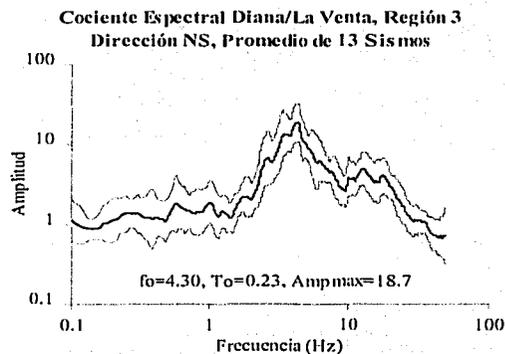
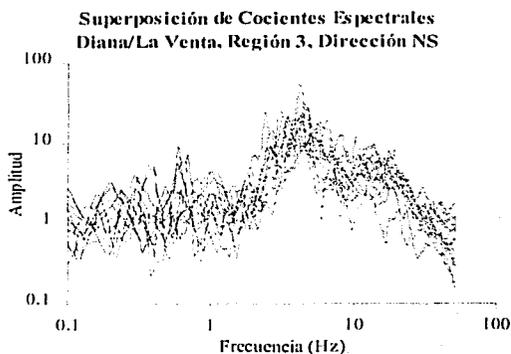
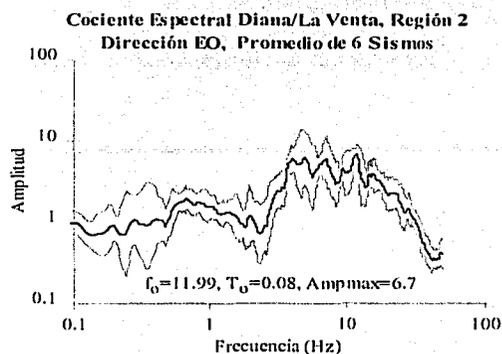
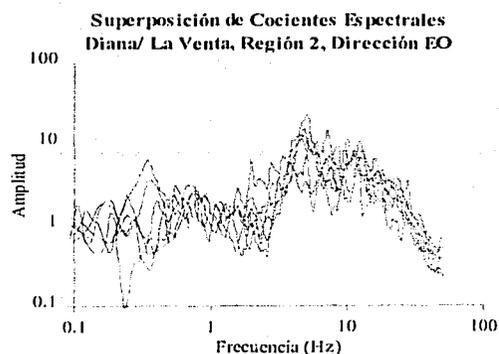


Figura 4.64: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en regiones 2 y 3

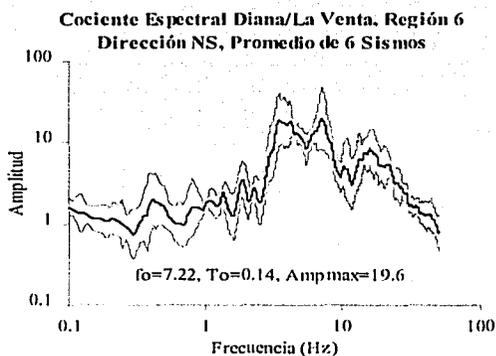
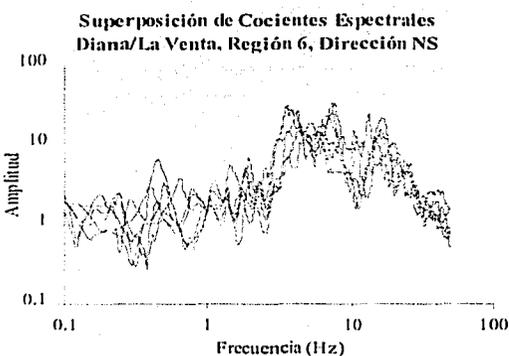
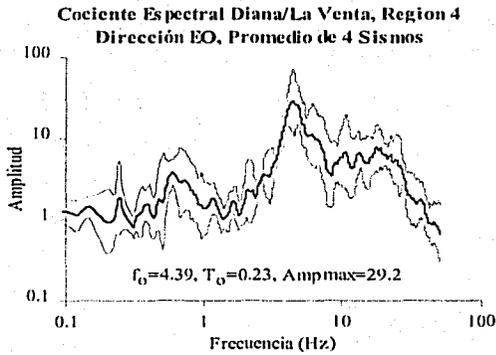
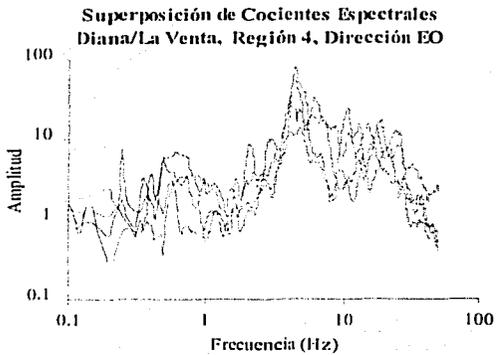
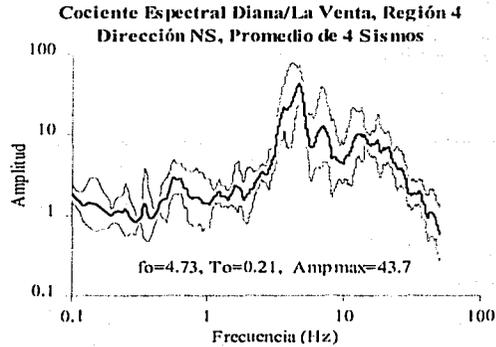
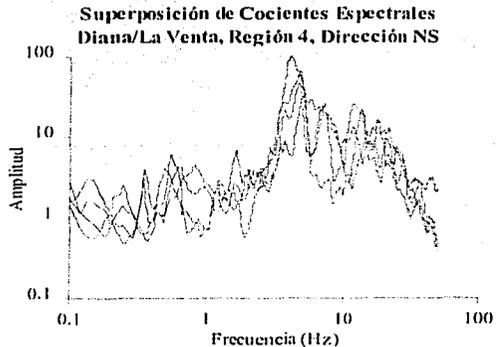


Figura 4.65: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en regiones 4 y 6

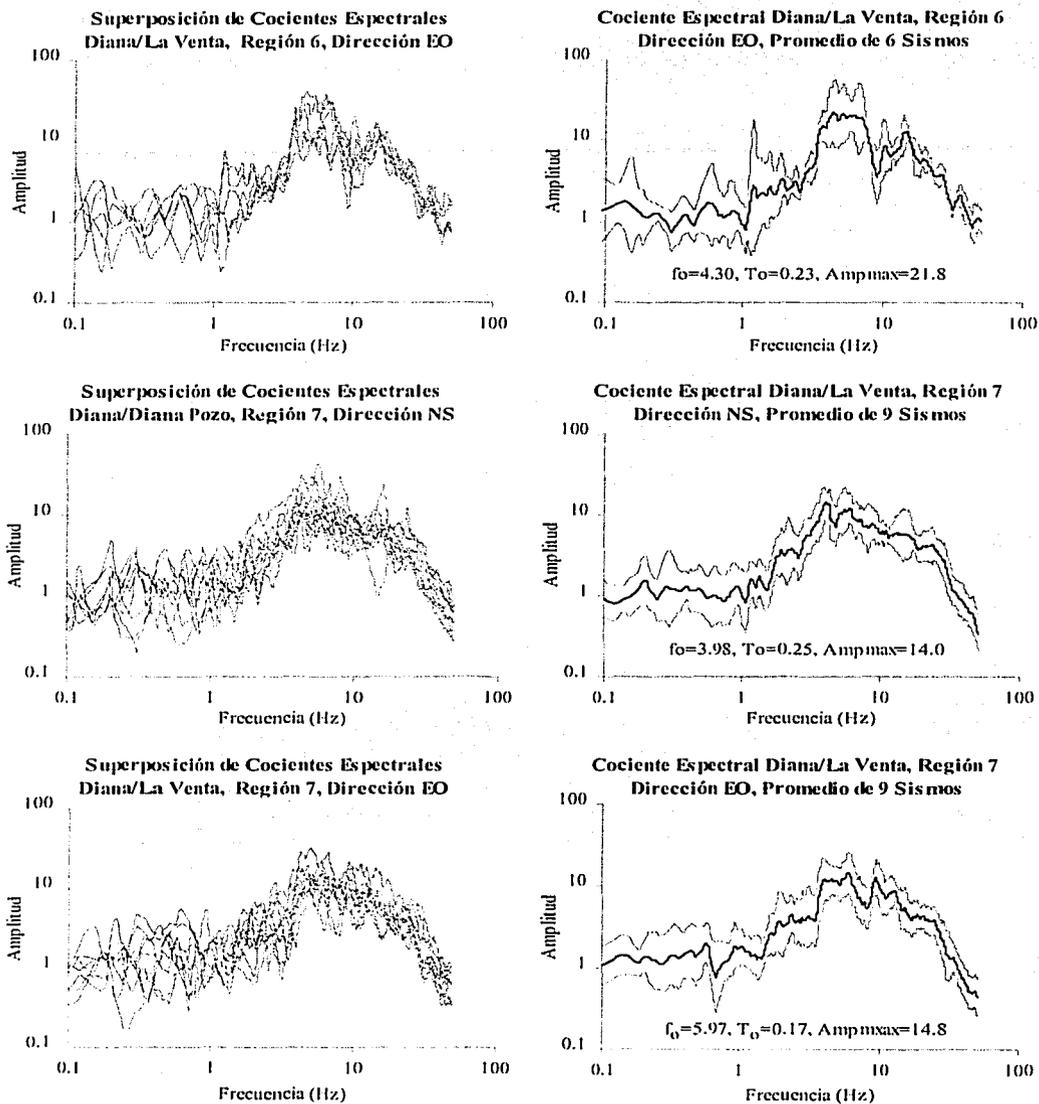


Figura 4.66: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en regiones 6 y 7

TESIS CON
FALLA DE CUBIEN

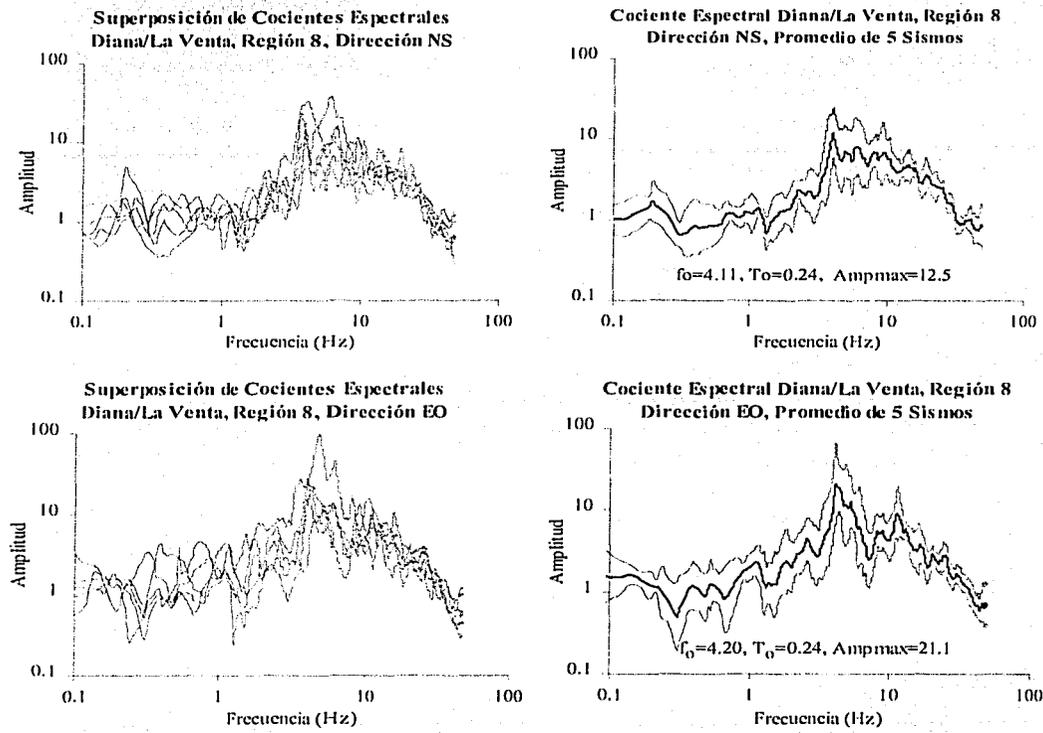


Figura 4.67: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en región 8

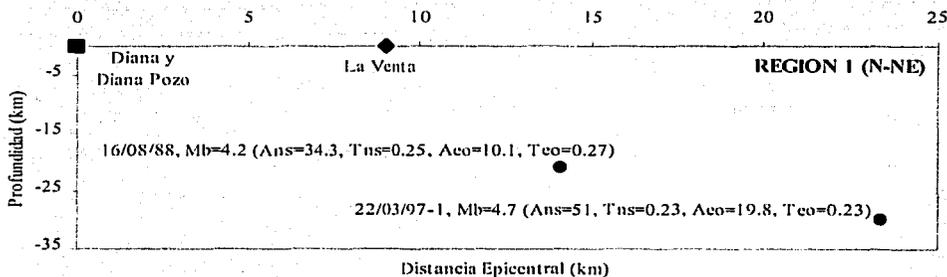


Figura 4.68: Corte transversal región 1, estaciones Diana y La Venta

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

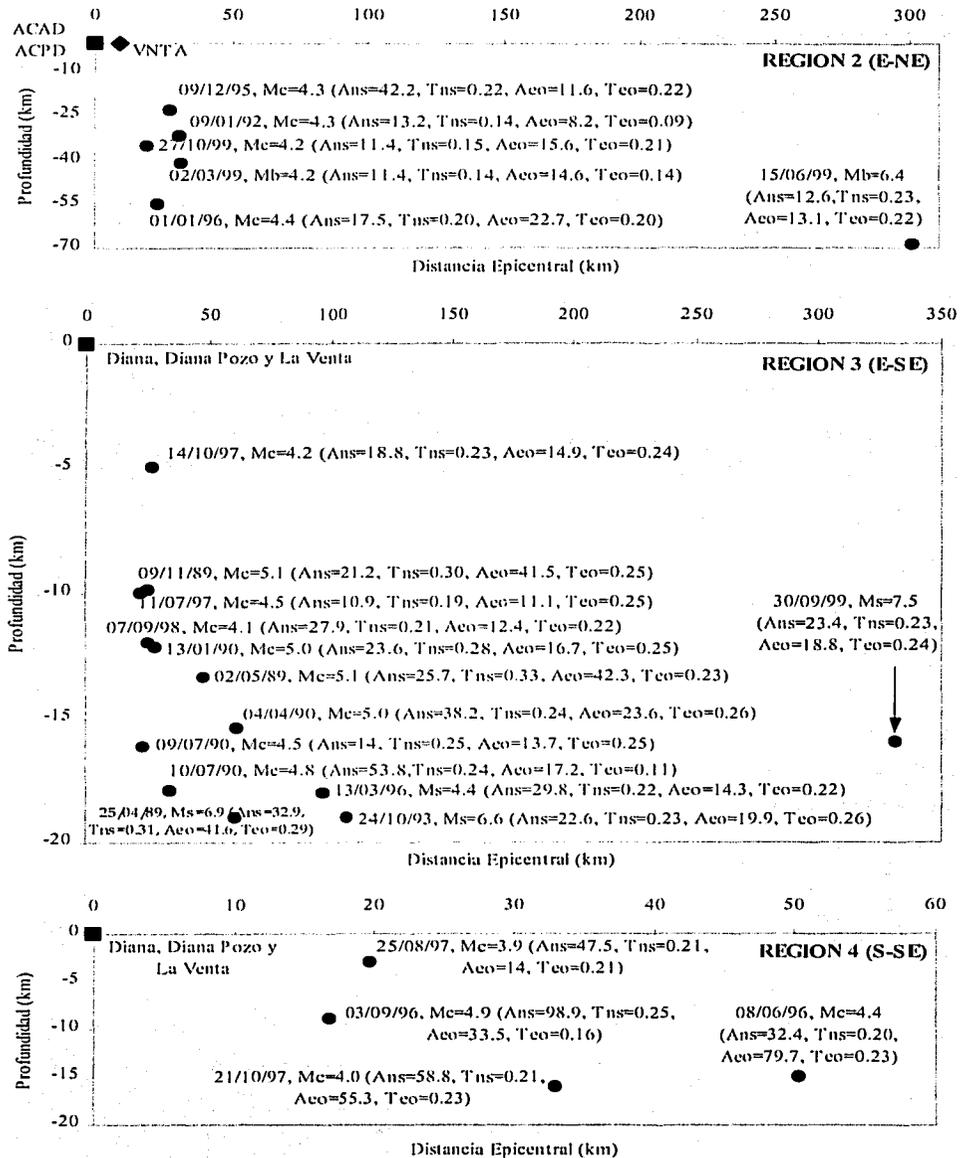


Figura 4.69: Corte transversal de regiones 2 al 4, estaciones Diana y La Venta

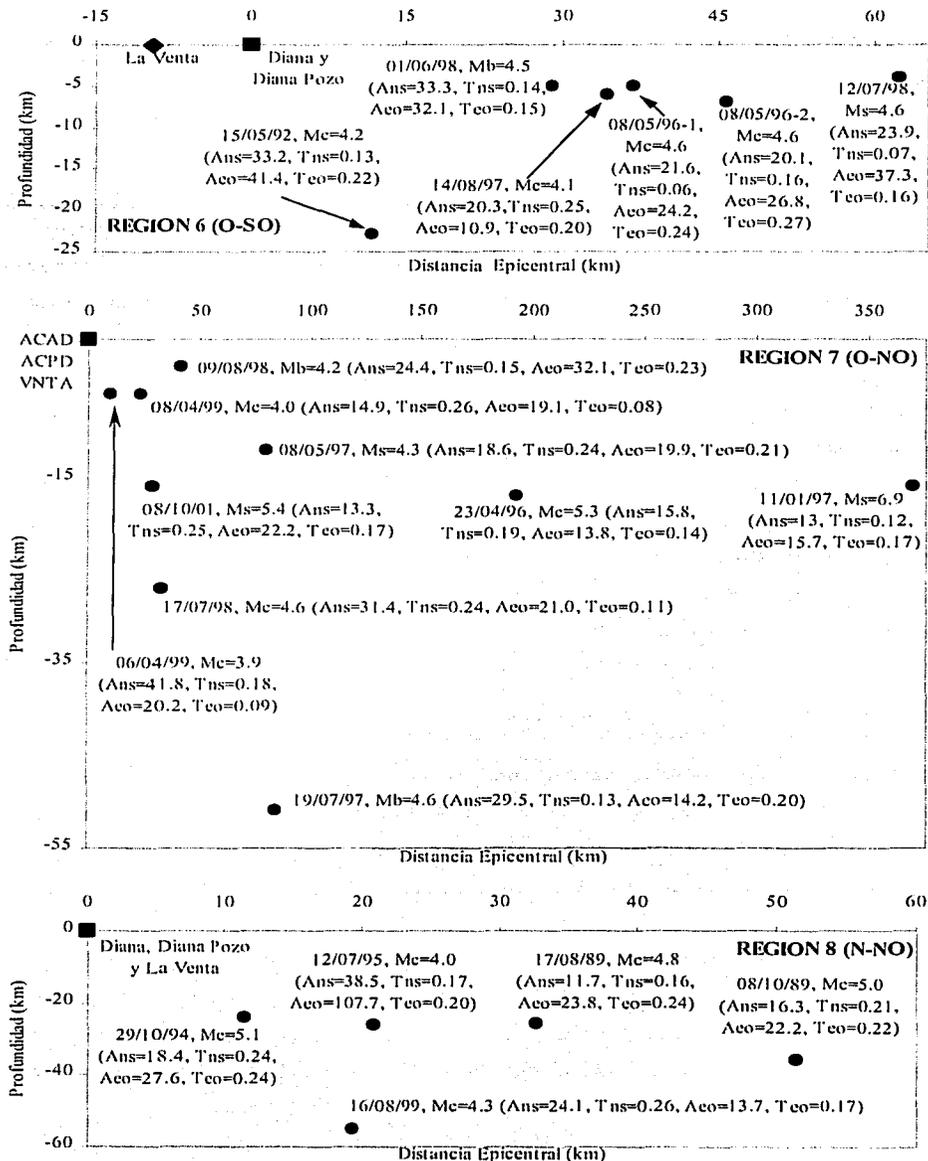


Figura 4.70: Corte transversal de regiones 6 a 8, estaciones Diana y La Venta

0.09 s. en las direcciones NS y EO respectivamente, cambia el intervalo de periodos en esta región, variando ahora de 0.09 s. a 0.23 s.

Región 3

Esta región se convierte en la que mayor sismos tiene ya que se agregan siete nuevos, siendo en total 13 sismos. La figura 4.64 nos presenta una buena semejanza entre los cocientes espectrales de cada dirección; los cocientes espectrales promedio no presentan gran variación con estos sismos nuevos.

De la figura 4.69, doce de los trece sismos se encuentran en un intervalo de distancia epicentral de entre 20 y 110 Km. y con profundidades de entre 5 y 20 Km., el sismo 30/09/99 se encuentra a 340 Km. de la estación Diana. Cinco sismos presentan amplificaciones relativas máximas similares en ambas direcciones, tres sismos presentan la mayor amplificación relativa máxima en la dirección EO y cinco en la NS, todos ubicados a diferentes profundidades y distancias epicentrales por lo que no se puede concluir que exista una tendencia definida de la dirección para la mayor amplificación. Cinco sismos presentan periodos fundamentales iguales en ambas direcciones, el resto presenta una diferencia mayor a 0.01 s. Los periodos varían de 0.11 s. a 0.33 s.

Región 4

Se agrega el sismo 03/09/96 en esta región, cuyos cocientes espectrales no alteran los cocientes espectrales promedio en ambas direcciones (figura 4.65), manteniendo los valores de frecuencia y periodo fundamentales promedio. Las amplificaciones relativas máximas promedio en cada dirección varían poco, aumentando en la dirección NS en 4.1 veces y disminuyendo en la EO en 1.6 veces.

La figura 4.69 muestra en el corte transversal que este sismo es también superficial, presentando la mayor amplificación relativa máxima en la dirección NS, similar al sismo más superficial de esta región, además el valor de esta amplificación que es de 98.9 veces es la mayor en esta región. Los periodos son de 0.25 s y 0.16 s. en las direcciones NS y EO, ocasionando que sean el mayor y menor valor de periodo en la región.

Región 6

En esta región se incorporan 3 sismos, observando sus cocientes espectrales en la superposición de la figura 4.65 y 4.66, son semejantes a la forma de los otros sismos de esta región, por lo que la forma de los cocientes espectrales promedio no varía, en la dirección NS se mantiene como respuesta máxima primero una pequeña banda de amplificación y luego un pico espectral y en la dirección EO una banda de amplificación que a diferencia del anterior análisis que era una banda creciente, ésta es casi plana, resaltando un pequeño pico en $f_0 = 4.30$ Hz. que es la frecuencia fundamental promedio en este caso, a diferencia del anterior que era de $f_0 = 6.21$ Hz.; en la dirección NS el valor de la frecuencia no sufre variación. Las amplificaciones relativas máximas en cada dirección disminuyeron en 5 y 4.4 veces en las direcciones NS y EO respectivamente.

La figura 4.70 muestra en el corte transversal que los tres sismos nuevos son también superficiales, se observa que cinco sismos se encuentran entre los 5 y 7 Km. de profundidad, el sexto sismo 15/05/92 está a 24 Km. de profundidad. Dos sismos presentan amplificaciones relativas máximas similares en ambas direcciones, tres tienen la mayor amplificación en la dirección EO y uno en la NS, a diferentes distancias epicentrales por lo que no existe una tendencia para determinar la dirección predominante de la mayor amplificación relativa máxima. Se mantiene el 01/06/98 como el único sismo con los periodos similares en ambas direcciones; los periodos varían en esta región de 0.06 s. a 0.27 s.

Región 7

Se agrega el sismo 23/04/96 a esta región (figura 4.66), sus cocientes espectrales no modifican los cocientes espectrales promedio manteniendo la forma y los respectivos valores de frecuencia y periodo fundamental promedio en ambas direcciones, las amplificaciones relativas máximas disminuyen sólo en 0.1 y 1.2 veces en las direcciones NS y EO respectivamente.

El corte transversal de la figura 4.70, indica que este sismo presenta amplificaciones relativas máximas similares en ambas direcciones, con periodos de 0.19 s. y 0.14 s. en las direcciones NS y EO. Los periodos varían de 0.08 s. a 0.26 s.

Región 8

Se agregan dos sismos a esta región (17/08/89 y 08/10/89), de la figura 4.67 se observa que la inclusión de estos sismos no modifica la forma de los cocientes espectrales promedio, los periodos permanecen iguales; las amplitudes disminuyen, en la dirección NS en 6.4 veces y en la EO en 1.2 veces.

La figura 4.70 muestra en el corte transversal que los dos sismos nuevos tienen la mayor amplificación relativa máxima en la dirección EO, sumando cuatro en esta región con esta característica, éstos se encuentran entre los 20 y 35 Km. de profundidad y a diferentes distancias epicentrales. El 16/08/99 presenta la mayor amplificación en NS y se encuentra a una profundidad de 55 Km. Los periodos varían de 0.16 s. a 0.26 s.

La tabla 4.13 muestra en resumen los valores de frecuencia y periodo fundamental, así como de amplificación relativa máxima, para cada evento sísmico y los promedios de cada región.

Comparación de la desviación estándar total y el cociente espectral promedio de cada región

Las figuras 4.71 al 4.73 muestran las superposiciones, en línea delgada la desviación estándar total y en línea gruesa el cociente espectral promedio de la región.

De la figura 4.71: los cocientes espectrales de la región 3 se ajustan dentro de la desviación estándar total. El cociente promedio de la región 1 en la dirección NS se ubica por debajo del límite inferior de la desviación estándar en los intervalos de frecuencia de 0.2 a 0.5 Hz., 1 a 2 Hz., 15 a 20 Hz. y mayor a 40 Hz.; en la dirección EO sucede lo mismo en los intervalos de 0.15 a 0.3 Hz., 2 a 2.5 Hz. y mayor a 30 Hz., entre las frecuencias 0.9 y 1.5 Hz. sobrepasa el límite superior. En la región 2, dirección NS, el cociente se ubica por debajo del límite inferior en el intervalo de frecuencia de 3 a 6 Hz.; en la EO ocurre lo mismo entre las frecuencias 2 y 2.5 Hz.

De la figura 4.72: en las regiones 4 y 6, picos o bandas de amplificación (entre ellos los máximos) de los cocientes promedio superan el límite superior de la desviación. En la región 4 en la dirección NS en los intervalos de 0.6 a 0.7 Hz., 3 a 4 Hz., 5 a 6 Hz. y mayor a 15 Hz.; en la EO de 0.6 a 0.8 Hz., 5 a 6 Hz. y mayor a 20 Hz. En la región 6 la forma de los cocientes promedios son diferentes a la desviación estándar total, en la dirección NS presenta una banda de amplificación y un pico espectral cuyos valores máximos superan el límite superior de la desviación de 3 a 4 Hz. y 7 a 8 Hz.; en la EO, la respuesta máxima que es

Tabla 4.13: Frecuencias y periodos fundamentales y amplificaciones relativas máximas obtenidas para cada sismo y región en la estación Diana (50 sismos respecto a La Venta)

Sismo	Norte - Sur				Este - Oeste			
	Frecuencia (Hz)	Periodo (Seg.)	Amp. Max.	Promedio	Frecuencia (Hz)	Periodo (Seg.)	Amp. Max.	Promedio
Región 1 (N-NE)								
16/08/88	4.01	0.25	34.3	fo=4.20, To=0.24 Ampmax=27.0	3.66	0.27	10.1	fo=3.66, To=0.27 Ampmax=9.9
22/03/97-1	4.44	0.23	51.0		4.40	0.23	19.8	
Región 2 (NE-E)								
09/01/92	7.32	0.14	13.2	fo=6.94, To=0.14 Ampmax=9.51	11.14	0.09	8.2	fo=11.99, To=0.08 Ampmax=6.7
09/12/95	4.49	0.22	42.2		4.64	0.22	11.6	
01/01/96	5.08	0.20	17.5		5.02	0.20	22.7	
02/03/99	6.93	0.14	11.4		7.03	0.14	14.6	
15/06/99	4.40	0.23	12.6		4.62	0.22	13.1	
27/10/99	6.88	0.15	11.4		4.75	0.21	15.6	
Región 3 (E-SE)								
25/04/89	3.22	0.31	32.9	fo=4.30, To=0.23 Ampmax=18.7	3.46	0.29	41.6	fo=4.00, To=0.25 Ampmax=16.7
02/05/89	3.02	0.33	25.7		4.35	0.23	42.3	
09/11/89	3.33	0.30	21.2		4.00	0.25	41.5	
13/01/90	3.53	0.28	23.6		4.01	0.25	16.7	
04/04/90	4.20	0.24	38.2		3.82	0.26	23.6	
09/07/90	3.97	0.25	14.0		4.00	0.25	13.7	
10/07/90	4.11	0.24	53.8		9.28	0.11	17.2	
24/10/93	4.30	0.23	22.6		3.86	0.26	19.9	
13/03/96	4.47	0.22	29.8		4.50	0.22	14.3	
11/07/97	5.31	0.19	10.9		4.00	0.25	11.1	
14/10/97	4.33	0.23	18.8		4.11	0.24	14.9	
07/09/98	4.68	0.21	27.9		4.58	0.22	12.4	
30/09/99	4.21	0.23	23.4	4.21	0.24	18.8		
Región 4 (SE-S)								
08/06/96	4.99	0.20	32.4	fo=4.73, To=0.21 Ampmax=43.7	4.44	0.23	79.7	fo=4.39, To=0.23 Ampmax=29.2
03/09/96	4.04	0.25	98.9		6.10	0.16	33.5	
25/08/97	4.68	0.21	47.5		4.82	0.21	14.0	
21/10/97	4.73	0.21	58.8		4.35	0.23	55.3	
Región 5 (S-SO)								
15/05/95	4.59	0.22	32.7	fo=4.30, To=0.23 Ampmax=13.7	11.72	0.09	20.4	fo=4.33, To=0.23 Ampmax=7.97
11/06/96	4.30	0.23	14.4		12.10	0.08	7.9	
22/03/97-2	4.11	0.24	88.4		4.75	0.21	117.3	
27/08/97	4.03	0.25	14.4		4.12	0.24	11.1	
28/01/98	6.26	0.16	28.9	6.15	0.16	9.8		
Región 6 (SO-O)								
15/05/92	7.52	0.13	33.2	fo=7.22, To=0.14 Ampmax=19.6	4.49	0.22	41.4	fo=4.30, To=0.23 Ampmax=21.8
08/05/96-1	16.31	0.06	21.6		4.11	0.24	24.2	
08/05/96-2	6.41	0.16	20.1		3.66	0.27	26.8	
14/08/97	3.95	0.25	20.3		5.13	0.20	10.9	
01/06/98	7.22	0.14	33.3		6.50	0.15	32.1	
12/07/98	13.38	0.07	23.9		6.18	0.16	37.3	
Región 7 (O-NO)								
23/04/96	5.30	0.19	15.8	fo=3.98, To=0.25 Ampmax=14.0	7.26	0.14	13.8	fo=5.97, To=0.17 Ampmax=14.8
11/01/97	8.01	0.12	13.0		5.94	0.17	15.7	
08/05/97	4.23	0.24	18.6		4.67	0.21	19.9	
19/07/97	7.97	0.13	29.5		5.13	0.20	14.2	
17/07/98	4.21	0.24	31.4		9.46	0.11	21.0	
09/08/98	6.59	0.15	24.4		4.44	0.23	32.1	
06/04/99	5.49	0.18	41.8		11.40	0.09	20.2	
08/04/99	3.82	0.26	14.9		12.60	0.08	19.1	
08/10/01	3.94	0.25	13.3		5.89	0.17	22.2	
Región 8 (NO-N)								
17/08/89	6.30	0.16	11.7	fo=4.11, To=0.24 Ampmax=12.5	4.11	0.24	23.8	fo=4.20, To=0.24 Ampmax=21.1
08/10/89	4.84	0.21	16.3		4.58	0.22	22.2	
29/10/94	4.11	0.24	18.4		4.11	0.24	27.6	
12/07/95	6.06	0.17	38.5		4.93	0.20	107.7	
16/08/99	3.82	0.26	24.1		5.89	0.17	13.7	

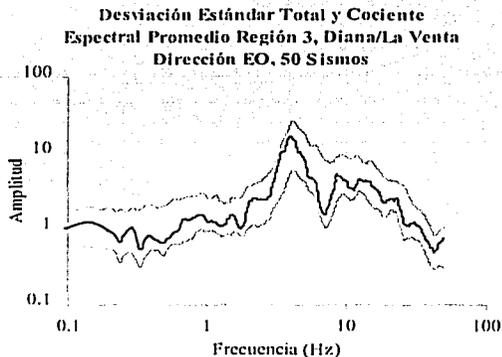
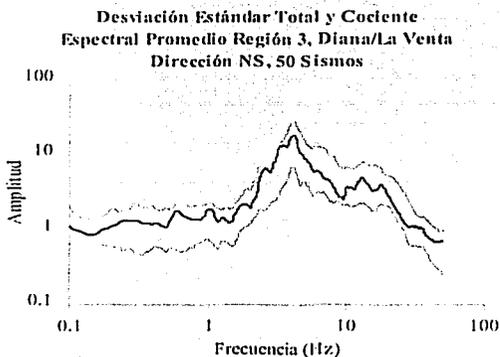
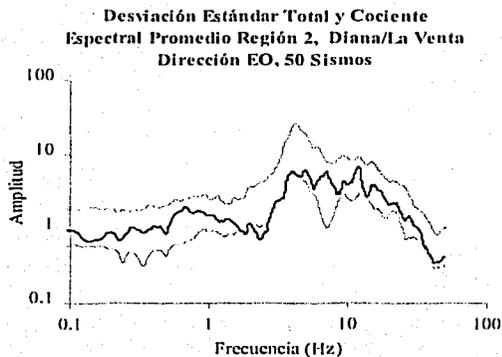
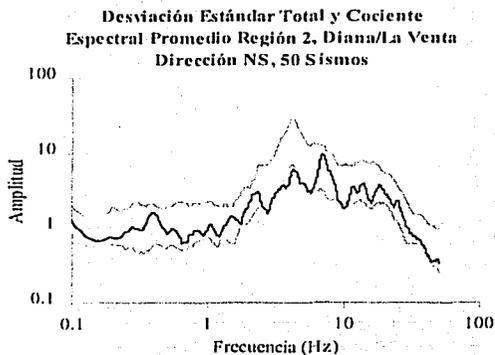
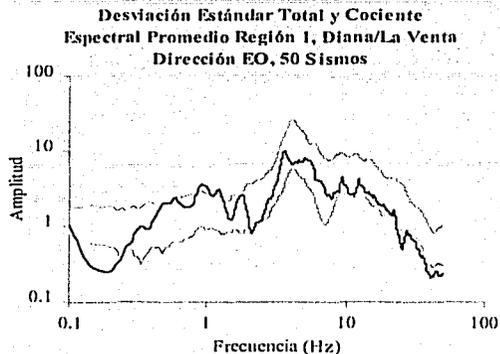
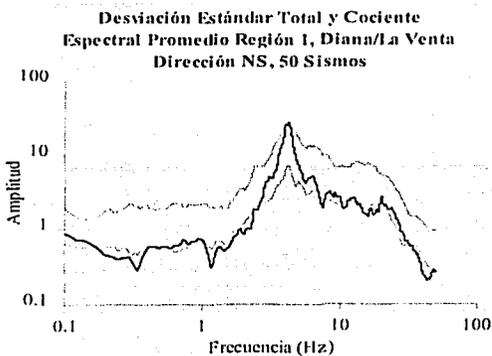


Figura 4.71: Superposición de las desviaciones estándar de 50 sismos y el cociente espectral promedio de regiones 1 al 3, Diana/La Venta

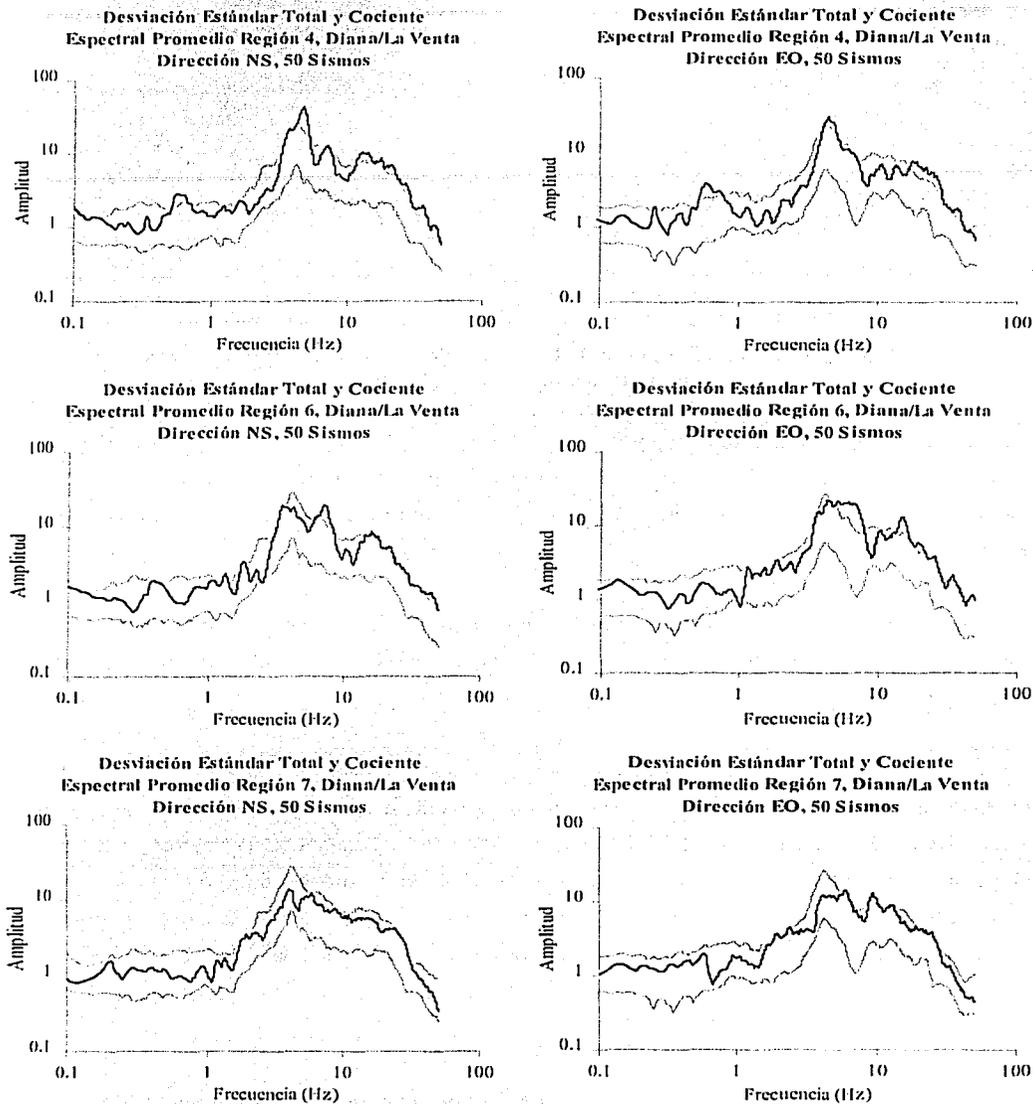


Figura 4.72: Superposición de las desviaciones estándar de 50 sísmos y el cociente espectral promedio de regiones 4 al 7, Diana/La Venta

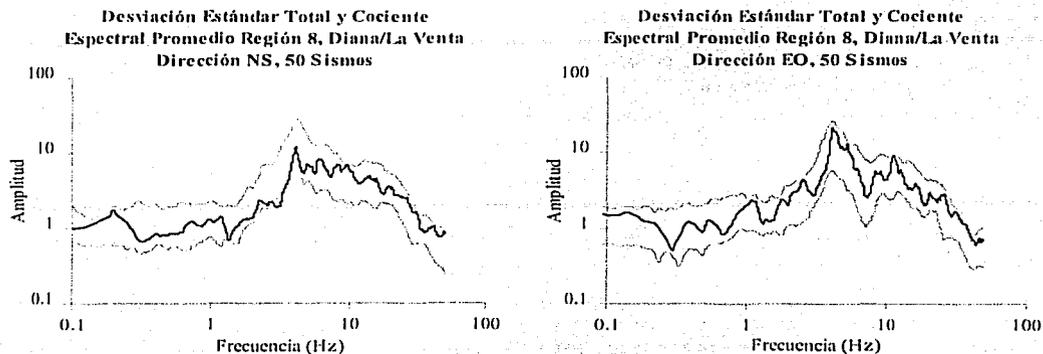


Figura 4.73: Superposición de las desviaciones estándar de 50 sismos y el cociente espectral promedio de región 8, Diana/La Venta

una banda de amplificación supera el límite superior de 5 a 8 Hz., luego un pico espectral supera este límite de 15 a 20 Hz. En la región 7, el cociente espectral promedio de la dirección NS se ubica ajustadamente en la desviación estándar, en la EO supera el límite superior en el intervalo de 6 a 6.5 Hz. y 9 a 10 Hz.

