



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO
EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**“Uso de familias espectrales obtenidas con registros de
sismos y microtemores para la clasificación de terrenos
con fines de diseño sísmico. Aplicación en las ciudades
de Veracruz-Boca del Río, Oaxaca y Acapulco”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRA EN INGENIERÍA
(GEOTECNIA)**

P R E S E N T A:

Felicita Marlene Limaymanta Mendoza

DIRECTOR DE TESIS: M. en C. Javier Francisco Lermo
Samaniego



Ciudad Universitaria, México D.F. 2009

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Gabriel Yves Armand Auvinet

Secretario: Dr. Efrain Ovando Shelley

Vocal: M.en C. Javier F. Lermo Samaniego

1° Suplente: Dr. Javier Avilés López

2° Suplente: Dr. Jaime Garcia Pérez

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería de la UNAM, Ciudad Universitaria, México, DF.

TUTOR DE TESIS

M.en C. Javier F. Lermo Samaniego

FIRMA

*A mi mamita, Felicita Fortunata Carrión Paucar,
por recibirme con los brazos abiertos cuando era una bebe
y desde entonces dedicarse a cuidarme, educarme, enseñarme
a enfrentar las dificultades de la vida y a ser una persona
que busque su realización. Por su amor y apoyo incondicional
hasta el último minuto de su vida y por ser un ejemplo de vida.*

AGRADECIMIENTOS

Doy gracias a Dios por la fortaleza y fuerza que me dio desde que llegué a México y cuando se presentaron situaciones difíciles durante la maestría y la realización de esta tesis.

A mi papá Alejandro, por apoyarme siempre en todas mis decisiones y por motivarme a seguir avanzando en mi profesión. Gracias por tus consejos y por amarme tanto. Eres un gran ejemplo.

A mi mamá Elsa Mendoza por estar a mi lado y darme su apoyo en todo, a Raúl Patilongo por apoyarme como un padre, a mis hermanos, Hoover y Meli, gracias por su comprensión durante estos años fuera de casa.

A toda mi familia, tíos, tías, primos, primas, sobrinos y sobrinas, por estar conmigo, aún en la distancia. Gracias por estar siempre pendientes de mí.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme todas las facilidades para estudiar la maestría. Así como también al Instituto de Ingeniería, donde adquirí conocimientos valiosos que estoy segura me será útil en mi vida profesional.

A mi tutor, Javier F. Lermo Samaniego, quién compartió conmigo sus conocimientos, su experiencia profesional y porque me apoyó cuando más lo necesité. Gracias por sus consejos.

A mis amigos, Marcia Oliveira y Yuri Valderrama, por su amistad, por ayudarme a hacer tareas en la maestría, y por su disposición a escucharme siempre.

A mis amigos de la Torre de Ingeniería, Sandra, Benjamín, Orlando y Ricardo, por su amistad y por los momentos de alegría durante las comidas, momentos que me ayudaron a relajarme para continuar con la tesis, mil gracias.

Muchas gracias a Edelmira de Ledesma, Eduardo Ledesma, Pilar, Lucy, Norma y todos mis amigos del Sector Dos. Gracias por preocuparse por mí y por sus oraciones.

A Horte, por su amistad incondicional. Mil gracias a Luis Flores, por compartir sus conocimientos conmigo y por esas largas pláticas sobre la geotecnia y sus aplicaciones.

A mis amigos del CISMID, por darme su amistad aún en la distancia, gracias por no olvidarse de mí, por estar pendientes y recibirme tan bien en cada visita a Lima.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 2: EFECTOS DE SITIO	3
2.1 INTRODUCCIÓN	3
2.2 NATURALEZA DEL EFECTO DE SITIO	3
2.3 PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL RECONOCIMIENTO DEL EFECTO DE SITIO	4
2.4 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA	5
2.5 MÉTODOS PARA OBTENER LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA Y EVALUAR EL EFECTO DE SITIO	6
2.5.1 Métodos teóricos	6
2.5.2 Métodos empíricos	6
2.5.2.1 <i>Estimación con Registros de Movimientos Fuertes</i>	7
2.5.2.1.1 <i>Razón espectral estándar (SSR)</i>	7
2.5.2.1.2 <i>Razón espectral de la componente horizontal a la componente vertical, Técnica de Nakamura para sismos, (HVSR)</i>	8
2.5.2.2 <i>Estimación con Registros de Movimientos débiles</i>	8
2.5.2.3 <i>Estimación con Registros de Microtremores</i>	8
2.5.2.3.1 <i>Razón Espectral Relativa a la Componente Vertical, Técnica de Nakamura (HVNR)</i>	9
2.6. RELACIÓN ENTRE EL EFECTO DE SITIO Y DAÑOS EN EDIFICIOS	11
2.7 COMENTARIOS	12
CAPÍTULO 3: EFECTOS DE SITIO EN LOS CÓDIGOS DE DISEÑO SÍSMICO	13
3.1 INTRODUCCIÓN	13
3.2 CÓDIGOS DE DISEÑO SÍSMICO ANTES DE 1985	13
3.2.1 Reglamento de construcción de 1954 en Japón	13
3.2.2 Reglamento de construcción de Chile-1960	14
3.2.3 Reglamentos de Construcción en México	14
3.2.3.1 <i>Reglamento de Construcción del Distrito Federal después del terremoto de El Ángel</i>	14
3.2.3.2 <i>Manual de Obras Civiles de la CFE en 1969</i>	16
3.2.3.3 <i>Reglamento de Construcción del Distrito Federal en 1976</i>	16
3.2.3.4 <i>Manual de Obras Civiles de la CFE en 1981</i>	17
3.2.4 Estados Unidos Americanos	18
3.2.4.1 <i>Reglamento de Construcción en 1976</i>	18
3.2.4.3 <i>Reglamento de Construcción en 1978</i>	19
3.2.4.5 <i>Reglamento de construcción en 1985</i>	19
3.3 CÓDIGOS DE DISEÑO DESPUÉS DE 1985	21
3.3.1 México	21
3.3.1.1 <i>Reglamento de construcción del Distrito Federal después del terremoto de Michoacán</i>	21
3.3.1.2 <i>Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad en 1993</i>	21
3.3.1.3 <i>Reglamento de construcción del Distrito Federal versión 2004</i>	22
3.3.2 Estados Unidos de Norte América	23
3.3.2.1 <i>Normas para diseño sísmico en 1988</i>	23
3.3.2.3 <i>Normas para diseño sísmico de 2000</i>	24
3.4 EFECTO DE SITIO RELACIONADO CON LA INTENSIDAD DE MOVIMIENTO DE LA ROCA EN LAS NORMAS DE DISEÑO SÍSMICO	26
3.4 COMENTARIOS	29
CAPÍTULO 4: CLASIFICACIÓN DE TERRENOS DE CIMENTACIÓN CON FINES DE DISEÑO SÍSMICO	31
4.1 INTRODUCCIÓN	31
4.2 CODIGOS NACIONALES	31
4.2.1 Clasificación de terrenos de cimentación en el Manual de Obras Civiles, diseño por sismo de la	31