De la figura 4.73: el cociente promedio de la región 8 en la dirección EO se ubica dentro la desviación estándar; en la NS en el intervalo de frecuencia de 3 a 4 Hz., el cociente se encuentra por debajo del límite inferior.

En comparación con el análisis realizado para los anteriores 33 sismos, se coincide con el resultado de las regiones 3, 4, 6, 7 y 8; pero no hay una coincidencia con las regiones 1 y 2 donde ahora se presentan bandas de frecuencia donde el cociente promedio no se ajusta a la desviación estándar total. Se concluye que el acimut está influyendo en la respuesta del suelo, de manera más notoria en las regiones 4 y 6. Al aumentar el número de sismos en las regiones, se ha aumentado el desajuste del cociente espectral promedio con la desviación estándar total para algunas bandas de frecuencia.

Conclusiones del análisis de las regiones

1º Como ya se observó en la superposición de los cocientes espectrales regionales y la desviación estándar total, el periodo fundamental del suelo varía en función del acimut y que posiblemente se traduzca en efectos bidimensionales o tridimensionales debido a irregularidades laterales en el subsuelo. Los valores del periodo varían en las regiones 1, 4 y 8 respectivamente de la siguiente manera: de 0.23 s. a

0.27 s., de 0.16 s. a 0.25 s. y de 0.16 s. a 0.26 s., éstas son las menores variaciones que se presentan, o sea donde el valor del periodo presenta mayor estabilidad; debe tenerse en cuenta que la región 1 sólo tiene dos sismos. La región 2 presenta una variación de 0.09 s. a 0.23 s. La mayor variación es de 0.11 s. a 0.33 s. y pertenece a la región 3. Sin embargo, al revisar los periodos fundamentales promedio presentados en la tabla 4.13 se observa que las regiones 1, 3, 4, 5 y 8 tienen los valores para cada dirección entre 0.21 s. y 0.27 s., los cuales son aceptables dentro del valor del periodo fundamental promedio total, o sea para los 50 sismos, que es de 0.24 s. en ambas direcciones. Aportan también para obtener este valor promedio la región 6 en la dirección EO y la 7 en la NS. Se debe esperar valores del periodo diferentes al promedio en la región 2 en ambas direcciones y en las regiones 6 y 7 en las direcciones NS y EO respectivamente.

2" La forma del cociente espectral promedio varía en cada región; se muestra un pico espectral que define claramente la amplificación relativa promedio máxima y el correspondiente periodo fundamental promedio en ambas direcciones en las regiones 3, 4 y 8. Los cocientes promedio de la región 1 muestran en la dirección NS un pico espectral definido, pero en la EO se presentan dos picos espectrales unidos formando una banda de amplificación. Las regiones 5 (figura 4.25) y 2 presentan una forma similar de respuesta para ambas direcciones que consiste en una banda de amplificación en la que resaltan varios picos espectrales. Los valores de estos picos, salvo el máximo de la región 5 en la dirección NS, son menores a 10 veces. Las regiones 6 y 7 tienen cocientes promedios muy diferentes al resto; la región 6 presenta como respuesta máxima en la dirección NS una banda de amplificación y un pico espectral claramente definido, en la dirección EO muestra una banda de amplificación; la región 7 tiene los cocientes promedio con forma semejante a la región 6 pero con amplitudes menores. Estas diversas formas de los cocientes espectrales promedio indican que el acimut está influyendo en la variación de la amplificación con la frecuencia, posiblemente como ya se mencionó, debido a efectos laterales en el subsuelo.

3" De la descripción anterior, las regiones que muestran un cociente espectral promedio semejante al promedio total son las regiones 1, 3, 4 y 8; las regiones 2 y 5 muestran menor semejanza debido a sus menores amplificaciones. Las regiones 6 y 7 presentan cocientes promedios diferentes al promedio total y al resto de regiones.

4" No hay tendencias claras de direcciones predominantes para las amplificaciones relativas máximas. En los dos únicos sismos de la región 1 la tendencia es en la dirección NS. En la región 2 sólo el sismo más superficial presenta en la dirección NS la mayor amplificación, en el resto de sismos las amplificaciones máximas son similares (con una diferencia menor de 5 unidades entre ellos). Los dos

sismos más superficiales (entre 2 y 10 Km.) de la región 4 tienen la mayor amplificación en la dirección NS, luego el sismo que sigue en profundidad tiene esta amplificación en la EO. Algo similar ocurre pero en dirección contraria en la región 8, los 3 sismos superficiales (entre 21 y 22 Km.) tienen la mayor amplificación en la dirección EO, luego el más profundo lo tiene en la NS. En las regiones 3, 5, 6 y 7, la mayor amplificación relativa máxima cambia de dirección con la profundidad y distancia epicentral sin alguna tendencia definida.

5° Los sismos más superficiales tienen la mayor amplificación relativa máxima en la dirección NS en las regiones 1, 2, 4 y 5, y en la EO en las regiones 6, 7 y 8. Los periodos varían para estos valores de amplificación entre 0.09 s. y 0.27 s. en la dirección NS y entre 0.07 s. y 0.24 s. en la EO.

6° En las regiones 4 y 5 donde hay una cierta tendencia en que la amplificación relativa máxima sea mayor en la dirección NS, los sismos alejados en estas regiones, con distancias epicentrales iguales o mayores a los 50 Km., tienen la mayor amplificación relativa máxima en la dirección EO.

7° Los sismos con distancia epicentral igual o mayor a 300 Km., o sea los más alejados y que son: 15/06/99 con $M_b = 6.4$, 30/09/99 con $M_s = 7.5$ y 11/01/97 con $M_s = 6.9$, cada uno con acimut diferente, no presentan amplificaciones relativas máximas grandes, variando entre 12.6 y 23.4 veces; los periodos son estables para los dos primeros sismos, variando de 0.22 a 0.24 s. mientras que el último sismo presenta periodos en 0.12 s. y 0.17 s. en las direcciones NS y EO, esto se debe a que pertenece a la región 7 donde estos valores varían grandemente.

4.5.4.2 Comparación de resultados obtenidos para 33 y 50 sismos en las estaciones Diana y La Venta

Del análisis de las regiones

En ambos casos el valor del periodo fundamental de los sismos varía con el acimut. Al agregar nuevos sismos en las diferentes regiones (en total 17) se producen aumentos en la variación del valor del periodo: por ejemplo la región 4 cuyo intervalo de valores con tres sismos es de entre 0.21 s. y 0.23 s. cambia a 0.16 s. y 0.25 s. al agregarle un sismo. De igual manera sucede en la región 2, donde con cinco sismos tiene un intervalo de entre 0.14 s. y 0.23 s. y al agregarle un sismo cambia a 0.09 s. y 0.23 s. La mayor variación está en la región 3 donde se agrega 8 sismos (siendo la región con la mayor cantidad de sismos); con 5 sismos varía entre 0.19 s. y 0.24 s., con 13 sismos su intervalo cambia a 0.11 s. y 0.31 s.

Las amplificaciones relativas también varían con el acimut en ambos casos, esto se observa claramente en la forma de los cocientes espectrales regionales cuya amplitud va cambiando a través de la frecuencia. En ambos casos los cocientes promedio de las regiones 6 y 7 son diferentes al promedio total, se concluye que estas regiones presentan características diferentes al resto. De este resto, presenta un cambio significativo en su forma el cociente promedio de la región 2 debido a que ahora tiene los mayores picos espectrales en alta frecuencia, estando anteriormente en baja frecuencia. Los demás cocientes espectrales regionales muestran semejanza entre ellos para ambos casos. El promedio total que se obtiene tanto para 33 y 50 sismos representa a las regiones 1, 3, 4, 5 y 8. El cociente promedio de la región 2 sólo tiene semejanza con el promedio total para el caso de 33 sismos, en el de 50 sismos no existe esta semejanza.

Del periodo fundamental promedio y amplificación relativa máxima promedio

Los periodos fundamentales promedio regionales no varían para los casos de 33 y 50 sismos, en las regiones 4, 5 y 7. En las regiones 2, 3 y 6 se presentan variaciones, siendo más significativa en las regiones 2 y 6. Los periodos promedio de la región 2 cambian de 0.23 s. a 0.14 s. y de 0.20 s. a 0.08 s. en las direcciones NS y EO respectivamente, esto al agregar un solo sismo; y la región 6 en la dirección NS el periodo se mantiene igual pero en la EO cambia de 0.16 s. a 0.23 s., esto al agregar 3 sismos.

Las amplificaciones relativas máximas promedio son similares en ambos casos, ya que disminuyen o aumentan un valor menor a 5 veces, sólo hay un cambio significativo en la región 8 en la dirección EO donde con tres sismos tiene un valor de 18.9 veces y al incorporar dos nuevos disminuye a 12.5 veces.

Como conclusión general; tanto para 33 como para 50 sismos, los valores de las amplificación relativa máxima promedio total y del periodo fundamental promedio total son similares; sin embargo, los valores que se obtienen para los promedios regionales presentan variaciones significativas sobre todo en el valor del periodo fundamental promedio en las regiones 2, 3 y 6. La tabla 4.14 presenta para cada caso la frecuencia, periodo y amplificación relativa máxima promedios para cada región y del total de sismos.

A continuación, se realizará el análisis para 55 sismos en las estaciones Diana y Diana Pozo, cuyos resultados serán comparados los que se obtuvieron para Diana y La Venta y de esa manera obtener mejores conclusiones.

Tabla 4.14: Frecuencias y periodos fundamentales promedio y amplificaciones relativas máximas promedio obtenidas para la estación Diana

DIANA/LA VENTA					
Regiones	Parametros	33 sismos		50 sismos	
		NS	EO	NS	EO
Total	Frecuencia (Hz)	4.23	4.39	4.11	4.11
	Periodo (s)	0.24	0.23	0.24	0.24
	Amp.Rel.Max.	14.2	12.4	14.1	12.5
Region 1	Frecuencia (Hz)	4.44	4.40	4.20	3.66
	Periodo (s)	0.23	0.23	0.24	0.27
	Amp.Rel.Max.	51.0	19.8	27.0	9.9
Region 2	Frecuencia (Hz)	4.27	4.88	6.94	11.99
	Periodo (s)	0.23	0.20	0.14	0.08
	Amp.Rel.Max.	11.0	9.4	9.5	6.7
Region 3	Frecuencia (Hz)	4.46	4.52	4.30	4.00
	Periodo (s)	0.22	0.22	0.23	0.25
	Amp.Rel.Max.	17.9	13.0	18.7	16.7
Region 4	Frecuencia (Hz)	4.73	4.39	4.73	4.39
	Periodo (s)	0.21	0.23	0.21	0.23
	Amp.Rel.Max.	39.6	30.8	43.7	29.2
Region 5	Frecuencia (Hz)	4.30	4.33	4.30	4.33
	Periodo (s)	0.23	0.23	0.23	0.23
	Amp.Rel.Max.	13.7	8.0	13.7	8.0
Region 6	Frecuencia (Hz)	7.22	6.21	7.22	4.30
	Periodo (s)	0.14	0.16	0.14	0.23
	Amp.Rel.Max.	24.6	26.2	19.6	21.8
Region 7	Frecuencia (Hz)	4.03	5.97	3.98	5.97
	Periodo (s)	0.25	0.17	0.25	0.17
	Amp.Rel.Max.	14.1	16.0	14.0	14.8
Region 8	Frecuencia (Hz)	4.11	4.11	4.11	4.20
	Periodo (s)	0.24	0.24	0.24	0.24
	Amp.Rel.Max.	18.9	22.3	12.5	21.1

4.5.4.3 Estaciones Diana y Diana Pozo (55 sismos)

En la figura 4.75 se presenta la distribución de los 55 epicentros por región. No se vuelve a analizar las regiones 1 y 2 por que de los 22 sismos nuevos, ninguno pertenece a estas regiones.

Las figuras 4.75 al 4.78 presentan el cociente espectral promedio y sus respectivas desviaciones estándar (derecha) y la superposición de los cocientes espectrales (izquierda) para cada región.

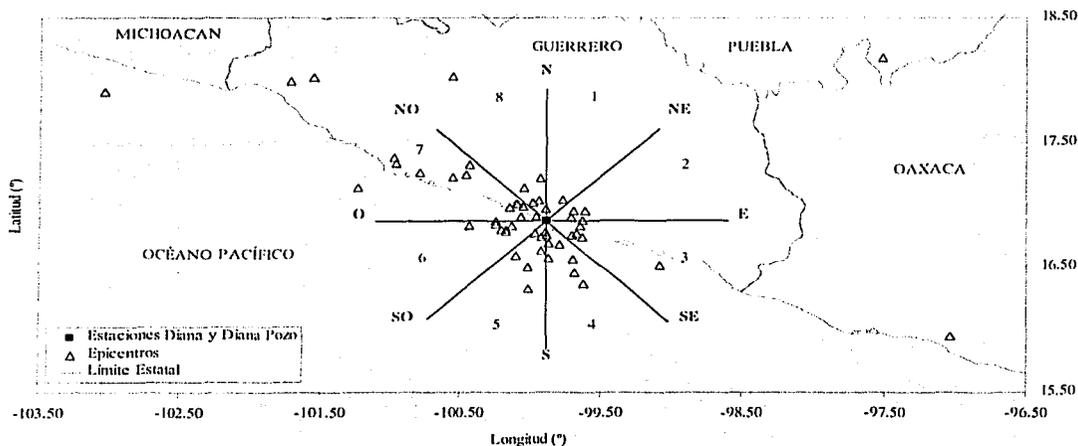


Figura 4.74: Distribución por regiones de 55 sismos registrados simultáneamente en estaciones Diana y Diana Pozo

Las figuras 4.79 y 4.80 muestran un corte transversal a las regiones, lo que permite visualizar la distribución en profundidad y distancia epicentral de los sismos respecto a la estación Diana, los cuales se señalan por su fecha y magnitud; junto a cada sismo se presentan sus amplificaciones máximas relativas (A_{ns} y A_{eo}) y periodos fundamentales (T_{ns} y T_{eo}) en cada dirección, esta figura permite analizar si la ubicación de los sismos y su magnitud influyen en la respuesta obtenida en cada región.

Región 3

Se agregó el sismo del 15/04/94, cuyos cocientes espectrales no modifican la forma del cociente espectral promedio en esta región (figura 4.75), las frecuencias fundamentales promedio cambian muy poco de manera que no afectan a los correspondientes periodos, las amplitudes relativas máximas promedio disminuyen en 0.3 veces en la dirección NS y en 4.5 veces en la EO.

El corte transversal se observa en la figura 4.79, este sismo nuevo presenta amplificaciones relativas máximas similares en ambas direcciones, sus periodos son de 0.19 s. y 0.21 s. en las direcciones NS y EO. Las características de esta región no se modifican con la inclusión de este sismo. La variación del periodo sigue siendo de 0.19 s. a 0.23 s.

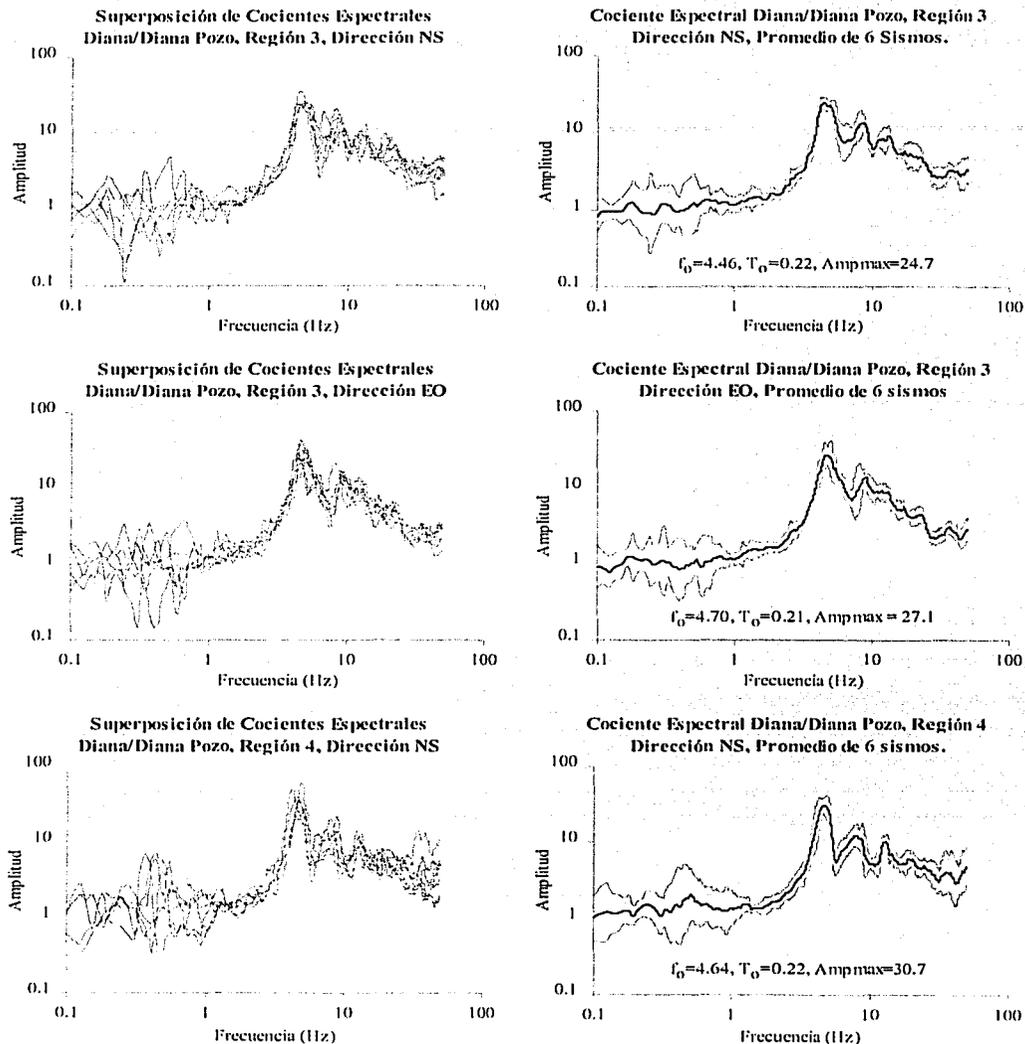


Figura 4.75: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en regiones 3 y 4

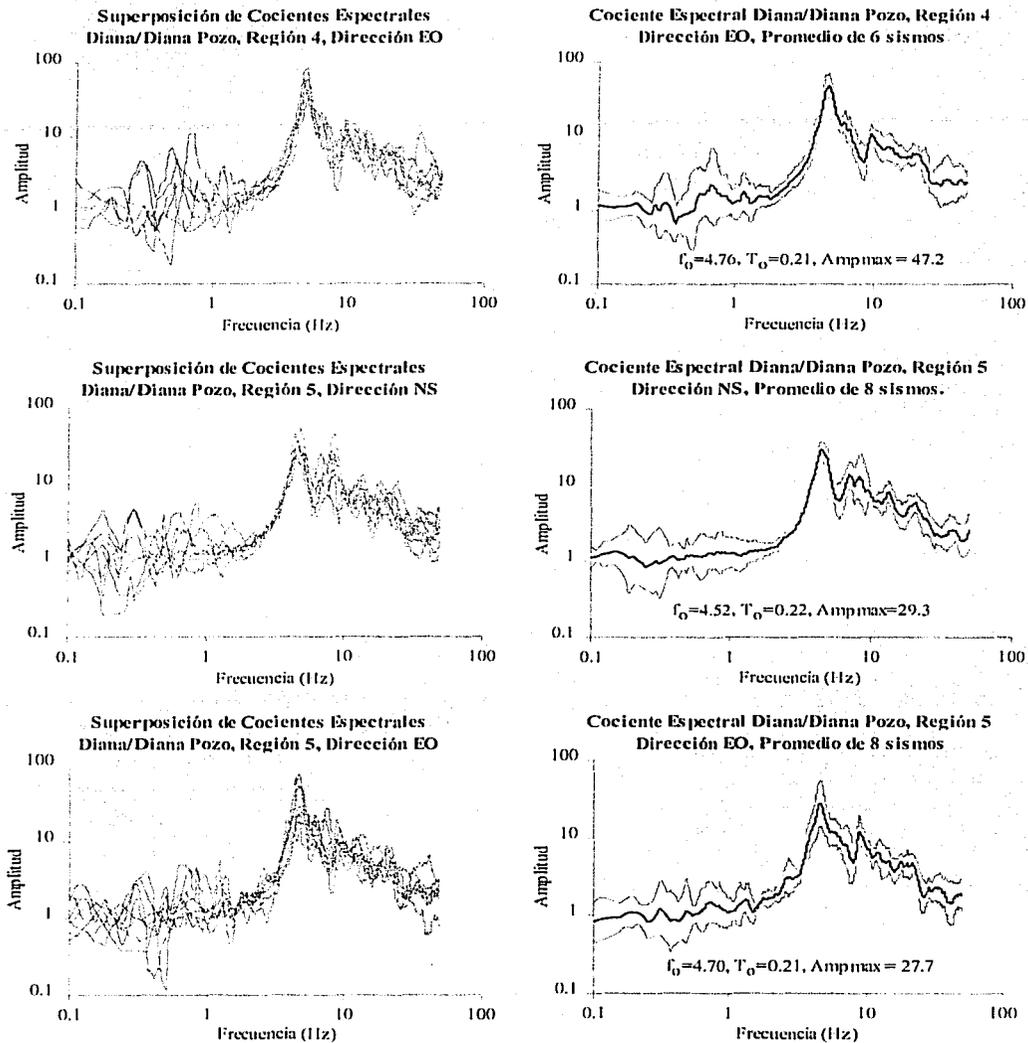


Figura 4.76: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en regiones 4 y 5

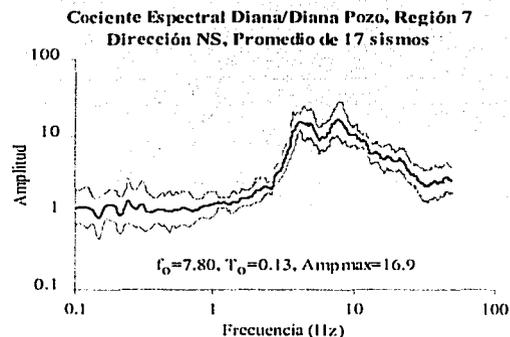
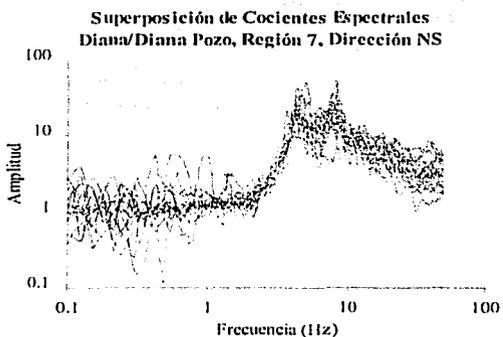
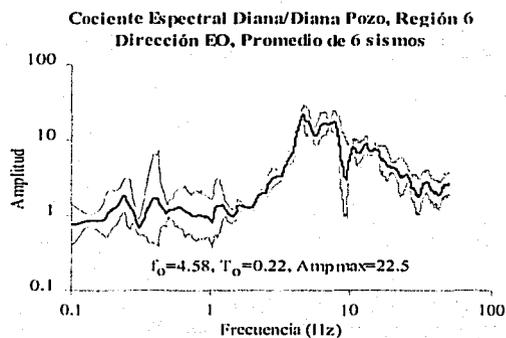
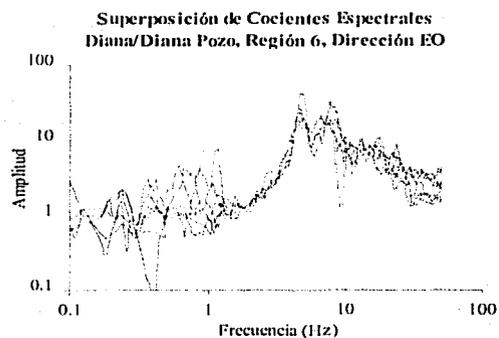
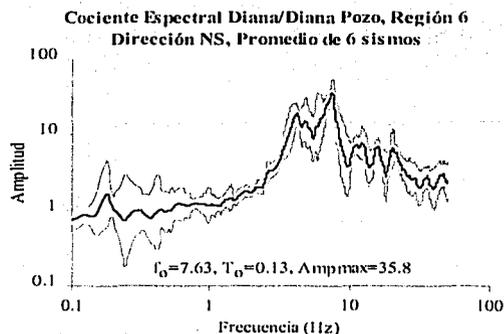
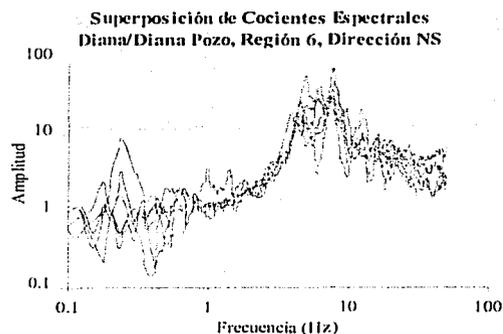
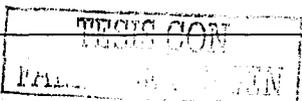


Figura 4.77: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en regiones 6 y 7

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

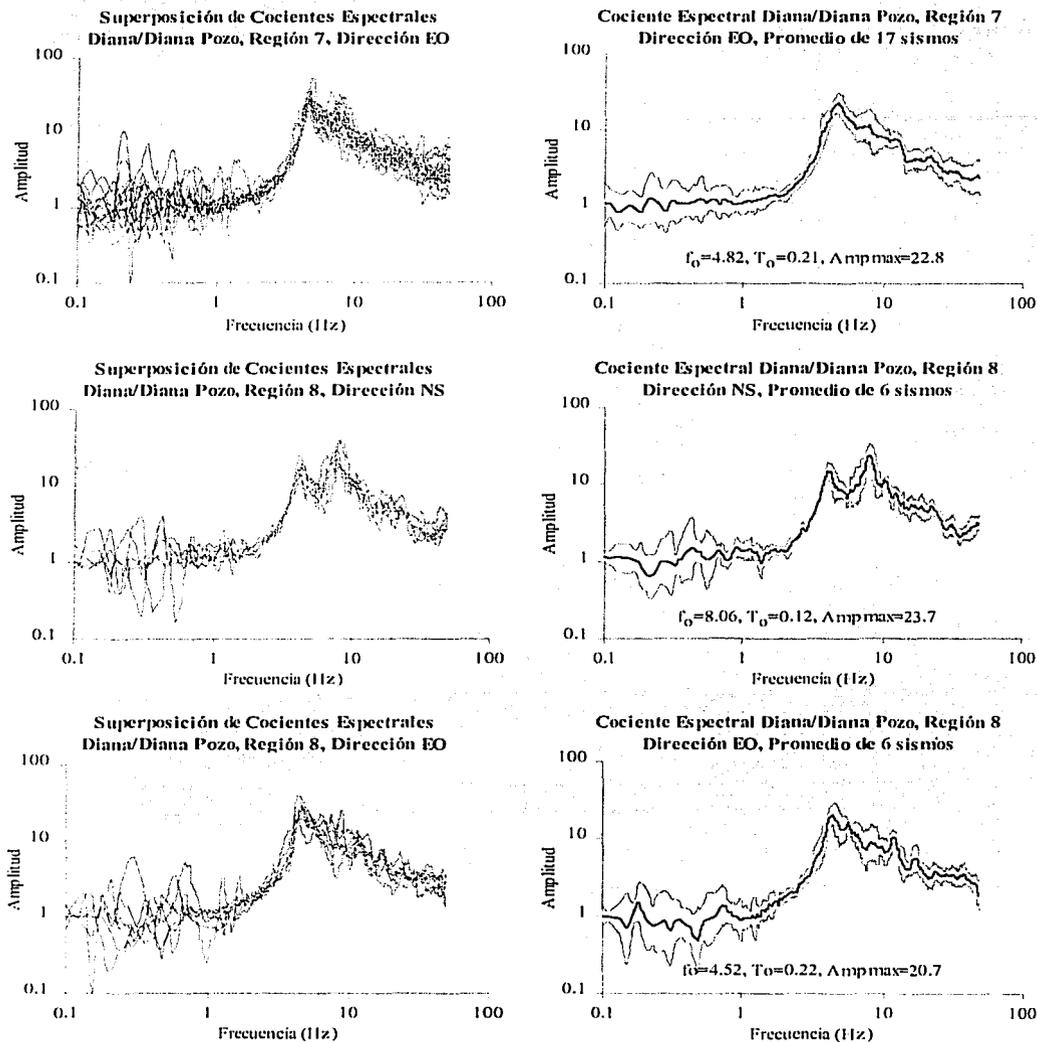


Figura 4.78: Cociente espectral promedio y superposición de cocientes espectrales en regiones 7 y 8

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

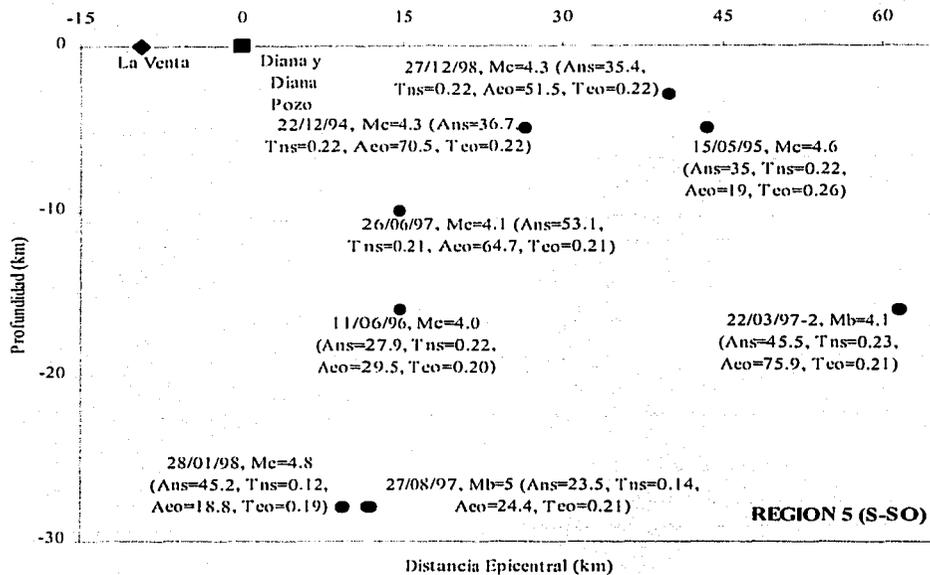
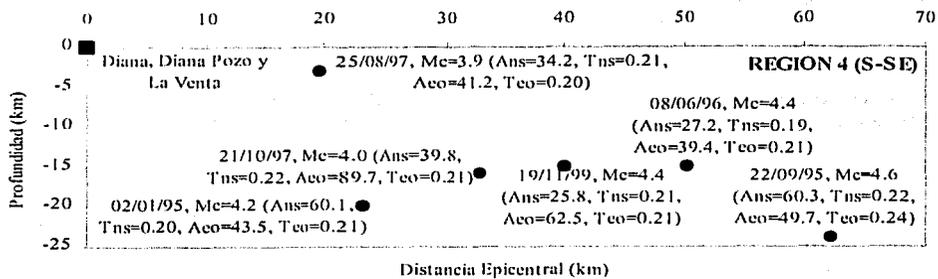
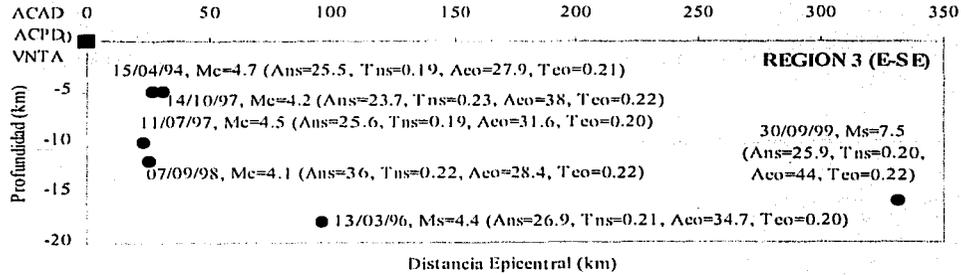


Figura 4.79: Corte transversal de regiones 3 al 5, estaciones Diana y Diana Pozo

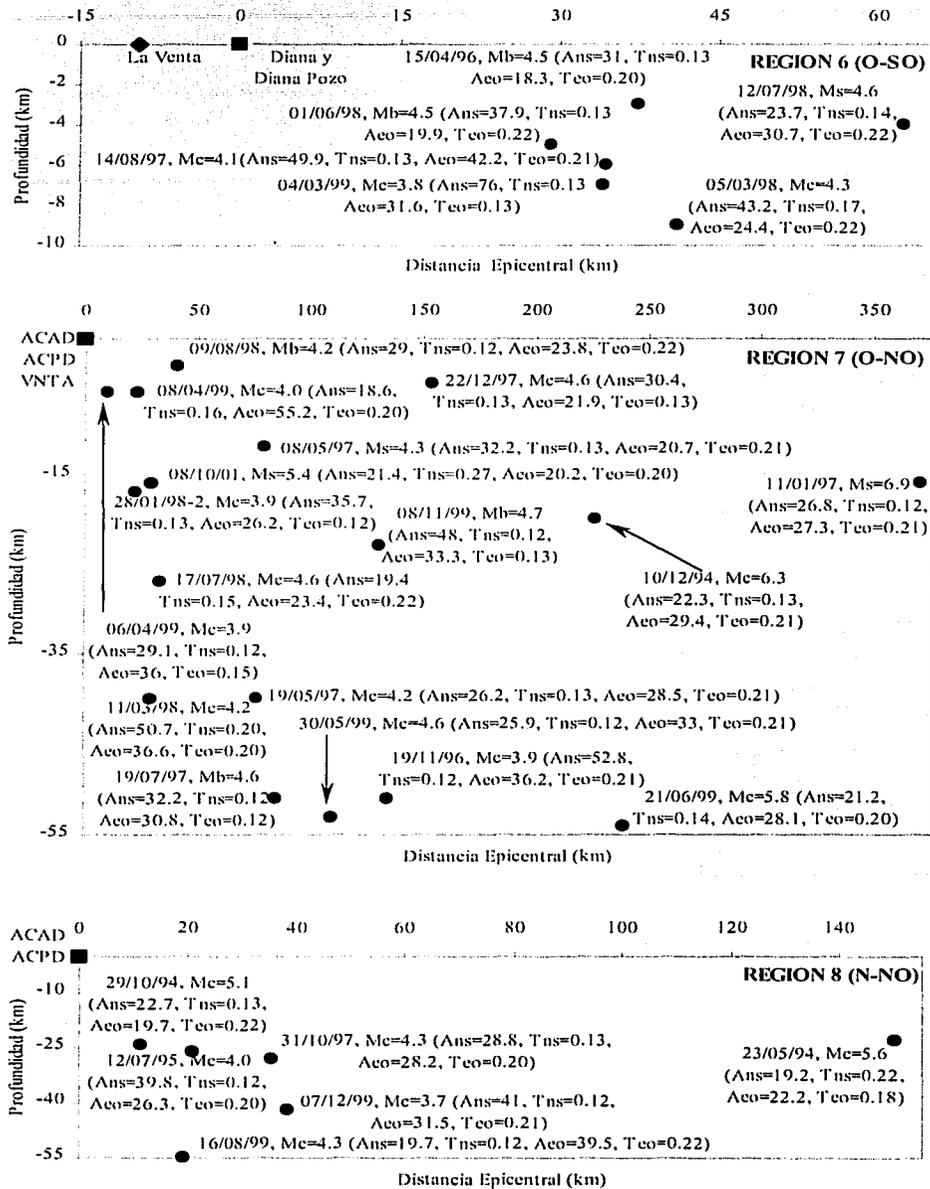


Figura 4.80: Corte transversal de regiones 6 al 8, estaciones Diana y Diana Pozo**Región 4**

Se tiene en total 6 sismos ya que se agregan 3 nuevos, los cuales no modifican la forma de los cocientes espectrales promedio (figuras 4.75 y 4.76), las frecuencias fundamentales promedio varían pero sin cambiar los respectivos periodos, las amplificaciones relativas máximas promedio disminuyen en 1.5 veces en la dirección NS y 1.3 veces en la EO.

El corte transversal se observa en la figura 4.79, cuatro sismos entre los 3 y 16 Km. de profundidad presentan la mayor amplificación relativa máxima en la dirección EO, los otros dos entre los 20 y 24 Km. de profundidad tiene la mayor amplificación en la dirección NS. Uno de los nuevos sismos, 22/09/95, presenta periodos de 0.22 s. en la dirección NS y 0.24 s. en la EO, por lo que los periodos varían ahora de 0.19 s. a 0.24 s.

Región 5

Se agregan también 3 sismos, siendo en total 8 en esta región. Los tres nuevos no modifican la forma de los cocientes espectrales promedio. Ni la frecuencia ni el periodo predominante promedio se modifican. Las amplificaciones relativas máximas aumentan, en 2.6 veces en la dirección NS y en 3.7 veces en la dirección EO.

En el corte transversal de esta región (figura 4.79), dos sismos presentan amplificaciones relativas máximas similares en ambas direcciones, cuatro sismos tienen la mayor amplificación en la dirección EO y los otros dos en la NS, por lo que hay una cierta tendencia a que las mayores amplificaciones se den en la dirección EO. Los periodos de estos ochos sismos varían entre 0.12 s. y 0.26 s.

Región 6

Nuevamente se agregan 3 sismos, siendo en total 6 en esta región. No hay cambio en la forma de los cocientes espectrales promedio y tampoco en los valores de la frecuencia y periodo fundamental promedio. Las amplificaciones relativas máximas promedio aumentan en 0.4 veces en la dirección NS y disminuye 0.4 veces en la EO.

El corte transversal de la figura 4.80 indica que cinco de los seis sismos ubicados entre los 3 y 9 Km. de profundidad y los 30 y 43 Km. de distancia epicentral presentan la mayor amplificación relativa máxima en la dirección NS, siendo sólo el sismo 12/07/98 el que lo presenta en la EO. Los periodos varían de 0.13 a 0.22 s.

Región 7

Se agregan nueve sismos, lo que hace que esta región sea la que tenga la mayor cantidad de sismos, siendo en total 17. Los cocientes espectrales nuevos son semejantes a los anteriores en ambas direcciones, como consecuencia los cocientes espectrales promedio no varían en el valor del periodo fundamental promedio. Las amplificaciones relativas máximas promedio aumentan en 0.7 veces en la dirección NS y 0.8 veces en la EO.

La figura 4.80 muestra el corte transversal de esta región, se observa que no existe una tendencia definida de la ubicación de la mayor amplificación relativa máxima; seis eventos presentan amplificaciones máximas similares en ambas direcciones, siete sismos lo tienen en la dirección NS y 4 en la EO. Los periodos siguen variando de 0.12 a 0.27 s.

Región 8

En esta región se adicionan 3 sismos cuyos cocientes espectrales no afectan significativamente la forma de los cocientes promedio en ambas direcciones. En la dirección NS la frecuencia fundamental promedio aumenta 0.31 Hz. provocando que el periodo disminuya en 0.01 s; en la EO la frecuencia permanece sin cambio. Las amplificaciones relativas máximas promedio disminuyen en 0.2 veces en ambas direcciones.

El corte transversal de la figura 4.80, muestra que tres sismos tienen amplificaciones relativas máximas similares en ambas direcciones, dos eventos tienen la mayor amplificación en la dirección NS y uno en la EO, por lo que no se puede determinar una tendencia definida para la ubicación de la mayor amplificación. Los periodos continúan variando de 0.12 s. a 0.22 s.

La tabla 4.15 presenta el resumen de los valores de frecuencia y periodo fundamental y amplificaciones relativas máximas obtenidas para los sismos y los promedios obtenidos para las regiones.

Comparación de la desviación estándar total y el cociente espectral promedio de cada región

Las figuras 4.81 al 4.82 muestran las superposiciones, en línea delgada la desviación estándar total y la gruesa el cociente promedio de la región.

De estas figuras, se puede observar que en las regiones 3, 5 y 7 los cocientes espectrales promedio se ubican dentro de los límites de la desviación estándar total.

La amplificación relativa máxima de los cocientes espectrales promedio de la región 4 (figura 4.81) superan el límite superior de la desviación estándar.