CFE-1993	31
4.2.2 Clasificación de terrenos de cimentación en las NTC para diseño por sismo del Distrito Federal	34
4.2.3 Clasificación de terrenos de cimentación en la Zona Conurbada de Veracruz-Boca del Río (ZCV)	36
4.2.4 Clasificación de terrenos de cimentación en el Reglamento de Construcción para la Ciudad de Acapulco	38
4.2.5 Clasificación de terreno en el Reglamento de Construcción del Estado de Oaxaca	39
4.3 CODIGOS INTERNACIONALES	40
4.3.1 Parámetro VS30	41
4.3.2 Aplicaciones y Aportaciones	43
4.3.2.1 Factores de sitio para periodo corto y largo en función del VS30	43
4.3.2.2 Calculo del VS30 a partir de perfiles de velocidad menores a 30 m	44
4.4 OTROS SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN	47
4.5 COMENTARIOS	49
CAPÍTULO 5: PROCEDIMIENTO PARA CLASIFICAR LOS TERRENOS DE LA ZCV, OAXACA Y ACAPULCO	51
5.1 INTRODUCCIÓN	51
5.2 INFORMACIÓN GEOLÓGICA, GEOTÉCNICA Y GEOFÍSICA	51
5.3 CÁLCULO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EMPÍRICA PROMEDIO (FTEP)	52
5.4 OBTENCIÓN DE FAMILIAS ESPECTRALES SEGÚN LAS FORMAS ESPECTRALES DE LAS FTEP Y MICROZONACIÓN	54
5.5 CÁLCULO DE LAS FTT Y MODELOS ESTRATIGRÁFICOS	54
5.5.1 Espesores de los estratos	55
5.5.2 Velocidad de onda de corte	55
5.5.3 Amortiguamiento	59
5.5.4 Densidad de los suelos	59
5.6 CLASIFICACIÓN DE TERRENOS	59
5.7 COMENTARIOS	61
CAPÍTULO 6: CLASIFICACIÓN DE TERRENOS DE LAS CIUDADES DE VERACRUZ-BOCA DEL RIO, ACAPULCO Y OAXACA	62
6.1 INTRODUCCIÓN	62
6.2 CIUDAD DE VERACRUZ-BOCA DEL RIO (ZCV)	62
6.2.1 Geología	62
6.2.1.1 Depósito de Arenisca-Conglomerado T(ar-cg)	62
6.2.1.2 Depósito de Coral (Qc)	62
6.2.1.3 Depósito de Playa (Qp)	62
6.2.1.4 Depósito de Dunas (Qd)	63
6.2.1.5 Depósito Aluvial (Qal)	63
6.2.2 Geotecnia	63
6.2.3 Datos geofísicos	64
6.2.3.1 Refracción sísmica	64
6.2.3.2 Vibración ambiental	69
6.2.3.3 Registro de Temblores	69
6.2.4 Obtención de familias espectrales según las formas espectrales de las FTEP y microzonación	70
6.2.5 Cálculo de las FTT y modelos estratigráficos	70
6.2.5.1 Zona IV	71
6.2.5.2 Zona III	72
6.2.5.3 Zona II	74
6.2.5.4 Zona I	75
6.2.6 Clasificación de terrenos	77
6.2.6.1 Clasificación con la IBC-2000	77
6.2.6.2 Clasificación con el Manual de Obras Civiles de la CFE-1993 y con las NTC D.F-2004	80

6.2.6.3 Clasificación con las NTC para diseño sísmico propuesto para el estado de Veracruz	82
6.2.6.4 Clasificación con el sistema propuesto por Bray et al., 2001	82
6.2.6.5 Comparación de los sistemas de clasificación	83
6.2.7 Comentarios	83
6.3 CIUDAD DE OAXACA	85
6.3.1 Geología	85
6.3.1.1 Rocas Metamórficas	85
6.3.1.2 Calizas, areniscas, lutitas y conglomerados metamorfozados	85
6.3.1.3 Areniscas y lutitas	86
6.3.1.4 Tobas andesíticas	86
6.3.1.5 Depósitos clásticos continentales	86
6.3.1.6 Depósitos aluviales	86
6.3.1.7 Depósitos de abanico aluvial	86
6.3.2 Geotecnia	86
6.3.3 Datos geofísicos	88
6.3.3.1 Refracción sísmica	88
6.3.3.2 Vibración ambiental	88
6.3.3.3 Registro de Temblores	89
6.3.4 Obtención de familias espectrales según las formas espectrales de las FTEP y microzonación	90
6.3.5 Cálculo de las FTT y modelos estratigráficos	90
6.3.5.1 Zona VI	90
6.3.5.2 Zona V	92
6.3.5.3 Zona IV	93
6.3.5.4 Zona III	94
6.3.5.5 Zona II	95
6.3.5.6 Zona I	96
6.3.6 Clasificación de terrenos	97
6.3.6.1 Clasificación con la IBC-2000	97
6.3.6.2 Clasificación con el Manual de Obras Civiles de la CFE-1993 y con las NTC D.F-2004	98
6.3.6.3 Clasificación con la norma técnica complementaria para el diseño por sismo del reglamento de construcciones del estado de Oaxaca	99
6.3.6.4 Clasificación con el sistema propuesto por Bray et al., 2001	99
6.3.6.5 Comparación de los sistemas de clasificación	99
6.3.7 Comentarios	100
6.4 CIUDAD DE ACAPULCO	101
6.4.1 Geología	101
6.4.1.1 Rocas metamórficas	101
6.4.1.2 Rocas intrusivas	101
6.4.1.3 Depósitos sedimentarios	102
6.4.2 Geotecnia	102
6.4.3 Datos geofísicos	103
6.4.3.1 Vibración ambiental	103
6.4.3.2 Registro de Temblores	104
6.4.4 Obtención de familias espectrales según las formas espectrales de las FTEP y microzonación	105
6.4.5 Cálculo de las FTT y modelos estratigráficos	106
6.4.5.1 Zona VI	106
6.4.5.2 Zona V	108
6.4.5.3 Zona IV	109
6.4.5.4 Zona III	110
6.4.5.5 Zona II	111
6.4.5.6 Zona I	113
6.4.6 Clasificación de terrenos	114
6.4.6.1 Clasificación con la IBC-2000	114
6.4.6.2 Clasificación con el Manual de Obras Civiles de la CFE-1993 y con las NTC D.F-2004	115
6.4.6.3 Clasificación con la norma técnica complementaria para el diseño por sismo del reglamento	

<i>de construcciones del estado de Guerrero</i>	116
<i>6.4.6.4 Clasificación con el sistema propuesto por Bray et al., 2001</i>	116
<i>6.4.6.5 Comparación de los sistemas de clasificación</i>	117
<i>6.4.7 Comentarios</i>	117
CAPÍTULO 7: DISCUSIÓN DE RESULTADOS	118
7.1 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN PROPUESTO	119
7.2 VERACRUZ-BOCA DEL RIO	120
7.3 OAXACA	120
7.4 ACAPULCO	122
7.5 METODOLOGÍA PROPUESTA	123
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES	124
ANEXO A	
CIUDAD DE VERACRUZ-BOCA DEL RÍO	127
ANEXO B	
CIUDAD DE OAXACA	140
ANEXO C	
CIUDAD DE ACAPULCO	155
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	174

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

El fenómeno de efecto de sitio fue reconocido desde principios del siglo XX, pero el estudio a profundidad comenzó en los años 50, debido a la ocurrencia de terremotos intensos y devastadores como el sismo de El Ángel (1957). Este efecto fue tomado en cuenta dentro de los reglamentos de construcción, mediante la clasificación del terreno en función de parámetros cuantitativos y cualitativos. Una de las primeras clasificaciones fue la de Seed en 1976, basado en la composición y espesor de los estratos, propuso tres clases de terrenos: suelo duro o roca, suelo firme y suelo blando.

Después del sismo de Michoacán-México (1985), el efecto de sitio fue más evidente y la comunidad académica estudió con mayor detalle la respuesta dinámica de los suelos para poder integrarla en los reglamentos de construcción. Se tomaron en cuenta otros parámetros de clasificación como: valores pico de aceleración, velocidad o desplazamiento (en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia), frecuencia dominante del terreno, etc. Asimismo, existen estudios orientados a obtener leyes de atenuación en función del tipo de terreno, características del sismo y medios de propagación.

En 1986 Philips y Aki establecen una relación entre la geología y la amplificación y clasifican el terreno en cuatro tipos: graníticos, formaciones mesozoicas, sedimentos en zonas de fallas y fuera de ellas. Sue (1992) analiza el efecto de sitio a través del estudio de la coda de microterremotos y establece un sistema de clasificación más detallado que la anterior, ya que conoce mejor la geología. Además señala, al igual que en el trabajo anterior, la existencia de una relación inversa entre la amplificación local y la edad geológica. En este análisis, realizado entre 1.5 y 12 Hz, se infiere que la razón de decrecimiento de la amplificación con el aumento de la edad geológica, en las frecuencias bajas, es más rápida que en las altas. También se puede mencionar el trabajo de Ligorría y Atakan (1997) quienes estimaron empíricamente la respuesta local de la ciudad de Guatemala y dividieron el terreno en cuatro tipos: S1, Terciario Volcánico; S2, Cuaternario Purnice; S3, Sedimentos de Transición y S4, Depósito Aluvial Cuaternario.

Pero se llega a observar que en la clasificación del terreno, no es suficiente el conocimiento de la composición o espesores de los estratos, otros parámetros de tipo geotécnico y geofísico (velocidad de ondas de corte, módulo de rigidez, densidad, amortiguamiento, etc.) son necesarios para tratar mejor el problema. Borchedt (1992) propuso un método empírico, que consta de cuatro fases, para la estimación de espectros de respuesta en función del efecto de sitio, una de las fases para esta estimación es la clasificación del terreno en función de las propiedades físicas del material, espesor mínimo de los estratos y la velocidad de onda de corte en los últimos 30 m.

La Uniform Building Code (IBC), USA, del 2000 incorpora el sistema de clasificación de Borchedt, sistema que consta de seis tipos de terreno. El parámetro S que caracterizaba al terreno en ediciones anteriores es remplazado por factores de amplificación para periodo corto y largo (F_a y F_v , respectivamente). F_a es utilizado para calcular el espectro del terreno a partir del espectro de respuesta en roca alrededor de 0.2 s de periodo y F_v , amplifica alrededor de 1s. Es importante mencionar que en las clasificaciones anteriores las amplificaciones no se consideraban para periodos cortos.

Las normas de construcción de México clasifican los terrenos con fines de diseño sísmico en tres tipos, los parámetros para esta clasificación son el periodo dominante del terreno y la velocidad de onda de corte efectiva. Sin embargo, esta clasificación muchas veces no satisface las condiciones del terreno de algunas ciudades, y si a esto le sumamos que hoy en día se cuenta con herramientas sencillas para determinar las propiedades dinámicas del suelo (periodo dominante y amplificación) concluimos que se puede mejorar esta clasificación para que sea más detallada y que represente mejor las condiciones dinámicas, geotécnicas y geológicas. Por otro lado, el efecto de sitio que las normas tratan de incluir dentro de esta clasificación, quedaría mejor incluido con una clasificación más fina del terreno.

Por ello, el primer objetivo de este trabajo es proponer una metodología para clasificar el terreno usando familias espectrales, obtenidas con registros sísmicos y microtremores, juntamente con la geología y geotecnia. Un segundo objetivo es proponer un sistema de clasificación más detallado de la que actualmente se presenta en las normas de construcción.

Con estos propósitos se estudio la respuesta dinámica del terreno de las ciudades de Veracruz-Boca del Río, Oaxaca y Acapulco. Estas ciudades fueron escogidas por presentar características geológicas distintas (la primera se ubica en la zona del Golfo de México, la segunda en las costas del pacífico y la tercera cerca al Eje Neovolcánico) y diferente actividad sísmica (aproximadamente, 35% de los sismos nacionales ocurren en zona de Guerrero, 15% en Oaxaca y 3% en Veracruz, según los reportes del Servicio Sismológico Nacional Mexicano).

Para el estudio del efecto de sitio y el desarrollo de mapas de clasificación de terreno para diseño sísmico se tomaron en cuenta las familias espectrales de registros sísmicos y de microtremores, ya que la geometría espectral es una característica del movimiento sísmico del terreno y por consiguiente, el efecto local tiene gran influencia sobre esta geometría (Lermo et. al., 2007).

En lo que sigue se presentará una revisión bibliográfica acerca del efecto de sitio (Capítulo II), los efectos de sitio dentro de los códigos de diseño sísmico (Capítulo III) y la clasificación de terrenos de cimentación con fines de diseño sísmico (Capítulo IV).

En el Capítulo V se describe el procedimiento utilizado para la evaluación del efecto de sitio y el manejo de las familias espectrales para la microzonación previa a la clasificación del terreno, el Capítulo VI presenta los resultados: zonas definidas por las familias espectrales, descripción de cada una de ellas y la clasificación de terrenos aplicando las normas nacionales así como las internacionales.

En el Capítulo VII se presenta la discusión de resultados, el sistema de clasificación de terreno propuesto, así como la clasificación de terreno de cada ciudad al aplicar esta propuesta. Y se describe la metodología propuesta para aplicar este nuevo sistema de clasificación. Finalmente, en el Capítulo VIII se menciona las conclusiones de esta tesis.

CAPÍTULO 2: EFECTOS DE SITIO

2.1 INTRODUCCIÓN

El efecto de sitio o efecto local importante en la determinación de la intensidad del movimiento sísmico fue reconocido desde los inicios de la sismología y documentado, sobre todo por los japoneses, desde el siglo XVIII (Giraldo et. al., 1999). Tal vez uno de los primeros reportes fue el de MacMurdo, después de la evaluación de daños del sismo de 1819 en la India: *Los edificios situados sobre roca no fueron tan afectados por el terremoto como aquellos cuya cimentación no alcanzó el fondo del suelo.* (Seed, 1986).

Wood en 1908 después de evaluar los daños producidos por el sismo de San Francisco de 1906 concluyó: *Esta investigación ha demostrado claramente que la magnitud de los daños producidos por el sismo en diferentes partes de la ciudad y condado de San Francisco dependió principalmente de la naturaleza del terreno*". (Seed, 1986).

Así también, el conocimiento de la amplificación de depósitos blandos cerca de la superficie fue reconocida desde varias décadas atrás, (Giraldo et. al., 1999).

A medida que ocurría un sismo fuerte se tenía mayores evidencias de este fenómeno, es así que por los años 50 del siglo XX se reportaron varios estudios, sobre todo en Japón, acerca del efecto local. En 1957, con el sismo de El Ángel en México se evidenció con mayor claridad este efecto (Seed et, al, 1986).

El sismo de Michoacán en 1985 fue un evento clave, ya que a partir de éste, muchos sismólogos e ingenieros sísmicos se involucraron en estudios de respuesta de sitio y desde entonces se ha publicado sugerencias y revisiones críticas de los estudios sobre efectos locales (Giraldo et. al., 1999).

Hoy en día, se conoce que los factores importantes en este fenómeno son la geología y la topografía, al respecto se puede encontrar resúmenes, reportes y publicaciones enfocados en la metodología, problemática o respuesta (Borchedt 1970, Seed, 1986; Bard, 1999, etc). En esta sección abordaremos el aspecto geológico, los métodos empíricos para evaluar la respuesta de sitio y mencionaremos algunas conclusiones importantes de Seed (1986) al estudiar este efecto en sismos importantes como es de Caracas de 1967. Pero antes mencionaremos la naturaleza del fenómeno y definiremos la función de transferencia para evaluar el efecto local.

2.2 NATURALEZA DEL EFECTO DE SITIO

Cuando las ondas sísmicas se propagan por diferentes medios geológicos, el comportamiento del movimiento vibratorio es afectado por diferentes fenómenos físicos que dan lugar a una combinación de movimientos en la superficie formado por ondas P, ondas S, reflexiones y refracciones de las ondas anteriores y ondas superficiales (Álvarez, S.,2001). Un ejemplo de ello se observa al comparar el movimiento de una roca dura, el cual es constante en un rango de frecuencia, con el movimiento de un suelo blando a las mismas frecuencias, en la cual claramente se muestra una amplificación relativa con respecto a la roca. Es decir, la geología modifica la incidencia de las ondas sísmicas en el lecho rocoso, lo cual se conoce como efecto de sitio,

emplazamiento o efecto local, y donde la contribución de la geología superficial, la topografía, y la composición y radiación incidente en la base rocosa juegan un papel importante.