De la figura 4.82: en la región 6, en la dirección NS el cociente promedio supera el límite superior en el intervalo de frecuencia de 7 a 8 Hz. y se encuentra por debajo del límite inferior de 9.5 a 10 Hz.; en la EO supera el límite superior en el intervalo de 7 a 9 Hz. y está por debajo del límite inferior de 9.5 a 10 Hz. En la región 8, en la dirección NS el cociente promedio se encuentra por debajo del límite inferior en el intervalo de 4 a 5 Hz.; en la EO el cociente promedio se ubica dentro de la desviación estándar.

En comparación con el análisis realizado para los anteriores 33 sismos, se coincide con el resultado de las regiones 3, 5, 4, 6 y 7; se coincide en la región 8 en la dirección NS pero en la EO ya no se coincide. Se observa que al aumentar el número de sismos en las regiones, el cociente promedio alcanza un mayor ajuste dentro de la desviación estándar, disminuyendo las bandas de frecuencia donde se superan los límites de la desviación. Se concluye que el acimut está influyendo en la respuesta del suelo, de manera más notoria en las regiones 4 y 6.

Conclusiones del análisis de las regiones

1° Como ya se observó de la superposición del cociente espectral promedio de cada región con la desviación estándar total, el acimut está influyendo en el periodo fundamental de los sismos; la tabla 3.15 muestra cómo los periodos no presentan una gran variación para las regiones 2 al 5 en ambas direcciones, pero las regiones 6 al 8 sí presentan una variación significativa; esto se refleja claramente en el periodo fundamental promedio de las regiones. Hay una gran estabilidad en ambas direcciones para las regiones 2, 3, 4 y 5 donde el valor del periodo promedio varía sólo entre 0.21 s. y 0.22 s., por lo que se puede considerar que en estas regiones los periodos fundamentales promedio son similares en ambas direcciones. En cambio, en las regiones 6, 7 y 8 estos periodos son diferentes en ambas direcciones; en la dirección EO

Tabla 4.15: Frecuencias y periodos fundamentales y amplificaciones relativas máximas obtenidas para cada sismo y región en la estación Diana (55 sismos respecto a Diana Pozo)

Sismo	Norte Sur				Este Oeste			
	Frecuencia (Hz)	Periodo (Seg.)	Amp. Max.	Promedio	Frecuencia (Hz)	Periodo (Seg.)	Amp. Max.	Promedio
Región 1 (N-NE)								
22/03/97-1	4.49	0.22	37.3		4.52	0.22	30.8	
Región 2 (NE-E)								
09/12/95	4.56	0.22	30.2	fo=4.49, To=0.2 Ampmax=26.9	4.59	0.22	39.2	fo=4.79, To=0.21 Ampmax=27.2
01/01/96	4.76	0.21	32.1		4.87	0.21	33.6	
02/03/99	4.35	0.23	34.2		4.27	0.23	23.2	
15/06/99	4.43	0.23	21.7		4.62	0.22	32.2	
27/10/99	4.61	0.22	30.7		4.79	0.21	38.1	
Región 3 (E-SE)								
15/04/94	5.13	0.19	25.5	fo=4.46, To=0.2 Ampmax=24.7	4.70	0.21	27.9	fo=4.70, To=0.21 Ampmax=27.1
13/03/96	4.76	0.21	26.9		4.93	0.20	34.7	
11/07/97	5.31	0.19	25.6		5.01	0.20	31.6	
14/10/97	4.41	0.23	23.7		4.49	0.22	38.0	
07/09/98	4.46	0.22	36.0		4.46	0.22	28.4	
30/09/99	4.91	0.20	25.9		4.64	0.22	44.0	
Región 4 (SE-S)								
02/01/95	4.99	0.20	60.1	fo=4.64, To=0.2 Ampmax=30.7	4.76	0.21	33.5	fo=4.76, To=0.21 Ampmax=47.2
22/09/95	4.52	0.22	60.3		4.21	0.24	49.7	
08/06/96	5.25	0.19	27.2		4.70	0.21	39.4	
25/08/97	4.72	0.21	34.2		5.07	0.20	41.2	
21/10/97	4.58	0.22	39.8		4.76	0.21	89.7	
19/11/99	4.70	0.21	25.8		4.82	0.21	62.5	
Región 5 (S-SO)								
22/12/94	4.46	0.22	36.7	fo=4.64, To=0.2 Ampmax=31.6	4.46	0.22	70.5	fo=4.70, To=0.21 Ampmax=25.6
15/05/95	4.53	0.22	35.0		3.83	0.26	19.0	
11/06/96	4.58	0.22	27.9		4.91	0.20	29.5	
22/03/97-2	4.33	0.23	45.5		4.70	0.21	75.9	
26/06/97	4.73	0.21	53.1		4.73	0.21	64.7	
27/08/97	6.97	0.14	23.5		4.85	0.21	24.4	
28/01/98-1	8.55	0.12	45.2		5.37	0.19	18.8	
27/12/98	4.52	0.22	35.4		4.56	0.22	51.5	
Región 6 (SO-O)								
15/04/96	7.57	0.13	31.0	fo=7.63, To=0.1 Ampmax=35.8	4.91	0.20	18.3	fo=4.58, To=0.22 Ampmax=22.5
14/08/97	7.86	0.13	40.9		4.78	0.21	42.2	
05/03/98	6.04	0.17	43.2		4.58	0.22	24.4	
01/06/98	7.51	0.13	37.9		4.58	0.22	19.9	
12/07/98	7.36	0.14	23.7		4.58	0.22	30.7	
04/03/99	7.66	0.13	76.0		7.57	0.13	31.6	
Región 7 (O-NO)								
10/12/94	7.54	0.13	22.3	fo=7.80, To=0.1 Ampmax=16.9	4.82	0.21	29.4	fo=4.82, To=0.21 Ampmax=22.8
19/11/96	8.12	0.12	52.8		4.76	0.21	36.2	
11/01/97	8.27	0.12	26.8		4.79	0.21	27.3	
08/05/97	7.66	0.13	32.2		4.73	0.21	20.7	
19/05/97	7.78	0.13	26.2		4.76	0.21	28.5	
19/07/97	8.09	0.12	32.2		8.21	0.12	30.8	
22/12/97	7.89	0.13	30.4		7.61	0.13	21.9	
28/01/98-2	7.81	0.13	35.7		8.12	0.12	26.2	
11/03/98	5.04	0.20	50.7		4.88	0.20	36.6	
17/07/98	6.47	0.15	19.4		4.55	0.22	23.4	
09/08/98	8.30	0.12	29.0		4.52	0.22	23.8	
06/04/99	8.67	0.12	29.1		6.65	0.15	36.0	
08/04/99	6.10	0.16	18.6		5.01	0.20	55.2	
30/05/99	8.32	0.12	25.9		4.82	0.21	33.0	
21/06/99	7.20	0.14	21.2		4.99	0.20	28.1	
08/11/99	8.29	0.12	48.0		7.46	0.13	33.3	
08/10/01	3.69	0.27	21.4		4.88	0.2	20.2	
Región 8 (NO-N)								
23/05/94	4.49	0.22	19.2	fo=8.06, To=0.1 Ampmax=23.7	5.55	0.18	22.2	fo=4.52, To=0.22 Ampmax=20.8
29/10/94	7.75	0.13	22.7		4.52	0.22	19.7	
12/07/95	8.30	0.12	39.8		4.88	0.20	26.3	
31/10/97	7.81	0.13	28.8		5.10	0.20	28.2	
16/08/99	8.06	0.12	19.7		4.46	0.22	39.5	
07/12/99	8.42	0.12	41.0		4.70	0.21	31.5	

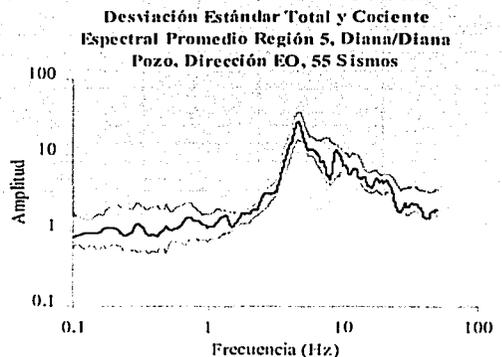
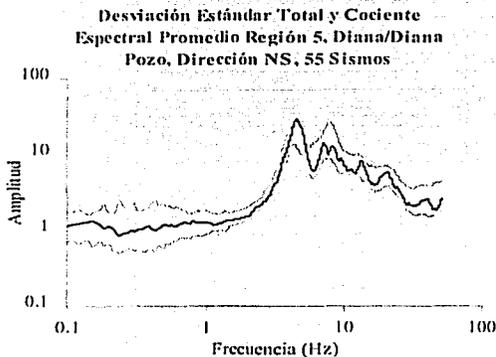
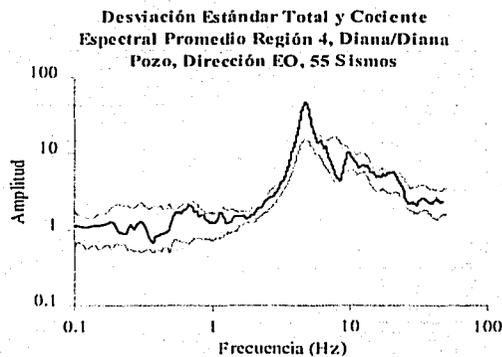
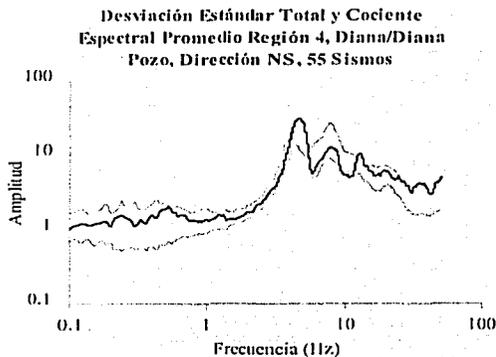
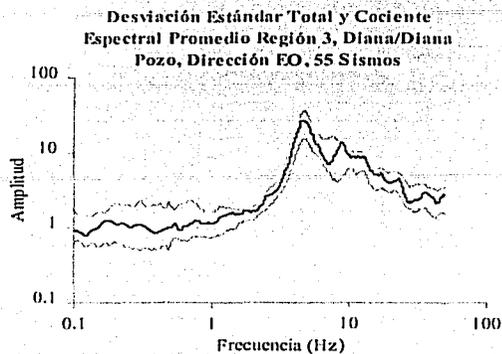
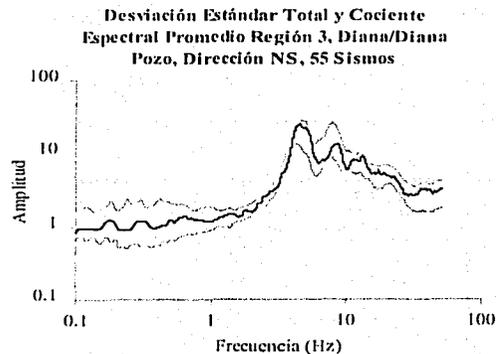


Figura 4.81: Superposición de las desviaciones estándar de 55 sismos y el cociente espectral promedio de regiones 3 al 5, Diana/Diana Pozo

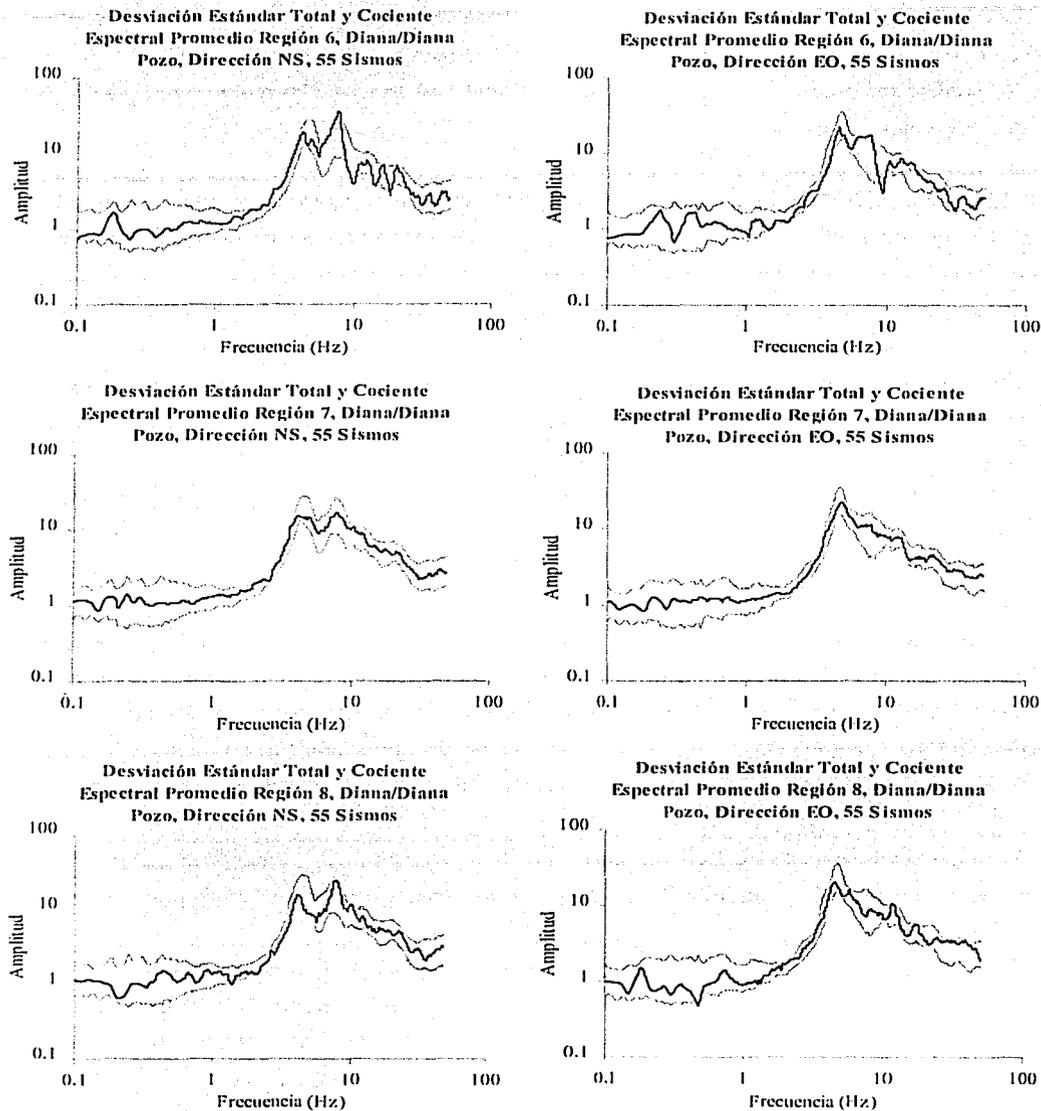


Figura 4.82: Superposición de la desviación estándar de 55 sismos y el cociente espectral promedio de las regiones 6 al 8, Diana/Diana Pozo

el valor se encuentra entre 0.21 s. y 0.22 s., similares las otras regiones, pero en la dirección NS los valores están entre 0.12 s y 0.13 s. Se concluye que en la zona integrada por las regiones del 2 al 5, los eventos sísmicos presentarán promedios similares al promedio total; los sismos de las regiones 6, 7 y 8 presentaran periodos diferentes sobre todo en la dirección NS.

2° Se vuelve a distinguir cuatro formas de cociente espectral: una para las regiones 2 al 5, y las otras tres para las regiones 6, 7 y 8 respectivamente. Se vuelve a observar una especie de transición en la forma, siendo similar, o sea con un pico espectral definido y variando solo en amplitud, desde la región 2 hasta la 5, cambiando a dos picos espectrales o una banda de amplificación en las regiones 6 y 7 y regresando otra vez a un pico espectral y una banda para la región 8. La forma que predomina en el cociente espectral promedio total es debido a las regiones 2 al 5, por lo que se debe esperar formas diferentes para las regiones 6, 7 y 8.

3° Se repite las características de la desviación estándar, teniendo tres intervalos bien definidos de valores, variando los máximos entre los 0.1 y 2.5 Hz., los valores mínimos entre 1 y 5 Hz., y en la alta frecuencia siempre es menor el valor que en la baja frecuencia.

4° Al aumentar sismos a las diferentes regiones (en total 22), nuevamente no se observa una clara tendencia de una dirección predominante para la mayor amplificación relativa máxima de los eventos en cada región. En las regiones 3, 4 y 5 hay una mayor cantidad de sismos con la mayor amplificación en la dirección EO. En la región 6 esta amplificación predomina en la dirección NS. La regiones 2 (figura 4.38) y 7 presentan casi el mismo numero de sismos con amplificaciones mayores en ambas direcciones.

5° En las regiones 2, 3, 4 y 5 el sismo más superficial siempre tiene la mayor amplificación relativa máxima en la dirección EO, variando el periodo para estos valores de amplificación entre 0.20 y 0.22 s.

6° Se repite que los sismos más alejados de las estaciones, es decir los sismos con distancia epicentral igual o mayor a 300 Km. y que son del 15/06/99 conocido como el de Tehuacán, con $M_b = 6.4$, del 30/09/99 llamado el de Oaxaca con $M_s = 7.5$ y del 11/01/97 con $M_s = 6.9$, cada uno con acimut diferente, presentan amplificaciones relativas máximas de gran valor, variando entre 21.7 y 44 veces; los periodos muestran estabilidad para los dos primeros sismos, variando de 0.20 a 0.23 s. mientras que el último sismo presenta periodos en la dirección NS de 0.12 s. y en la EO de 0.21 s. esto debido a que este sismo pertenece a la región 7 donde los valores del periodo varían grandemente.

4.5.4.4 Comparación de resultados obtenidos para 33 y 55 sismos en las estaciones Diana y Diana Pozo

Del análisis de las regiones

En ambos casos el valor del periodo fundamental de los sismos varía con el acimut de igual manera, es decir, al agregar los 22 sismos nuevos en las diferentes regiones no se producen aumentos en la variación del valor del periodo en todas las regiones, excepto en la 4, cuyo intervalo de valores con tres sismos es de entre 0.19 s. y 0.22 s., pero al agregarle tres sismos nuevos cambia a 0.19 s. y 0.24 s.

La amplificación relativa también varía con el acimut y de manera similar en ambos casos, o sea, al agregar los 22 sismos la forma de los cocientes espectrales regionales no sufren variación significativa, mejorando el ajuste de la forma de estos cocientes en los límites de la desviación estándar. Se observa en ambos casos que se mantiene la diferencia en la forma de los cocientes espectrales regionales de las regiones 6, 7 y 8 con el cociente promedio total, por lo que se puede concluir que estas regiones presentan características diferentes al resto de regiones. El promedio total que se obtiene tanto para 33 y 55 sismos representa a las regiones 1, 2, 3, 4 y 5.

Del periodo fundamental promedio y amplificación relativa máxima promedio

Los periodos fundamentales promedio regionales no varían en todas las regiones menos en la 8, donde sólo en la dirección NS aumenta de 0.13 s. a 0.12 s., la diferencia de 0.01 s. nos permite asumir estos periodos como valores similares.

Las amplificaciones relativas máximas regionales son en ambos casos similares, esto es, hay un aumento o disminución de hasta 5 unidades, siendo en muchos casos menor que una unidad.

Como conclusión general; tanto para 33 como para 55 sismos, los valores de las amplificaciones relativas máximas promedio total y de cada región son similares en ambas direcciones; el periodo fundamental promedio total y de cada región son iguales en ambas direcciones. La tabla 4.16 presenta para cada caso la frecuencia, periodo y amplificación relativa máxima promedio para cada región y del total de sismos.

Tabla 4.16: Frecuencias y periodos fundamentales promedio y amplificaciones relativas máximas promedio obtenidas para la estación Diana

DIANA/DIANA POZO					
Regiones	Parametros	33 sismos		55 sismos	
		NS	EO	NS	EO
Total	Frecuencia (Hz)	4.35	4.72	4.39	4.72
	Periodo (s)	0.23	0.21	0.23	0.21
	Amp.Rel.Max.	17.6	22.4	18.9	23.6
Region 1	Frecuencia (Hz)	4.49	4.52	4.49	4.52
	Periodo (s)	0.22	0.22	0.22	0.22
	Amp.Rel.Max.	37.3	30.8	37.3	30.8
Region 2	Frecuencia (Hz)	4.49	4.79	4.49	4.79
	Periodo (s)	0.22	0.21	0.22	0.21
	Amp.Rel.Max.	26.9	27.2	26.9	27.2
Region 3	Frecuencia (Hz)	4.50	4.72	4.46	4.70
	Periodo (s)	0.22	0.21	0.22	0.21
	Amp.Rel.Max.	25.0	31.6	24.7	27.1
Region 4	Frecuencia (Hz)	4.58	4.79	4.64	4.76
	Periodo (s)	0.22	0.21	0.22	0.21
	Amp.Rel.Max.	32.2	48.5	30.7	47.2
Region 5	Frecuencia (Hz)	4.52	4.70	4.64	4.70
	Periodo (s)	0.22	0.21	0.22	0.21
	Amp.Rel.Max.	26.7	21.9	31.6	25.6
Region 6	Frecuencia (Hz)	7.63	4.58	7.63	4.58
	Periodo (s)	0.13	0.22	0.13	0.22
	Amp.Rel.Max.	35.4	22.9	35.8	22.5
Region 7	Frecuencia (Hz)	7.70	4.82	7.80	4.82
	Periodo (s)	0.13	0.21	0.13	0.21
	Amp.Rel.Max.	16.2	22.0	16.9	22.8
Region 8	Frecuencia (Hz)	7.75	4.52	8.06	4.52
	Periodo (s)	0.13	0.22	0.12	0.22
	Amp.Rel.Max.	23.9	20.9	23.7	20.7

4.5.5 Comparación de resultados obtenidos en los pares de estaciones Diana/La Venta (50 sismos) y Diana/Diana Pozo (55 sismos)

Se van a comparar los resultados mediante las figuras 4.83 al 4.85 que presentan la superposición de los cocientes espectrales promedio por cada región y la figura 4.86 que muestra los periodos obtenidos en cada región.

Como se observó en la figura 4.61 y en otras anteriores de carácter similar, la diferencia de amplificaciones relativas en la alta frecuencia entre los cocientes espectrales promedio de Diana/Diana Pozo y Diana/La Venta se debe a los efectos de superficie libre y baja impedancia producto del

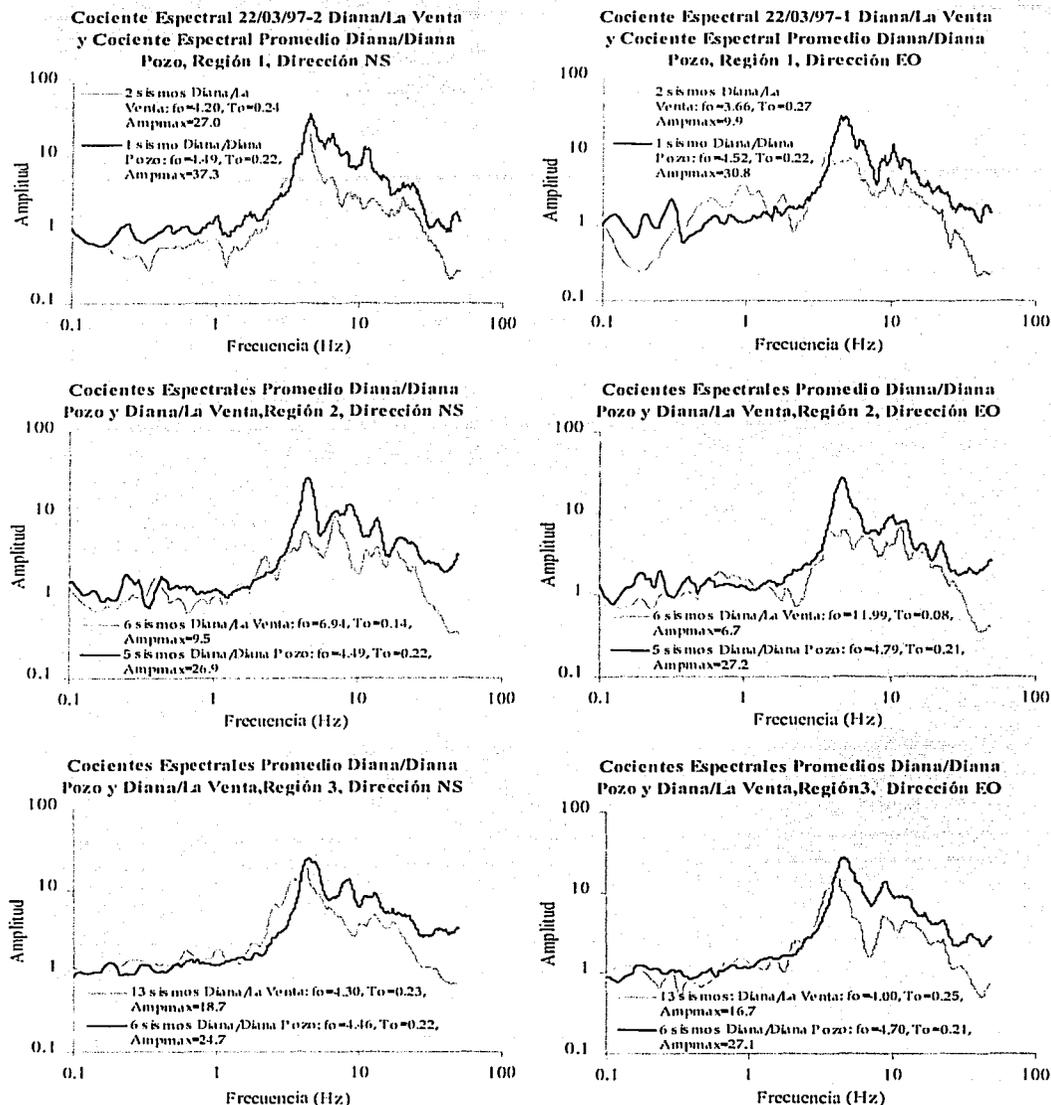


Figura 4.83

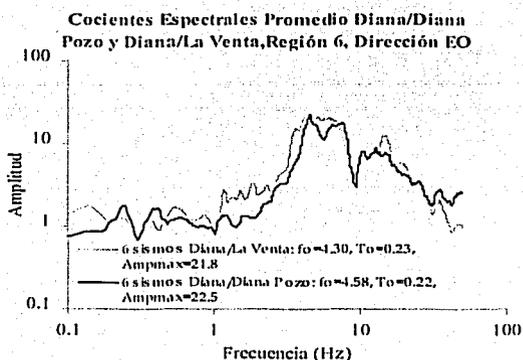
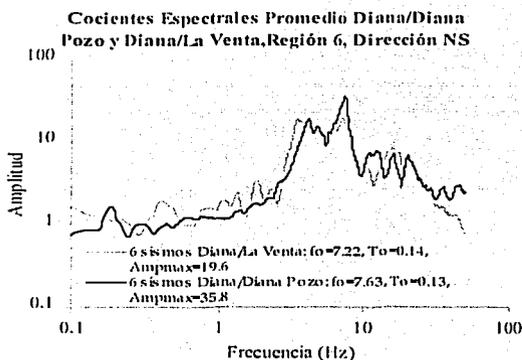
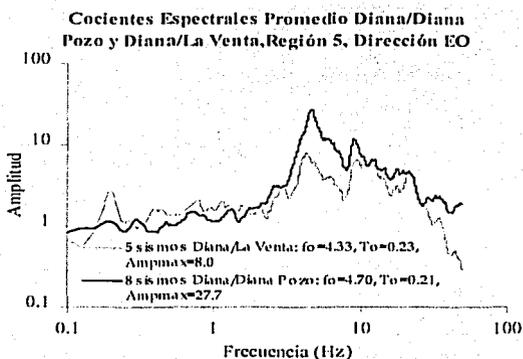
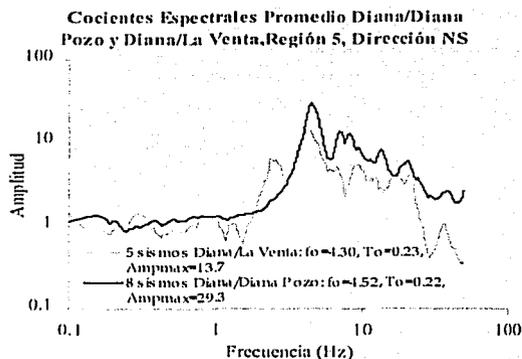
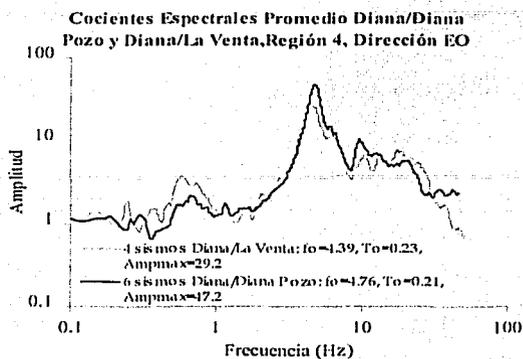
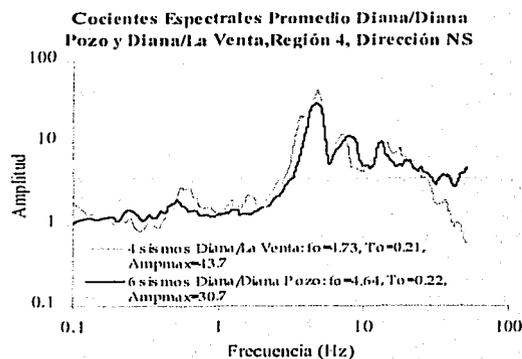


Figura 4.84

TESIS CON
FALLA DE CUBEN

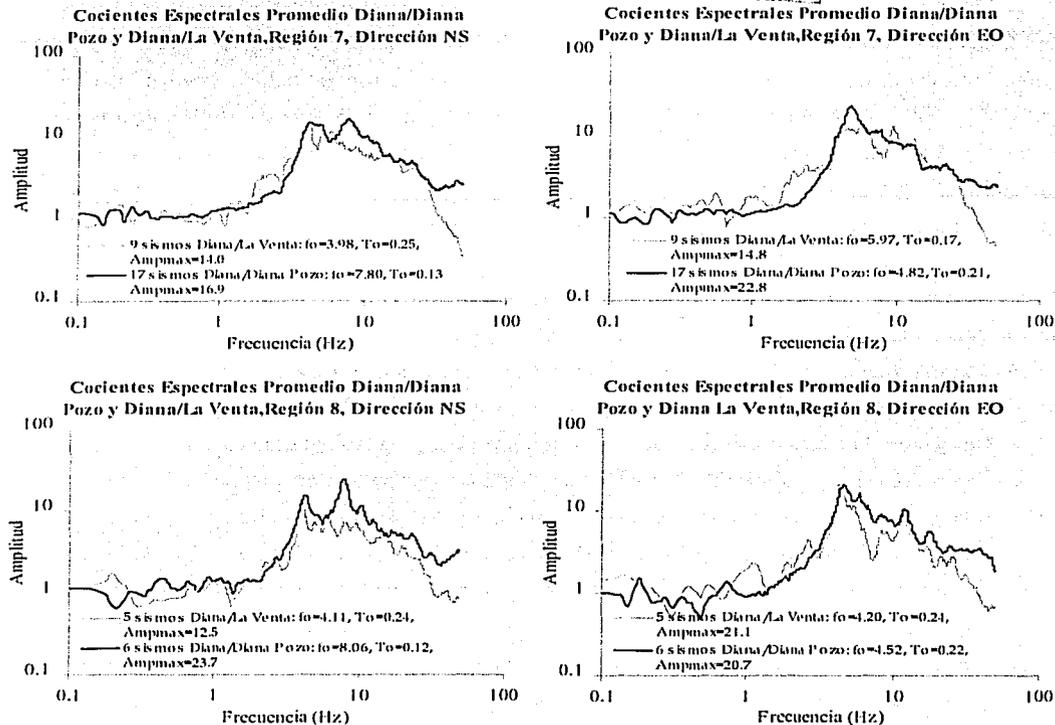


Figura 4.85

intemperismo en la estación La Venta. Esta diferencia se repite nuevamente al hacer la superposición de los cocientes espectrales promedio por cada región obtenidos para los 50 sismos de Diana/La Venta y 55 sismos de Diana/Diana Pozo.

Comparando con la realizada para los 33 sismos, esta superposición sólo presenta una diferencia y que corresponde a la región 2, debido que los cocientes promedio pertenecientes a Diana/La Venta presentan cambios significativos en su forma; en el resto de regiones no hay diferencias notables en la superposición y se mantienen las características con respecto a los 33 sismos; esto es: en la baja frecuencia, desde 0.1 a 2, 3 o 4 Hz., las amplificaciones relativas de cada par de estaciones y en cada dirección son algo similares como en las regiones 2, 3, 7 y 8, y no tan similares como en las regiones 1, 4, 5 y 6.

En la alta frecuencia, a partir de los 4 Hz., se mantiene que en las regiones 1, 2, 3, 5 y 8 las amplificaciones relativas de Diana/Diana Pozo son mayores a las de Diana/La Venta; nuevamente la región 7 presenta solo en ciertas bandas de frecuencia esta diferencia, siendo iguales en otras; y las regiones 4 y 6 muestran otra vez amplificaciones relativas similares de entre 4 y 30 Hz. a partir de la cual recién empieza la diferencia notoria entre las amplitudes. Se repite que en la mayoría de las regiones las amplitudes del cociente promedio Diana/Diana Pozo, en la alta frecuencia, tienen una forma algo semejante a las de Diana/La Venta, pero con mayores ordenadas espectrales.

Se confirma que la región 6 tiene una respuesta diferente al resto, al coincidir para ambos casos de superposición en la forma del cociente espectral promedio; y la no coincidencia en la forma de los cocientes promedio en la región 7 no da la seguridad en tener una respuesta confiable para esta región.

Respecto a la frecuencia promedio o periodo promedio fundamental de cada región, la figura 4.86 ayuda a determinar qué estación de referencia esta dando los mejores valores de periodos de los sismos en cada región y como consecuencia del promedio respectivo. Nuevamente se observa, comparando con los resultados del análisis de los 33 sismos, que los valores de periodo obtenidos de utilizar la estación Diana Pozo como referencia tiene menos dispersión que los de La Venta. Se repiten las regiones 2, 3, 4, 6 y 8 como las que presentan esta menor dispersión. Es interesante observar la región 3 que es la que tiene la mayor cantidad de sismos para el par de estaciones Diana/La Venta, la dispersión de valores del periodo fundamental de los 13 sismos es grande, comparada con los valores de los 6 sismos del par de estaciones Diana/Diana Pozo que se agrupan alrededor de entre 0.19 s. y 0.21 s. en ambas direcciones. De manera similar ocurre en la región 7, donde hay la mayor cantidad de sismos para Diana/Diana Pozo, aunque hay una cierta dispersión para los 17 sismos, los cuales tienden a agruparse en dos zonas, la primera alrededor de 0.12 s. y 0.13 s. en la dirección NS y en la EO entre 0.12 s. y 0.15 s., la segunda entre 0.12 s. y 0.16 s. en la dirección NS y en la EO entre 0.20 s. y 0.22 s.; en cambio los 9 sismos del par de estaciones Diana/La Venta no muestran tendencia alguna, presentando gran dispersión.

La tabla 4.17 muestra en resumen los valores de frecuencia y periodo predominante así como de las amplificaciones relativas máximas obtenidas de los cocientes espectrales para todos los casos analizados.

La figura 4.87 muestra la variación de las frecuencias fundamentales obtenidas para los 72 eventos con respecto a la distancia epicentral. se puede observar que la mayor variación de la frecuencia se presenta para los eventos con distancias menores a 70 Km, esta variación muestra mayor dispersión en los

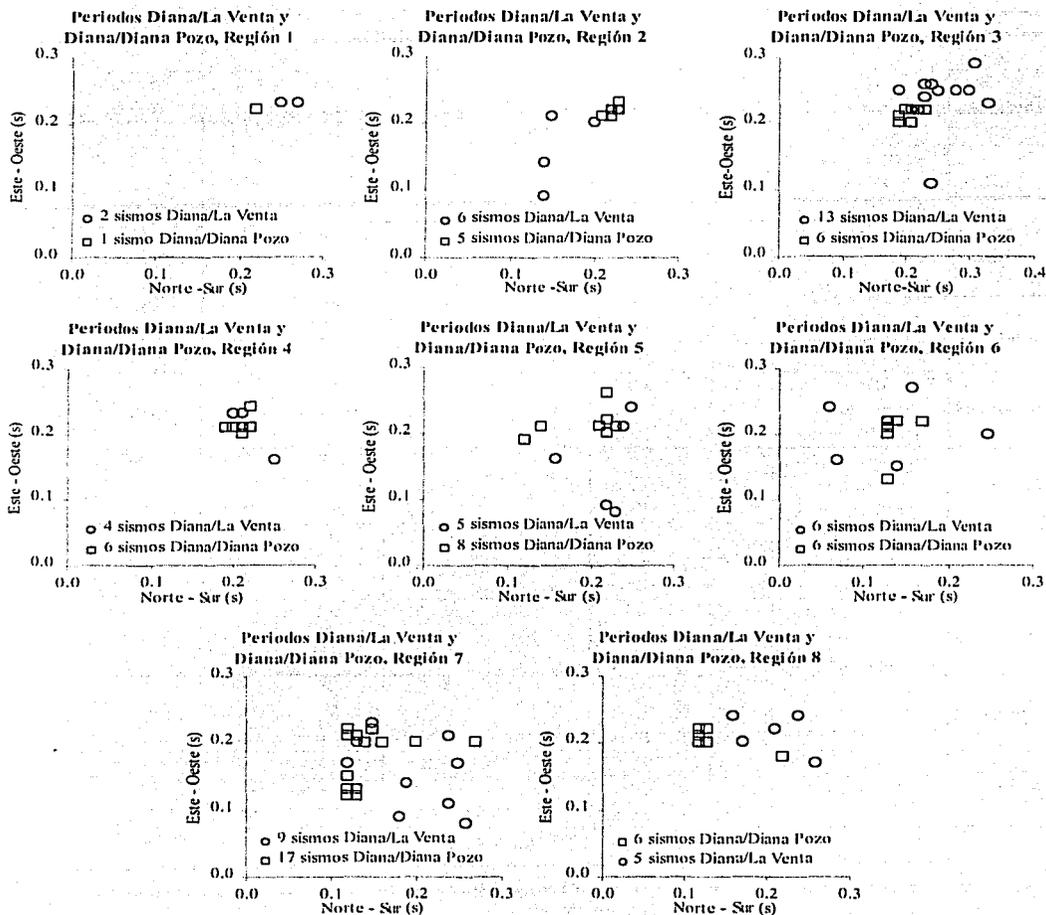


Figura 4.86

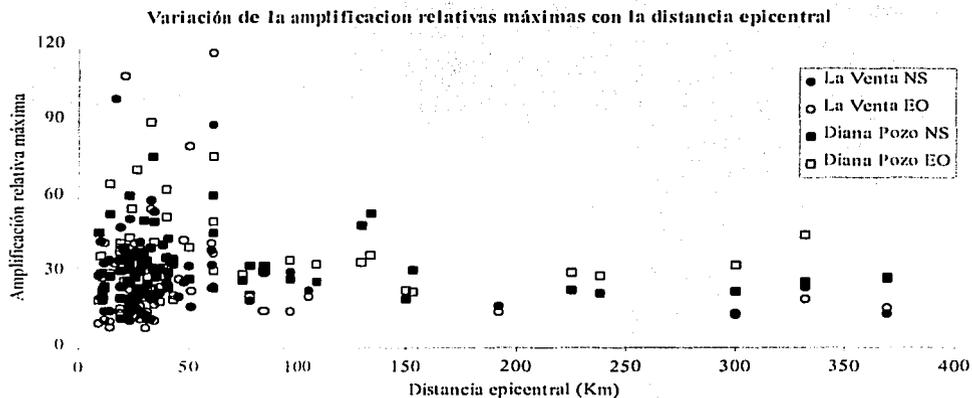
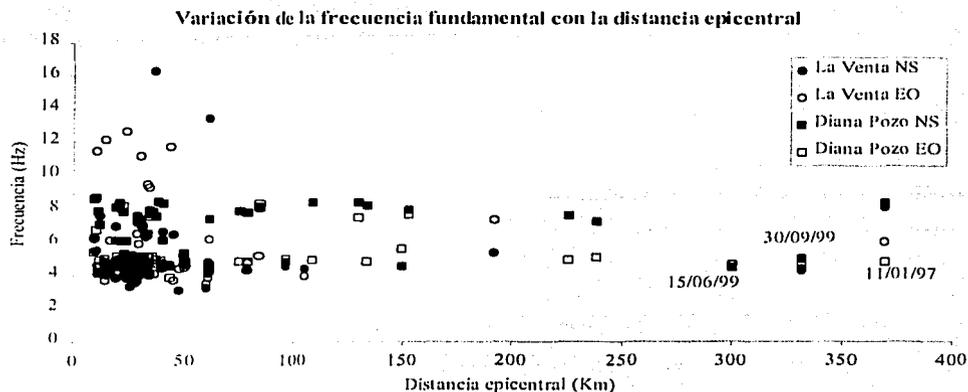
valores obtenidos con respecto a la estación de referencia La Venta, las respuestas en alta frecuencia podrían deberse a efectos de campo cercano; los sismos con distancias entre 70 y 250 Km muestran valores más estables de frecuencia siendo los límites entre los 4 y 8 Hz aproximadamente, y no se observa la gran dispersión vista anteriormente para la estación La Venta; es interesante observar ahora los tres sismos con mayores distancias epicentrales, el 15/06/99 y 30/09/99 pertenecen a las regiones 2 y 3 respectivamente y sus frecuencias son similares sin distinción de haber sido calculadas con respecto a Diana Pozo o La Venta y sin que se observe una dispersión de estos valores, si embargo el evento

**Tabla 4.17: Comparación de resultados obtenidos de cocientes espectrales
Diana/La Venta y Diana/Pozo**

Regiones	Parametros	33 sismos		33 sismos		50 sismos		55 sismos	
		Diana/La Venta		Diana/Diana Pozo		Diana/La Venta		Diana/Diana Pozo	
		NS	EO	NS	EO	NS	EO	NS	EO
Total	Frecuencia (Hz)	4.23	4.39	4.35	4.72	4.11	4.11	4.39	4.72
	Periodo (s)	0.24	0.23	0.23	0.21	0.24	0.24	0.23	0.21
	Amp.Rel.Max.	14.2	12.4	17.6	22.4	14.1	12.5	18.9	23.6
Region 1	Frecuencia (Hz)	4.44	4.40	4.49	4.52	4.20	3.66	4.49	4.52
	Periodo (s)	0.23	0.23	0.22	0.22	0.24	0.27	0.22	0.22
	Amp.Rel.Max.	51.0	19.8	37.3	30.8	27.0	9.9	37.3	30.8
Region 2	Frecuencia (Hz)	4.27	4.88	4.49	4.79	6.94	11.99	4.46	4.70
	Periodo (s)	0.23	0.20	0.22	0.21	0.14	0.08	0.22	0.21
	Amp.Rel.Max.	11.0	9.4	26.9	27.2	9.5	6.7	24.7	27.1
Region 3	Frecuencia (Hz)	4.46	4.52	4.50	4.72	4.30	4.00	4.46	4.70
	Periodo (s)	0.22	0.22	0.22	0.21	0.23	0.25	0.22	0.21
	Amp.Rel.Max.	17.9	13.0	25.0	31.6	18.7	16.7	24.7	27.1
Region 4	Frecuencia (Hz)	4.73	4.39	4.58	4.79	4.73	4.39	4.64	4.76
	Periodo (s)	0.21	0.23	0.22	0.21	0.21	0.23	0.22	0.21
	Amp.Rel.Max.	39.6	30.8	32.2	48.5	43.7	29.2	30.7	47.2
Region 5	Frecuencia (Hz)	4.30	4.33	4.52	4.70	4.30	4.33	4.64	4.70
	Periodo (s)	0.23	0.23	0.22	0.21	0.23	0.23	0.22	0.21
	Amp.Rel.Max.	13.7	8.0	26.7	21.9	13.7	8.0	31.6	25.6
Region 6	Frecuencia (Hz)	7.22	6.21	7.63	4.58	7.22	4.30	7.63	4.58
	Periodo (s)	0.14	0.16	0.13	0.22	0.14	0.23	0.13	0.22
	Amp.Rel.Max.	24.6	26.2	35.4	22.9	19.6	21.8	35.8	22.5
Region 7	Frecuencia (Hz)	4.03	5.97	7.70	4.82	3.98	5.97	7.80	4.82
	Periodo (s)	0.25	0.17	0.13	0.21	0.25	0.17	0.13	0.21
	Amp.Rel.Max.	14.1	16.0	16.2	22.0	14.0	14.8	16.9	22.8
Region 8	Frecuencia (Hz)	4.11	4.11	7.75	4.52	4.11	4.20	8.06	4.52
	Periodo (s)	0.24	0.24	0.13	0.22	0.24	0.24	0.12	0.22
	Amp.Rel.Max.	18.9	22.3	23.9	20.9	12.5	21.1	23.7	20.7

11/01/97 que pertenece a la región 7 si presenta una dispersión pero que es debido a que los eventos de esta región presentan estos valores de frecuencia.