Bajo este contexto, el estudio del efecto de sitio se puede tratar desde alguno de los tres puntos que contribuyen en el fenómeno o en un estudio combinado de los tres, sin embargo los especialistas reconocen que esto último es complejo y por lo general se aborda el efecto local haciendo simplificaciones y tomando en cuenta uno de los puntos importantes en la naturaleza del fenómeno.

2.3 PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL RECONOCIMIENTO DEL EFECTO DE SITIO

Para ilustrar e identificar estos parámetros nos referiremos a un método teórico para evaluar el efecto de sitio, este método es el de Haskell (1962), el cual se basa en la teoría unidimensional de propagación de ondas en medios estratificados. Haskell parte de las siguientes hipótesis:

- El comportamiento del suelo es lineal para cualquier nivel de excitación.
- Los estratos del suelo son horizontales y se extienden lateralmente hasta el infinito, por lo que no se incluyen efectos de irregularidad lateral. Los estratos descansan sobre un semiespacio homogéneo.

Y si a estas hipótesis le añadimos la incidencia vertical de las ondas S polarizadas horizontalmente y la simplificación de un solo estrato horizontal con la salvedad de que no se pierdan el periodo predominante y la velocidad de propagación de la onda de corte S de la estratigráfica real (características principales de la estratigrafía) tendremos el modelo que se muestra en la figura 2.1 (Montecillo R. 1996).

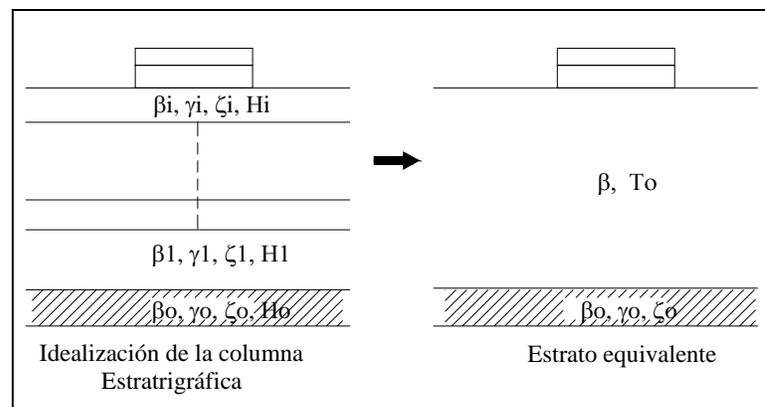


Figura 2.1. Perfil estratigráfico real y Modelo estratigráfico simplificado

Donde: el perfil estratigráfico representa al medio real y cada estrato se encuentra caracterizado por los parámetros: β_i , velocidades de propagación de las ondas S; densidad del material γ_i , amortiguamiento del material ζ_i y el espesor del material H_i . El semiespacio sobre el cual descansa el medio estratificado queda caracterizado también por los mismos parámetros ($\beta_0, \gamma_0, \zeta_0$).

En esta figura el tiempo que tardan las ondas en atravesar el i -ésimo estrato vale H_i/β_i , de donde el tiempo total T que tardan en atravesar los estratos, para llegar a la superficie es:

$$T = \sum \frac{H_i}{\beta_i} \quad 2.1$$

Si el perfil estratigráfico de la figura 2.1 estuviera formado por un solo estrato de espesor $H = \sum H_i$, estrato equivalente de la figura, la velocidad necesaria para que las ondas tarden el mismo tiempo en atravesarlo sería:

$$\beta = \frac{\sum H_i}{\sum \frac{H_i}{\beta_i}} \quad 2.2$$

Esta ecuación se conoce como la velocidad media del depósito simplificado. Por otro lado, de la solución de la ecuación de onda para incidencia vertical (Aki, 1980), el periodo predominante de vibración del medio T_o es:

$$T_o = \frac{4H}{\beta} \quad 2.3$$

En donde, combinando las ecuaciones (2.2) y (2.3) se tiene:

$$T_o = \frac{4H}{\sum H_i (\sum \frac{H_i}{\beta_i})} \quad 2.4$$

Recordando que $H = \sum H_i$, se obtiene:

$$T_o = \frac{4H}{\sum H_i (\sum \frac{H_i}{\beta_i})} = \frac{4 \sum H}{\sum H_i (\sum \frac{H_i}{\beta_i})} = 4 \sum \frac{H_i}{\beta_i} \quad 2.5$$

Esta última ecuación expresa que el medio estratificado idealizado de la figura 2.1 puede ser sustituido por el estrato equivalente de la misma figura, conservando las características antes mencionadas, β_i y T_o dadas por la ecuación 2.2 y 2.5 respectivamente.

Por lo tanto, si T_o es un parámetro que caracteriza al medio y depende directamente de las propiedades estratigráficas del mismo medio, podemos evaluar el efecto de sitio estimando su valor. Al mismo tiempo podemos estimar otro parámetro asociado al efecto de sitio, la amplificación relativa de sitio (A_r) asociada a T_o la cual se define como la máxima amplificación que sufre el movimiento de las partículas de suelo blando con respecto al movimiento de las partículas en el semiespacio rocoso, estos dos parámetros son los que definen el efecto de sitio.

2.4 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA

Esta función es análoga a un modelo matemático que entrega la respuesta de un sistema frente a una excitación exterior, la cual se puede representar gráficamente en la figura 2.2.

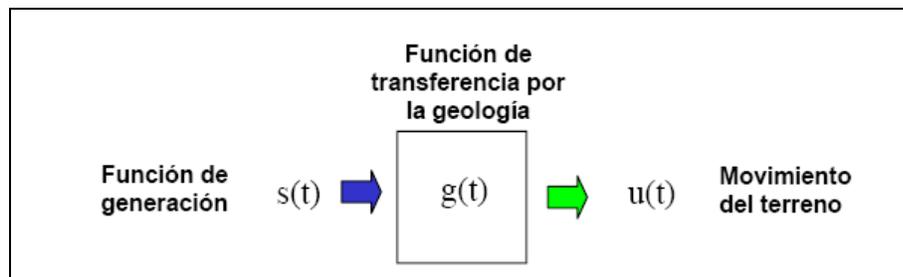


Figura 2.2. Esquema de la función de transferencia

Donde la función de generación corresponde al movimiento de las ondas en la base rocosa, el depósito geológico, a una caja negra entre las ondas que arriban a la interfase entre suelo y roca (basamento) y las ondas que llegan a superficie. Este problema se resuelve, ubicando dos estaciones: una en roca y la otra en superficie.

A partir de esta gráfica se puede definir esta función como la expresión que permite determinar las características dinámicas (vibración del estrato) de la superficie del suelo en función de las características dinámicas de la roca base o suelo muy firme. Es decir:

$$\text{Características dinámicas en la superficie} = FT * \text{Características dinámicas en la base}$$

Al calcular esta función se obtiene el periodo predominante (T_0) y la amplificación del suelo (A).

2.5 MÉTODOS PARA OBTENER LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA Y EVALUAR EL EFECTO DE SITIO

En la literatura se puede encontrar varias técnicas o métodos para estimar el efecto de sitio, las cuales se pueden dividir en dos grupos:

2.5.1 Métodos teóricos

Los cuales se basan en modelos matemáticos de propagación de onda, como el Método Numérico Directo de los Elementos de Contorno, MEC, (Álvarez, S. 2001), el método de Haskell (1962) que se basa en la teoría de propagación unidimensional de ondas (Thomson, 1950 y Haskell, 1953) y el cual permite calcular la función de transferencia en la superficie de un medio estratificado. Para aplicar estos métodos es necesario contar con información geofísica, geológica y geotécnica detallada del sitio a evaluar. Sin embargo, la confiabilidad de los datos y el nivel de detalle de los estudios sobre la estructura y propiedades mecánicas de suelo pueden representar una desventaja en la aplicación de este método, tal como lo mencionaron, Lermo et. al. 1991.

2.5.2 Métodos empíricos

Para calcular la función de transferencia empírica (FTE) con estos métodos se analiza dos tipos de registros: a) Registros de movimientos fuertes y débiles y b) Registros de vibración ambiental o microtemores. A continuación describiremos las técnicas de procesamiento de estos registros para calcular la FTE.

2.5.2.1 Estimación con Registros de Movimientos Fuertes

Giraldo et. al., 1999, mencionan que esta estimación es la más valiosa en la evaluación de los efectos locales, debido a que en estos registros se encuentran incluidos algunos tipos de efectos no lineales y amplios contenidos de frecuencia, a esto se puede sumar el aumento en la instalación de instrumentos de movimiento fuerte en los últimos años. A pesar de estas ventajas, han sido pocas las oportunidades en las que se ha podido zonificar ciudades con este tipo de movimiento, por ejemplo, Lermo et al. en 1994 reportaron que no pudieron obtener una zonificación detallada en el ciudad de México con este tipo de registro, debido a que muchos de los aparatos fueron instalados después del sismo de Michoacán de 1985. Hoy en día, algunas ciudades cuentan con redes de aparatos que pueden registrar estos movimientos, pero la cantidad de ellos sigue siendo insuficiente para lograr una zonificación detallada.

No obstante, la FTE obtenida con este tipo de registros es importante para validar los resultados obtenidos con registros de sismos leves o microtremores, por ello se mencionará las técnicas para calcular la FTE, las cuales son también aplicables a los otros tipos de registro.

2.5.2.1.1 Razón espectral estándar (SSR)

Esta técnica aplicada desde el primer trabajo de Borchardt en 1970, consiste en dividir el espectro de amplitud de Fourier del lugar de interés por el espectro de amplitud de Fourier en una estación de referencia.

La hipótesis de esta técnica se basa en que el registro en terreno firme (estación de referencia) es representativo del campo incidente en la interfase entre el basamento (capa base) y estratos de terreno blando (estación de interés), lo cual implica que la energía sísmica es atrapada en los sedimentos blandos y la energía que se propaga desde las capas blandas al terreno firme es muy pequeña.

Siguiendo el planteamiento de Borchardt, en el dominio de la frecuencia (f), el espectro de amplitud del movimiento del terreno debido al j -ésimo evento registrado en el i -ésimo sitio ($A_{ij}(f)$) aparece como el producto de la fuente ($O_j(f)$), la trayectoria ($P_{ij}(f)$) y el efecto de sitio ($S_i(f)$).

$$A_{ij} = O_j(f)P_{ij}(f)S_i(f) \quad 2.6$$

Y si a esta expresión se le aplica dos condiciones: La respuesta del sitio de referencia r ($i=r$) debe ser insignificante, $S_r(f)=0$, y el efecto de trayectoria es similar para todos los sitios, cuando la distancia entre las estaciones es más corta que la distancia epicentral, resulta que el efecto de sitio en un lugar de interés puede ser expresado de la siguiente forma:

$$S_j^r = \frac{1}{j} \sum_{j=1}^j A_{ij}(f) / A_{rj}(f) \quad 2.7$$

Se considera que la estación de referencia ideal sería un lugar donde la roca se encuentra aflorando con velocidad de onda de corte (V_s), aproximadamente, de 3000 m/s, sin embargo si aceptamos que la estación de referencia debe tener respuesta insignificante (F. Chávez y J. Cuenca, 1998 mencionan que una estación cuyo factor de amplificación es menor a 2, puede ser

considerada sin efecto de sitio) se debe considerar que en las aplicaciones de ingeniería se han encontrado estos efectos para terreno con Vs entre 400 y 600 m/s (roca blanda), tal como lo reportan Rodríguez V. y Modorikawa S (2001).

Chávez et. al. (1994) mencionan que esta técnica es aplicable cuando se tiene una geología local relativamente simple donde no se requiera aplicar modelos 2D o 3D, y que esta condición se puede evaluar observando la dispersión entre los cocientes espectrales para diferentes sismos y el mismo par de estaciones. Asimismo mencionan que la desventaja de esta técnica es la necesidad de obtener registros simultáneos en las estaciones de suelo blando y en la de referencia.

2.5.2.1.2 Razón espectral de la componente horizontal a la componente vertical, Técnica de Nakamura para sismos, (HVSR)

A diferencia de la técnica anterior, esta no requiere de una estación de referencia, la hipótesis de Lermo y Chávez-García, quienes propusieron por primera vez esta técnica en 1993, es que sólo la componente horizontal es influenciada por la estructura local, entonces usan la técnica de Nakamura dividiendo el espectro de amplitud de Fourier de la componente horizontal por el espectro de la componente vertical (H/V), este cálculo es realizado para la fase intensa de la onda de corte. Al igual que la técnica anterior, ésta requiere de una geología relativamente simple, pero no se tiene el problema de contar con registros simultáneos.

Una conclusión importante que dieron a conocer Lermo y Chávez García (1993) es que la frecuencia y amplitudes de resonancia fueron similares a las obtenidas con la SSR, Sousa et. al. (2006) mencionan que Theodulidis (1995) encontró resultados razonables al aplicar el HVSR en Grecia y en Taiwán.

2.5.2.2 Estimación con Registros de Movimientos débiles

Para obtener estos registros generalmente se ubica una red temporal distribuida adecuadamente en la ciudad de estudio, las técnicas para calcular la FTE son las mismas que se usan cuando se trabaja con registros fuertes.

Varios investigadores (Borchedt, 1970; Tucker, King, 1984; Chávez-García, 1990; Lermo et. al. 1993, 1994 a y 1994b) encontraron una buena correlación entre los resultados usando la SSR para estos sismos y sismos fuertes. Al igual que con los registros fuertes se tiene la desventaja de obtener sismos simultáneos en las estaciones de referencia y de interés, en este caso se añade que los aparatos se instalan por un corto tiempo y a veces no se puede registrar simultáneamente los sismos en todas las estaciones.

Frente ha este hecho resulta ventajoso aplicar la técnica HVSR, al respecto podemos decir que los reportes de los estudios (Chávez-García y Cuenca, 1994; Lermo-Chávez, 1994a y 1994b) refieren que se han obtenido buenos resultados al aplicar esta técnica.

2.5.2.3 Estimación con Registros de Microtremores

Los investigadores de este tipo de registro reportan que el estudio del ruido, fue realizado desde antes de 1950, Bennefoy, et. al., 2006 mencionan al trabajo de Gutenberg de 1911 como el pionero en este tema. Entre los años 50 y 70 con el avance de la sismología, surgieron varios

trabajos para entender el fenómeno de ruido, en estos se trabajaron con análisis de autocorrelación de señal (SPAC) (Aki, 1957, 1965) y análisis de número de onda y frecuencia (f-k) (Capón et. al., 1967).

En los últimos años, específicamente de 1970 en adelante el número de trabajos al respecto sobrepasa los 500, según Bennefoy et. al., quienes también señalan que el 95% de estos trabajos se enfocan a la aplicación de microzonación usando la técnica HVNR (razón espectral relativa a la componente vertical, técnica de Nakamura) la cual se describirá más adelante.

En cuanto al origen del ruido, existe un acuerdo en la comunidad científica: El origen del ruido puede ser natural o cultural. El primer caso se relaciona con periodos largos (frecuencias cortas) cuya fuente principal sería condiciones meteorológicas u ondas oceánicas, llamados también microsismos. El segundo caso presenta periodos cortos (frecuencias altas) cuya fuente es la actividad humana, llamado microtemores o vibración ambiental (este es el tipo de ruido que se usa para trabajos de respuesta de sitio y microzonación). El límite de frecuencia de estos dos tipos de ruido se encuentra en 1Hz, este límite ha sido también comprobado por diferentes investigadores tal como lo reportan Bennefoy et. al.