La figura 4.88 presenta la variación de la amplificación relativa máxima con la distancia epicentral de los 72 eventos sísmicos, en forma similar a como se observó para la frecuencia fundamental, los eventos con distancia menor a 70 Km presentan una gran dispersión de valores de amplificación desde 8 hasta 117 veces, las mayores amplificaciones relativas máximas pueden deberse también por efecto del campo próximo o cercano; los sismos con distancias epicentrales mayores a los 70 Km presentan una respuesta mas estable, con amplificaciones entre 13 y 52 veces pero que en promedio sería de unas 25 veces.



4.6 CONCLUSIONES

El movimiento en la estación La Venta presenta los efectos de baja impedancia (producto del intemperismo) y de superficie libre (debido a los campos de ondas incidente y reflejado), lo que se observa en el espectro de amplitudes de Fourier sobre todo en la alta frecuencia (figura 4.21), subestimando las respuestas que se obtienen en los cocientes espectrales de la estación Diana y mostrando gran dispersión en los valores de frecuencia o periodo fundamental del suelo. La estación Diana Pozo no muestra estos efectos y por lo tanto no subestima las amplitudes de los cocientes espectrales de la estación Diana y presenta una menor dispersión de los valores de frecuencia o periodo fundamental del suelo.

En la superposición de los cocientes espectrales promedio por región, se observa que en la baja frecuencia, hasta los 4 o 5 Hz aproximadamente, no hay una gran diferencia entre las amplitudes de estos promedios; esto se debe a que en la baja frecuencia las longitudes de ondas son más grandes que la separación vertical entre las estaciones La Venta y Diana Pozo (de aproximadamente 107 m); en alta frecuencia, la longitud de onda incidente vertical se hace más pequeña de manera que se pueden notar los cambios decrecientes de velocidad que existen, producto del inemperismo, a medida que se aproximan a la superficie rocosa de la estación La Venta; esta estructura decreciente de velocidad no se presenta en la estación Diana Pozo.

La estación Diana Pozo, al encontrarse junto y por debajo de la estación de superficie Diana, no presenta el efecto por trayectoria que afecta a la propagación de ondas sísmicas, lo cual es una gran ventaja en comparación con la estación La Venta que al encontrarse a 9.4 Km de distancia de la estación Diana puede presentar este tipo de efecto para algunos sismos; de ser significativo este efecto se reflejaría tanto en el espectro de amplitudes de Fourier como en el correspondiente cociente espectral.

Por todo lo expuesto anteriormente, se considera que los resultados obtenidos de utilizar como estación de referencia a la estación Diana Pozo tienden a ser más confiables que los obtenidos con la estación La Venta, lo que motiva en este caso a proponer a la estación Diana Pozo como una mejor estación de referencia.

La distancia epicentral influye en la respuesta de la frecuencia fundamental y de la amplificación relativa máxima en el suelo de la estación Diana; posiblemente el efecto de campo cercano afecta a los sismos con distancia menor a 70 Km los cuales presentan las mayores frecuencias y amplificaciones relativas máximas de todos los sismos, pero también presentan las menores frecuencias y amplificaciones relativas; sin embargo estos valores se vuelven más estables para los sismos con distancias mayores a los 70 Km. Los eventos con distancias epicentrales mayores a 300 Km presentan valores de frecuencia fundamental y amplificaciones relativas máximas correspondientes a las regiones a las cuales pertenecen.

Los valores presentados en la tabla 4.17 indican que no existe variación en los resultados de frecuencia o periodo fundamental y amplificación relativa máxima obtenidos por regiones para 33 y 55 sismos en las estaciones Diana y Diana Pozo; las regiones 1 al 5 presentan valores similares de frecuencia o periodo fundamental y aproximados en la amplificación relativa máxima, las regiones 6 al 8 presentan valores similares de frecuencia y periodo fundamental y diferentes en las amplificaciones relativas máximas. Los valores obtenidos de las estaciones Diana y La Venta sí presentan diferencias para 33 y 50 sismos y a la vez también son diferentes en algunas regiones a las de las estaciones Diana y Diana Pozo.

CAPÍTULO V

POSIBLE COMPORTAMIENTO NO LINEAL DEL SUELO DE LA ESTACION DIANA

Idriss (1991), utilizando aceleraciones horizontales máximas registradas en varios tipos de suelo durante el sismo de Loma Prieta, determina la gráfica en la que relaciona aceleraciones máximas horizontales en roca y en suelo blando (figura 5.1). Como puede observarse, la relación que se presenta es del tipo no lineal. Con estos mismos datos de aceleración presenta la gráfica (figura 5.2) que muestra el factor de amplificación de aceleración horizontal máxima del suelo blando respecto a la aceleración horizontal máxima en roca, el cual no es constante y disminuye a medida que aumenta el valor de la aceleración en roca, lo que indica también un comportamiento no lineal del suelo blando.

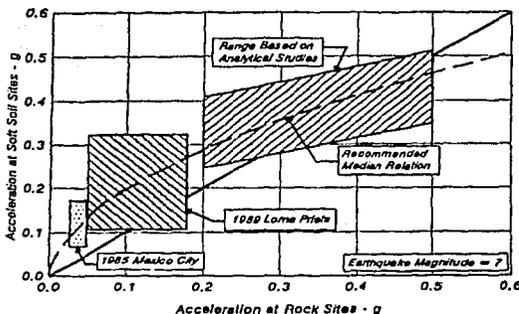


Figura 5.1 (tomado de Idriss, 1991)

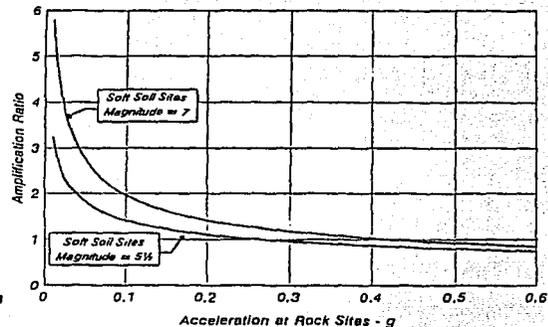


Figura 5.2 (tomado de Idriss, 1991)

A continuación se analizarán las aceleraciones horizontales máximas registradas en las estaciones Diana, Diana Pozo y La Venta, con la intención de verificar si las observaciones hechas por Idriss (1991) también se cumplen para los pares de estaciones Diana/Diana Pozo y Diana/La Venta. Para identificar eventos con posible comportamiento no lineal en la estación Diana, se hará uso de los cocientes espectrales obtenidos de cada par de estaciones.

5.1 ACELERACIONES HORIZONTALES MÁXIMAS REGISTRADAS

La tabla 5.1 muestra las aceleraciones horizontales máximas registradas en las direcciones EO y NS en las estaciones La Venta y Diana (50 sismos) así como también el cociente de las aceleraciones

Tabla 5.1: Aceleraciones horizontales máximas registradas en las estaciones La Venta y Diana

Nº	SISMO	Latitud (°)	Longitud (°)	Profund (Km)	Mb	Ms	Mc	LA VENTA		DIANA		DIANA/LA VENTA	
								AmaxEO	AmaxNS	AmaxEO	AmaxNS	EO	NS
1	16/08/88	16.97	-99.80	21.1	4.2	-	4.6	38.3	31.6	120.1	71.8	3.1	2.3
2	25/04/89	16.60	-99.40	19.0	6.3	6.9	6.5	62.0	29.1	331.5	335.0	5.3	11.5
3	02/05/89	16.64	-99.51	13.4	5.4	4.9	5.1	8.8	8.1	58.3	73.9	6.6	9.1
4	17/08/89	17.12	-100.04	25.6	4.9	-	4.8	20.2	14.4	78.2	60.7	3.9	4.2
5	08/10/89	17.19	-100.21	36.0	5	4.1	5	10.9	10.0	49.2	45.0	4.5	4.5
6	09/11/89	16.84	-99.65	9.9	5.1	4.1	5.1	49.8	30.6	93.5	90.5	1.9	3.0
7	13/01/90	16.82	-99.63	12.2	5.3	5	5	43.2	24.5	172.3	150.3	4.0	6.1
8	04/04/90	16.65	-99.37	15.4	4.3	4.3	5	7.7	5.3	48.8	26.3	6.3	5.0
9	09/07/90	16.86	-99.67	16.2	-	-	4.5	29.0	18.8	17.7	11.0	0.6	0.6
10	10/07/90	16.83	-99.57	17.9	4.5	-	4.8	24.7	16.1	76.1	56.0	3.1	3.5
11	09/01/92	17.01	-99.65	32.0	4.7	-	4.3	24.9	25.8	59.8	45.5	2.4	1.8
12	15/05/92	16.83	-99.98	23.0	4.2	-	4.2	6.3	8.2	110.5	95.2	17.5	11.6
13	24/10/93	16.54	-98.98	19.0	6.2	6.6	6.5	15.3	17.1	128.2	103.8	8.4	6.1
14	29/10/94	16.97	-99.89	24.0	-	-	5.1	38.5	26.7	97.5	92.9	2.5	3.5
15	15/05/95	16.50	-100.02	5.0	-	-	4.6	11.1	9.2	49.9	47.6	4.5	5.2
16	12/07/95	17.02	-99.99	26.0	-	-	4	6.1	6.6	45.8	41.2	7.6	6.2
17	09/12/95	16.88	-99.63	23.0	-	-	4.3	10.5	6.5	17.7	22.6	1.7	3.5
18	01/01/96	16.95	-99.69	55.0	-	-	4.4	2.5	4.0	18.1	17.3	7.3	4.3
19	13/03/96	16.52	-99.08	18.0	5.2	4.4	5.1	2.6	3.3	14.9	13.4	5.7	4.0
20	23/04/96	17.11	-101.60	17.0	5.3	4.9	5.3	3.8	3.3	20.8	19.3	5.5	5.8
21	08/05/96-	16.83	-100.21	5.0	4	-	4.6	2.2	3.6	18.9	31.6	8.8	8.7
22	08/05/96-	16.82	-100.29	7.0	4.1	-	4.6	3.2	5.8	30.3	30.9	9.5	5.3
23	08/06/96	16.46	-99.68	15.0	-	-	4.4	2.4	3.2	20.0	15.4	8.4	4.9
24	11/06/96	16.74	-99.92	16.0	-	-	4	13.3	14.4	11.7	22.5	0.9	1.6
25	03/09/96	16.72	-99.85	9.0	4.6	-	4.9	2.4	2.4	43.4	69.5	18.4	29.1
26	11/01/97	17.91	-103.04	16.0	6.5	6.9	-	2.5	2.2	16.5	20.0	6.7	9.1
27	22/03/97-	17.04	-99.76	30.0	4.7	-	4.6	11.2	15.9	35.5	29.9	3.2	1.9
28	22/03/97-	16.33	-100.02	16.0	4.1	-	4.3	3.2	1.8	37.7	25.2	12.0	13.8
29	08/05/97	17.32	-100.44	12.0	5	4.3	4.8	5.9	5.7	46.8	53.2	7.9	9.4
30	11/07/97	16.76	-99.70	10.0	-	-	4.5	5.4	5.1	17.8	18.3	3.3	3.6
31	19/07/97	17.22	-100.56	51.0	4.6	3.8	4.9	3.9	4.4	26.6	33.1	6.9	7.5
32	14/08/97	16.79	-100.18	6.0	-	-	4.1	1.8	2.7	17.1	12.9	9.3	4.7
33	25/08/97	16.69	-99.87	3.0	-	-	3.9	4.2	3.0	10.9	17.5	2.6	5.8
34	27/08/97	16.76	-99.88	28.0	5	-	4.6	29.6	58.7	59.0	74.4	2.0	1.3
35	14/10/97	16.83	-99.64	5.0	-	-	4.2	2.6	3.8	13.9	10.9	5.4	2.8
36	21/10/97	16.57	-99.87	16.0	-	-	4	3.5	3.7	31.7	38.9	9.0	10.7
37	28/01/98	16.78	-99.89	28.0	-	-	4	3.2	2.3	10.7	11.7	3.3	5.2
38	01/06/98	16.83	-100.14	5.0	4.5	-	4.8	10.4	18.2	171.8	143.1	16.5	7.9
39	12/07/98	16.83	-100.44	4.0	5.1	4.6	4.8	3.6	3.6	24.3	20.2	6.8	5.7
40	17/07/98	16.98	-100.16	27.0	-	-	4.6	17.1	17.7	130.3	108.8	7.6	6.1
41	09/08/98	16.87	-100.25	3.0	4.2	-	4.5	1.9	3.6	29.4	23.1	15.8	6.5
42	07/09/98	16.77	-99.67	12.0	-	-	4.1	6.7	5.5	8.5	12.7	1.3	2.3
43	02/03/99	16.95	-99.61	41.0	4.2	-	4.2	13.9	14.0	40.5	28.8	2.9	2.1
44	06/04/99	16.91	-99.96	6.0	-	-	3.9	5.0	8.4	47.8	41.9	9.5	5.0
45	08/04/99	16.99	-100.06	6.0	-	-	4	3.7	5.3	25.2	34.5	6.8	6.6
46	15/06/99	18.18	-97.51	69.0	6.4	6.5	-	5.6	6.6	22.5	24.5	4.0	3.7
47	16/08/99	17.03	-99.94	55.0	-	-	4.3	3.4	6.6	18.8	13.8	5.6	2.1
48	30/09/99	15.95	-97.03	16.0	6.5	7.5	5.2	7.6	7.7	45.8	39.3	6.0	5.1
49	27/10/99	16.90	-99.71	35.0	-	-	4.2	5.1	11.5	16.9	12.3	3.3	1.1
50	08/10/01	17.01	-100.10	16.0	5.6*	5.4*	-	26.6	38.6	221.1	334.5	8.3	8.7

* fuente: Harvard CTM Catalog

Tabla 5.2: Aceleraciones horizontales máximas registradas en las estaciones Diana Pozo y Diana

Nº	Sismo	Latitud (°)	Longitud (°)	Profund. (Km)	Mb	Ms	Mc	DIANA POZO		DIANA		DIANA/DIANA POZO	
								AmaxEO	AmaxNS	AmaxEO	AmaxNS	EO	NS
1	15/04/94	16.74	-99.63	5.0	4.0	-	4.7	8.6	8.3	40.6	52.1	4.7	6.3
2	23/05/94	18.03	-100.57	23.0	-	-	5.6	4.2	3.7	22.6	26.9	5.4	7.3
3	29/10/94	16.97	-99.89	24.0	-	-	5.1	15.4	15.4	97.5	92.9	6.4	6.0
4	10/12/94	18.02	-101.56	20.0	-	-	6.3	2.7	2.2	18.2	16.6	6.8	7.5
5	22/12/94	16.63	-99.92	5.0	-	-	4.3	2.4	3.1	23.6	32.3	10.0	10.5
6	02/01/95	16.68	-99.79	20.0	-	-	4.2	3.0	2.0	12.9	12.6	4.3	6.3
7	15/05/95	16.50	-100.02	5.0	-	-	4.6	11.1	12.3	49.9	47.6	4.5	3.9
8	12/07/95	17.02	-99.99	26.0	-	-	4.0	4.1	7.3	45.8	41.2	11.2	5.6
9	22/09/95	16.37	-99.62	24.0	-	-	4.6	2.6	3.2	24.0	22.9	9.4	7.1
10	09/12/95	16.88	-99.63	23.0	-	-	4.3	3.1	6.2	17.7	22.6	5.8	3.7
11	01/01/96	16.95	-99.69	55.0	-	-	4.4	3.1	3.1	18.1	17.3	5.9	5.6
12	13/03/96	16.52	-99.08	18.0	5.2	4.4	5.1	2.2	2.7	14.9	13.4	6.8	4.9
13	15/04/96	16.89	-100.21	3.0	-	-	4.1	1.4	2.3	10.9	13.1	7.5	5.7
14	08/06/96	16.46	-99.68	15.0	-	-	4.4	1.7	2.5	20.0	15.4	11.9	6.2
15	11/06/96	16.74	-99.92	16.0	-	-	4.0	2.9	3.2	11.7	22.5	4.0	7.0
16	19/11/96	17.38	-100.98	51.0	-	-	3.9	1.9	1.6	8.1	14.4	4.3	9.2
17	11/01/97	17.91	-103.04	16.0	6.5	6.9	-	2.1	2.1	16.5	20.0	7.8	9.5
18	22/03/97-1	17.04	-99.76	30.0	4.7	-	4.6	6.5	5.5	35.5	29.9	5.5	5.4
19	22/03/97-2	16.33	-100.02	16.0	4.1	-	4.3	3.3	2.9	37.7	25.2	11.5	8.7
20	08/05/97	17.32	-100.44	12.0	5.0	4.3	4.8	8.9	6.2	46.8	53.2	5.3	8.6
21	19/05/97	17.24	-100.46	40.0	-	-	4.2	1.4	1.3	11.0	12.0	7.9	9.6
22	26/06/97	16.77	-99.97	10.0	-	-	4.1	2.9	3.7	22.4	19.7	7.7	5.3
23	11/07/97	16.76	-99.70	10.0	-	-	4.5	3.2	3.1	17.8	18.3	5.5	6.0
24	19/07/97	17.22	-100.56	51.0	4.6	3.8	4.9	3.3	3.5	26.6	33.1	8.1	9.6
25	14/08/97	16.79	-100.18	6.0	-	-	4.1	2.1	1.8	17.1	12.9	8.3	7.0
26	25/08/97	16.69	-99.87	3.0	-	-	3.9	4.3	3.6	10.9	17.5	2.6	4.9
27	27/08/97	16.76	-99.88	28.0	5.0	-	4.6	16.3	15.2	59.0	74.4	3.6	4.9
28	14/10/97	16.83	-99.64	5.0	-	-	4.2	1.5	1.5	13.9	10.9	9.2	7.2
29	21/10/97	16.57	-99.87	16.0	-	-	4.0	4.2	6.0	31.7	38.9	7.6	6.5
30	31/10/97	17.14	-100.05	28.0	-	-	4.3	1.5	1.5	17.5	19.6	11.5	13.4
31	22/12/97	17.14	-101.24	5.0	5.1	5.0	4.6	1.6	1.6	15.1	14.5	9.7	9.2
32	28/01/98-1	16.78	-99.89	28.0	-	-	4.0	1.6	1.1	10.7	11.7	6.6	10.4
33	28/01/98-2	16.91	-100.08	17.0	-	-	3.9	1.4	0.8	14.0	14.6	10.0	18.7
34	05/03/98	16.85	-100.25	9.0	-	-	4.3	2.6	1.7	20.6	17.2	7.9	10.1
35	11/03/98	17.01	-100.11	40.0	-	-	4.2	3.5	2.5	13.2	12.9	3.7	5.1
36	01/06/98	16.83	-100.14	5.0	4.5	-	4.8	14.4	20.1	171.8	143.1	11.9	7.1
37	12/07/98	16.83	-100.44	4.0	5.1	4.6	4.8	4.1	2.9	24.3	20.2	5.9	7.0
38	17/07/98	16.98	-100.16	27.0	-	-	4.6	28.0	19.4	130.3	108.8	4.6	5.6
39	09/08/98	16.87	-100.25	3.0	4.2	-	4.5	2.6	3.1	29.4	23.1	11.1	7.5
40	07/09/98	16.77	-99.67	12.0	-	-	4.1	1.6	1.6	8.5	12.7	5.2	8.0
41	27/12/98	16.59	-100.11	3.0	-	-	4.3	7.5	10.7	51.1	47.5	6.8	4.4
42	02/03/99	16.95	-99.61	41.0	4.2	-	4.2	6.5	5.1	40.5	28.8	6.3	5.7
43	04/03/99	16.80	-100.18	7.0	-	-	3.8	1.7	1.4	16.0	16.9	9.5	12.4
44	06/04/99	16.91	-99.96	6.0	-	-	3.9	7.3	6.5	47.8	41.9	6.6	6.5
45	08/04/99	16.99	-100.06	6.0	-	-	4.0	5.4	3.7	25.2	34.5	4.7	9.3
46	30/05/99	17.26	-100.79	53.0	4.4	-	4.6	0.9	0.7	10.4	11.4	11.6	16.4
47	15/06/99	18.18	-97.51	69.0	6.4	6.5	-	4.5	5.1	22.5	24.5	5.0	4.9
48	21/06/99	17.99	-101.72	54.0	6.0	5.8	5.8	1.9	1.2	13.7	9.3	7.2	7.5
49	16/08/99	17.03	-99.94	55.0	-	-	4.3	1.8	2.5	18.8	13.8	10.6	5.6
50	30/09/99	15.95	-97.03	16.0	6.5	7.5	5.2	7.4	6.2	45.8	39.3	6.2	6.4
51	27/10/99	16.90	-99.71	35.0	-	-	4.2	3.4	1.9	16.9	12.3	4.9	6.6
52	08/11/99	17.33	-100.96	23.0	4.7	4.1	4.6	1.7	1.2	15.3	14.1	8.8	12.1
53	19/11/99	16.56	-99.69	15.0	-	-	4.4	1.7	2.0	13.6	12.6	8.1	6.3
54	07/12/99	17.21	-99.93	42.0	-	-	3.7	1.8	1.5	7.3	12.3	4.2	8.0
55	08/10/01	17.01	-100.10	16.0	5.6*	5.4*	-	41.1	37.0	221.1	334.5	5.4	9.1

* fuente: Harvard CTM Catalog

máximas de Diana entre La Venta para cada dirección. De igual manera, en la tabla 5.2 se presentan estos valores para las estaciones Diana Pozo y Diana (55 sismos). Las figuras 5.3 y 5.4, presentan la relación de las aceleraciones para cada par de estaciones; la tendencia de las aceleraciones esta representada para cada dirección por sendos gráficos de tipo logarítmico, los cuales tienden a superponerse.

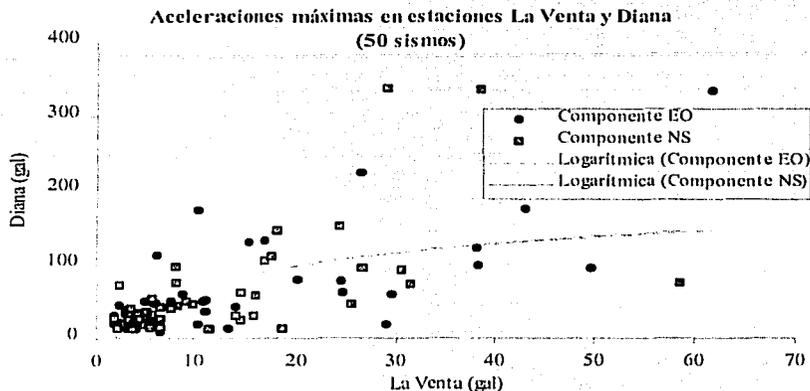


Figura 5.3

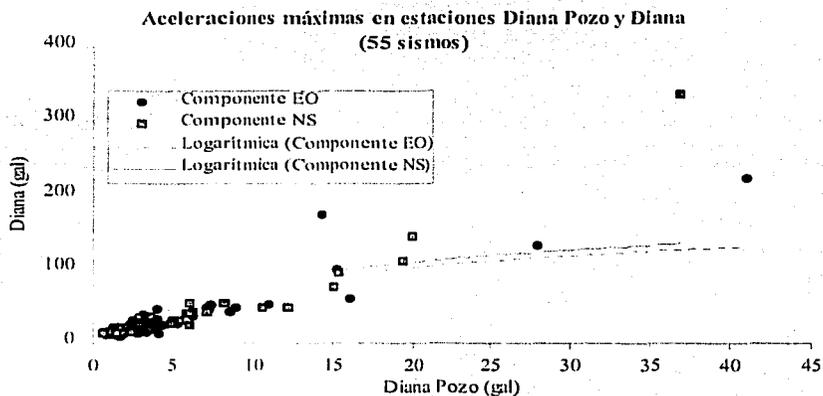


Figura 5.4

Las figuras 5.5 y 5.6 muestran en las abscisas el valor de la aceleración horizontal máxima en las estaciones La Venta y Diana Pozo, y en las ordenadas el factor de amplificación de la aceleración horizontal máxima en la estación Diana respecto a las estaciones La Venta y Diana Pozo, esto es $AceMaxDIANA/AceMaxVENTA$ y $AceMaxDIANA/AceMaxDIANA POZO$ para cada dirección.

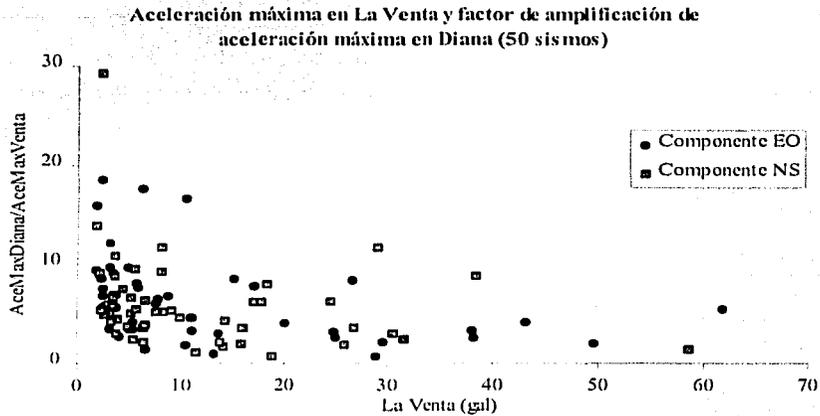


Figura 5.5

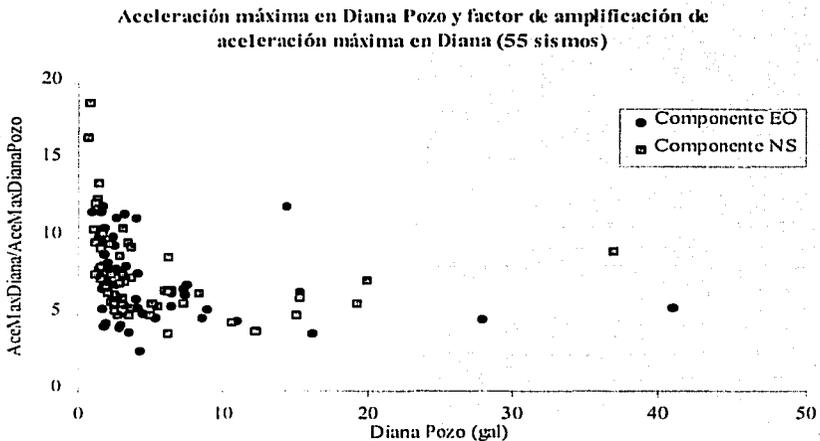


Figura 5.6

Se observa que este factor de amplificación es mayor para aceleraciones menores a 10 gal para el par de estaciones Diana y La Venta (figura 5.5) y para aceleraciones menores a 4 gal para Diana y Diana Pozo (figura 5.6); a medida que la aceleración en las estaciones La Venta y Diana Pozo aumenta, el valor del factor de amplificación en Diana decrece, confirmando el comportamiento visto por Idriss (1991).

Se procederá primero a analizar los eventos que se han registrado simultáneamente en las tres estaciones, esto es, los 33 sismos ya utilizados en el capítulo anterior; si un evento presenta características de comportamiento no lineal, se espera que lo cumpla para cada par de estaciones. La tabla 5.3 presenta los valores de aceleración máxima para los 33 sismos y las figuras 5.7 y 5.8 la relación de estas aceleraciones. Se observa la diferencia entre las gráficas logarítmicas de cada par de estaciones.

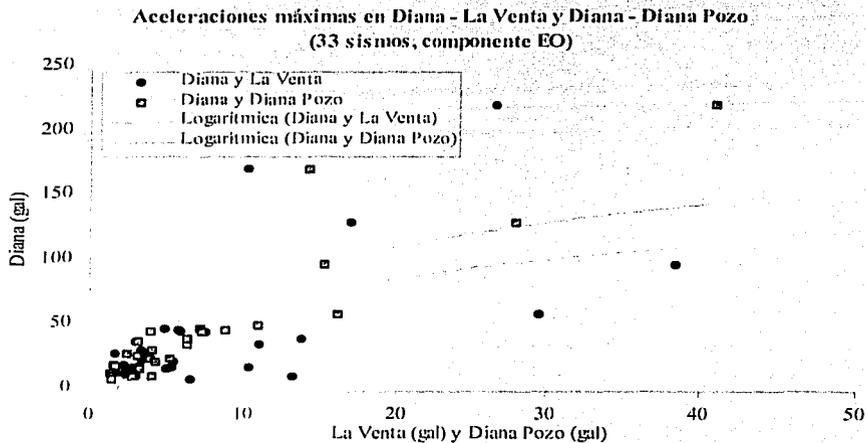


Figura 5.7

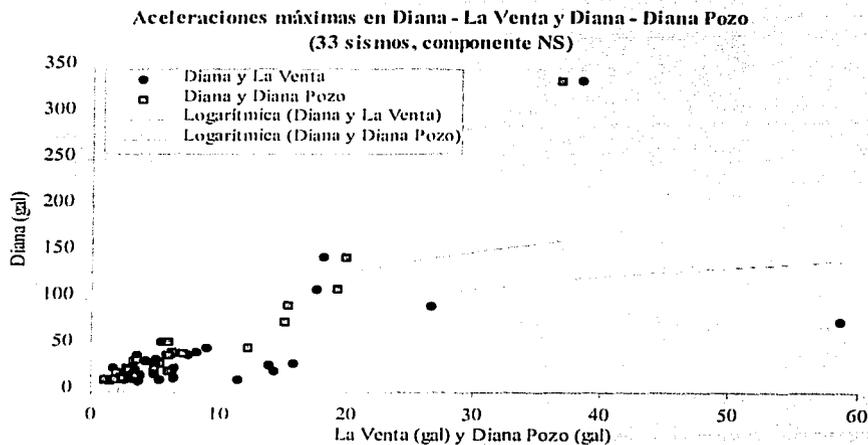


Figura 5.8

Tabla 5.3: Aceleraciones máximas de 33 sismos registrados simultáneamente en Diana, Diana Pozo y La Venta

Nº	SISMO	Latitud (°)	Longitud (°)	Profund. (Km)	Mb	Ms	Mc	LA VENTA		DIANA POZO		DIANA		DIANA/LA VENTA		DIANA/DIANA POZO	
								AmaxEO	AmaxNS	AmaxEO	AmaxNS	AmaxEO	AmaxNS	EO	NS	EO	NS
1	29/10/94	16.97	-99.89	24.0	-	-	5.1	38.5	26.7	15.4	15.4	97.5	92.9	2.5	3.5	6.4	6.0
2	15/05/95	16.50	-100.02	5.0	-	-	4.6	11.1	9.2	11.1	12.3	49.9	47.6	4.5	5.2	4.5	3.9
3	12/07/95	17.02	-99.99	26.0	-	-	4	6.1	6.6	4.1	7.3	45.8	41.2	7.6	6.2	11.2	5.6
4	09/12/95	16.88	-99.63	23.0	-	-	4.3	10.5	6.5	3.1	6.2	17.7	22.6	1.7	3.5	5.8	3.7
5	01/01/96	16.95	-99.69	55.0	-	-	4.4	2.5	4.0	3.1	3.1	18.1	17.3	7.3	4.3	5.9	5.6
6	13/03/96	16.52	-99.08	18.0	5.2	4.4	5.1	2.6	3.3	2.2	2.7	14.9	13.4	5.7	4.0	6.8	4.9
7	08/06/96	16.46	-99.68	15.0	-	-	4.4	2.4	3.2	1.7	2.5	20.0	15.4	8.4	4.9	11.9	6.2
8	11/06/96	16.74	-99.92	16.0	-	-	4	13.3	14.4	2.9	3.2	11.7	22.5	0.9	1.6	4.0	7.0
9	11/01/97	17.91	-103.04	16.0	6.5	6.9	-	2.5	2.2	2.1	2.1	16.5	20.0	6.7	9.1	7.8	9.5
10	22/03/97-1	17.04	-99.76	30.0	4.7	-	4.6	11.2	15.9	6.5	5.5	35.5	29.9	3.2	1.9	5.5	5.4
11	22/03/97-2	16.33	-100.02	16.0	4.1	-	4.3	3.2	1.8	3.3	2.9	37.7	25.2	12.0	13.8	11.5	8.7
12	08/05/97	17.32	-100.44	12.0	5	4.3	4.8	5.9	5.7	8.9	6.2	46.8	53.2	7.9	9.4	5.3	8.6
13	11/07/97	16.76	-99.70	10.0	-	-	4.5	5.4	5.1	3.2	3.1	17.8	18.3	3.3	3.6	5.5	6.0
14	19/07/97	17.22	-100.56	51.0	4.6	3.8	4.9	3.9	4.4	3.3	3.5	26.6	33.1	6.9	7.5	8.1	9.6
15	14/08/97	16.79	-100.18	6.0	-	-	4.1	1.8	2.7	2.1	1.8	17.1	12.9	9.3	4.7	8.3	7.0
16	25/08/97	16.69	-99.87	3.0	-	-	3.9	4.2	3.0	4.3	3.6	10.9	17.5	2.6	5.8	2.6	4.9
17	27/08/97	16.76	-99.88	28.0	5	-	4.6	29.6	58.7	16.3	15.2	59.0	74.4	2.0	1.3	3.6	4.9
18	14/10/97	16.83	-99.64	5.0	-	-	4.2	2.6	3.8	1.5	1.5	13.9	10.9	5.4	2.8	9.2	7.2
19	21/10/97	16.57	-99.87	16.0	-	-	4	3.5	3.7	4.2	6.0	31.7	38.9	9.0	10.7	7.6	6.5
20	28/01/98-1	16.78	-99.89	28.0	-	-	4	3.2	2.3	1.6	1.1	10.7	11.7	3.3	5.2	6.6	10.4
21	01/06/98	16.83	-100.14	5.0	4.5	-	4.8	10.4	18.2	14.4	20.1	171.8	143.1	16.5	7.9	11.9	7.1
22	12/07/98	16.83	-100.44	4.0	5.1	4.6	4.8	3.6	3.6	4.1	2.9	24.3	20.2	6.8	5.7	5.9	7.0
23	17/07/98	16.98	-100.16	27.0	-	-	4.6	17.1	17.7	28.0	19.4	130.3	108.8	7.6	6.1	4.6	5.6
24	09/08/98	16.87	-100.25	3.0	4.2	-	4.5	1.9	3.6	2.6	3.1	29.4	23.1	15.8	6.5	11.1	7.5
25	07/09/98	16.77	-99.67	12.0	-	-	4.1	6.7	5.5	1.6	1.6	8.5	12.7	1.3	2.3	5.2	8.0
26	02/03/99	16.95	-99.61	41.0	4.2	-	4.2	13.9	14.0	6.5	5.1	40.5	28.8	2.9	2.1	6.3	5.7
27	06/04/99	16.91	-99.96	6.0	-	-	3.9	5.0	8.4	7.3	6.5	47.8	41.9	9.5	5.0	6.6	6.5
28	08/04/99	16.99	-100.06	6.0	-	-	4	3.7	5.3	5.4	3.7	25.2	34.5	6.8	6.6	4.7	9.3
29	15/06/99	18.18	-97.51	69.0	6.4	6.5	-	5.6	6.6	4.5	5.1	22.5	24.5	4.0	3.7	5.0	4.9
30	16/08/99	17.03	-99.94	55.0	-	-	4.3	3.4	6.6	1.8	2.5	18.8	13.8	5.6	2.1	10.6	5.6
31	30/09/99	15.95	-97.03	16.0	6.5	7.5	5.2	7.6	7.7	7.4	6.2	45.8	39.3	6.0	5.1	6.2	6.4
32	27/10/99	16.90	-99.71	35.0	-	-	4.2	5.1	11.5	3.4	1.9	16.9	12.3	3.3	1.1	4.9	6.6
33	08/10/01	17.01	-100.1	16.0	5.6*	5.4*	-	26.6	38.6	41.1	37.0	221.1	334.5	8.3	8.7	5.4	9.1

* fuente: Harvard CTM Catalog

Las figuras 5.9 y 5.10 presentan en las abscisas el valor de las aceleraciones horizontales máximas en cada dirección de los 33 eventos registrados en la estación Diana y en las ordenadas el factor de amplificación de la aceleración máxima de Diana respecto a las aceleraciones horizontales máximas registradas en La Venta y Diana Pozo para cada uno de los 33 eventos. La diferencia con las figuras 5.5 y 5.6 es que colocando en las abscisas la aceleración máxima en Diana permite comparar para cada evento los respectivos factores de amplificación de aceleración máxima respecto a La Venta y Diana Pozo.