Este acuerdo no se da cuando se discute la composición del campo de onda del ruido. En 1961 Kanai y Tanaka consideraron que la amplificación de los microtemores en capas del subsuelo se deben a múltiples reflexiones de ondas S incidentes verticalmente, en forma similar a los movimientos fuertes, Horike (1985) señaló que los microtemores consisten de ondas de Rayleigh, (Rosales I. 2001). Al respecto, Bennefoy et. al. concluyen que la composición del campo de ondas del ruido es altamente dependiente de las características del suelo, especialmente del contraste de impedancias. Además mencionan, que a frecuencias altas puede existir modos altos de la onda de Rayleigh, que el segundo o tercer pico observados en la FTE con la técnica HVNR se puede deber a la composición del campo de onda del ruido (que pueden ser ondas de cuerpo en resonancia o modos altos de onda de Rayleigh) y que existe una proporción importante de ondas Love (probablemente 40% y en algunos casos 50%).

Después de hacer estas aclaraciones, Bennefoy et. al. concluyen que a pesar del tipo de onda preponderante, la FTE con el HVNR indica la frecuencia de resonancia al menos para una estructura 1D con un grado de impedancia alto. Según Bard, 1999 un grado de impedancia alto se refiere a un contraste de velocidades entre la superficie y terreno firme de 100 m/s y 600 m/s respectivamente, Bennefoy et. al., señala que este contraste de velocidades se encuentra en el rango de 3 a 4.

2.5.2.3.1 Razón Espectral Relativa a la Componente Vertical, Técnica de Nakamura (HVNR)

Esta técnica propuesta por Nakamura en 1989 se basa en que el cociente espectral entre la componente horizontal y vertical del registro de microtemores es una aproximación de la FTE. Nakamura parte de la hipótesis de que los microtemores principalmente son registros de ondas Rayleigh.

A parte de la hipótesis anterior y al igual que las otras técnicas, también supone un medio estratificado de suelo blando que sobreyace a un espacio de suelo firme (o roca). Bajo estas

condiciones y trabajando en el dominio de las frecuencias, cuatro son los espectros que se involucran en el problema.

- V_s , H_s , espectros de fourier de las componentes vertical y horizontal del movimiento en la superficie.
- V_b , H_b , espectros de fourier de las componentes vertical y horizontal del movimiento en el sustrato.

La figura 2.3 muestra el modelo a partir del cual se desarrollan las bases para explicar esta técnica. Según esta figura se trata de un solo estrato blando (SB), que descansa sobre un semiespacio de roca (R), por el medio SB se propagan ondas Rayleigh.

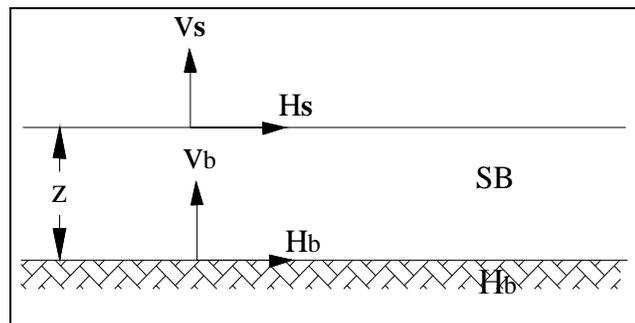


Figura 2.3 Modelo estratigráfico de la técnica de Nakamura

De acuerdo a Nakamura el efecto de la fuente se encuentra representado por la siguiente expresión:

$$A_s = \frac{V_s}{V_b} H \quad 2.8$$

Y el efecto de sitio (*Definición de Función de Transferencia Empírica FTE*) con la ecuación siguiente:

$$S_E = \frac{H_s}{H_b} \quad 2.9$$

Para compensar esta expresión por el efecto de fuente, define una relación espectral de efecto de sitio modificada, S_M , como sigue:

$$S_M = \frac{S_E}{A_s} = \frac{\frac{H_s}{H_b}}{\frac{V_s}{V_b}} = \frac{\frac{H_s}{V_s}}{\frac{H_b}{V_b}} \quad 2.10$$

Nakamura comprobó experimentalmente la siguiente relación:

$$\frac{H_b}{V_b} = 1 \quad 2.11$$

Siguiendo el procedimiento de Nakamura, al aplicar la relación anterior a la ecuación 2.8 se obtiene:

$$S_M = \frac{H_s}{V_s} \quad 2.12$$

Esto implica que la función de transferencia de capas superficiales puede ser calculada con registros de microtemores en la superficie y que la componente vertical de éstas mantiene las características de la componente en el basamento o sustrato.

Es importante mencionar que Nakamura en 1989 y 2000, basado en que las fuentes artificiales de vibración tienen principalmente movimiento vertical, consideró que los microtemores están compuestos por diferentes tipos de ondas que incluye tanto ondas de superficie como ondas internas, y que el efecto de las ondas Rayleigh aparece en las componentes horizontal y vertical de estas, pero más acentuado en la componente vertical. Esto fue confirmado por simulaciones numéricas de Lermo & Chávez-García (1994). Además menciona que en la relación H/V esta controlada por las ondas SH y que no incluye las ondas Rayleigh presentes en los microtemores.

Rosales I. (2001) menciona que Lachet & Bard (1994) establecieron que los microtemores consisten de ondas Rayleigh propagándose en un semiespacio de una sola capa y Bennofoy et. al. mencionan que Wakamatsu & Yasui (1995) encontraron que en los microtemores predominaban las ondas Rayleigh y Love.

2.6. RELACIÓN ENTRE EL EFECTO DE SITIO Y DAÑOS EN EDIFICIOS

La relación que existe entre los daños de estructuras y el efecto de sitio en un sismo fue estudiado por Seed (1986) a partir de varios eventos importantes (sismo de Skopje, Yugoslavia, 1963; sismo de Caracas, 1967; sismo de San Fernando, 1971) y lo llevó a plantear las siguientes conclusiones:

- *En estructuras bajas de periodo relativamente corto se espera daños máximos e intensidad sísmica máxima cuando se encuentran desplantadas en depósitos de suelo de poco espesor (periodo corto) e intensidad y daños mínimos en depósitos de suelos profundos (periodos largos).*
- *En estructuras altas de periodo largo se espera daños máximos e intensidades sísmicas máximas cuando se encuentran desplantadas en depósitos de gran espesor (periodo largo) y daños mínimos en depósitos de poco espesor (periodo corto).*

Estas conclusiones sugieren que cuando el periodo predominante de la estructura es similar a la del terreno puede desarrollarse el efecto de resonancia y la respuesta del edificio será muy elevada, en caso contrario, cuando estos periodos son diferentes no existirá una interacción fuerte entre el suelo y la estructura y la respuesta estructural es baja.

Este tipo de comportamiento Seed lo llama interacción de respuesta, y ocurre cuando el periodo predominante de un depósito de suelo ocasiona que los movimientos del terreno tengan un periodo predominante similar al de la estructura apoyada en la superficie del terreno, lo cual conduce a daños en los edificios por excitación sísmica.

Estas conclusiones evidencian que la respuesta de sitio es también función de la profundidad del suelo.

2.7 COMENTARIOS

Los sismos de la ciudad de México, 1985, Loma Prieta, 1989, Northridge y Kobe, 1995, provocaron severos daños en las estructuras y pérdidas de vidas humanas, aunque estos daños están relacionados a diferentes factores como la topografía y licuación, el efecto de sitio fue el factor que más contribuyó en el número de daños observados.

La relación de este efecto de sitio con los daños estructurales es claramente ilustrada en las conclusiones de Seed (1986) donde la profundidad del suelo juega un papel importante en la evaluación del este fenómeno. Por la tanto, podemos decir que existen tres factores que determinan el efecto de sitio: la amplificación, el periodo predominante y la profundidad del suelo.

Frente a este hecho, la cuantificación del efecto de sitio es un componente importante para evaluar el riesgo sísmico de una ciudad, además se debe tomar en cuenta estos tres parámetros para dicha cuantificación.

Por lo expuesto en este escrito, la obtención de la función de transferencia no está limitada a un solo método, además en la práctica se debería contemplar dos métodos distintos para determinar la función de transferencia de un sitio y así enriquecer los datos obtenidos.