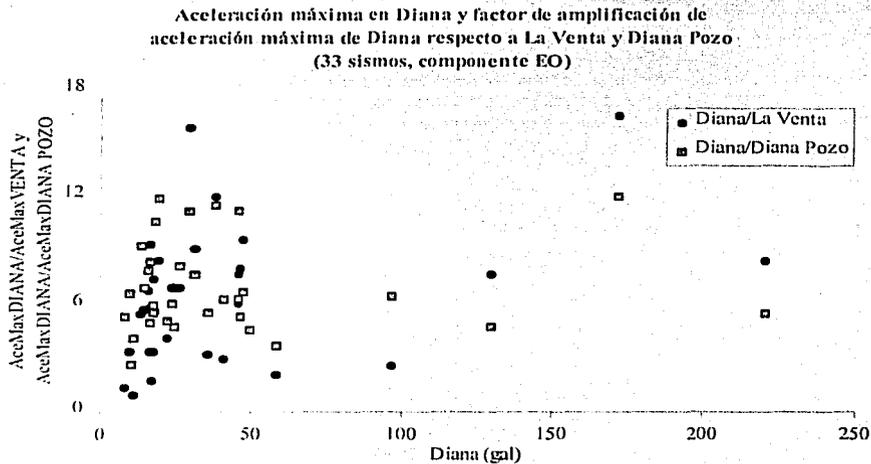


Figura 5.9

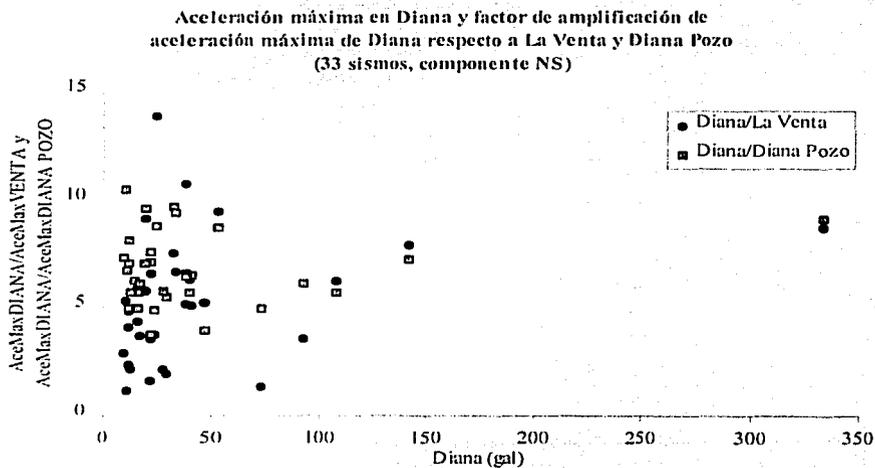


Figura 5.10

En estos 33 sismos se observa nuevamente cómo, en forma general, el factor de amplificación de la aceleración máxima disminuye a medida que aumenta la aceleración en Diana. Las figuras 5.9 y 5.10 presentan los valores obtenidos para cada dirección, los cuales para algunos eventos no muestran una clara tendencia de las aceleraciones para el movimiento total del suelo; debido a que los registros sísmicos de aceleración nos proporcionan la aceleración horizontal máxima del suelo en cada componente, o sea en las direcciones NS y EO, es necesario establecer una combinación de estos valores para poder representar la aceleración horizontal total del movimiento y así poder visualizar los factores de amplificación de aceleración máxima para el movimiento total de cada evento.

Se proponen tres formas de representar el movimiento total del suelo por medio de un único valor de aceleración horizontal: aceleración total máxima promedio (ATMaxP), aceleración total máxima (ATMax) y la aceleración total máxima en el tiempo (ATMaxT).

La aceleración total máxima promedio se define como la raíz cuadrada de la semisuma de los cuadrados de las aceleraciones horizontales máximas de cada dirección, esto es:

$$ATMaxP = \sqrt{\frac{A_{maxEO}^2 + A_{maxNS}^2}{2}}$$

La aceleración total máxima se define como la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las aceleraciones horizontales máximas de cada dirección, o sea el valor absoluto de la suma vectorial de las componentes horizontales máximas, esto es:

$$ATMax = \sqrt{A_{maxEO}^2 + A_{maxNS}^2}$$

La aceleración total máxima en el tiempo se define como la mayor aceleración total en valor absoluto de las aceleraciones totales obtenidas para cada intervalo de tiempo. Como un ejemplo, si se observa la figura 4.11, en la que se muestra dos registros de aceleración, se llama aceleración total en el tiempo (ATt) al valor absoluto de la suma vectorial de las amplitudes de estas señales para cada intervalo de tiempo "t".

$$ATt = \sqrt{A_{ceEO}^2 + A_{ceNS}^2}$$

Al mayor valor de estas aceleraciones se le llama aceleración total máxima en el tiempo (ATMaxT) y representa la mayor aceleración horizontal máxima total que se presentó durante el tiempo que duró el movimiento del suelo.

$$ATMaxT = Max(ATt)$$

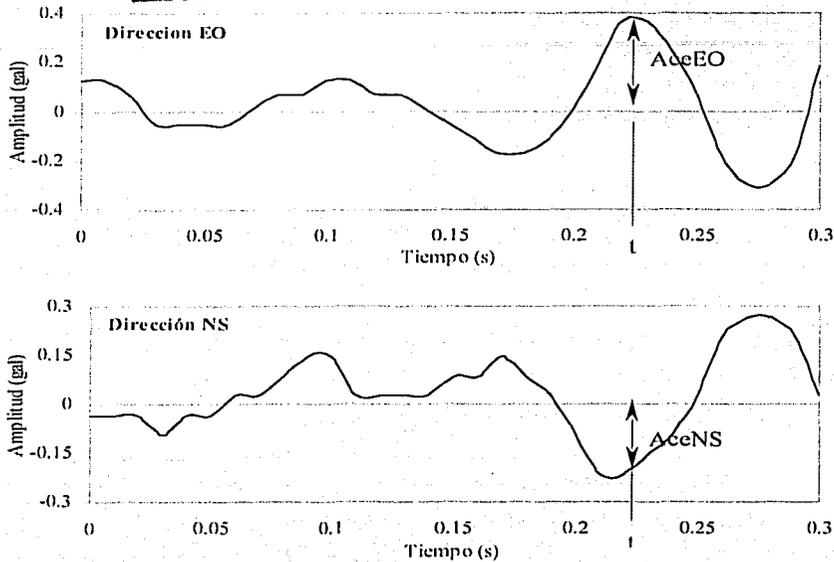


Figura 5.11: Registros de Aceleración, componentes EO y NS

Se aplican las definiciones mencionadas de aceleración para los 33 sismos registrados en las tres estaciones simultáneas; la tabla 5.4 presenta los valores obtenidos.

En la figura 5.12 se grafican los valores de las aceleraciones horizontales totales máximas obtenidas para cada sismo y en cada estación. se puede observar que los valores de la aceleración total máxima promedio son los más bajos, los de la aceleración total máxima son los valores mayores y los de la aceleración total máxima en el tiempo muestran un valor intermedio. De estas tres formas, la aceleración total máxima en el tiempo es la que representa en forma real la aceleración máxima total del movimiento ya que está relacionada directamente con el movimiento sísmico del suelo a través del tiempo, determinando el valor de la aceleración máxima en el tiempo "t". Las aceleraciones total máximo promedio y total máximo están en función de las aceleraciones máximas registradas en cada dirección, las cuales no necesariamente ocurren para un mismo tiempo "t" durante el movimiento, estos valores no representan adecuadamente el valor de la aceleración máxima horizontal, ya que la total máxima promedio subestima el valor real y la total máxima lo sobreestima tal como se ve en la figura 5.12. Por lo tanto se utilizará en adelante la aceleración total máxima en el tiempo (abreviada como aceleración total máxima o aceleración máxima) como la aceleración horizontal total máxima del movimiento sísmico de cada evento.

Tabla 5.4: Valores de aceleraciones totales máximas calculadas para 33 sismos en las estaciones Diana, La Venta y Diana Pozo

Nº	SISMO	DIANA POZO					LA VENTA					DIANA				
		AmaxEO	AmaxN	ATMaxP	ATMax	ATMaxI	AmaxEO	AmaxN	ATMaxP	ATMax	ATMaxI	AmaxEO	AmaxN	ATMaxP	ATMax	ATMaxI
1	28/01/98-1	1.6	1.1	1.4	2.0	1.7	3.2	2.3	2.8	4.0	3.7	10.7	11.7	11.2	15.9	11.8
2	07/09/98	1.6	1.6	1.6	2.3	1.8	6.7	5.5	6.1	8.7	8.4	8.5	12.7	10.8	15.2	12.9
3	13/03/96	2.2	2.7	2.5	3.5	2.8	2.6	3.3	3.0	4.2	3.3	14.9	13.4	14.2	20.0	15.9
4	14/10/97	1.5	1.5	1.5	2.1	1.8	2.6	3.8	3.3	4.6	3.8	13.9	10.9	12.5	17.6	16.7
5	27/10/99	3.4	1.9	2.8	3.9	3.7	5.1	11.5	8.9	12.6	11.5	16.9	12.3	14.8	20.9	17.3
6	14/08/97	2.1	1.8	2.0	2.8	2.1	1.8	2.7	2.3	3.3	3.2	17.1	12.9	15.1	21.4	17.5
7	25/08/97	4.3	3.6	3.9	5.5	5.1	4.2	3.0	3.6	5.1	4.7	10.9	17.5	14.5	20.6	17.5
8	16/08/99	1.8	2.5	2.1	3.0	2.5	3.4	6.6	5.2	7.4	6.7	18.8	13.8	16.5	23.3	18.8
9	11/07/97	3.2	3.1	3.1	4.4	3.3	5.4	5.1	5.3	7.4	7.4	17.8	18.3	18.1	25.6	19.9
10	08/06/96	1.7	2.5	2.1	3.0	2.7	2.4	3.2	2.8	4.0	3.3	20.0	15.4	17.9	25.3	20.0
11	11/01/97	2.1	2.1	2.1	3.0	2.5	2.5	2.2	2.3	3.3	2.6	16.5	20.0	18.3	25.9	20.7
12	01/01/96	3.1	3.1	3.1	4.4	3.9	2.5	4.0	3.3	4.7	4.0	18.1	17.3	17.7	25.0	21.5
13	12/07/98	4.1	2.9	3.5	5.0	4.2	3.6	3.6	3.6	5.0	4.1	24.3	20.2	22.4	31.6	24.6
14	11/06/96	2.9	3.2	3.1	4.3	3.3	13.3	14.4	13.8	19.6	15.1	11.7	22.5	18.0	25.4	24.7
15	09/12/95	3.1	6.2	4.9	6.9	6.3	10.5	6.5	8.7	12.4	11.6	17.7	22.6	20.3	28.7	26.3
16	15/06/99	4.5	5.1	4.8	6.8	5.4	5.6	6.6	6.1	8.6	7.5	22.5	24.5	23.5	33.2	28.6
17	09/08/98	2.6	3.1	2.9	4.1	3.2	1.9	3.6	2.8	4.0	3.7	29.4	23.1	26.4	37.4	29.4
18	19/07/97	3.3	3.5	3.4	4.8	4.2	3.9	4.4	4.2	5.9	4.5	26.6	33.1	30.0	42.5	33.6
19	08/04/99	5.4	3.7	4.6	6.6	6.3	3.7	5.3	4.5	6.4	5.7	25.2	34.5	30.2	42.7	36.4
20	22/03/97-1	6.5	5.5	6.0	8.5	6.6	11.2	15.9	13.7	19.4	16.7	35.5	29.9	32.8	46.4	41.2
21	02/03/99	6.5	5.1	5.8	8.2	6.5	13.9	14.0	13.9	19.7	15.8	40.5	28.8	35.2	49.7	42.4
22	21/10/97	4.2	6.0	5.2	7.3	6.2	3.5	3.7	3.6	5.1	3.9	31.7	38.9	35.5	50.2	42.6
23	22/03/97-2	3.3	2.9	3.1	4.4	3.4	3.2	1.8	2.6	3.6	3.2	37.7	25.2	32.0	45.3	44.7
24	30/09/99	7.4	6.2	6.8	9.6	8.9	7.6	7.7	7.7	10.8	8.1	45.8	39.3	42.7	60.4	51.7
25	06/04/99	7.3	6.5	6.9	9.7	9.7	5.0	8.4	6.9	9.7	8.8	47.8	41.9	44.9	63.5	53.0
26	15/05/95	11.1	12.3	11.7	16.6	12.7	11.1	9.2	10.2	14.4	13.3	49.9	47.6	48.8	69.0	55.1
27	08/05/97	8.9	6.2	7.7	10.8	10.2	5.9	5.7	5.8	8.2	6.4	46.8	53.2	50.1	70.9	55.5
28	12/07/95	4.1	7.3	5.9	8.4	8.2	6.1	6.6	6.3	9.0	8.1	45.8	41.2	43.5	61.6	58.0
29	27/08/97	16.3	15.2	15.7	22.3	20.4	29.6	58.7	46.5	65.7	65.2	59.0	74.4	67.1	94.9	91.1
30	29/10/94	15.4	15.4	15.4	21.8	16.2	38.5	26.7	33.1	46.8	40.7	97.5	92.9	95.2	134.7	131.5
31	17/07/98	28.0	19.4	24.1	34.1	29.5	17.1	17.7	17.4	24.6	22.3	130.3	108.8	120.0	169.7	137.1
32	01/06/98	14.4	20.1	17.5	24.7	24.0	10.4	18.2	14.8	21.0	20.8	171.8	143.1	158.1	223.6	172.0
33	08/10/01	41.1	37.0	39.1	55.2	42.6	26.6	38.6	33.1	46.9	43.3	221.1	334.5	283.5	401.0	337.0

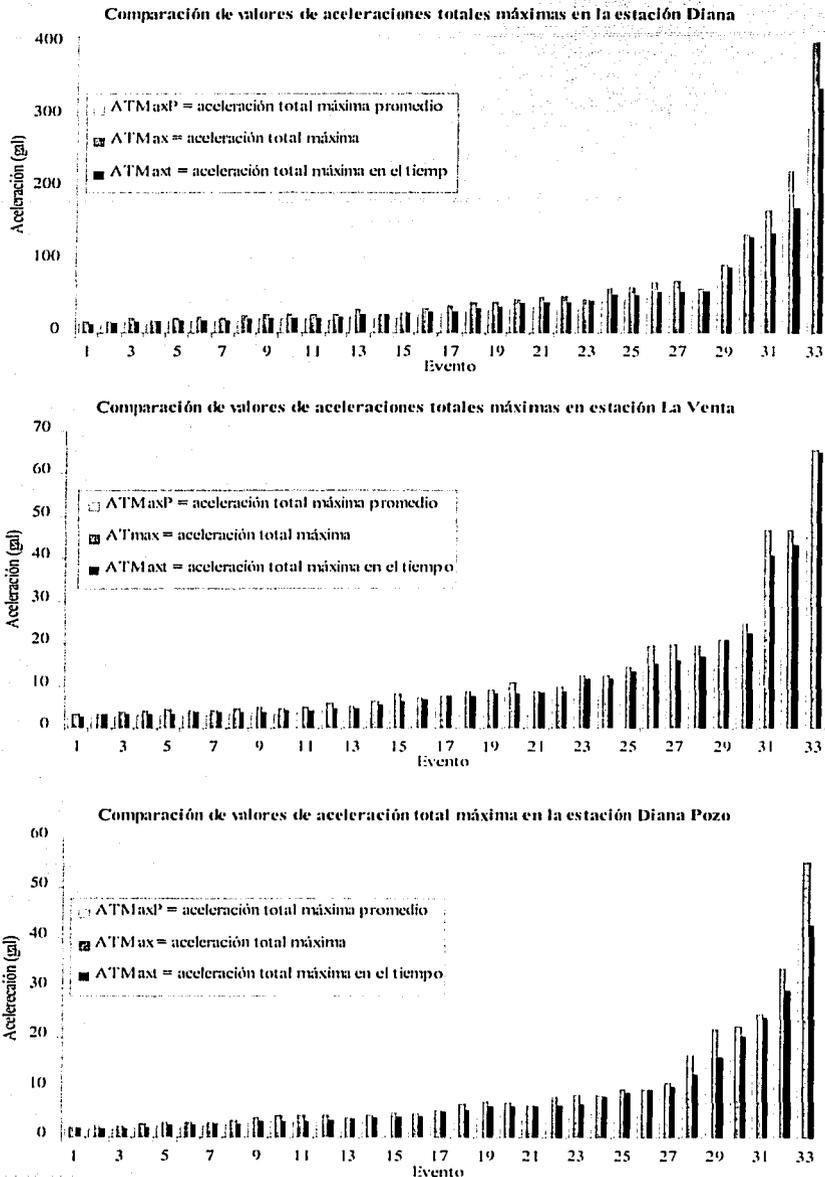


Figura 5.12

La tabla 5.5 muestra los valores de aceleración horizontal total máxima de cada evento en cada estación; también presenta los valores de los factores de amplificación de aceleración máxima para los pares de estaciones Diana/Diana Pozo y Diana/La Venta.

Tabla 5.5: Valores de aceleraciones totales máximas de cada evento y factores de amplificación de aceleración máxima

N°	SISMO	DIANA POZO	LA VENTA	DIANA	DIANA/ DIANA POZO	DIANA/ LA VENTA
		ATMaxt	ATMaxt	ATMaxt		
1	28/01/98-1	1.7	3.7	11.8	7.0	3.2
2	07/09/98	1.8	8.4	12.9	7.2	1.5
3	13/03/96	2.8	3.3	15.9	5.7	4.8
4	14/10/97	1.8	3.8	16.7	9.3	4.3
5	27/10/99	3.7	11.5	17.3	4.7	1.5
6	14/08/97	2.1	3.2	17.5	8.3	5.5
7	25/08/97	5.1	4.7	17.5	3.4	3.7
8	16/08/99	2.5	6.7	18.8	7.5	2.8
9	11/07/97	3.3	7.4	19.9	6.0	2.7
10	08/06/96	2.7	3.3	20.0	7.4	6.1
11	11/01/97	2.5	2.6	20.7	8.3	8.0
12	01/01/96	3.9	4.0	21.5	5.5	5.4
13	12/07/98	4.2	4.1	24.6	5.9	6.0
14	11/06/96	3.3	15.1	24.7	7.5	1.6
15	09/12/95	6.3	11.6	26.3	4.2	2.3
16	15/06/99	5.4	7.5	28.6	5.3	3.8
17	09/08/98	3.2	3.7	29.4	9.2	8.0
18	19/07/97	4.2	4.5	33.6	8.0	7.4
19	08/04/99	6.3	5.7	36.4	5.8	6.4
20	22/03/97-1	6.6	16.7	41.2	6.2	2.5
21	02/03/99	6.5	15.8	42.4	6.5	2.7
22	21/10/97	6.2	3.9	42.6	6.9	11.0
23	22/03/97-2	3.4	3.2	44.7	13.1	13.9
24	30/09/99	8.9	8.1	51.7	5.8	6.4
25	06/04/99	9.7	8.8	53.0	5.5	6.0
26	15/05/95	12.7	13.3	55.1	4.3	4.2
27	08/05/97	10.2	6.4	55.5	5.4	8.6
28	12/07/95	8.2	8.1	58.0	7.1	7.2
29	27/08/97	20.4	65.2	91.1	4.5	1.4
30	29/10/94	16.2	40.7	131.5	8.1	3.2
31	17/07/98	29.5	22.3	137.1	4.6	6.1
32	01/06/98	24.0	20.8	172.0	7.2	8.3
33	08/10/01	42.6	43.3	337.0	7.9	7.8

La figura 5.13 muestra las gráficas que relacionan las aceleraciones horizontales totales máximas entre las estaciones Diana - La Venta y Diana - Diana Pozo, se propone una relación logarítmica para ambos casos. Para el sismo 27/08/97, donde la aceleración total máxima en Diana es de 91.1 gal, las aceleraciones en roca son muy diferentes siendo de 65.2 gal en La Venta y de 20.4 gal en Diana Pozo, caso contrario ocurre para el evento 08/10/01 donde la aceleración en Diana es de 337 gal pero en Diana Pozo y La Venta los valores son muy parecidos siendo de 42.6 gal y 43.3 gal respectivamente.

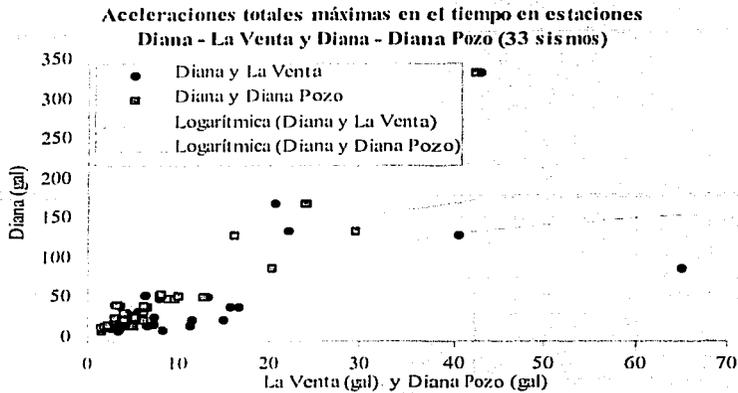


Figura 5.13

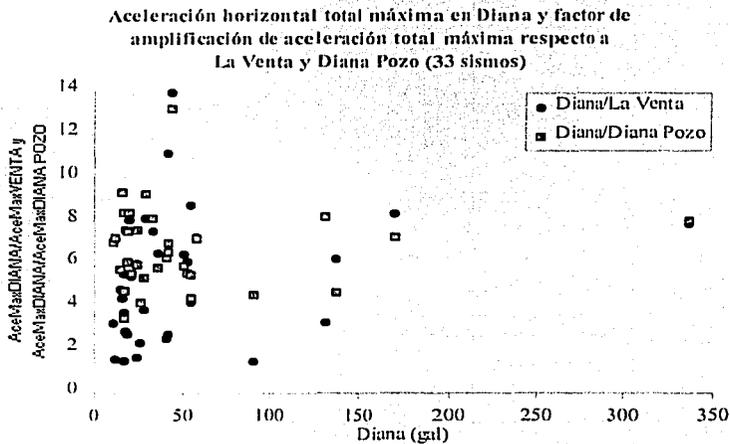


Figura 5.14

Observando los factores de amplificación de aceleración máxima (figura 5.14), hay más eventos en los que este factor es mayor en Diana/Diana Pozo que en Diana/La Venta; esto concuerda con lo observado en el capítulo anterior con los cocientes espectrales de Diana/Diana Pozo que en la mayoría de los casos tiene mayores ordenadas espectrales, sobre todo en alta frecuencia, que los de Diana/La Venta.

La figura 5.14 también indica que los factores de amplificación de aceleración alcanzan valores mayores hasta antes de los 50 gal en la estación Diana; para aceleraciones mayores a los 50 gal, el factor de amplificación no sobrepasa, sea para Diana/Diana Pozo o Diana/La Venta el valor de 8 veces.

En el capítulo anterior se concluyó que por las características de los efectos de sitio encontrados, podemos clasificar en cuatro zonas la distribución de los sismos respecto a la estación Diana, siendo una zona la integrada por las regiones 2, 3, 4 y 5; y las otras 3 zonas las regiones 6, 7 y 8 respectivamente. La figura 5.14 presenta los factores de amplificación de aceleración de los 33 sismos, la cual proporciona una idea general del comportamiento de estos sismos alrededor de la estación Diana. A continuación, se realizará el análisis de estos factores de amplificación de aceleración pero considerando las regiones ya establecidas anteriormente, de manera de ser consecuente con lo observado en el capítulo anterior con base en los efectos de sitio encontrados para cada región.

5.2 SISMOS REGISTRADOS EN LAS ESTACIONES DIANA, DIANA POZO Y LA VENTA

La tabla 5.6 muestra por regiones los valores de las aceleraciones horizontales totales máximas de cada evento en cada estación así como el correspondiente factor de amplificación de aceleración máxima y las respectivas amplificaciones relativas máximas de los cocientes espectrales en cada dirección.

En las figuras 5.15 al 5.17 se presentan por regiones en las abscisas el valor de la aceleración horizontal total máxima de cada evento en la estación Diana y en las ordenadas los correspondientes valores del factor de amplificación de aceleración máxima respecto a Diana Pozo y La Venta; también en las ordenadas se incluye el valor de las amplificaciones relativas máximas obtenidas de los cocientes espectrales de Diana/Diana Pozo y Diana/La Venta.

Esta disposición de los valores mencionados en estas gráficas nos permite relacionar, para los diferentes eventos de cada región, los factores de amplificación de aceleración máxima y de amplificaciones relativas máximas respecto a las estaciones Diana Pozo y La Venta con la aceleración horizontal total máxima en la estación Diana. Se esperaría que a medida que aumenta la aceleración en Diana, los factores de amplificación de aceleración y amplificaciones relativas máximas se mantengan constante, lo que estaría indicando un comportamiento lineal en la respuesta del suelo de la estación Diana respecto a la roca de las estaciones Diana Pozo y La Venta. Lo contrario, o sea que estos factores disminuyan, indicaría que se estaría presentando un comportamiento no lineal en la respuesta del suelo a medida que aumenta la aceleración máxima en la estación Diana, lo cual puede comprobarse superponiendo los cocientes espectrales de los posibles eventos no lineales con los eventos que presentaron un comportamiento lineal, el cociente espectral del evento no lineal tendría que presentar un valor menor en su amplificación relativa máxima y el desplazamiento de este valor hacia bajas frecuencias con respecto al cociente del evento o eventos lineales.

TABLA 5.6: Factor de amplificación de aceleración total máxima y amplificación relativa máxima por regiones (33 sismos)

REGIÓN	SISMO	ACELERACIONES TOTALES MÁXIMAS					AMPLIFICACIONES RELATIVAS MÁXIMAS			
		DIANA	LA VENTA	DIANA POZO	DIANA/ LA VENTA	DIANA/ DIANA POZO	DIANA/LA VENTA		DIANA/DIANA POZO	
							NS	EO	NS	EO
1	22/03/97-1	41.2	16.7	6.6	2.5	6.2	51.0	19.8	37.3	30.8
2	09/12/95	26.3	11.6	6.3	2.3	4.2	42.2	11.6	30.2	39.2
	01/01/96	21.5	4.0	3.9	5.4	5.5	17.5	22.7	32.1	33.6
	02/03/99	42.4	15.9	6.5	2.7	6.5	11.4	14.6	34.2	23.2
	15/06/99	28.6	7.5	5.4	3.8	5.3	12.6	13.1	21.7	32.2
	27/10/99	17.3	11.5	3.7	1.5	4.7	11.4	15.6	30.7	38.1
3	13/03/96	15.9	3.3	2.8	4.8	5.7	29.8	14.3	26.9	34.7
	11/07/97	19.9	7.4	3.3	2.7	6.0	10.9	11.1	25.6	31.6
	14/10/97	16.7	3.9	1.8	4.3	9.3	18.8	14.9	23.7	38.0
	07/09/98	12.9	8.4	1.8	1.5	7.2	27.9	12.4	36.0	28.4
	30/09/99	51.7	8.1	8.9	6.4	5.8	23.4	18.8	25.9	44.0
4	08/06/96	20.0	3.3	2.7	6.1	7.4	32.4	79.7	27.2	39.4
	25/08/97	17.5	4.7	5.1	3.7	3.4	47.5	14.0	34.2	41.2
	21/10/97	42.6	3.9	6.2	11.0	6.9	58.8	55.3	39.8	89.7
5	15/05/95	55.1	13.3	12.7	4.1	4.3	32.7	20.4	35.0	19.0
	11/06/96	24.7	15.1	3.3	1.6	7.5	14.4	7.9	27.9	29.5
	22/03/97-2	44.7	3.2	3.4	13.9	13.1	88.4	117.3	45.5	75.9
	27/08/97	91.1	65.2	20.4	1.4	4.5	14.4	11.1	23.5	24.4
	28/01/98-1	11.8	3.7	1.7	3.2	6.9	28.9	9.8	45.2	18.8
6	14/08/97	17.5	3.2	2.1	5.5	8.3	20.3	10.9	49.9	42.2
	01/06/98	172.0	20.8	24.0	8.3	7.2	33.3	32.1	37.9	19.9
	12/07/98	24.6	4.1	4.2	6.0	5.9	23.9	37.3	23.7	30.7
7	11/01/97	20.7	2.6	2.5	8.0	8.3	13.0	15.7	26.8	27.3
	08/05/97	55.5	6.4	10.2	8.6	5.4	18.6	19.9	32.2	20.7
	19/07/97	33.6	4.5	4.2	7.4	8.0	29.5	14.2	32.2	30.8
	17/07/98	137.1	22.3	29.5	6.1	4.6	31.4	21.0	19.4	23.4
	09/08/98	29.4	3.7	3.2	8.0	9.2	24.4	32.1	29.0	23.8
	06/04/99	53.0	8.8	9.7	6.0	5.5	41.8	20.2	29.1	36.0
	08/04/99	36.4	5.7	6.3	6.4	5.8	14.9	19.1	18.6	55.2
	08/10/01	337.0	43.3	42.6	7.8	7.9	13.3	22.2	21.4	20.2
8	29/10/94	131.5	40.7	16.2	3.2	8.1	18.4	27.6	22.7	19.7
	12/07/95	58.0	8.1	8.2	7.2	7.1	38.5	107.7	39.8	26.3
	16/08/99	18.8	6.7	2.5	2.8	7.5	24.1	13.7	19.7	39.5

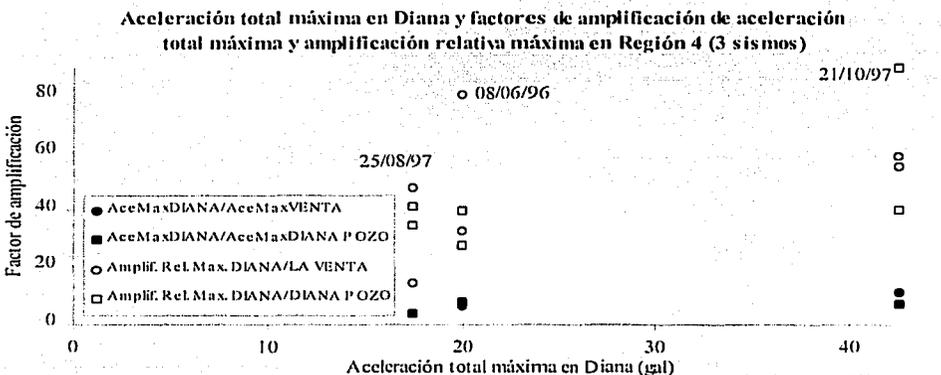
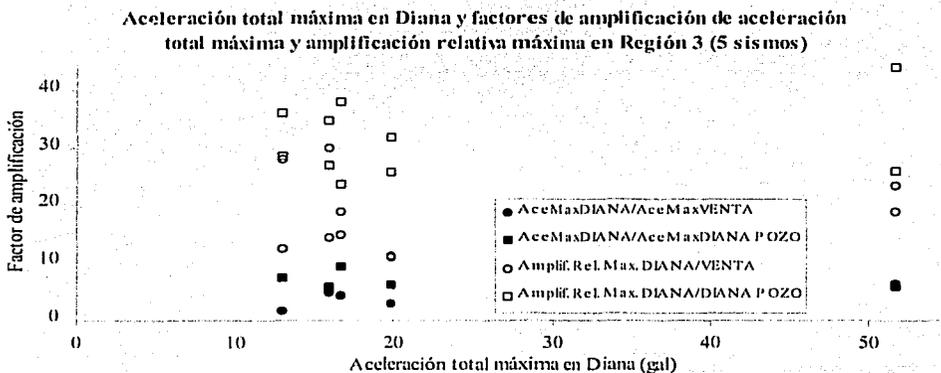
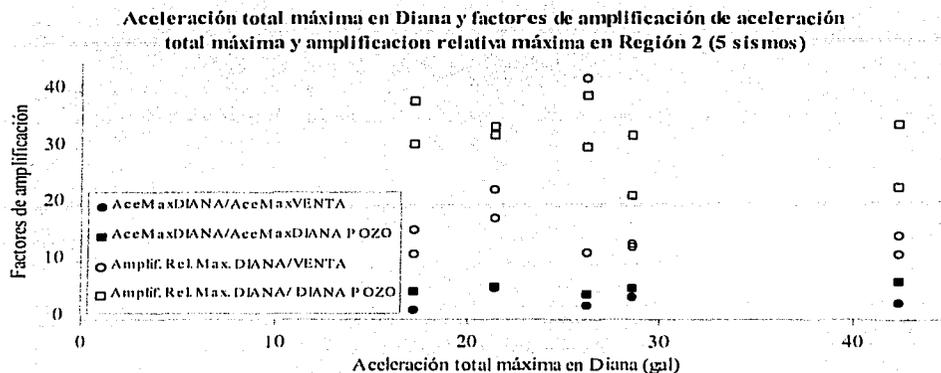
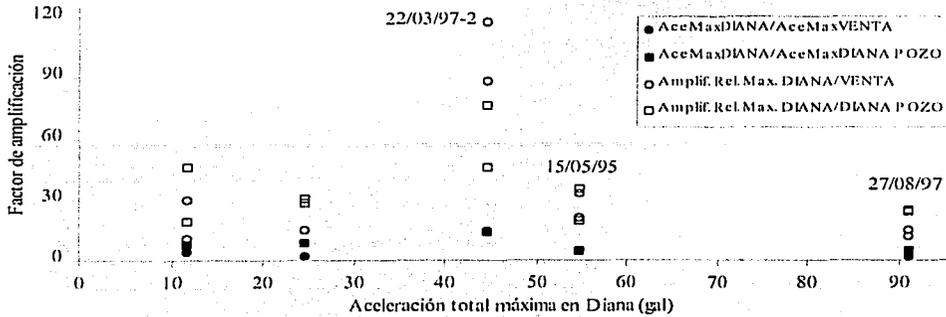


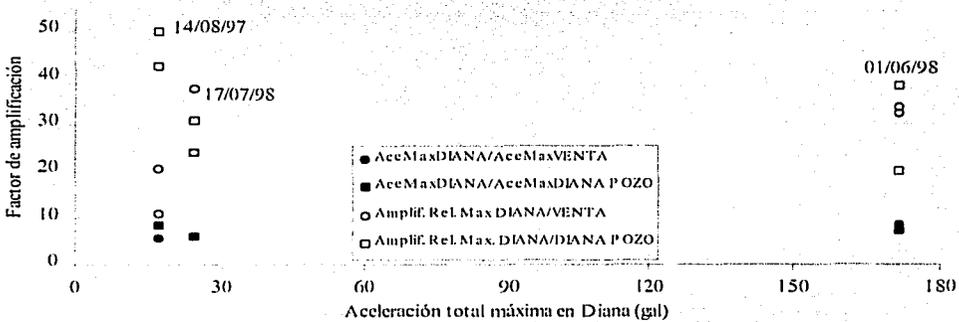
Figura 5.15

TESIS CON
FALLA DE COPIA

Acceleración total máxima y factores de amplificación de aceleración total máxima y amplificación relativa máxima en Región 5 (5 sismos)



Acceleración total máxima y factores de amplificación de aceleración total máxima y amplificación relativa máxima en Región 6 (3 sismos)



Acceleración total máxima en Diana y factores de amplificación de aceleración total máxima y amplificación relativa máxima en Región 7 (8 sismos)

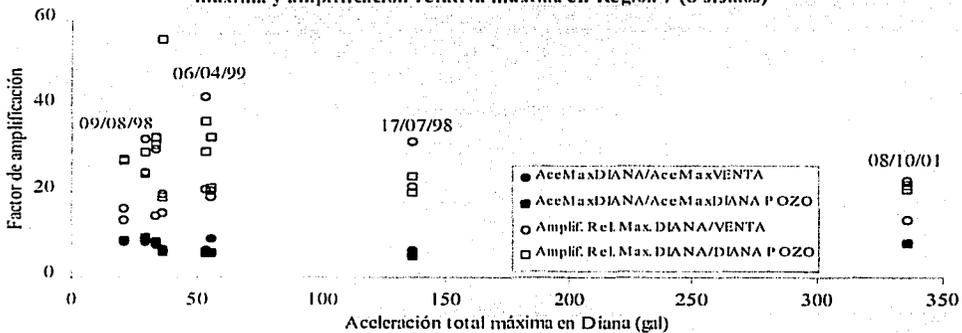


Figura 5.16

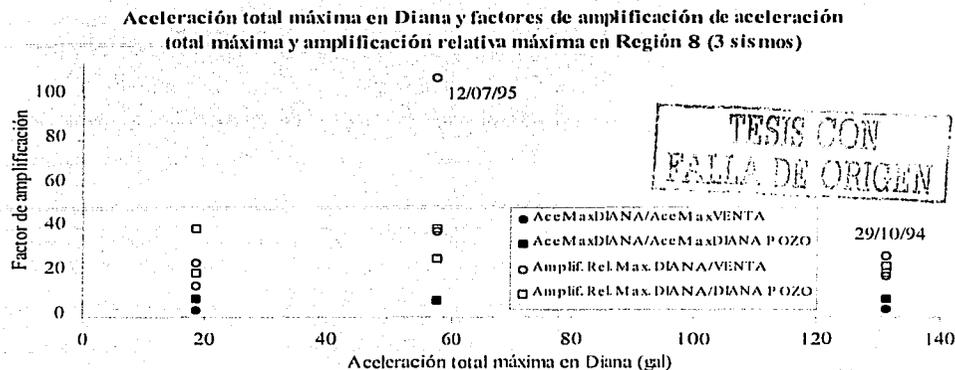


Figura 5.17

Utilizando estos criterios, a continuación se va proceder a identificar en cada región los eventos que presenten valores menores de los dos factores de amplificación para mayores aceleraciones máximas en la estación Diana, superponiendo luego los cocientes espectrales de tales eventos con aquellos que presenten valores mayores de los dos factores de amplificación que correspondan a menores aceleraciones máximas en Diana. Si un evento presenta estos indicios de no linealidad, esto deberá verificarse para los cocientes espectrales de ambos pares de estaciones, aunque se debe tener presente que por lo observado en el capítulo anterior, los cocientes espectrales respecto a La Venta presentan menores ordenadas espectrales y una dispersión grande en los valores de la frecuencia predominante en la mayoría de las regiones, por lo que se tendrá presente esta característica al momento de analizar los resultados.

5.2.1 SUPERPOSICIÓN DE COCIENTES ESPECTRALES POR EVENTO

5.2.1.1 Regiones 2, 3 y 4

Estas regiones presentan factores de amplificación en forma algo constante o creciente a medida que aumenta el valor de la aceleración en Diana (figura 5.15); la mayor aceleración que alcanza un evento en estas regiones es de 52 gal (región 3) que es justo el límite donde se observó el cambio de los valores de los factores de amplificación (figura 5.14) dividiendo a los eventos en lineales y posiblemente no lineales. Por ello no se identifica en estas regiones algún evento como posiblemente no lineal.

Se debe observar que los factores de amplificación relativa respecto a la estación Diana Pozo son en su mayoría mayores respecto de La Venta; esto concuerda con lo visto en el capítulo anterior donde, debido al efecto de superficie libre y baja impedancia, los espectros de amplitudes de Fourier en la estación La Venta presentan mayores ordenadas espectrales en comparación con los de la estación Diana Pozo, lo que provoca que al hacer los cocientes espectrales, la respuesta en la estación Diana sea mayor con respecto a Diana Pozo que con La Venta. Los sismos de las regiones 2 y 3 tienen en su mayoría esta característica; en la región 4 (parte inferior de la figura 5.15), los sismos 21/10/97 y 25/08/97 presentan en la dirección EO el factor de amplificación relativa máxima mayor respecto a Diana Pozo y en la NS mayor respecto a La Venta y el sismo 08/06/96 tiene en ambas direcciones este factor mayor respecto a La Venta.

5.2.1.2 Región 5

En la figura 5.16 (parte superior), los factores de amplificación con mayor valor corresponden al evento del 22/03/97-2 con aceleración máxima de 44.7 gal, los eventos con aceleración máxima mayor a 50 gal presentan factores de amplificación decrecientes, éstos son 15/05/95 y 27/08/97. De esta observación se identifica a los eventos con aceleración en Diana menor a 50 gal con comportamiento lineal y los que tienen aceleración mayor a 50 gal con posible comportamiento no lineal.

En la figura 5.18, la columna de la izquierda muestra las gráficas con la superposición de los cocientes espectrales de los eventos considerados lineales, la columna intermedia y de la derecha presentan la superposición de los cocientes espectrales de los eventos considerados lineal y no lineal.

De la superposición de los cocientes espectrales de los eventos lineales, es notorio que el evento del 22/03/97-2 ($M_b=4.1$) con aceleración máxima de 44.7 gal en la estación Diana, presenta las mayores amplificaciones relativas máximas en ambas direcciones y en ambos pares de estaciones; sus frecuencias predominantes son similares al resto de eventos en Diana/Diana Pozo, pero en Diana/La Venta no se presenta esta característica. Debido a sus mayores valores de amplificación se considera este evento como el de mayor comportamiento lineal; por ello se superponen sus cocientes espectrales con los eventos 15/05/95 y 27/08/97 que presentan posible comportamiento no lineal.