La técnica de Nakamura ha sido objeto de múltiples investigaciones, tanto teóricas, aplicadas y de simulaciones numéricas, sus resultados han sido comparados con la técnica SSR para movimientos fuertes y débiles, y ha sido utilizada alrededor del mundo con fines de microzonación (Bennofoy et. al., 2006) y todos estos estudios y aplicaciones muestran que esta técnica permite diferenciar zonas urbanas con base en características geotécnicas, dinámicas y geológicas.

Bard (1999), Rosales I. (2001), Flores E. (2004) y (Bennofoy et. al., 2006), después de una extensa revisión bibliográfica (cada uno menciona de 10 a 20 investigadores) concluyen que los resultados de la técnica de Nakamura han sido satisfactorios y comparten la idea general de que es una buena herramienta para estimar el periodo predominante del terreno.

Ha esto podemos añadir, que para aplicar la técnica de Nakamura no se necesita dos estaciones, ni registros simultáneos, ni tiempo para registrar sismos fuertes o leves (desventajas de las técnica SSR y HVNR) lo cual tarda los trabajos de microzonación, si no más bien se puede obtener registros de varios puntos de una ciudad en un corto lapso de tiempo y por consiguiente, microzonaciones más detalladas. Además el registro de microtemores con una sola estación suele ser económica y las aplicaciones de gran alcance.

CAPÍTULO 3: EFECTOS DE SITIO EN LOS CÓDIGOS DE DISEÑO SÍSMICO

3.1 INTRODUCCIÓN

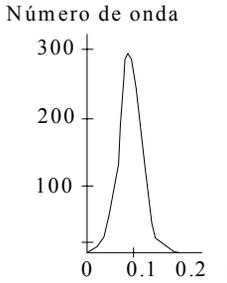
En el periodo de 1906 a 1957 ocurrieron sismos en varios países que dieron evidencia del efecto de sitio, pero a pesar de estas evidencias el efecto de sitio aún no se tomaba en cuenta en los códigos de diseño sísmico de los países afectados, a excepción de algunos países como México, Japón y Chile (Seed, 1986). Estos países tomaron en cuenta los efectos de sitio para el diseño sísmico con el cálculo del coeficiente sísmico en función de las características del terreno y la rigidez de la estructura. Con el propósito de analizar como el efecto de sitio fue considerado en los reglamentos de construcción se presenta una revisión bibliográfica sobre los códigos de diseño sísmico del país y de otros países (para esta revisión se consideró los códigos antes y después de 1985 hasta llegar a los códigos actuales), se señala las consideraciones tomadas en cuenta para definir los parámetros que cuantifican el efecto de sitio en los códigos de diseño (coeficientes de diseño, factores de sitio y periodo dominante del suelo) y finalmente, se presenta una base teórica sobre la consideración de la intensidad del movimiento en roca en los códigos.

3.2 CÓDIGOS DE DISEÑO SÍSMICO ANTES DE 1985

3.2.1 Reglamento de construcción de 1954 en Japón

Kanai et. al. en 1954 registraron microtremores en varios sitios de Japón, con estos construyeron curvas de distribución de periodo usando la técnica del “cruce de línea cero”. Estas curvas reflejaron una forma definida dependiente de tipo de terreno y permitieron clasificar el terreno en cuatro tipos, mas tarde esta clasificación fue adoptada por el código de construcción japonés para el diseño sísmico. Las características de estas cuatro clases de terreno se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Clasificación de terrenos en función de la curva de periodos para el Reglamento del código de diseño japonés de 1960 (Giraldo V. et al. 1999).

Tipo de suelo	Descripción	Curva de distribución de periodos
I	Suelos conformados por rocas, gravas arenosas duras, clasificados como terciarios.	

II	Gravas arenosas, arcilla arenosa dura y otros. Clasificados como diluvial o aluvial gravosos, con espesor de 5 m. o más, sobre un área considerable alrededor de la estructura.	
III	Suelo aluvial con espesor de 5 metros o más.	
IV	Suelo aluvial de depósitos deltaicos blandos, suelo superficial, limos, con espesores de 30 m. a más.	

3.2.2 Reglamento de construcción de Chile-1960

Este código especificaba los coeficientes como función del tipo de terreno y de la rigidez de las estructuras como se presenta en la tabla 3.2.

Tabla 3.2. Coeficientes de sitio en conformidad con las características del suelo del Reglamento de Construcción Chileno de 1960 (Bertling, 1956).

Características del terreno	Coefficiente
Construcciones Rígidas ($T < 0.4$ s)	
Arenas y suelos filled	0.10
Conglomerado y suelos compactos	0.12
Roca	0.08
Construcciones Rígidas ($0.4 < T < 0.75$ s)	
Arenas y suelos filled	0.12
Conglomerado y suelos muy compactados	0.10
Roca	0.05

3.2.3 Reglamentos de Construcción en México

3.2.3.1 Reglamento de Construcción del Distrito Federal después del terremoto de El Ángel.

Cuando ocurre el terremoto de El Ángel en México, el 28 de Julio de 1957 ($M=7.7$), se encontraba vigente el código de construcción de 1942, el cual especificaba que el coeficiente sísmico debía depender del tipo de estructura. Sin embargo, el sismo de El Ángel dañó varias edificaciones y además permitió observar un fenómeno muy importante, la amplificación de los suelos blandos. Este fenómeno llamó la atención de los investigadores, quienes consideraron la importancia de tomar en cuenta los efectos del suelo dentro del diseño sísmico. Es así que, el nuevo reglamento presentó la división de la ciudad en tres zonas, tal como lo habían planteado Marsal, R. J., y Mazari en 1953. Las características de cada zona se presentan a continuación:

Zona A: Se extiende en la zona del viejo lago de Texcoco compuesta por estratos de arcilla altamente compresible de 10 m a 214 m de profundidad aproximadamente, el contenido de humedad promedio de estos materiales se encuentra en 300%. Las arcillas en la superficie (2.0 a 6.0 m) tienen baja plasticidad.

Zona B: Es llamada zona de transición entre las zonas A y B, en esta zona se puede encontrar arcillas y arenas limosas de mediana compresibilidad, en ocasiones se encuentra estratos de 6.0 m de profundidad, aproximadamente de arcilla blandas y limos de alta plasticidad.

Zona C: Esta zona incluye la parte baja de las montañas de la sierra al oeste y este de la ciudad, el material de esta zona está compuesto por conglomerados, arenas compactas y material incompresible.

Por otro lado, con base en conceptos de espectros de respuesta se incorpora nuevos valores del coeficiente sísmico tomando en cuenta el tipo de estructura y las características del terreno, para este caso se divide a la ciudad en dos zonas, ya que la zona de transición es incorporada dentro de las zona del lago (suelos de alta compresibilidad). Los coeficientes sísmicos para las construcciones del grupo B (hoteles, estaciones de gas, restaurantes, construcciones industriales, construcciones para oficinas y departamentos) se presentan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Código de diseño de 1960 (Rosembueth, 1960)

Tipo de Estructura	Zona de alta compresibilidad	Zona de baja compresibilidad
1	0.06	0.04
2	0.08	0.08
3	0.15	0.10

Los coeficientes sísmicos para las construcciones del grupo A (hospitales, museos, construcciones públicas, gubernamentales y municipales) debían estar multiplicados por 1.3, las construcciones del grupo C (todas las estructuras que no pertenecen ni al grupo A ni al grupo B) no requerían diseño sísmico.

Con la evidencia de los efectos de sitio provocados por los sismos ocurridos, varios países a finales de los años 50 optaron por considerar los coeficientes sísmicos dependientes de las características del suelo. En la tabla 3.4 se presenta una lista de países con esta disposición dentro de sus códigos de diseño sísmico, (Seed. et al 1986).