La figura 5.18 (parte intermedia) presenta la superposición del evento 15/05/95 ($M_c=4.6$ y aceleración máxima de 55.1 gal en la estación Diana) con el 22/03/97-2, para el par de estaciones Diana/Diana Pozo se observa en la dirección EO una reducción notable de la amplitud máxima respecto al

22/03/97-2 y esta amplitud se desplaza hacia una frecuencia menor, pero esta reducción de la amplitud sólo se mantiene hasta los 9 Hz a partir del cual las amplitudes de ambos eventos son similares; en la dirección NS se produce una significativa reducción de la amplitud máxima pero sin que ésta se desplace hacia la izquierda, todo lo contrario se desplaza hacia la derecha, lo que origina que hacia altas frecuencias las amplitudes no sean menores que las del 22/03/97-2. Para Diana/La Venta ocurre algo similar, en la dirección EO se produce una notable disminución en la amplitud máxima y un corrimiento de éstas hacia la izquierda, sin embargo en la alta frecuencia sus amplitudes son mayores o menores al 22/03/97-2 para ciertos intervalos; en la NS ocurre lo mismo que en Diana/Diana Pozo. De esta comparación se concluye que este evento posiblemente presentó un comportamiento no lineal.

El evento 27/08/97 ($M_b=5.0$) con aceleración máxima de 91.1 gal en Diana presenta para Diana/Diana Pozo en la dirección NS una disminución en sus amplificaciones relativas sólo en el intervalo de frecuencia de 4.2 a 5.3 Hz (donde se presenta el mayor pico espectral del 22/03/97-2) ya que para frecuencias altas sus amplificaciones son mayores incluyendo su mayor pico espectral; en la dirección EO su mayor amplificación relativa es menor en los intervalos de frecuencia de 3.5 a 5.4 Hz (donde se encuentra el mayor pico espectral del 22/03/97-2) y de 5.7 a 8.5 Hz; no se observa un corrimiento de su frecuencia fundamental en ambas direcciones. La superposición de los cocientes espectrales para Diana/La Venta en ambas direcciones presenta la forma que se esperaría para identificar un comportamiento no lineal, ya que existe una clara disminución de la amplitud máxima y ésta se mantiene a través de la alta frecuencia, además de presentar la disminución de su frecuencia fundamental.

Esta diferencia de los cocientes espectrales en ambos pares de estaciones se debe a que para el sismo del 22/03/97-2, el espectro de amplitudes de Fourier en La Venta tiene menores ordenadas espectrales que Diana Pozo (ver figura 4.21, capítulo 4) lo que ocasiona que los factores de amplificación relativa máxima en ambas direcciones sean mayor con respecto a La Venta que a Diana Pozo, en esta región este sismo es el único que presenta esta característica, los demás presentan lo observado en las regiones 2, 3 y 4 (parte superior, figura 5.16). Se puede interpretar que estos factores respecto a La Venta, para este sismo en particular, están sobrestimados de allí el resultado de la superposición entre estos sismos. Sin embargo esta sobrestimación no resta las características lineales de sus cocientes espectrales, por que aún si sus amplitudes fueran algo menores, al superponerlos con los cocientes del 27/08/97 se presentaría algo similar a lo observado en la superposición de los cocientes 22/03/97-2 y 15/05/95 en la dirección EO. De acuerdo a estos resultados este sismo del 27/08/97 presentó un posible comportamiento no lineal.

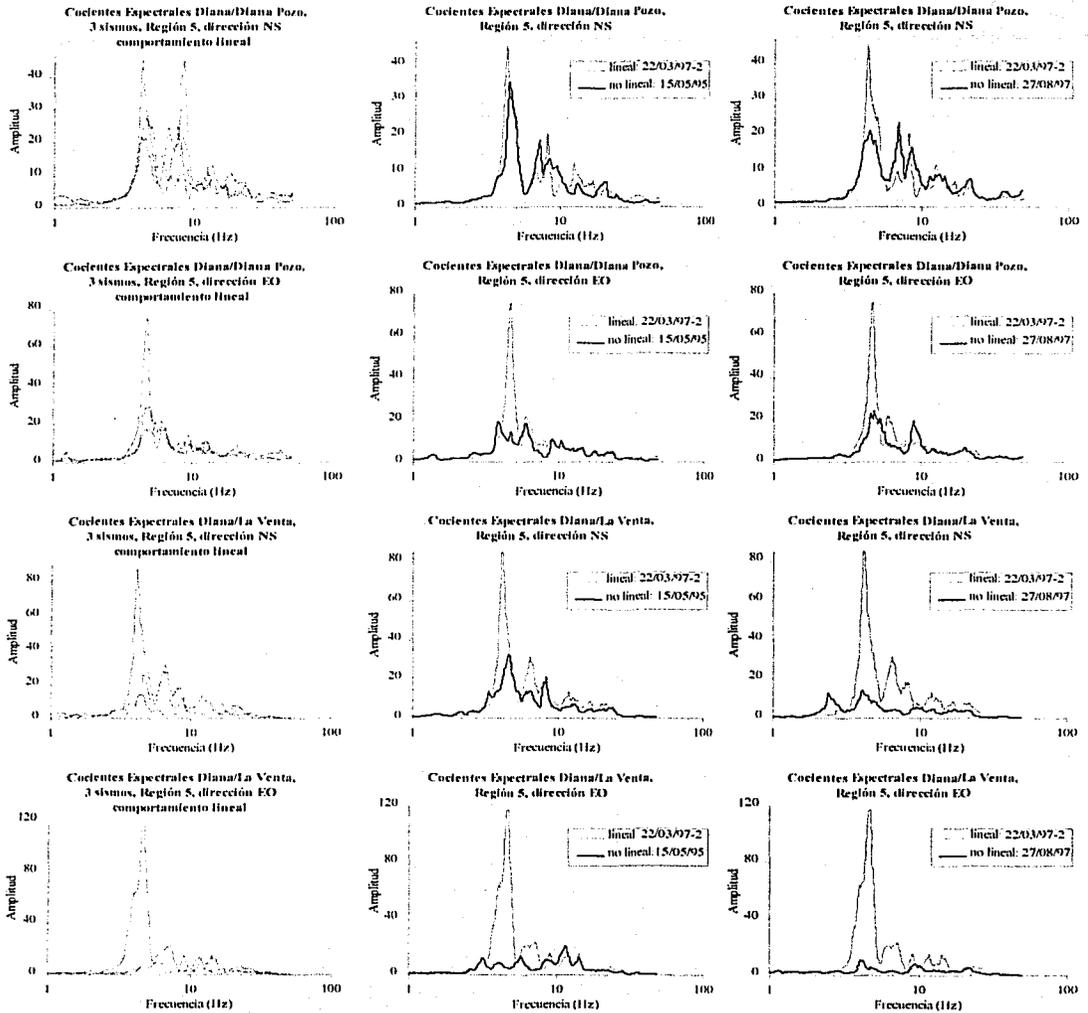


Figura 5.18

5.2.1.3 Región 6

Esta región presenta tres sismos registrados simultáneamente en las tres estaciones, dos de ellos presentan aceleraciones totales máximas menores a 30 gal en Diana, el otro tiene una aceleración cercana

a 180 gal (parte intermedia, figura 5.16); al observar sus factores de amplificación es notorio que el evento del 14/08/97 ($M_c=4.1$) con aceleración total máxima de 17.5 gal en Diana presenta los mayores factores, tanto de aceleración como de amplificación relativa, para el par de estaciones Diana/Diana Pozo; sin embargo para Diana/La Venta sucede lo contrario, es decir, los factores de amplificación son los menores respecto a los dos sismos restantes. El evento 01/06/98 ($M_b=4.5$) con aceleración máxima de 172 gal en Diana puede ser considerado con posible comportamiento no lineal si sólo se toma en cuenta los factores de amplificación respecto a Diana Pozo; si consideramos los factores de amplificación respecto a La Venta, el sismo 12/07/98 presenta sólo en la dirección EO el factor de amplificación mayor al del 01/06/98. A continuación sólo se realizará el análisis para Diana/Diana Pozo entre los eventos 14/08/97 y 01/06/98.

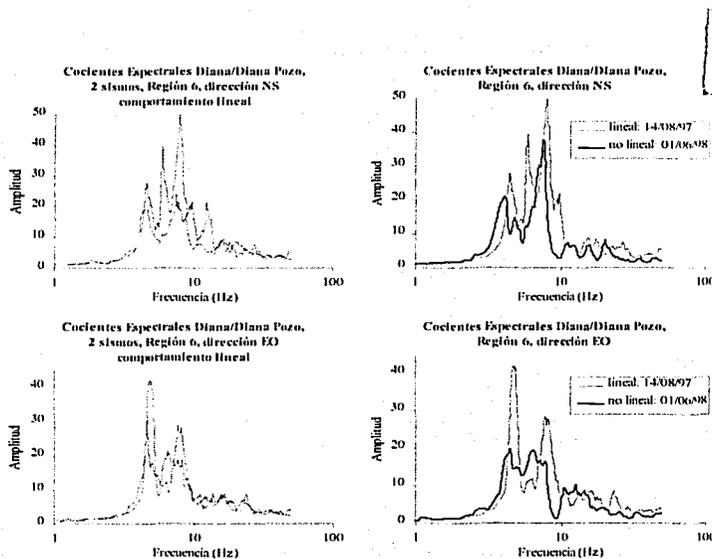


Figura 5.19

La figura 5.19 muestra la superposición de los cocientes espectrales de estos dos eventos (columna de la derecha). Se observa que los cocientes son semejantes en la forma lo que permite considerar el evento 01/06/98 con un posible comportamiento no lineal debido a que los picos espectrales, incluyendo el máximo, son menores con respecto a los del 14/08/97 y además presentan un desplazamiento hacia la izquierda, ocasionando que sus correspondientes ordenadas espectrales sean menores en comparación al 14/08/97 manteniéndose esta diferencia a través de la alta frecuencia, salvo un pequeño intervalo en la dirección EO.

5.2.1.4 Región 7

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

De la figura 5.16 (parte inferior), se observa que los eventos con aceleración menor a 100 gal presentan factores de amplificación mayores con respecto a los dos sismos con aceleraciones mayores a 100 gal. Tomando en cuenta esto, se va considerar los eventos 17/07/98 y 08/10/01 con posible comportamiento no lineal. Como no se tiene un evento que contenga los factores de amplificación respecto a Diana Pozo y La Venta mayores a los de estos sismos supuestos como no lineales, se va considerar el sismo 06/04/99 con comportamiento lineal para Diana/Diana Pozo, y los eventos 06/04/99 y 09/08/98 con comportamiento lineal para Diana/La Venta.

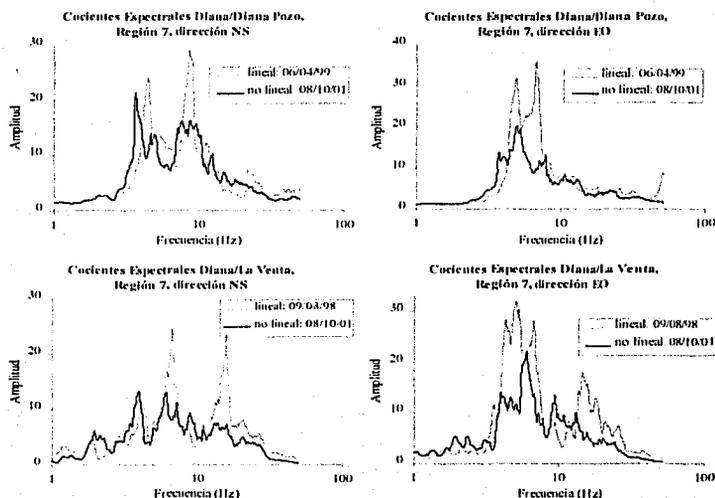


Figura 5.20

En la figura 5.20 (parte superior) se presenta la superposición de los cocientes espectrales de los eventos 08/10/01 ($M_s=5.4$) con aceleración máxima de 337 gal en Diana y 06/04/99 ($M_c=3.9$) con aceleración máxima de 53 gal en Diana para el par de estaciones Diana/Diana Pozo. En la dirección EO el evento 08/10/01 muestra una clara disminución de sus picos espectrales y el corrimiento de éstos hacia frecuencias bajas, de la misma manera en la dirección NS también se observa una disminución de los picos espectrales y el desplazamiento de éstos hacia frecuencias bajas. En ambas direcciones las amplitudes del 08/01/10 se mantienen menores al 06/04/99 a través de varios intervalos en la alta frecuencia.

Para Diana/La Venta se utiliza con comportamiento lineal al sismo 09/08/98 ($M_b=4.2$) que tiene una aceleración máxima de 29.4 gal en Diana. De la superposición se observa (parte inferior, figura 5.20) que en ambas direcciones se produce una importante reducción de los picos espectrales (incluyendo los máximos) y sus desplazamientos hacia frecuencias menores, manteniéndose esta diferencia de las amplitudes espectrales a través de la alta frecuencia. Se concluye que posiblemente el sismo 08/10/01 presentó un comportamiento del tipo no lineal.

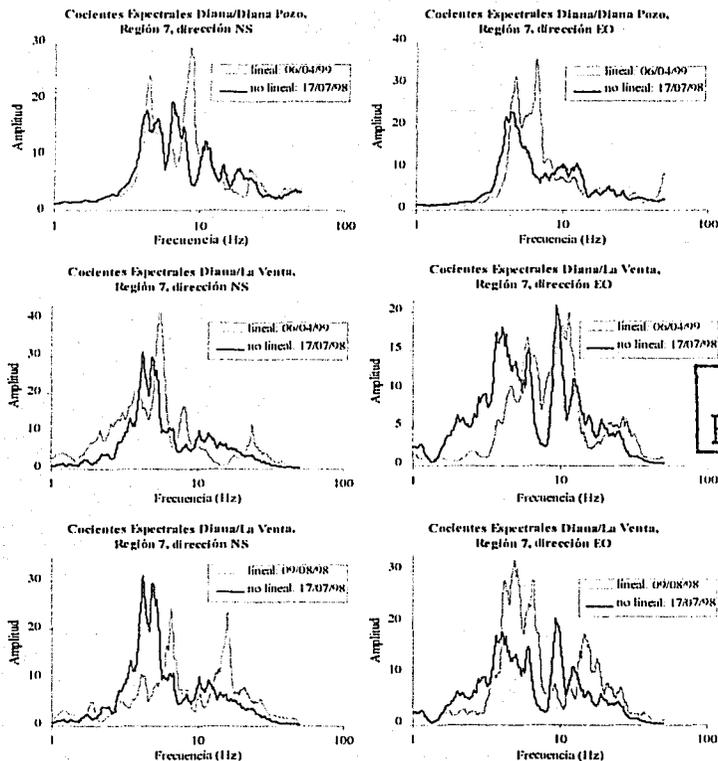


Figura 5.21

La figura 5.21 presenta las superposiciones con el evento 17/07/98 ($M_c=4.6$) que tiene una aceleración máxima de 137.1 gal en Diana. Analizando la superposición con el evento 06/04/99 para Diana/Diana Pozo (parte superior, figura 5.21) se observa que en ambas direcciones sus picos espectrales disminuyen y se desplazan hacia frecuencias mas bajas para la alta frecuencia; sin embargo a partir de los 10 Hz y a través de la alta frecuencia no se presenta esta disminución de las amplitudes.

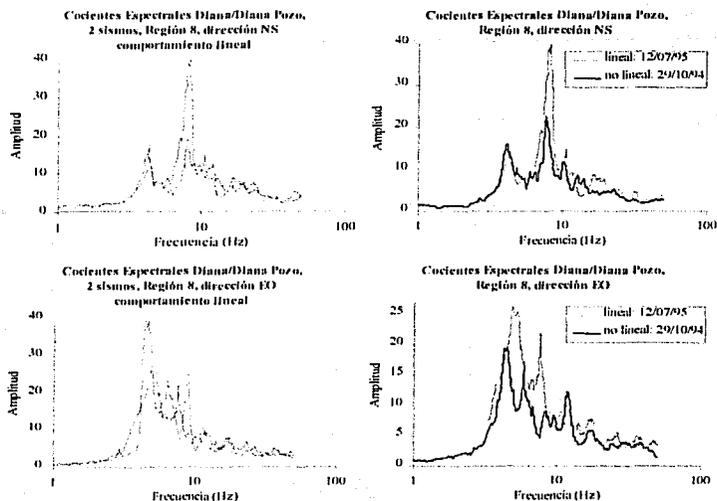


Figura 5.22

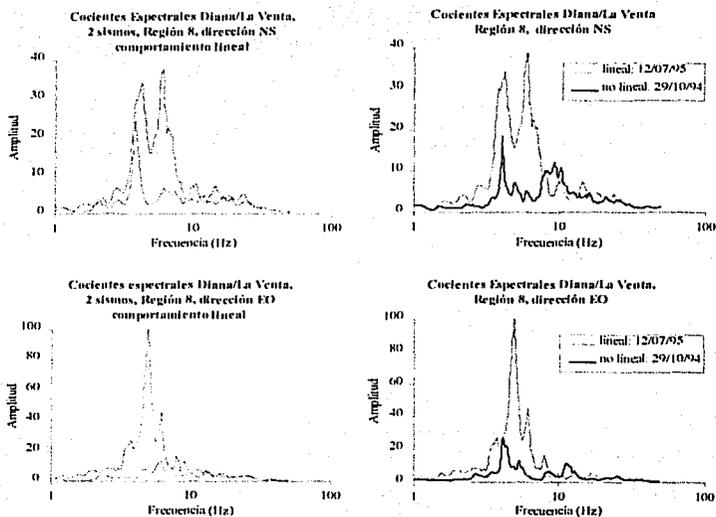


Figura 5.23

Para Diana/La Venta, la figura 5.21 (parte intermedia) muestra las superposiciones de los eventos 17/07/98 y 06/04/99; en la dirección NS el sismo 17/07/98 presenta una disminución de la amplificación relativa y de la frecuencia fundamental, pero en la dirección EO sus amplificaciones relativas son mayores a las del 06/04/99. Lo mismo sucede en la superposición de los eventos 17/07/98 y 09/08/98 (parte inferior, figura 5.21) pero en las direcciones contrarias. Se concluye que posiblemente este sismo de 17/07/98 presentó un posible comportamiento no lineal.

5.2.1.5 Región 8

La figura 5.17 presenta los factores de amplificación para esta región, de los tres sismos que se observan, el 12/07/95 ($M_c=4.0$) con aceleración total en Diana de 58 gal presenta los mayores factores de amplificación sobretodo respecto a La Venta, el sismo 29/10/94 ($M_c=5.1$) con aceleración máxima en Diana de 131.5 gal presenta factores de amplificación menores. Se va considerar al evento 12/07/95 con comportamiento lineal y al 29/10/94 con posible comportamiento no lineal.

La figura 5.22 presenta la superposición de los cocientes espectrales de estos eventos para Diana/Diana Pozo; puede observarse como las formas de estos cocientes son semejantes, lo que permite notar que las amplitudes máximas del 29/10/94 disminuyen y se desplazan hacia la izquierda en ambas direcciones. Sin embargo en la alta frecuencia sólo para ciertos intervalos y en ambas direcciones sus amplitudes no son menores respecto al 12/07/95.

La figura 5.23 nos presenta la superposición de los cocientes espectrales de estos eventos para Diana/La Venta; similar al análisis anterior, hay una importante reducción de la amplitud máxima y desplazamiento de ésta hacia bajas frecuencias en ambas direcciones, pero en la alta frecuencia a partir de los 9 Hz sus amplitudes no son menores respecto al 12/07/95. Se concluye que este evento del 29/10/94 posiblemente presentó un comportamiento no lineal.

5.3 SISMOS REGISTRADOS EN LAS ESTACIONES DIANA Y LA VENTA

Se repetirá este análisis para los sismos que sólo han sido registrados en el par de estaciones Diana y La Venta; la tabla 5.7 presenta las aceleraciones totales máximas, factores de aceleración y los factores de amplificación relativa máxima de todos los sismos distribuidos por regiones. Los sismos sombreados son los registrados simultáneamente en las tres estaciones, los no sombreados son los que se agregaran a las regiones (figuras 5.24 al 5.26).

Tabla 5.7: Aceleraciones totales máximas, factores de aceleración y factores de amplificación relativa máxima de todos los sismos distribuidos por regiones

REGIÓN	SISMO	ACELERACIONES TOTALES MÁXIMAS					AMPLIFICACIONES RELATIVAS MÁXIMAS			
		DIANA	LA VENTA	DIANA POZO	DIANA/LA VENTA	DIANA/POZO	NS	EO	NS/DIANA	EO/POZO
1	22/03/97-1	41.2	16.7	6.6	2.5	6.2	51.0	19.8	37.3	30.8
	16/08/88	127.1	40.3	-	3.2	-	34.3	10.1	-	-
2	09/12/95	26.3	11.6	6.3	2.3	4.2	42.2	11.6	30.2	39.2
	01/01/96	21.5	4.0	3.9	5.4	-	17.5	22.7	32.1	33.6
	02/03/99	42.4	15.9	6.5	2.7	6.5	11.4	14.6	34.2	23.2
	15/06/99	28.6	7.5	5.4	3.8	5.3	12.6	13.1	21.7	32.2
	27/10/99	17.3	11.5	3.7	1.5	4.7	11.4	15.6	30.7	38.1
	09-01-92	60.0	33.9	-	1.8	-	13.2	8.2	-	-
3	13/03/96	15.9	3.3	2.8	4.8	5.7	29.8	14.3	26.9	34.7
	11/07/97	19.9	7.4	3.3	2.7	6.0	10.9	11.1	25.6	31.6
	14/10/97	16.7	3.9	1.8	4.3	9.3	18.8	14.9	23.7	38.0
	07/09/98	12.9	8.4	1.8	1.5	7.2	27.9	12.4	36.0	28.4
	30/09/99	51.7	8.1	8.9	6.4	5.8	23.4	18.8	25.9	44.0
	25-04-89	351.0	66.3	-	5.3	-	32.9	41.6	-	-
	02-05-89	74.5	10.8	-	6.9	-	25.7	42.3	-	-
	09-11-89	124.1	51.1	-	2.4	-	21.2	41.5	-	-
	13-01-90	221.2	47.0	-	4.7	-	23.6	16.7	-	-
	04-04-90	48.8	8.1	-	6.0	-	38.2	23.6	-	-
	09-07-90	18.9	29.2	-	0.6	-	14.0	13.7	-	-
4	10-07-90	80.4	25.2	-	3.2	-	53.8	17.2	-	-
	24-10-93	135.4	18.7	-	7.2	-	22.6	19.9	-	-
	15-04-94	61.0	-	11.9	-	5.1	-	-	25.5	27.9
	08-06-96	20.0	3.3	2.7	6.1	7.4	32.4	79.7	27.2	39.4
	25/08/97	17.5	4.7	5.1	3.7	3.4	47.5	14.0	34.2	41.2
	21/10/97	42.6	3.9	6.2	11.0	6.9	58.8	55.3	39.8	89.7
	03-09-96	73.9	2.5	-	30.2	-	98.9	33.5	-	-
	02-01-95	13.2	-	3.2	-	4.1	-	-	60.1	43.5
	22-09-95	25.9	-	3.5	-	7.4	-	-	60.3	49.7
	19-11-99	16.7	-	2.1	-	8.0	-	-	25.8	62.5
	5	13-05-95	55.1	13.3	12.7	4.1	4.3	32.7	20.4	35.0
11-06-96		24.7	15.1	3.3	1.6	7.5	14.4	7.9	27.9	29.5
22-03-97-2		44.7	3.2	3.4	13.9	13.1	88.4	117.3	45.5	75.9
27-08-97		91.1	65.2	20.4	1.4	4.5	14.4	11.1	23.5	24.4
28/01/98-1		11.8	3.7	1.7	3.2	6.9	28.9	9.8	45.2	18.8
22-12-94		32.5	-	3.7	-	8.8	-	-	36.7	70.5
6	26-06-97	23.0	-	4.3	-	5.3	-	-	53.1	64.7
	27-12-98	58.3	-	10.8	-	5.4	-	-	35.4	51.5
	14-08-97	17.5	3.2	2.1	5.5	8.3	20.3	10.9	49.9	42.2
	01-06-98	172.0	20.8	24.0	8.3	7.2	33.3	32.1	37.9	19.9
	12-07-98	24.6	4.1	4.2	6.0	5.9	23.9	37.3	23.7	30.7
	15-05-92	110.6	9.3	-	11.9	-	33.2	41.4	-	-
	08-05-96-1	31.6	3.7	-	8.6	-	21.6	24.2	-	-
	08-05-96-2	33.7	5.8	-	5.8	-	20.1	26.8	-	-
	15-04-96	16.4	-	2.4	-	6.8	-	-	31.0	18.3
	05-03-98	20.7	-	2.6	-	8.0	-	-	43.2	24.4
	04-03-99	17.0	-	1.8	-	9.4	-	-	76.0	31.6
7	11/01/97	20.7	2.6	2.5	8.0	8.3	13.0	15.7	26.8	27.3
	08/05/97	55.5	6.4	10.2	8.6	5.4	18.6	19.9	32.2	20.7
	19/07/97	33.6	4.5	4.2	7.4	8.0	29.5	14.2	32.2	30.8
	17/07/98	137.1	22.3	29.5	6.1	4.6	31.4	21.0	19.4	23.4
	09/08/98	29.4	3.7	3.2	8.0	9.2	24.4	32.1	29.0	23.8
	06/04/99	53.0	8.8	9.7	6.0	5.5	41.8	20.2	29.1	36.0
	08/04/99	36.4	5.7	6.3	6.4	5.8	14.9	19.1	18.6	55.2
	08/10/01	337.0	43.3	42.6	7.8	7.9	13.3	22.2	21.4	20.2
	23-04-96	21.3	4.0	-	5.4	-	15.8	13.8	-	-
	10-12-94	20.7	-	2.9	-	7.1	-	-	22.3	29.4
	19-11-96	14.5	-	1.9	-	7.6	-	-	52.8	36.2
	19-05-97	12.4	-	1.5	-	8.3	-	-	26.2	28.5
	22-12-97	15.3	-	1.7	-	9.0	-	-	30.4	21.9
	28-01-98-2	14.7	-	1.4	-	10.5	-	-	35.7	26.2
11-03-98	16.3	-	3.5	-	3.7	-	-	50.7	36.6	
30-05-99	11.4	-	1.0	-	11.4	-	-	25.9	33.0	
21-06-99	13.8	-	2.0	-	6.9	-	-	21.2	28.1	
08-11-99	15.3	-	1.7	-	9.0	-	-	48.0	33.3	
8	29/10/94	131.5	40.7	16.2	3.2	8.1	18.4	27.6	22.7	19.7
	12/07/95	58.0	8.1	8.2	7.2	7.1	38.5	107.7	39.8	26.3
	16/08/99	18.8	6.7	2.5	2.8	7.5	24.1	13.7	19.7	39.5
	17-08-89	89.1	20.8	-	4.3	-	11.7	23.8	-	-
	08/10-89	50.5	11.6	-	4.4	-	16.3	22.2	-	-
	23-05-94	27.0	-	4.3	-	6.3	-	-	19.2	22.2
31/10-97	21.9	-	1.7	-	12.9	-	-	28.8	28.2	
07/12-99	12.7	-	1.9	-	6.7	-	-	41.0	31.5	

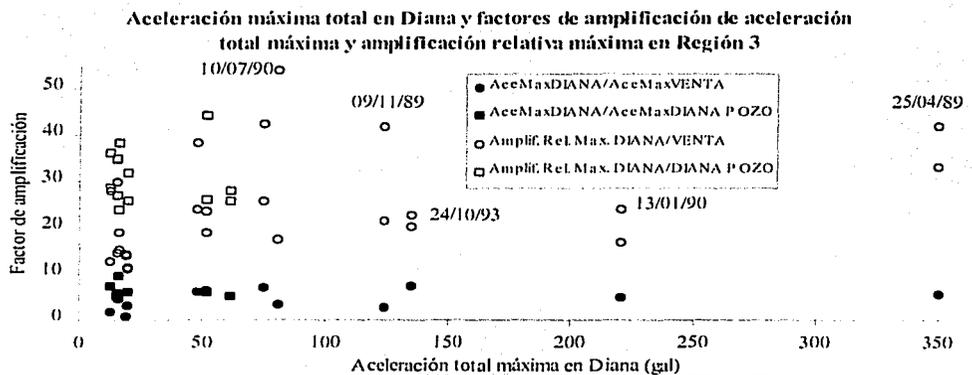
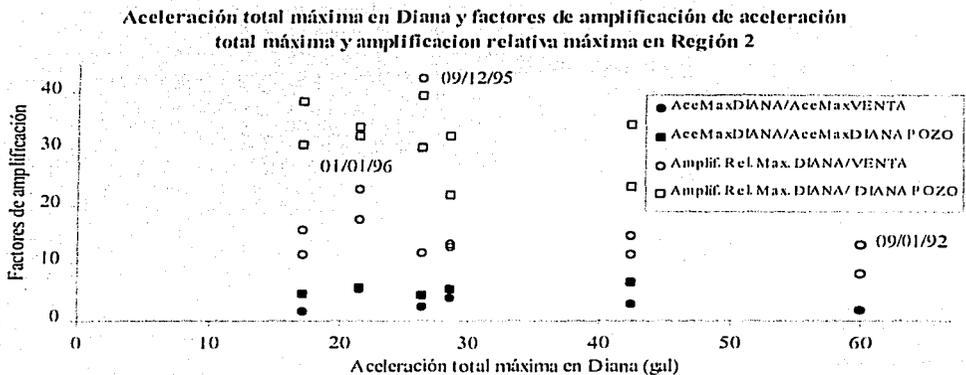
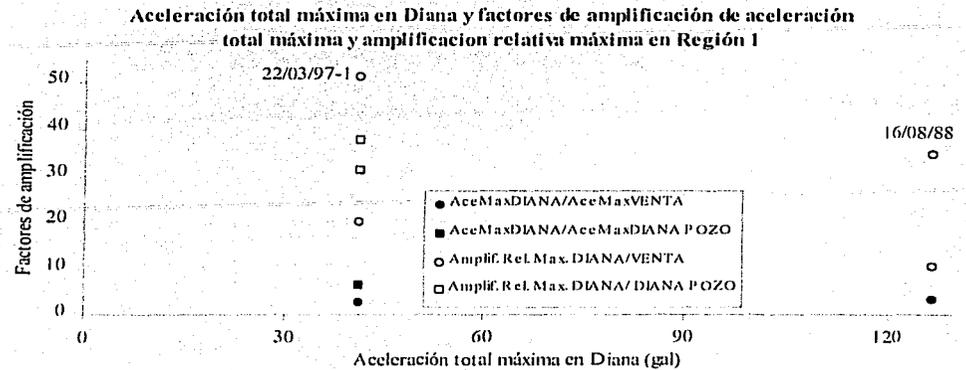


Figura 5.24

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

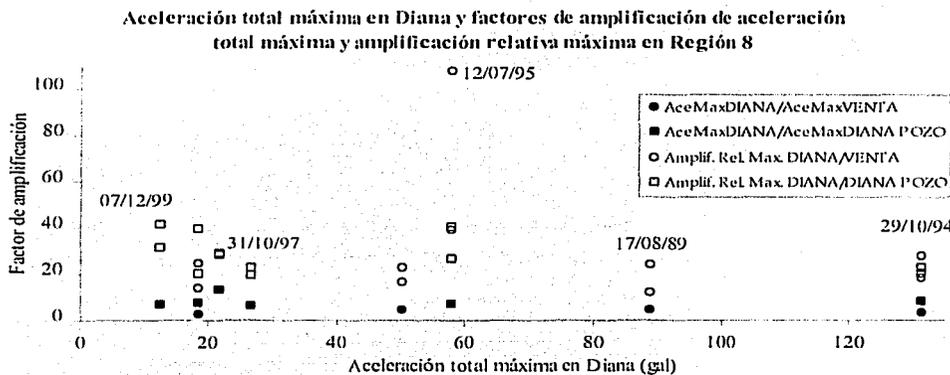
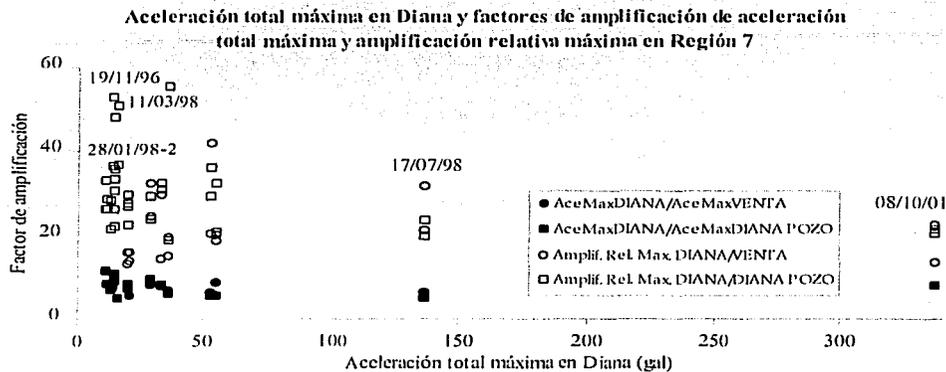


Figura 5.26

5.3.1 SUPERPOSICIÓN DE COCIENTES ESPECTRALES POR EVENTO

5.3.1.1 Región 1

Se tienen dos sismos en esta región (parte superior, figura 5.24), el 22/03/97-1 ($M_b=4.7$) con aceleración máxima de 41.2 gal en Diana y el 16/08/88 ($M_b=4.2$) con 127.1 gal de aceleración máxima en Diana. Se va considerar al primer sismo con comportamiento lineal y al segundo con posible comportamiento no lineal, esto debido a la distribución de sus factores de amplificación relativa máxima cuyos valores son mayores para el primer sismo respecto al segundo.



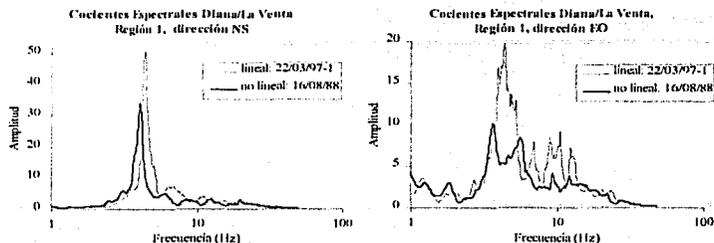


Figura 5.27

La figura 5.27 muestra la superposición de los cocientes espectrales, se observa claramente como en ambas direcciones el sismo del 16/08/88 presenta, respecto al 22/03/97-1, un corrimiento hacia la izquierda de su mayor pico espectral y un menor valor en sus amplificaciones relativas a partir de esta frecuencia, manteniéndose esta característica en la mayor parte de la alta frecuencia. Se concluye que el sismo 16/08/88 presentó un posible comportamiento del tipo no lineal.

5.3.1.2 Región 2

La figura 5.24 (parte intermedia) presenta todos los sismos correspondientes a esta región, en comparación con la figura 5.15 sólo se ha agregado el sismo 09/01/92 ($M_b=4.7$), el cual con una aceleración máxima de 60 gal en la estación Diana presenta menores factores tanto de aceleración como de amplificación relativa máxima respecto a los otros cuatro sismos. Asumiendo que posiblemente estos factores menores se deban a un comportamiento no lineal, se va superponer los cocientes espectrales de este sismo con los de los eventos 01/01/96 y 09/12/95 los cuales tienen mayores factores de amplificación relativa máxima en ambas direcciones con respecto a 09/12/92.

La figura 5.28 presenta la superposición de estos eventos; en la columna central se puede observar la semejanza en la forma de los cocientes espectrales, con la diferencia que el evento 09/01/92 presenta los picos espectrales con menor amplitud y desplazados hacia la izquierda respecto al 09/12/95, la amplitud del 09/01/92 se mantiene menor con respecto al 09/12/95 sólo en algunos intervalos de la alta frecuencia. En la columna de la derecha no se observa una buena semejanza entre los cocientes de 09/01/92 y 01/01/96, las formas son diferentes en la dirección NS lo que no permite hacer una adecuada interpretación de esta superposición y en la EO hay una semejanza que permite reconocer la disminución en amplitud de los picos espectrales del 09/01/92 respecto al 01/01/96 y el desplazamiento hacia frecuencias bajas de los dos primeros picos espectrales con respecto al 01/01/96, a través de la alta frecuencia no se mantiene la disminución de la amplitud.

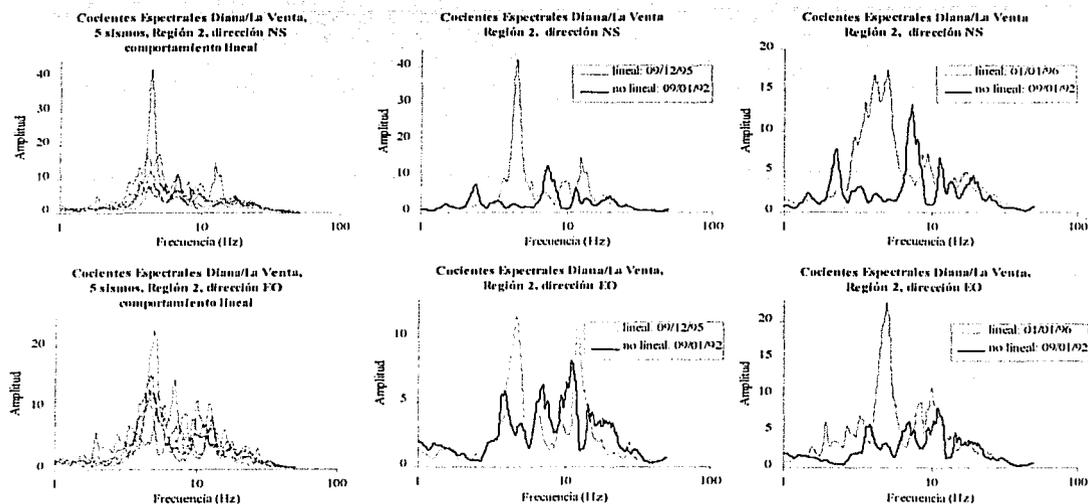


Figura 5.28

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Una de las conclusiones del capítulo anterior fue que las regiones 2 al 5 muestran semejanzas en la forma de su cociente espectral y en los valores promedio de su amplitud relativa máxima y frecuencia fundamental; considerando estas regiones como una sola zona de características similares en la respuesta de sitio, permite poder recurrir a eventos que pertenezcan a estas regiones que presenten un comportamiento lineal y poder utilizar sus cocientes espectrales como base para la comparación con los identificados como posiblemente no lineales.

La figura 5.29 compara los cocientes espectrales de los sismos lineales 21/10/97 (aceleración máxima de 42.6 gal, región 4) y 22/03/97-2 (aceleración máxima de 44.7 gal, región 5) con el sismo 09/01/92, estas superposiciones muestran con mayor claridad en ambas direcciones las condiciones de una posible no linealidad para el sismo del 09/01/92, es decir una reducción de la amplificación relativa a partir de la máxima manteniéndose a través de la alta frecuencia y su desplazamiento hacia frecuencias menores. Si se quiere interpretar que los cocientes del 22/03/97-2 están sobre amplificados, tal como se mencionó al analizar anteriormente la región 5, los cocientes del 21/10/97 no presentan esta característica dentro de su región. Se puede concluir entonces que el evento 09/01/92 presentó posiblemente un comportamiento del tipo no lineal.

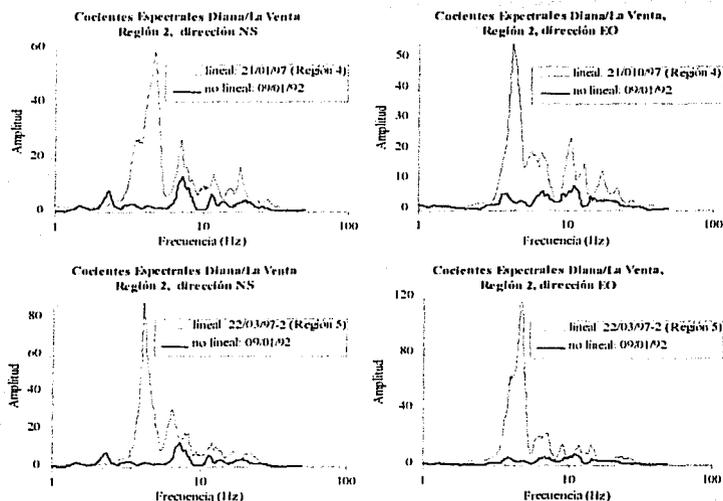


Figura 5.29

5.3.1.3 Región 3

En esta región se agregan 8 eventos (parte inferior de la figura 5.24), se va a proceder a analizar 5 sismos los cuales presentan aceleraciones máximas mayores a 80 gal en la estación Diana, estos sismos están señalados en la figura 4.24. Puede observarse que los sismos con aceleraciones máximas menores a 80 gal presentan los mayores factores de amplificación relativa máxima entre 20 y 40 veces, y los de mayor a 80 gal entre 30 a 50 veces, lo que no permite utilizar algún sismo de esta región como representante del comportamiento lineal, por ello se van a utilizar los sismos 21/10/97 y 22/03/97-2 de las regiones 4 y 5 respectivamente tal como se hizo para la región anterior.

La figura 5.30 muestra la superposición del evento 25/04/89 considerado posiblemente como no lineal con los eventos lineales 21/10/97 (parte superior) y 22/03/97-2 (parte inferior). Se debe mencionar que este sismo del 25/04/89 es el mayor registrado, tanto en magnitud como en aceleración en Diana ($M_s=6.9$, aceleración máxima total de 351 gal). Se puede notar claramente de la superposición con ambos eventos y para ambas direcciones que sus cocientes espectrales presentan una disminución en sus amplitudes máximas y se desplazan hacia frecuencias bajas; esta disminución de la amplitud se mantiene a través de la alta frecuencia. Se concluye que este sismo presentó un posible comportamiento no lineal.

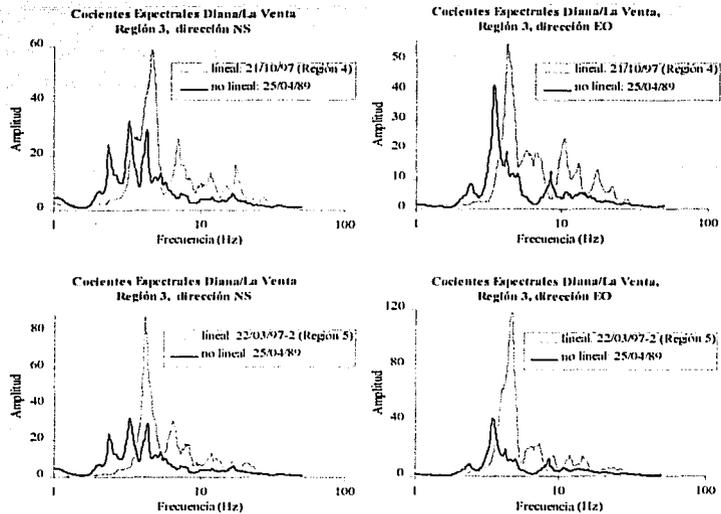


Figura 5.30

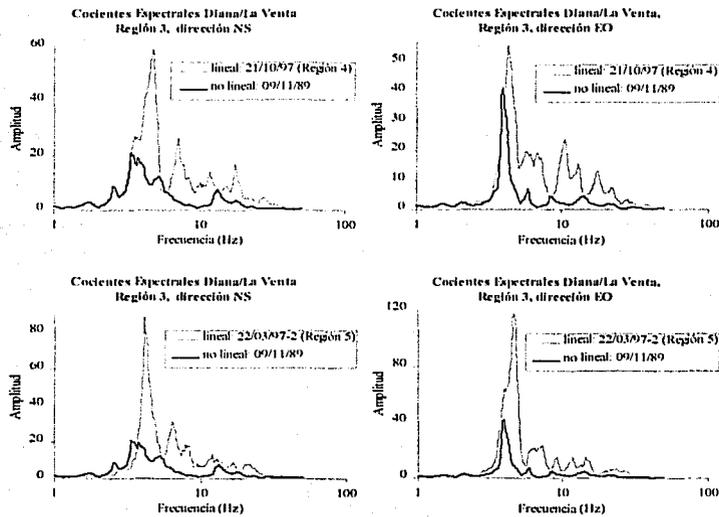


Figura 5.31

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La figura 5.31 muestra la superposición de los cocientes espectrales del sismo 09/11/89 ($M_s=4.1$) con aceleración máxima en Diana de 124.1 gal con los de comportamiento lineal. Se observa como en ambas direcciones los cocientes del 09/11/89 presentan una disminución de su mayor pico espectral y éste se encuentra desplazado hacia frecuencias bajas; desde este pico las amplitudes se mantienen menores respecto a ambos sismos lineales a través de la alta frecuencia. Se concluye que el sismo del 09/11/89 presentó un posible comportamiento del tipo no lineal.

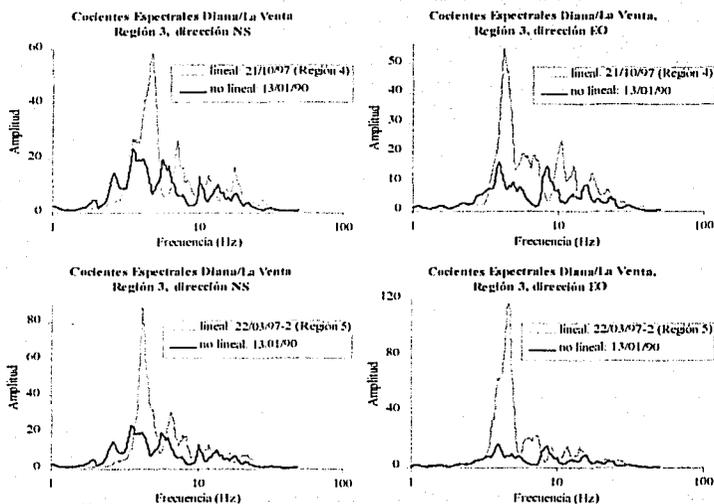


Figura 5.32

La figura 5.32 presenta la superposición de los eventos lineales con el sismo 13/01/90 ($M_s=5.0$) que tiene una aceleración total máxima en Diana de 221.2 gal. Estos cocientes espectrales muestran una buena semejanza, lo que permite observar como en ambas direcciones los picos espectrales del 13/01/90 son menores y están desplazados hacia frecuencias bajas con respecto a los sismos lineales, y a través de la alta frecuencia las amplitudes de este sismo se mantienen menores. Se concluye que el sismo 13/01/90 tuvo un posible comportamiento no lineal.

La figura 5.33 muestra la superposición de los cocientes espectrales del sismo 10/07/90 ($M_b=4.5$) con aceleración máxima total en Diana de 80.4 gal con los eventos lineales. Se observa que en la dirección EO hay una disminución notable de sus amplitudes respecto a los eventos lineales y un corrimiento hacia la izquierda de su amplitud máxima siendo más notorio con el evento 21/10/97. En la dirección NS hay una disminución de los picos espectrales máximos, siendo mayor con el evento 22/03/97-2; existiendo un

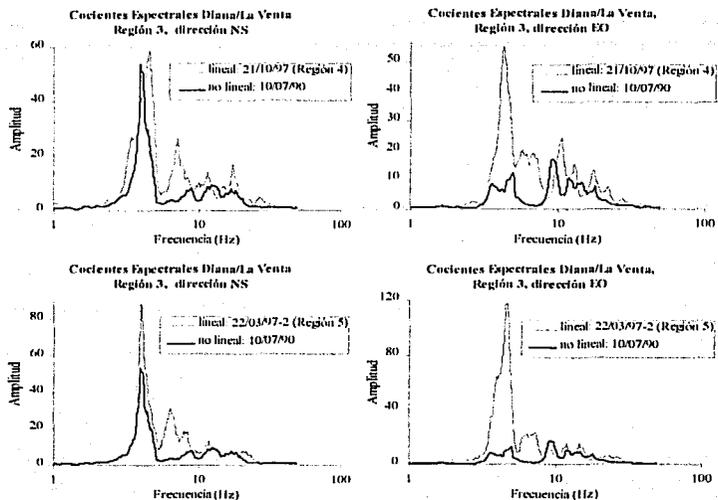


Figura 5.33

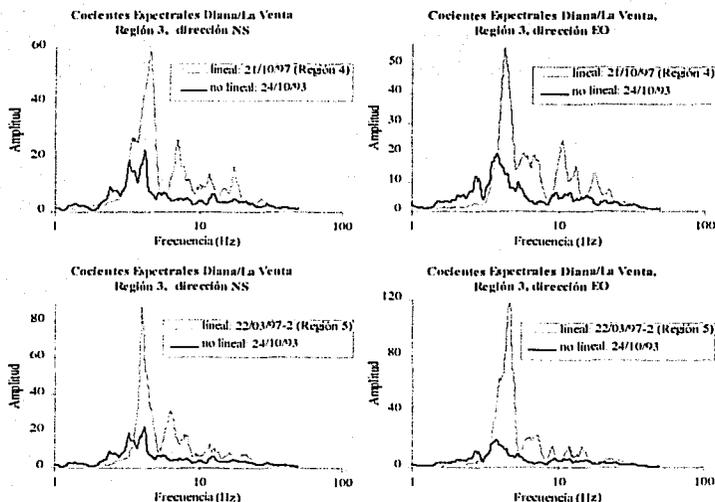


Figura 5.34

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

claro desplazamiento hacia la izquierda de la amplitud máxima con respecto al 21/10/97 pero no ocurre lo mismo con el evento 22/03/97-2. En la alta frecuencia, sólo para ciertos intervalos y en ambas direcciones las amplitudes son menores con respecto a los sismos lineales. Se concluye que este sismo del 10/07/90 presentó un posible comportamiento no lineal.

La figura 5.34 presenta la superposición del evento 24/10/93 ($M_s=6.6$) con aceleración total máxima en Diana de 135.4 gal con los eventos lineales. Se nota claramente con ambos sismos y en ambas direcciones la disminución de sus amplitudes máximas y el desplazamiento de éstos hacia frecuencias bajas, se mantiene esta menor amplitud con respecto a los sismos lineales a través de la alta frecuencia. Se concluye que este sismo presentó un posible comportamiento no lineal.

5.3.1.4 Región 6

En la región 6 (parte inferior, figura 5.25) se agregan 3 sismos de los cuales el 15/05/92 ($M_b=4.2$) tiene una aceleración total máxima en Diana de 110.6 gal y presenta los mayores factores de amplificación relativa máxima y de aceleración. Anteriormente al analizar esta región sólo se pudo hacer la superposición de cocientes espectrales para Diana/Diana Pozo y no para Diana/La Venta debido a que no se tiene un evento con menor aceleración que presente mayores factores de amplificación respecto a La Venta, lo que sigue sucediendo al agregar estos tres sismos.

La figura 5.35 muestra la superposición de los cocientes espectrales de los sismos 15/05/92 y 01/06/98, que nos indica la similitud en la forma de estos cocientes así como en su frecuencia y amplitudes. Se deberá esperar que aparezca un sismo con características lineales que permita la superposición con estos cocientes y determinar si tuvieron comportamiento no lineal con respecto a la estación La Venta.

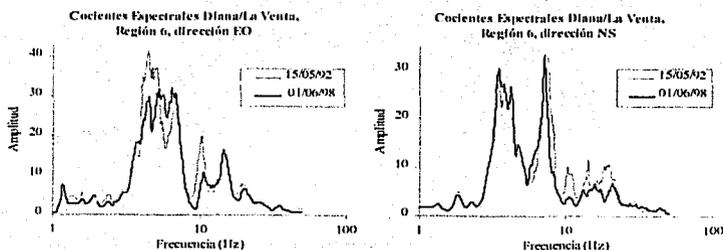


Figura 5.35

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

5.3.1.5 Región 8

En esta región se agregan dos sismos de los cuales el 17/08/89 ($M_b=4.9$) presenta la mayor aceleración total máxima siendo de 89.1 gal. Asumiendo la posibilidad que este sismo puede tener características no lineales, superponemos sus cocientes espectrales con los del evento 12/07/95 considerado lineal y ya utilizado anteriormente; la figura 5.36 muestra esta superposición. En la dirección EO se observa como su pico espectral está desplazado hacia la izquierda y es mucho menor que del 12/07/95, sin embargo sólo hasta los 10 Hz las amplitudes del 17/08/89 son menores respecto al 12/07/95, a partir de esta frecuencia las amplitudes del 17/08/89 son mayores. Lo mismo se puede observar en la dirección NS donde hasta los 9 Hz las amplitudes del 17/08/89 son menores incluyendo su mayor pico espectral, pero no se observa en este pico un corrimiento hacia la izquierda. Se concluye que este sismo del 17/08/89 presentó un posible comportamiento no lineal.

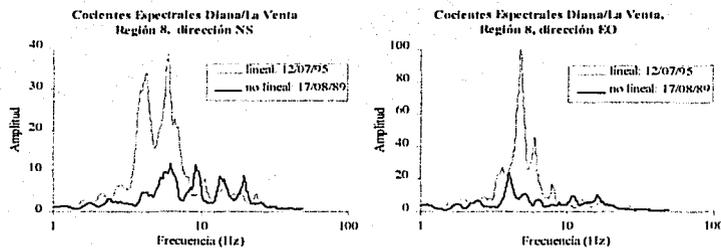


Figura 5.36

5.4 SISMOS REGISTRADOS EN LAS ESTACIONES DIANA Y DIANA POZO

5.4.1 SUPERPOSICIÓN DE COCIENTES ESPECTRALES POR EVENTO

5.4.1.1 Región 5

En esta región se agregan 3 sismos, de los cuales uno tiene una aceleración máxima en Diana mayor a 50 gal y los otros dos menores. En la figura 5.25 (parte intermedia) se señalan dos de estos sismos: el 26/06/97 ($M_c=4.1$) con aceleración total máxima en Diana de 23 gal y el 27/12/98 ($M_c=4.3$) con aceleración de 58.3 gal. Debido a los menores factores de amplificación del evento 27/12/98 se va asumir que posiblemente tuvo un comportamiento no lineal.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

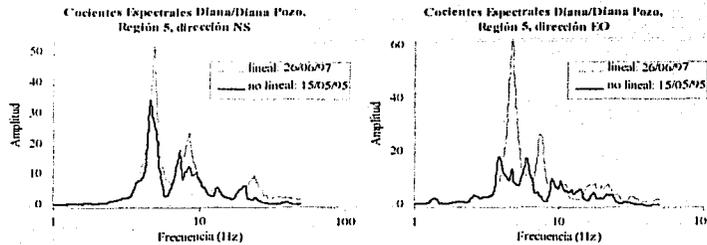


Figura 5.37

La figura 5.37 presenta la superposición de los eventos 26/06/97 y 15/05/95 que ya fue analizado anteriormente, se va comprobar el resultado obtenido con este nuevo sismo lineal. De la superposición se concluye de manera similar, es decir el 15/05/95 presenta una disminución en sus amplitudes máximas y el desplazamiento de éstas a frecuencias bajas en ambas direcciones; sus amplitudes son menores sólo en algunos intervalos en alta frecuencia para ambas direcciones. Se llega a la misma conclusión, que este sismo presentó un posible comportamiento no lineal.

De la misma manera se va comprobar el resultado para el sismo 27/08/97 superponiendo sus cocientes espectrales con el sismo 26/06/97 (figura 5.38). En ambas direcciones se observa la disminución de la amplitud mayor pero sólo en la dirección NS se aprecia el desplazamiento de esta amplitud hacia frecuencias bajas. La conclusión es la misma, que el evento 27/08/97 presentó un posible comportamiento no lineal.

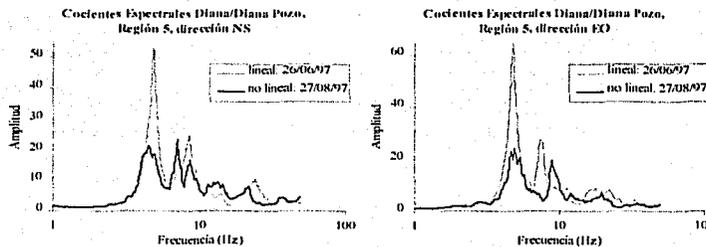


Figura 5.38

La figura 5.39 muestra la superposición del nuevo evento 27/12/98 con los eventos lineales 22/03/97-2 y 26/06/97. De la superposición con 22/03/97-2 (parte superior, figura 5.39) en la dirección EO se observa la disminución del mayor pico espectral y su desplazamiento hacia frecuencias bajas; sin embargo en la alta frecuencia a partir de los 10 Hz sus amplitudes son mayores. En la dirección NS hay una disminución en los picos espectrales pero sin tener un desplazamiento hacia frecuencias bajas.

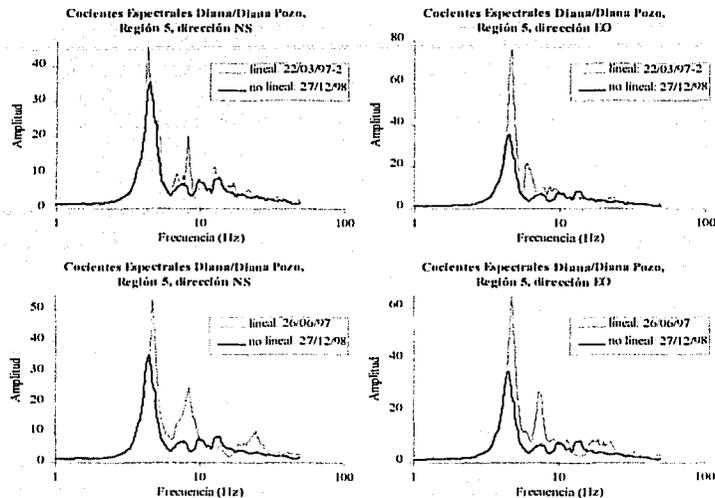


Figura 5.39

TESIS CON
 FALLA DE CALIFICACION

De la superposición con el evento 26/06/97 (parte inferior, figura 5.39) se nota claramente en ambas direcciones la disminución de la máxima amplitud espectral y su desplazamiento hacia la baja frecuencia, esta diferencia de amplitud se mantiene en la alta frecuencia salvo en un intervalo alrededor de los 20 Hz. Con esta última superposición se concluye que el evento del 27/12/98 tuvo un posible comportamiento no lineal.

5.4.1.2 Región 6

Se agregan tres sismos nuevos a esta región (parte superior de la figura 5.25), todos con aceleraciones máximas menores a 20 gal. Considerando el sismo nuevo 04/03/99 ($M_c=3.8$) con aceleración máxima de 17 gal en Diana, se va superponer sus cocientes espectrales con los del sismo 01/06/98 que ya fue analizado anteriormente, esto con el fin de comprobar el resultado obtenido.

La figura 5.40 presenta ésta superposición, de la que se observa en ambas direcciones la disminución de las máximas amplitudes y su corrimiento hacia frecuencias bajas. En la alta frecuencia se mantiene por intervalos esta diferencia de amplitud. Se llega a la misma conclusión, que el sismo 01/06/98 presentó un posible comportamiento no lineal.

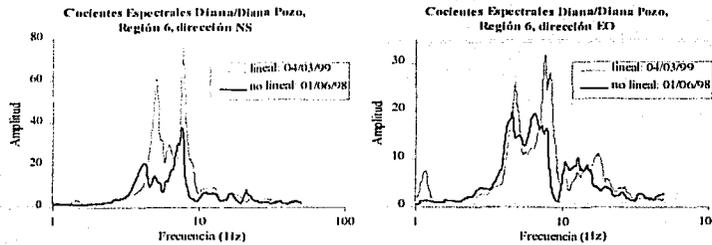


Figura 5.40

5.4.1.3 Región 7

Se agregan nueve sismos nuevos a esta región, todos ellos con aceleraciones máximas menores a 21 gal. Se van a verificar los resultados obtenidos para los sismos 17/07/98 y 08/10/01 superponiendo sus cocientes espectrales con los de siguientes sismos nuevos: 19/11/96 ($M_c=3.9$) que tiene una aceleración máxima de 14.5 gal en Diana, 28/01/98-2 ($M_c=3.9$) con aceleración máxima en Diana de 14.7 gal y el sismo 11/03/98 ($M_c=4.2$) con aceleración máxima de 16.3 gal en Diana.

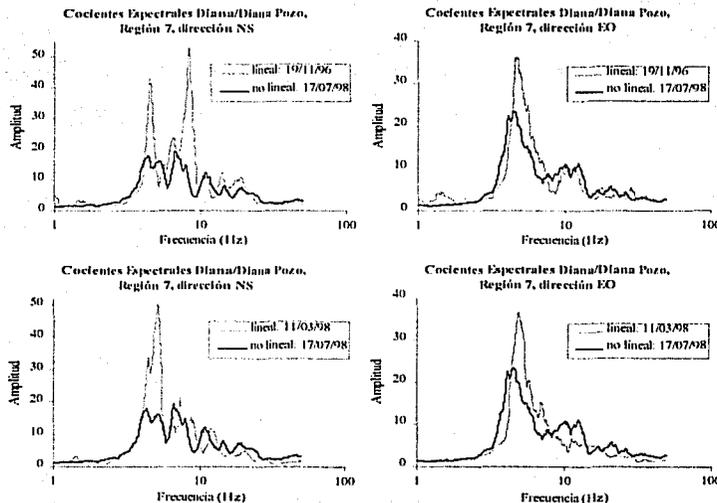


Figura 5.41

La figura 5.41 muestra la superposición de los cocientes espectrales del sismo 17/07/98 con 19/11/96 y 11/03/98, en ambos se observa que en las dos direcciones el pico espectral máximo disminuye y se desplaza hacia frecuencias bajas, pero en la alta frecuencia en la dirección EO sus amplitudes son mayores a los dos sismos lineales y en la NS son mayores en algunos intervalos. Se llega a la misma conclusión, que el sismo 17/07/98 presentó a un posible comportamiento no lineal.

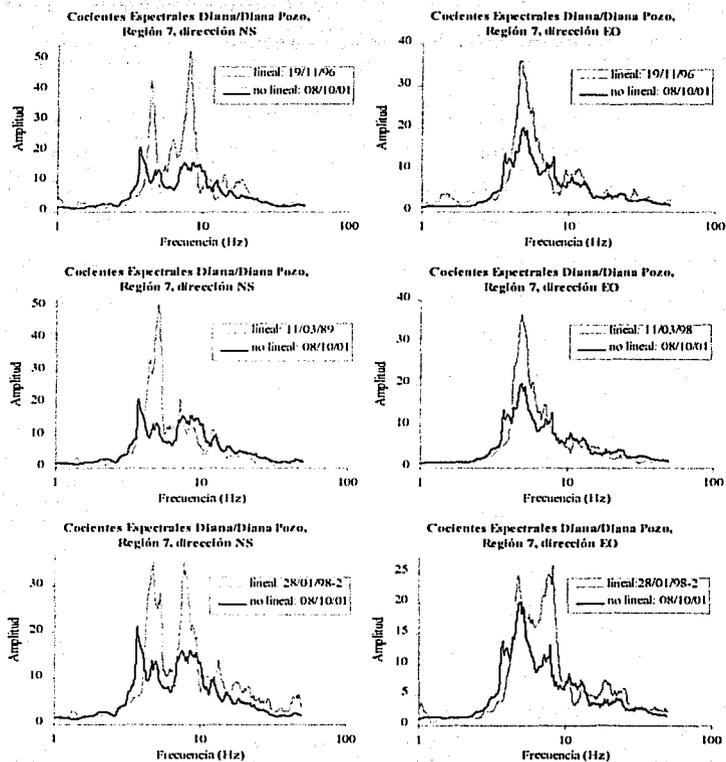


Figura 5.42

La figura 5.42 presenta la superposición de los cocientes espectrales del sismo 08/10/01 con 19/11/96, 11/03/98 y 28/01/98-2. En los tres casos se observa para ambas direcciones la notoria disminución del mayor pico espectral y su corrimiento hacia frecuencias bajas, pero es con el evento

28/01/98-2 donde esta diferencia de la amplitud se mantiene a través de la alta frecuencia. Se llega a la misma conclusión, que el evento 08/10/01 presentó posiblemente un comportamiento del tipo no lineal.

5.4.1.4 Región 8

Se agregan tres sismos nuevos a esta región, todos ellos con aceleraciones máximas menores a 27 gal. Se van a verificar los resultados obtenidos para el sismo 29/10/94 superponiendo sus cocientes espectrales con los sismos nuevos: 07/12/99 ($M_c=3.7$) con aceleración máxima en Diana de 12.7 gal y 31/10/97 ($M_c=4.3$) con aceleración máxima de 21.9 gal en Diana.

En la figura 5.43 se puede observar que la superposición de los cocientes con el sismo 31/10/97 en la dirección EO es mas claro la disminución de la amplitud máxima y su desplazamiento hacia la baja frecuencia que en la NS ya que en esta dirección sólo el primer pico espectral tiene este desplazamiento. La superposición con el sismo 07/12/99 es casi similar, en la dirección NS la disminución del pico espectral máximo junto con otros y sus desplazamientos hacia la baja frecuencia es mas notoria que en la dirección EO donde sólo el primer pico espectral tiene este desplazamiento. Para ambos casos y en ambas direcciones la amplitud del 29/10/94 es mayor en intervalos de la alta frecuencia. Se tiene la misma conclusión, el sismo 29/10/94 presentó un posible comportamiento no lineal.

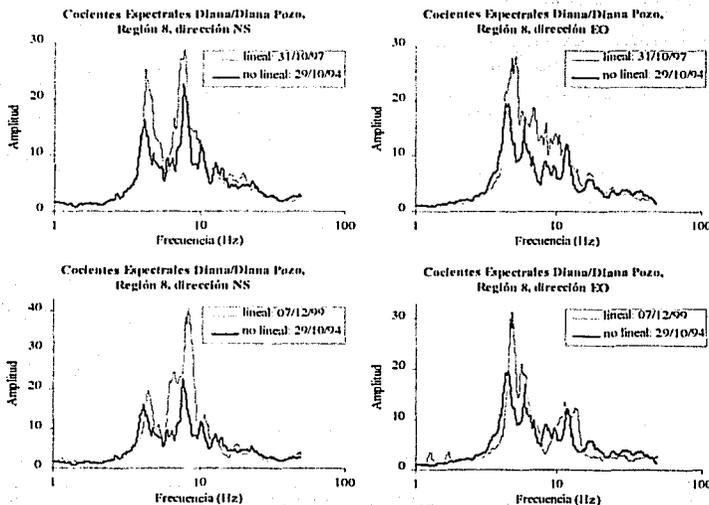


Figura 5.43

5.5 SUPERPOSICIÓN DE COCIENTES ESPECTRALES POR REGIONES

La superposición de cocientes espectrales por eventos realizado anteriormente, ha permitido identificar los sismos que teniendo las mayores aceleraciones en cada región, presentan cocientes espectrales con valores de amplificaciones relativas máximas y frecuencias fundamentales menores a las que presentan algunos eventos con menores aceleraciones, lo que es un indicio de un posible comportamiento no lineal. Sin embargo, esta simple comparación no es suficiente para poder concluir que un evento pudo haber tenido un comportamiento de este tipo. En esta sección se va a proceder a analizar por regiones la superposición de cocientes espectrales promedio de los eventos que presentan un comportamiento lineal y los que posiblemente presentaron un comportamiento no lineal; en este promedio lineal se incorporan los sismos cuyos cocientes espectrales no fueron utilizados en la superposición de cocientes espectrales por eventos, debido a que presentaban amplificaciones relativas máximas menores a los de los eventos posiblemente no lineales. Se observa en las regiones 3, 6 y 7 (figuras 5.24, 5.25 y 5.26) como en aceleraciones bajas (menores a 50 gal) existen eventos con un mismo o cercano valor de aceleración total en Diana que presentan valores menores o mayores del factor de amplificación de aceleración máxima y de amplificación relativa máxima, indicando la incertidumbre que se tiene en la respuesta del suelo en este nivel de aceleraciones, por lo que es necesario representar adecuadamente el comportamiento del suelo, que para este nivel de aceleraciones corresponde del tipo lineal; para ello se calculará un cociente espectral promedio que involucre a todos los sismos que representan este comportamiento el cual será luego utilizado para hacer la comparación con el promedio de los no lineales.

5.5.1 REGIONES 2 Y 3

La figura 5.44 presenta la superposición de los cocientes espectrales de las regiones 2 y 3 correspondientes al par de estaciones Diana y La Venta. A la izquierda se presenta la superposición de la desviación estándar del promedio lineal con el promedio de los eventos posiblemente no lineales, y a la derecha la superposición del promedio lineal y posiblemente no lineal.

La región 2 presenta 5 sismos lineales y uno posiblemente no lineal, el 09/01/92; el cociente de este sismo se ubica, en algunos intervalos de frecuencia, por encima o debajo de los límites de la desviación estándar, siendo esto más notorio en la dirección EO. De la superposición del promedio lineal y el cociente espectral, en la dirección EO es donde se puede apreciar una disminución notable del pico espectral correspondiente al primer modo de este cociente, pero los modos superiores son mayores a los del promedio; las frecuencias de estos modos presentan un desplazamiento hacia la izquierda, siendo más

notorio la correspondiente también al primer pico espectral. En la dirección NS hay reducción importante de la amplificación relativa en la baja frecuencia, pero en la alta frecuencia son mayores respecto al del promedio lineal; no se observa una reducción de las frecuencias asociadas a estos picos.

La región 3 presenta 8 eventos con comportamiento lineal y 5 con posible comportamiento no lineal; el cociente promedio de los posible no lineales se ubica dentro de la desviación estándar, aunque en ciertos intervalos en la baja frecuencia este promedio supera el límite superior de la desviación, sobre todo en la dirección NS. La superposición de los promedios muestra mayores ordenadas espectrales para los posiblemente no lineales; se observa un desplazamiento hacia frecuencias menores de los picos espectrales en ambas direcciones.

Se concluye que posiblemente el evento del 09/01/92 de la región 2, presentó una transición hacia un comportamiento no lineal, debido a la disminución de la amplificación relativa correspondiente a la primera forma de modo y al desplazamiento a menores frecuencias de los picos espectrales, sobre todo en la dirección EO.

En la región 3 no se puede tener una conclusión clara sobre los eventos posiblemente no lineales; si bien los promedios en cada dirección presentan mayores ordenadas espectrales que los promedios lineales, las frecuencias asociadas a las formas de modo muestran valores menores que los correspondientes a los lineales.

5.5.2 REGION 5

La figura 5.45 presenta las superposiciones para los cocientes espectrales de los dos pares de estaciones Diana/La Venta y Diana/Diana Pozo. Observando los cocientes de Diana/La Venta, se tienen 3 sismos lineales y 2 posiblemente no lineales y que son del 15/05/95 y 27/08/97. Los promedios de los posibles eventos no lineales, en ambas direcciones, se ubican dentro de los límites de la desviación estándar salvo un intervalo en la baja frecuencia en la dirección NS. La superposición de los cocientes promedio muestra un desplazamiento hacia frecuencias bajas del mayor pico espectral de los posibles no lineales en ambas direcciones, pero sólo muestra una disminución de la amplificación relativa máxima con respecto al lineal en la dirección NS; en la mayor parte de la alta frecuencia las amplificaciones relativas son mayores para el cociente de los posibles no lineales en ambas direcciones.

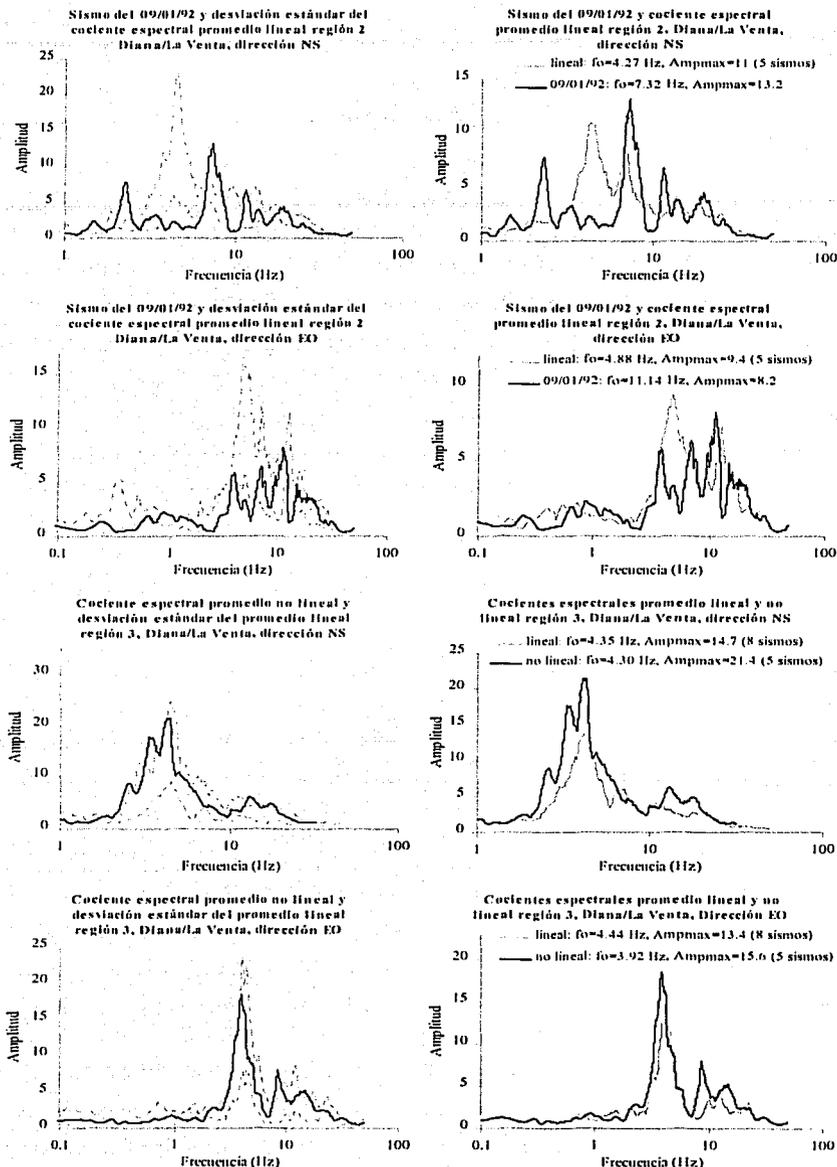


Figura 5.44

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Para Diana/Diana Pozo, se tienen 5 sismos lineales y 3 posiblemente no lineales y que son del 15/05/95, 27/08/97 (que también se presentan en Diana/La Venta) y 27/12/98. El cociente promedio de los posibles eventos no lineales bordea o se encuentra por debajo del límite inferior de la desviación estándar en ambas direcciones, notándose que en la dirección EO el mayor pico espectral de este cociente se ubica por debajo de la desviación estándar correspondiente al mayor pico espectral del promedio lineal. La superposición de los cocientes promedio muestra una disminución de las frecuencias asociadas a los modos de los posibles no lineales con respecto al promedio lineal siendo más notorio en la dirección NS; en ambas direcciones las ordenadas espectrales de los posibles no lineales son menores desde la frecuencia correspondiente al mayor pico espectral y a través de la mayoría de la alta frecuencia, la mayor disminución se presenta para el pico espectral en la dirección EO.

Por lo observado, sobre todo con los cocientes de Diana/Diana Pozo, se concluye que en esta región los eventos del 15/05/95, 27/08/97 y 27/12/98 presentan evidencia de haber tenido un estado de transición hacia un comportamiento no lineal.

5.5.3 REGIONES 1 AL 5

Como se concluyó en el anterior capítulo, los efectos de sitio son similares y no se observa que el acimut influya de gran manera en las regiones 2 al 5, por lo que ahora se procederá a calcular los cocientes espectrales promedios de todos los eventos lineales y los posiblemente no lineales que pertenecen a estas regiones; se agregarán también los dos sismos que pertenecen a la región 1, cuyos cocientes espectrales son también semejantes a los de las regiones 2 al 5; de esta manera se está representado la respuesta sísmica y el comportamiento del suelo (lineal o posiblemente no lineal) de estas regiones en conjunto.

La figura 5.46 presenta los cocientes promedio de los eventos pertenecientes a las regiones 1 al 5 de los pares de estaciones Diana/La Venta y Diana/Diana Pozo. Observando los cocientes de Diana/La Venta, se tienen 21 sismos con comportamiento lineal y se plantea 9 con comportamiento posiblemente no lineal; el promedio de los eventos posibles no lineales se ubican dentro de los límites de la desviación estándar de los eventos lineales; la superposición de los promedios muestra que las amplificaciones relativas máximas correspondientes a los posibles no lineales tienen menor frecuencia con respecto a las del promedio lineal, sin embargo sólo en la dirección NS el valor de esta amplificación máxima es menor respecto a la del promedio lineal; en la alta frecuencia las amplificaciones relativas del promedio de los posibles no lineales son mayores respecto a las del promedio lineal en ambas direcciones.

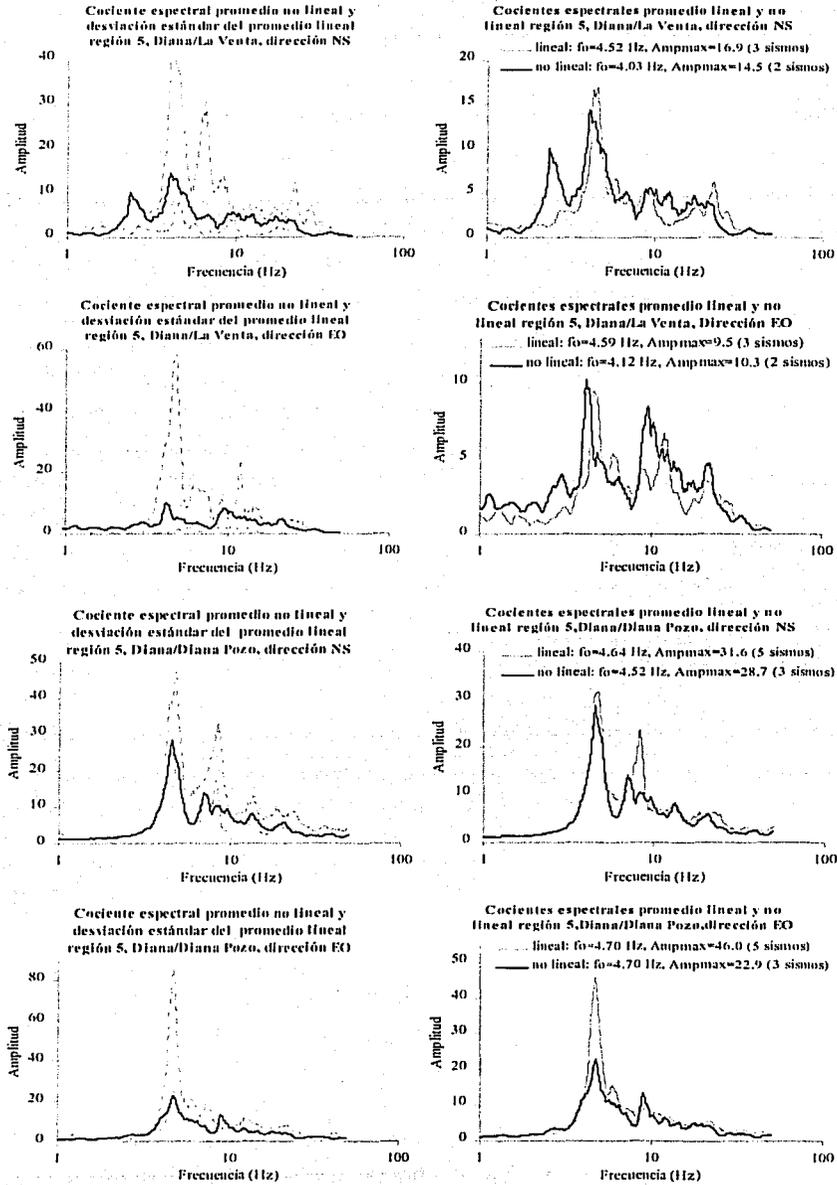


Figura 5.45

TESIS CON FALLA DE ORIGINAL

Para el par de estaciones Diana/Diana Pozo, se cuenta con 23 sismos con comportamiento lineal y se proponen 3 con comportamiento no lineal y que son los mismos que ya se analizaron en la región 5; es decir que para este par de estaciones sólo se está aumentando el número de eventos para el promedio lineal. Los promedios de los posibles eventos no lineales en algunos intervalos de frecuencia se ubican dentro de los límites de la desviación estándar del promedio lineal y en otros bordeando el límite inferior, sobre todo en la dirección EO; de la superposición de los cocientes espectrales promedio, en la dirección NS las amplificaciones relativas máximas de los promedios son iguales, pero en la dirección EO la del posible no lineal es menor en comparación con el del comportamiento lineal; en la mayor parte de la alta frecuencia, las amplificaciones relativas del promedio de los posibles no lineales son menores respecto a los de los lineales.

De Diana/La Venta, las diferencias observadas entre los promedios en las superposiciones de las regiones 2 y 3 disminuyen en comparación con los promedios obtenidos para las regiones 1 al 5 juntas. Sin embargo, no llegan a ser del todo convincentes para poder concluir que hubo un comportamiento no lineal. Se concluye que en estas regiones los eventos: 16/08/88, 09/01/92, 10/07/90, 09/11/89, 24/10/93, 13/01/90 y 25/04/89 podrían haber presentado un comportamiento no lineal. Estos sismos no han sido registrados en la estación Pozo Diana lo que no permite tener una comparación de cocientes espectrales con esta estación de referencia y tener así una mejor conclusión respecto a estos sismos, lo que sí se puede hacer con los eventos 15/05/95 y 27/08/97.

De Diana/Diana Pozo, al aumentar el número de eventos en el promedio lineal se sigue manteniendo las diferencias con el promedio no lineal observadas en la región 5; por lo que se concluye que los eventos 15/05/95, 27/12/98 y 27/08/97 presentan evidencia de haber tenido un estado de transición hacia un comportamiento no lineal.

5.5.4 REGION 6

La figura 5.47 presenta la superposición del cociente espectral promedio lineal de 5 sismos (de los cuales tres fueron registrados en las tres estaciones) con el cociente espectral del evento 01/06/98 el cual posiblemente presenta un comportamiento no lineal.

Los cocientes Diana/La Venta muestran que el evento 01/06/98 presenta en ambas direcciones, mayores amplificaciones relativas que el promedio lineal y no presenta algún desplazamiento de los picos espectrales hacia frecuencias menores.

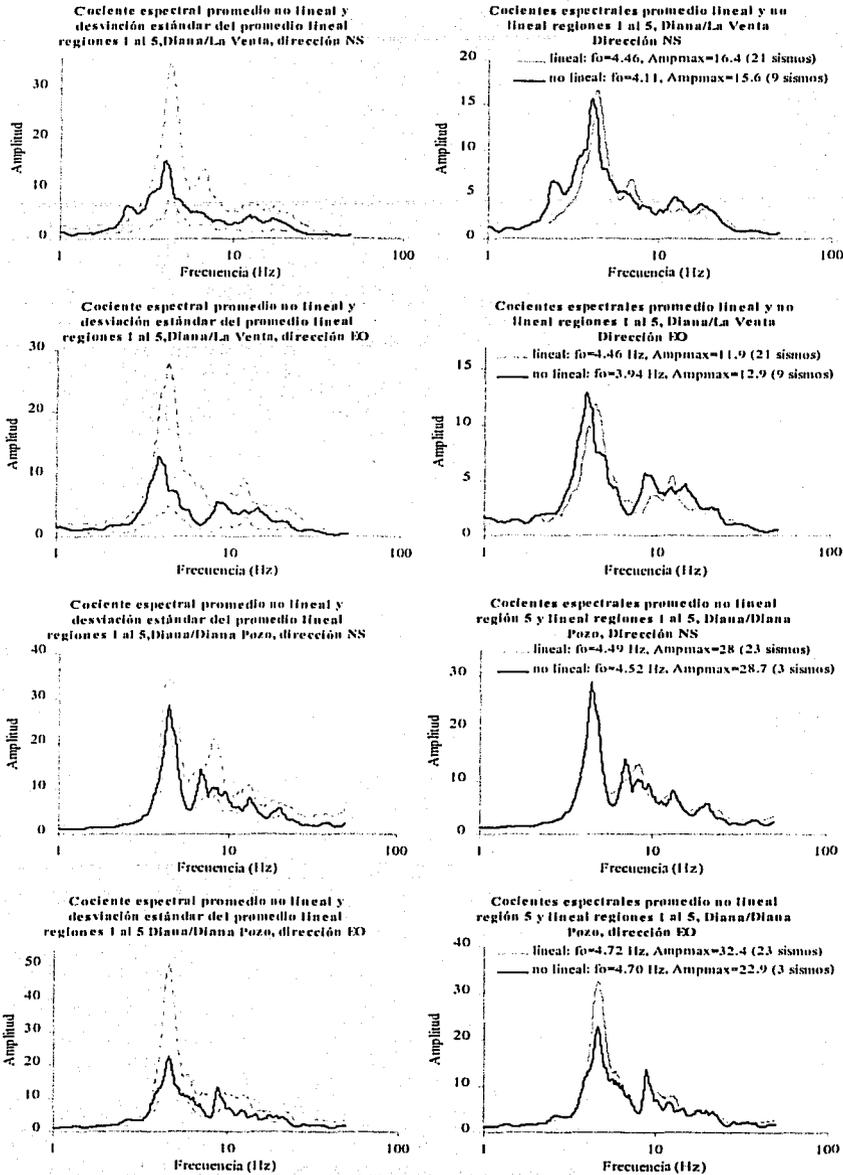


Figura 5.46

TESIS CON
FALLA DE CALIFICACION

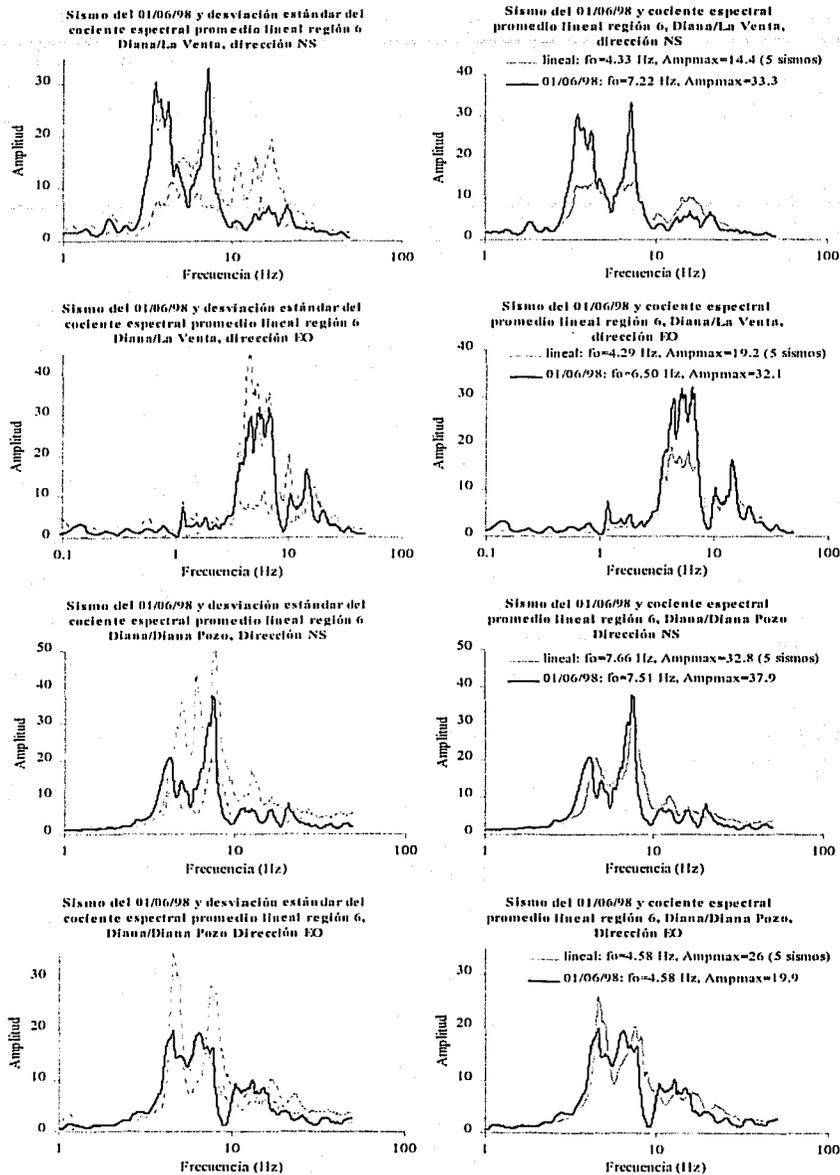
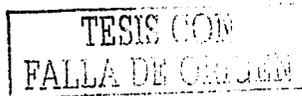


Figura 5.47



Sin embargo, para Diana/Diana Pozo se observa que en ambas direcciones y a través de la mayor parte de la frecuencia, los cocientes espectrales del sismo 01/06/98 superan el límite superior o se encuentran por debajo del límite inferior de la desviación estándar de los promedios de los eventos lineales. El cociente de este sismo muestra con respecto al promedio de los lineales una disminución de sus picos espectrales, salvo el máximo en la dirección NS, y el desplazamiento de éstos a frecuencias menores. La amplificación relativa de este cociente espectral se mantiene en la alta frecuencia, por debajo del cociente promedio lineal, salvo para un intervalo en la dirección EO.

Se concluye, sobre todo por lo observado en el par de estaciones Diana y Diana Pozo, que el evento del 01/06/98 presenta evidencias de un comportamiento no lineal.

5.5.5 REGION 7

La figura 5.48 muestra los cocientes espectrales promedio lineal correspondiente a 7 sismos para el par de estaciones Diana y La Venta y 15 sismos para el par Diana y Diana Pozo; los dos sismos con posible comportamiento no lineal son del 17/07/98 y 08/10/01 y fueron registrados en las tres estaciones.

Se observa en los cocientes de Diana/La Venta que los promedios de los eventos posiblemente no lineales se ubican, en ciertos intervalos de frecuencia, dentro de los límites de la desviación estándar y en otros intervalos bordea o supera el límite superior o se encuentra por debajo del límite inferior. El pico espectral mayor del promedio en la dirección NS presenta un mayor valor de amplificación respecto al promedio de los lineales, pero su frecuencia asociada es menor, en ciertos intervalos de la alta frecuencia sus amplificaciones relativas son menores respecto a los del promedio lineal; en la dirección EO es notorio que sus amplificaciones relativas son mayores a los del promedio lineal en la mayor parte de la frecuencia.

En los cocientes de Diana/Diana Pozo, el promedio de los posibles no lineales en la dirección NS se encuentra en un intervalo de la baja frecuencia por encima del límite superior de la desviación estándar del promedio lineal y en otros por debajo del límite inferior, en la alta frecuencia se ubica dentro de los límites; en la dirección EO nuevamente en un intervalo de la baja frecuencia supera el límite superior y a medida que aumenta el valor de la frecuencia bordea o se encuentra por debajo del límite inferior, se señala que el mayor pico espectral de este promedio se encuentra por debajo del límite de esta desviación. Al observar la superposición de los promedios lineal y de los posibles no lineales, en ambas direcciones se nota una disminución de los mayores picos espectrales y es en la dirección NS donde se observa un desplazamiento de éstos a menores frecuencias, en la dirección EO no se observa este desplazamiento.

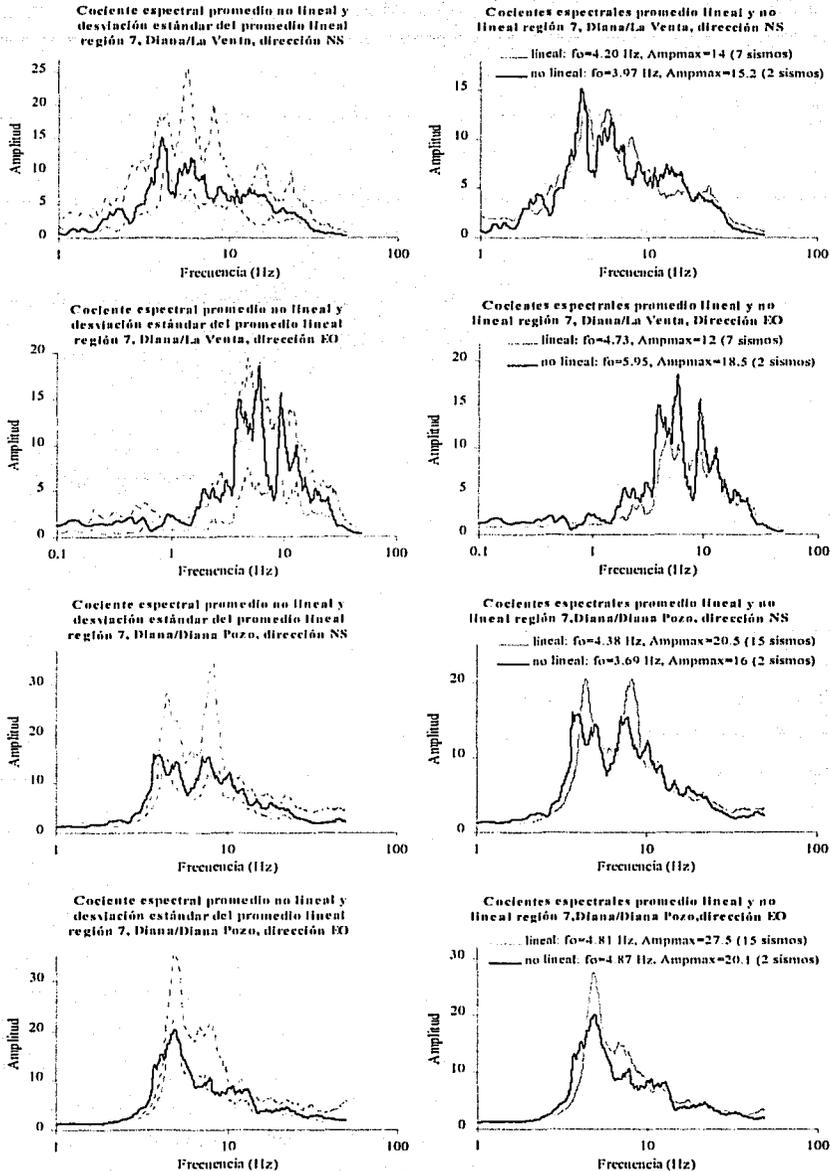


Figura 5.48

TESIS CON
FALLA DE CUBIEN

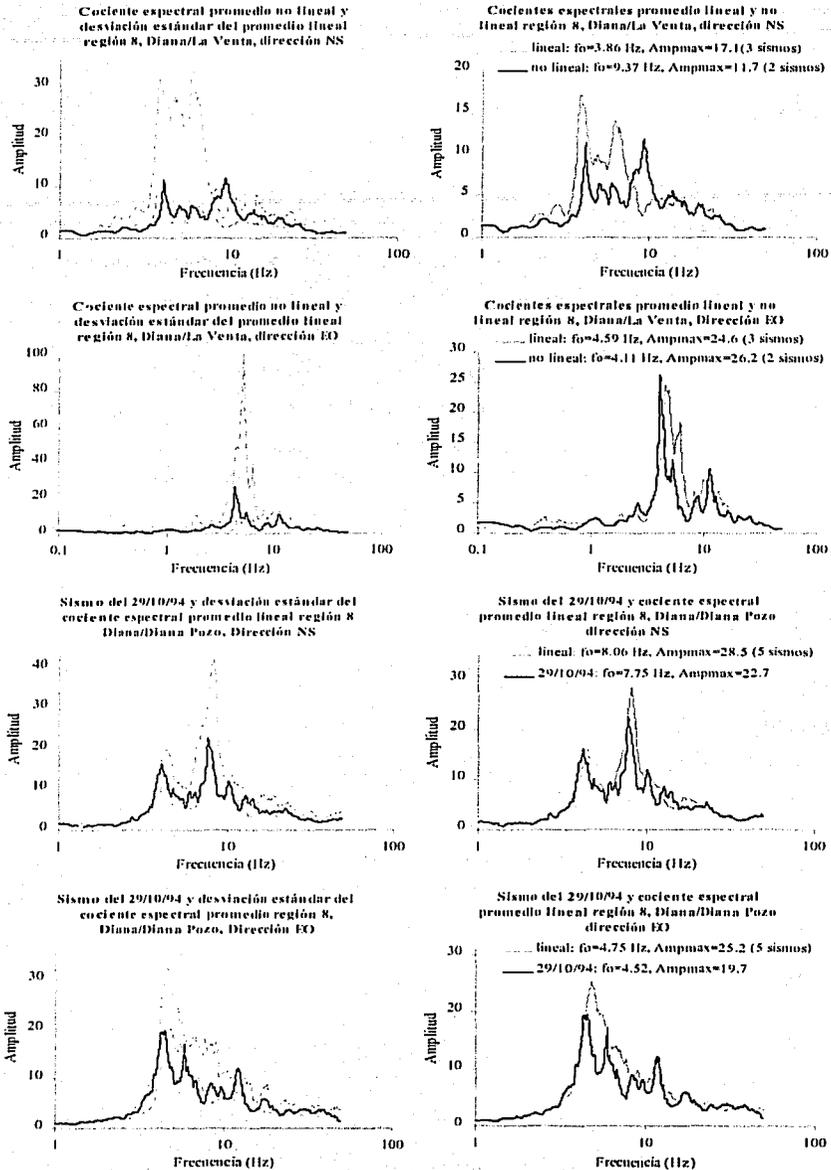


Figura 5.49

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

De este análisis se concluye que los eventos 17/07/98 y 08/10/01 presentan evidencias de un comportamiento no lineal, siendo más claras en los cocientes de la estaciones Diana y Diana Pozo.

5.5.6 REGION 8

La figura 5.49 muestra los cocientes espectrales promedio lineal correspondiente a 5 sismos para el par de estaciones Diana y La Venta y 6 sismos para el par Diana y Diana Pozo; se proponen dos sismos con posible comportamiento no lineal y son del 17/08/89 y 29/10/94 siendo este último el registrado en las tres estaciones.

El cociente de Diana/La Venta en la dirección NS muestra que el promedio de los posiblemente no lineales tiene la misma forma espectral y menores amplitudes que el promedio de los lineales, pero las frecuencias asociadas a los picos espectrales son mayores respecto a los lineales, todo lo contrario de lo que se espera para un comportamiento no lineal; sin embargo en la dirección EO este promedio presenta menores amplificaciones relativas en la baja y alta frecuencia, salvo el mayor pico espectral, y las frecuencias asociadas a los picos espectrales son menores respecto al promedio lineal; este promedio se ubica en ciertos intervalos de frecuencia dentro de los límites de la desviación estándar del promedio lineal y en otros intervalos debajo del límite inferior.

Para Diana/Diana Pozo, el cociente espectral del evento 29/10/94 se ubica en el borde o por debajo del límite inferior de la desviación estándar del promedio lineal, siendo más notorio en la dirección EO. De igual manera al observar la superposición de los promedios en ambas direcciones, los picos espectrales son menores y se han desplazado hacia frecuencias menores respecto a los del promedio lineal.

Se concluye que los sismos del 17/08/89 y 29/10/94 presentan características de haber presentado un comportamiento del tipo no lineal en estas regiones.

5.6 CONCLUSIONES

Las figuras 5.50 y 5.51 muestran las gráficas que relacionan las aceleraciones máximas en Diana con las aceleraciones máximas de las estaciones La Venta y Diana Pozo así como la aceleración máxima en roca (La Venta y Diana Pozo) con el factor de amplificación de aceleración máxima en Diana. Estas gráficas presentan formas similares a las presentadas por Idriss (1991) mostradas en las figuras 5.1 y 5.2; y muestran la tendencia de un comportamiento no lineal de este suelo a medida que aumenta su aceleración horizontal máxima.

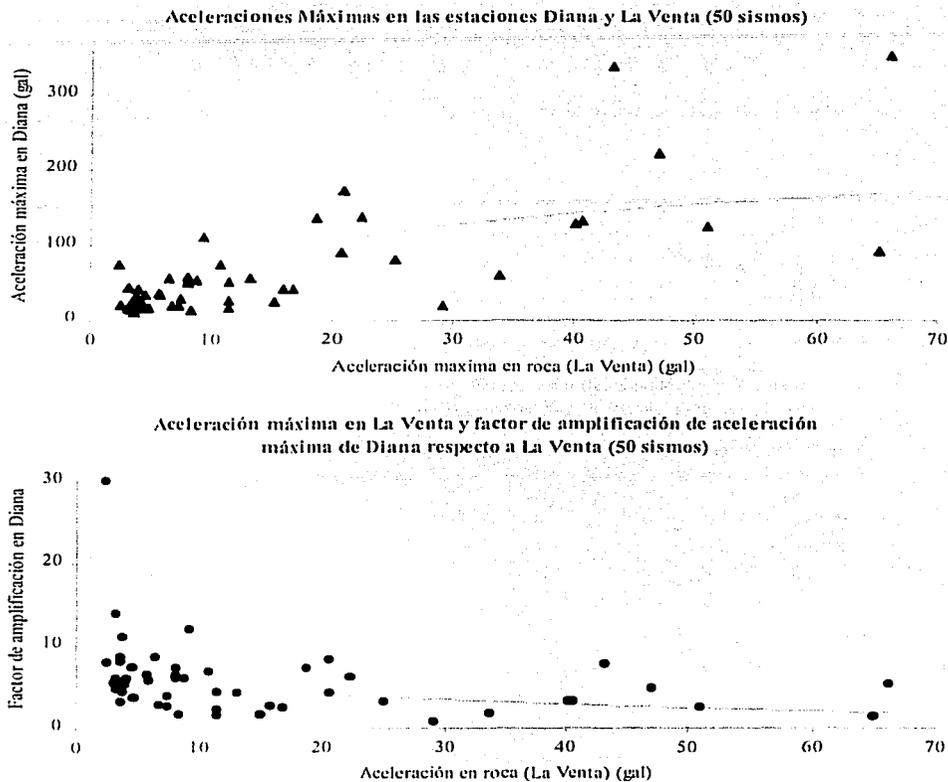
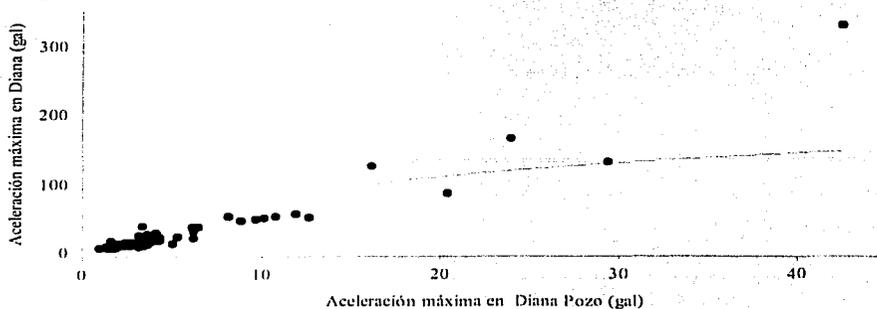


Figura 5.50

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Esta tendencia se confirma mediante la figura 5.52 la cual muestra la relación de los factores de amplificación relativa máxima (parte inferior) obtenida de los cocientes espectrales y de amplificación de aceleración máxima (parte superior) para Diana con la aceleración máxima para los 72 eventos registrados. Puede observarse cómo hay una correspondencia entre ambos gráficos en la distribución del valor de estos factores respecto a la aceleración máxima en Diana. En forma general, se puede establecer que los sismos con aceleración máxima hasta los 70 gal presentan los mayores factores tanto de aceleración como de amplificación, lo que está indicando un comportamiento lineal hasta este nivel de aceleraciones; los eventos con aceleraciones mayores a 70 gal muestran factores con valores menores respecto a los máximos presentados antes de los 70 gal; se puede notar que se establece un umbral en

Aceleraciones máximas en las estaciones Diana y Diana Pozo (55 sismos)



Aceleración máxima en Diana Pozo y factor de ampliación de aceleración máxima de Diana respecto a Diana Pozo (55 sismos)

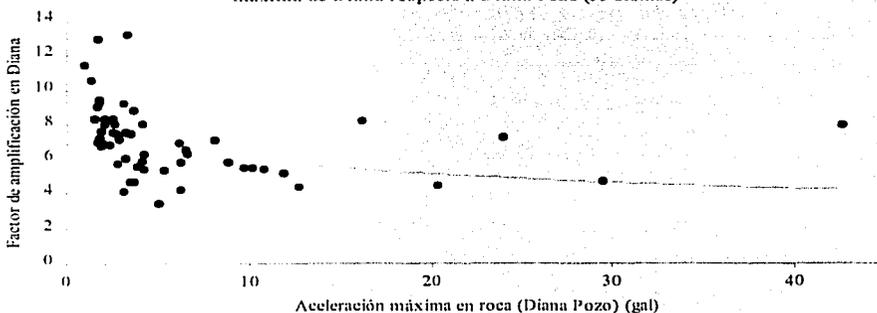


Figura 5.51

ambas gráficas, cuyo valor no es superado a medida que aumenta la aceleración máxima en Diana y que son de 9 veces para el factor de aceleración y de 42 veces para el factor de ampliación relativa máxima; estos resultados indican que el suelo en estos niveles de aceleraciones presenta un comportamiento del tipo no lineal.

De la superposición de los cocientes espectrales promedio lineales y no lineales efectuada por regiones, se llega a comprobar que 9 eventos cumplen de manera parcial o total con que sus cocientes espectrales presentan ampliificaciones relativas máximas y frecuencias fundamentales asociadas menores con respecto a las del promedio lineal; sin embargo esto no se pudo comprobar para los sismos 16/08/88, 25/04/89, 09/11/89, 13/01/90, 10/07/90 y 24/10/93; el sismo 16/08/88 pertenece a la región 1 y el resto a la región 3. Observando la figura 5.52 estos eventos presentan aceleraciones máximas desde 80 a 351 gal y por lo tanto se ubican en el intervalo de aceleraciones donde los factores de ampliación

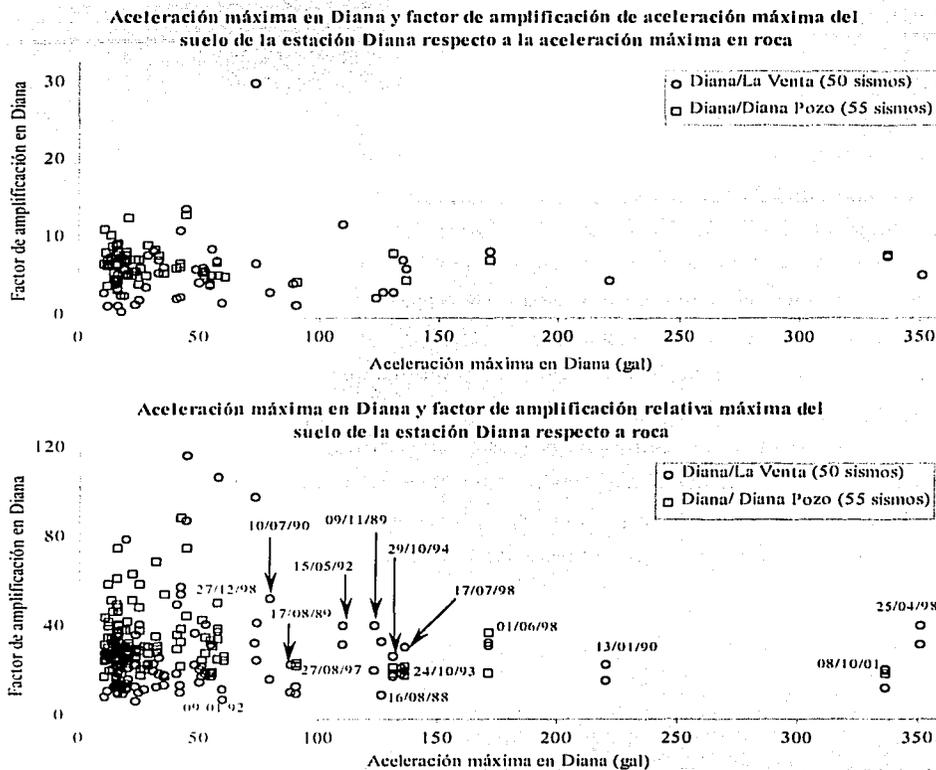


Figura 5.52

relativa máxima y de aceleración máxima representan un comportamiento no lineal del suelo; no obstante en la superposición de cocientes espectrales promedio tanto de la región 3 como de la 1 al 5, las frecuencias fundamentales promedio asociadas a la máximas amplificaciones relativas del promedio no lineal son menores respecto a las del promedio lineal, pero estas amplificaciones no tienen valores menores con respecto al promedio lineal; además estos promedios no se ubican fuera de la respectiva desviación estándar. Esto es debido a que los sismos considerados lineales no presentan en su mayoría amplificaciones relativas máximas mayores a los considerados no lineales lo cual se refleja en el correspondiente promedio. Estos sismos sólo han sido registrados en las estación de referencia La Venta, lo que no permite tener conocimiento de la respuesta del suelo con respecto a Diana Pozo y así poder comparar con los resultados obtenidos en La Venta como se ha hecho con otros eventos. Se espera que

futuros sismos con comportamiento lineal pertenecientes a estas regiones y registrados en las estaciones Diana y La Venta presenten ampliificaciones relativas de mayor valor respecto a las no lineales y así comprobar este comportamiento mediante los cocientes espectrales promedio.

Se ha observado también que los eventos 09/01/92 (region 2), 15/05/95, 27/08/97 y 27/12/98 (estos tres pertenecientes a la región 5) han presentado lo que se ha definido como un estado de transición a un comportamiento no lineal, esto debido a que presentan de manera parcial las condiciones para tal comportamiento la cual es consecuencia de haber tenido aceleraciones bajas cuyos valores variaron entre los 55 y 90 gal; en otras regiones no se han observado para eventos en este nivel de aceleraciones esta transición sino un comportamiento lineal. Ante estos resultados se propone que el suelo de la estación Diana se puede comportar según su aceleración horizontal máxima de tres maneras: hasta los 50 gal con comportamiento lineal; entre los 50 y 100 gal con comportamiento en tránsito a ser no lineal, es decir su cociente espectral presenta en forma parcial las características de disminución de la frecuencia fundamental y de su amplitud máxima asociada con respecto al promedio lineal además de no encontrarse dentro de la desviación estándar respectiva, en este intervalo de aceleraciones también se presentan eventos con comportamiento lineal; y mayores a 100 gal con comportamiento no lineal.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

Se pudieron estimar los efectos de sitio en el suelo donde se ubica la estación acelerográfica Diana, pero no se puede representar estos efectos mediante un valor promedio que involucre a los 72 sismos con los que se ha trabajado, esto debido a que al dividir en regiones la distribución de los epicentros, los resultados obtenidos muestran variaciones respecto a los valores totales promedio. Esto debido a los efectos por acimut la cual se traduce posiblemente en irregularidades laterales en el subsuelo que pueden estar provocando efectos bidimensionales o tridimensionales de diversa magnitud.

Se establecieron 8 regiones alrededor de esta estación de las cuales las numeradas del 1 al 5 presentan valores de frecuencia y periodo fundamental promedio y formas del cociente espectral similares, variando sólo en el valor de la amplificación relativa máxima; las regiones 6, 7 y 8 presentan sólo los valores de frecuencia o periodo fundamental promedio similares, la forma del cociente espectral y el valor de la amplificación máxima relativa varían, estos valores en resumen se muestran en la tabla 4.17.

Las conclusiones anteriores son con base en los resultados estimados teniendo como estaciones de referencia a La Venta y Diana Pozo; de los análisis realizados primero con 33 sismos registrados simultáneamente en las tres estaciones y luego de los realizados con los sismos registrados en las estaciones Diana – La Venta y Diana – Diana Pozo, los obtenidos teniendo como estación de referencia a Diana Pozo presentan menos dispersión en los valores de frecuencia o periodo fundamental comparándolos con los estimados con La Venta, esto se puede apreciar en la figura 4.86. La diferencia en los valores de frecuencia fundamental, mayor desviación estándar y menores amplitudes de los cocientes espectrales en alta frecuencia estimados con La Venta se deben a que esta estación presenta el efecto de superficie libre (debido a los campos incidente y reflejado de ondas) y de baja impedancia (producto del inemperismo) lo cual se refleja en los espectros de amplitudes de Fourier de aceleración los cuales en alta frecuencia son mayores en comparación con los estimados con Diana Pozo (campo difractado de ondas) estación que no presenta estos efectos, dando como consecuencia que la respuesta obtenida con respecto a La Venta esté subestimada. Además, la estación Diana Pozo se encuentra debajo de la estación Diana, en comparación con La Venta que se encuentra a 9.4 Km de distancia, lo que puede involucrar efectos por trayectoria que afecte a la propagación de ondas o de acimut para ciertos eventos.

Por lo anteriormente expuesto se llega a la conclusión que la estación Diana Pozo presenta mejores condiciones que la estación La Venta para ser utilizada como estación de referencia.

La distancia epicentral influye en los valores de la frecuencia fundamental y de la amplificación relativa máxima, hasta los 70 Km se presentan los mayores valores lo cual puede deberse a efectos de campo cercano, también a esta distancia se presentan los menores valores de ambos parámetros; eventos con distancia mayores a los 70 Km presentan valores más estables, esto se muestra en la figura 4.88.

Se tienen tres eventos con distancias epicentrales mayores a 300 Km, el 15/06/99 y 30/09/99 que pertenecen respectivamente a las regiones 2 y 3, presentan valores de frecuencia fundamental similares y de amplificaciones relativas máximas aproximados, lo que estaría indicando que estos valores son independientes del acimut; sin embargo el evento del 11/01/97 que pertenece a la región 7 presenta valores diferentes en frecuencia fundamental pero similares en amplificación relativa máxima con respecto a los anteriores eventos, los valores de frecuencia de este sismo son similares al resto que pertenecen a este evento, lo que indicaría que tanto sismos cercanos como lejanos a la estación Diana en esta región dependen del acimut. Esta comparación se cumple para los valores obtenidos de usar ambas estaciones de referencia. Esta conclusión cumple de manera parcial con lo propuesto por Singh et al (1988) que establece que los cocientes espectrales con respecto a C.U. son independientes del acimut para distancias epicentrales mayores a 200 Km.

No es confiable estimar efectos de sitio con un número reducido de eventos, las figuras 4.50 y 4.57 muestran claramente la variación de la amplitud de los cocientes espectrales correspondientes a eventos de magnitud desde 3.5 a 7.5, distribuidos en 50 sismos para Diana-La Venta y 55 sismos para Diana-Diana Pozo. Debido a la variabilidad en la respuesta sísmica que presenta el suelo con cada evento, es necesario hacer nuevas estimaciones con sismos que se registren en el futuro y así actualizar los valores de los efectos de sitio.

Solo las estaciones acelerográficas ubicadas en zonas sísmicas muy activas pueden ofrecer la oportunidad de contar con una cantidad de registros que abarquen las diferentes respuestas que un suelo puede tener debido a sismos de diferentes características; en estaciones que se encuentran en zonas no muy activas, se debe proceder con cuidado al momento de utilizar los pocos registros que pueda tener para estimar e interpretar los efectos de sitio, ya que es posible que estos registros no reflejen en gran medida los diferentes comportamientos del suelo donde esta instalada esta estación.

Se ha presentado comportamiento no lineal en este suelo, la figura 5.52 muestra como los factores de amplificación relativa máxima y de aceleración máxima disminuyen a medida que aumenta la aceleración máxima en la estación Diana. El suelo se comporta de tres maneras según la aceleración máxima que experimente: hasta los 70 gal presenta un comportamiento lineal, entre los 70 y 100 gal puede presentar un comportamiento lineal así como un estado de transición hacia un comportamiento no lineal, y para aceleraciones mayores a 100 gal muestra un comportamiento no lineal. Las características no lineales de los eventos dependerán de la región a la cual pertenezcan. Beresnev et al (1996) menciona que varias observaciones sismológicas indican entre los 100 y 200 gal como el umbral a partir del cual el comportamiento no lineal del suelo es perceptible, los resultados de este trabajo concuerdan con esta afirmación.

Se observa que este comportamiento no lineal es de un nivel moderado, se debe tener presente que el suelo presenta en promedio valores de periodo predominante de 0.12 a 0.25 s. dependiendo de la región donde se ubique el sismo, lo que nos indica que es un suelo tipo firme y como consecuencia al presentarse un comportamiento no lineal el periodo se reduce en 0.01 a 0.03 s y las amplificaciones máximas se reducen entre 5 a 20 unidades.

Se recomienda realizar estudios con el suelo de la estación Diana que involucre un modelo bidimensional o tridimensional de ondas, de manera de poder encontrar explicación a la diferencia de valores en la frecuencia o periodo fundamental y a las diferentes formas de los cocientes espectrales obtenidas en este trabajo.

También se propone realizar un estudio similar de identificar un comportamiento no lineal del suelo, es decir usando el método de cocientes espectrales, para un tipo de suelo que sea blando con el objetivo de compararlos con los resultados obtenidos para el suelo de la estación Diana.

REFERENCIAS

Beresnev I. A., Wen K. L. (1996). Nonlinear soil response – A reality?. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 86, N° 6, pp. 1964-1978

Chávez-García F., Sánchez-Sesma F. J., Campillo M. y Bard P. I. (1994). El terremoto de Michoacán de septiembre de 1985: efectos de fuente, trayecto y sitio. Física de la Tierra, 6. Madrid, España, pp. 157-200.

Coyoli R., Gutierrez C., Nava E., Lermo J., Mijares H. y Rodríguez M. (1989). Análisis de las réplicas del sismo del 25 de abril de 1989, Ms = 6.8. Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero.

Gutierrez C., Lermo J., Nava E., Singh S. K., Coyoli R., Rodríguez M, Mijares H. (1989). Registro de temblores pequeños y medición de microtemblores en Acapulco para microzonificación de la ciudad. Informe del Instituto de Ingeniería de la UNAM para el Gobierno del Estado de Guerrero.

Gutierrez C., Singh S. K. (1992). A site effect study in Acapulco, Guerrero, México: comparison of results from strong-motion and microtremor data. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 82, N° 2, pp. 642-659

Idriss I.M. (1991). Earthquake ground motions at soft soil sites. Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Missouri, Vol. III, pp. 2265-2272.

Kramer S. (1996). Geotechnical earthquake engineering. Prentice-Hall, USA.

Lermo J. (1992). Observaciones de microtemblores en México y su aplicación en la Ingeniería Sísmica. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias (Geofísica). Facultad de Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México.

Mena E., Alcántara L. y Macías M. (1989). Efectos locales observados en Acapulco, Guerrero durante temblores fuertes. Memorias del VIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica y VII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero.

Montiel J., Mooser F. y Prieto R. (1988). Informe geológico en relación al riesgo sísmico de la región de Acapulco, Guerrero.

Nishenko S. P. and Singh S. K. (1987). The Acapulco-Ometepe, Mexico earthquakes of 1907-1982: evidence for a variable recurrence history. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 77, N° 4, pp. 1359-1367.

Ordaz M. y Montoya Dulché C. (2002). Programa DEGTRA A4, versión 3.0.1. Instituto de Ingeniería, UNAM.

Ovando E., Jurado T., Méndez E. y Camacho L. (1989). Recopilación y análisis de datos geotécnicos de Acapulco. Reporte Fundación Barros Sierra e Instituto de Ingeniería de la UNAM elaborado para el Gobierno del Estado de Guerrero.

Ovando E. y Romo M. P. (1992). Geotechnical aspects for the microzonation of Acapulco. *Memorias de la 10ª Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica*, Madrid, España.

Pérez-Rocha L. E. y Sánchez-Sesma F. J. (1992). Hybrid non-linear response of soft soils. *Memorias de la 10ª Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica*, Madrid, España.

Reinoso E. (2000). Estudios para la microzonificación. *Memorias del VI simposio nacional de ingeniería sísmica y II reunión sobre la enseñanza de la ingeniería sísmica en México*. Sociedad mexicana de ingeniería sísmica.

Sanchez-Sesma F.J., Pérez Rocha L. E., Rodríguez-Zuñiga J. L. y Flores-Cruz F. (1995). Efectos de sitio en la Ciudad de México a 10 años de los sismos de 1985. *La Ingeniería Civil a 10 años de los sismos de 1985*. Simposio Internacional, septiembre de 1995.

Santoyo M., (1991). Programas para el cálculo de Funciones de Transferencia y sismogramas sintéticos para un modelo Unidimensional del subsuelo, ante la incidencia de ondas tipo SH. Coordinación de Investigación. CENAPRED.

Singh, S. K., Lermo J., Dominguez T., Ordaz M., Espinoza J. M., Mena E. and R. Quaas (1988). The Mexico earthquake of september 19, - A study of amplification of seismic waves in the of Mexico with respect to a hill zone site. *Earthquake Spectra*, Vol. 4, N° 4, pp. 653-673.

Singh, S. K., Ordaz M., Pacheco J.F., Quaas R., Alcántara L., Alcocer S., Gutierrez C., Meli R. y Ovando E. (1999). A preliminary report on the Tehuacán México Earthquake of June 15, 1999 (Mw=7.0). *Seismological Research Letters*, Vol. 70, N° 5, pp. 489-504.

Singh, S. K., Ordaz M., Alcántara L., Shapiro N., Kostoglodov V., Pacheco J.F., Alcocer S., Gutierrez C., Quaas R., Mikumo T. and Ovando E. (2000). The Oaxaca Earthquake of 30 September 1999 (Mw=7.5): A Normal-faulting Event in the Subducted Cocos Plate. *Seismological Research Letters*, Vol. 71, N° 1, pp. 67-78.

Seed H. B. (1986). Influencia de las condiciones locales del suelo en movimientos del terreno y en daños a edificios durante sismos. Octava conferencia Nabor Carrillo. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.

Steidl J. H., Turmakin A. G. and Archuleta R. J. (1996). What is a reference site?. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, N° 6, pp. 1733-1748.

TGC Geotecnia S.A. de C. V. (2000). Trabajos geotécnicos para la instalación de un sensor sísmico, Acapulco, Guerrero. Encargado por el Instituto de Geofísica de la UNAM.