Tabla 3.4. Disposición de varios países con respecto a los coeficientes de diseño sísmico dependientes de las características del suelo. (Seed. et al., 1986)

Año	País	Coefficientes sísmicos dependientes de las condiciones de suelo
1953	Turquía	Roca Arcilla Dura Otros Suelos
1954	Japón	Suelo duro Depósitos principales diluviales Depósitos principales aluviales Suelos blandos

1955	Argelia	Roca. Suelo.
1956	Grecia	Depósitos duros y homogéneos de arcilla-magra. Suelos sueltos y quebradizos. Zonas pantanosas y lechos lacustres drenados. Suelos sueltos y heterogéneos.

3.2.3.2 Manual de Obras Civiles de la CFE en 1969

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) editó su primer reglamento de construcción bajo el nombre de Manuales de Obras Civiles en 1969, en cuanto a las especificaciones sísmicas esta edición presentó un mapa de regionalización de la República que consistía en cuatro zonas sísmicas, estas zonas fueron determinadas a partir de un análisis probabilístico de las intensidades de Mercalli Modificada.

Asimismo, se propuso una clasificación de terreno, la cual se describe a continuación:

- Terreno Firme (F): Incluye roca sana o ligeramente intemperizada, arcillas compactas o arena densa.
- Terreno Compresible (C): se dividen en dos tipos.
C1, terreno de compresibilidad moderada, comparable a la de arcillas de consistencia media.
C2, terreno de gran compresibilidad, comparable a arcillas suaves o muy suaves de gran espesor.
- Material no cohesivo en estado suelto.

Los espectros de diseño propuestos para cada zona sísmica estaban en función del coeficiente sísmico, de la estructura y de los parámetros T_0 , T_1 y T_2 que dependían de la zona en la que se construya la estructura y del tipo de terreno. Cada uno de estos parámetros eran dependientes del tipo de terreno

3.2.3.3 Reglamento de Construcción del Distrito Federal en 1976

El 14 de diciembre de 1976 se pone en vigencia un nuevo reglamento en el Distrito Federal. Este nuevo código recomienda que se adopte como coeficiente sísmico para las estructuras tipo B los valores mostrados en la tabla 3.5. Para las estructuras tipo A, estos coeficientes debían ser multiplicados por 1.3.

Tabla 3.5. Coeficientes sísmicos (Reglamento de Construcciones para el DF. México 1976)

Zona	Descripción	Coeficiente sísmico
I	Terreno firme	0.16
II	Terreno de transición	0.20
III	Terreno compresible	0.24

3.2.3.4 Manual de Obras Civiles de la CFE en 1981

En esta edición la CFE presenta un mapa de regionalización sísmica de la República Mexicana, la cual considera cuatro zonas sísmicas, siendo la zona A la de menor intensidad y la D de mayor intensidad sísmica, esta regionalización fue acompañada con la clasificación de terrenos en tres tipos.

Esta clasificación con base en la rigidez se describe a continuación:

Tipo I: Terreno firme, tal como tepetate, arenisca medianamente cementada, arcilla muy compacta o suelos con características similares.

Tipo II: Suelos de baja rigidez, tal como arenas no cementadas o limos de mediana o alta compacidad, arcillas de mediana compacidad o suelos de características similares.

Tipo III: Arcillas blandas muy compresibles.

Para clasificar el terreno como uno de estos tipos se debía seguir los siguientes pasos:

- Localizar el nivel del terreno firme, cuyo valor del módulo de rigidez al cortante tenía que ser mayor a $5 \cdot 10^{-4} \text{t/m}^2$ o requerir más de 50 golpes por cada 30 cm en la prueba de penetración estándar.
- Para los estratos entre el nivel del terreno firme y el nivel en que las aceleraciones horizontales del terreno se transmitan a la construcción se debía calcular el coeficiente ψ .

$$\psi = \sum H_i \sqrt{\gamma_i / G_i} \quad (3.1)$$

Donde: H_i = espesor del i-ésimo estrato (m)

γ_i = Peso volumétrico del suelo del estrato i (t/m^2)

G_i = módulo de rigidez a cortante (t/m^2)

- Cuando $\psi < 0.20$, el terreno se consideraba firme (tipo I).
- Cuando $0.20 < \psi < 0.45$, el terreno se consideraba de baja rigidez, del tipo II.
- Cuando $\psi > 0.45$, el terreno se clasificaba como tipo III.
- Cuando en el terreno aparezca un estrato arcilloso blando muy compresible con espesor mayor o igual que 10 m, el terreno se considerará del tipo III, sin importar el valor de ψ .

A diferencia de la edición anterior, en esta edición se considera sólo dos tipos de estructuras, tipo A y B. Los parámetros para calcular los espectros de diseño para cada tipo de estructura dependían del coeficiente sísmico y de los parámetros T_0 , T_1 y T_2 , que tuvieron un ligero cambio en sus valores, calculados en función del tipo de terreno.

3.2.4 Estados Unidos Americanos

3.2.4.1 Reglamento de Construcción en 1976

A pesar de las evidencias del efecto de sitio, la UBC no tomó en cuenta éste en sus reglamentos de diseño sísmico, sino hasta 1976. El Comité Sismológico de la Asociación de Ingenieros Estructurales de California (SEAOC) y la UBC adoptaron como guía las conclusiones del trabajo de investigación de Seed et al. (1974). Estos nuevos códigos incluían un nuevo factor “factor de suelo S” de tal forma que la fuerza lateral fue planteada con la siguiente fórmula (Seed, 1986).

$$V = KZCWS \quad (3.2)$$

Donde: V = Fuerza lateral de corte

K= Factor determinado por el tipo de estructura.

Z = Factor sísmico de la zona

C = $0.067/(T)^{0.5}$

T = Periodo de la estructura.

S = Factor de sitio.

W = Peso total de la estructura.

Estas primeras medidas tienen como base el concepto de interacción de respuesta, por lo tanto el criterio de diseño se incrementó por un factor de resonancia suelo/estructura el cual variaba entre 1.0 y 1.5 en función de T/T_s (T es el periodo del edificio y T_s es el periodo del tipo de terreno). La figura 3.1 muestra la variación de S con respecto a T/T_s .

El valor de T_s según la UBC debía ser calculado mediante el análisis de respuesta de sitio unidimensional el cual considera capas horizontales de suelo y propagación vertical de la onda de corte polarizada horizontalmente, V_{SH} , ($T=4H/V$, donde V es considerado como el promedio ponderado de velocidades).

La expresión de la ecuación 3.14 es adoptada en otros países de forma similar (Dobry 1976), pero surgen diferencias para determinar el valor de S. La tabla 3.6 enlista el nombre de los países que reconocían esta medida dentro de sus códigos de diseño y las diferencias en cuanto al valor de S.

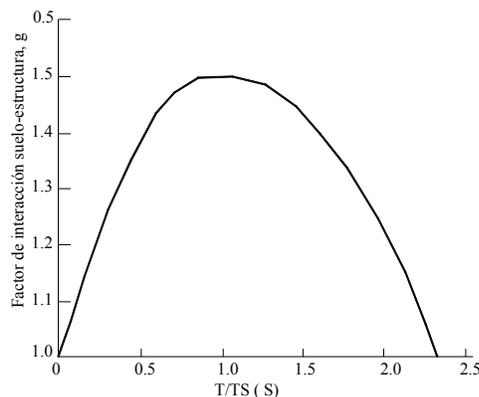


Figura 3.1. Relación de S con T/T_s (Seed, 1986).

Los países de la segunda fila de la tabla 3.6 asignan valor se $S = 1$ para suelos firmes y $S > 1$ para suelo blandos, esta medida no toma en cuenta el periodo de la estructura siendo sólo dependiente de la rigidez del terreno, los países listados en la tercera columna de esta tabla disponen que S debe ser dependiente del periodo de la estructura, así como de la rigidez y profundidad del terreno.

Tabla 3.6. Efecto de sitio y códigos de construcción de varios países, (Dobry, 1976).

Fuerzas Sísmicas independientes de la condición local de sitio	Factor S como función del suelo y condiciones de la cimentación	Factor S como función de las condiciones de sitio y el periodo de la estructura
El Salvador	Algeria	Argentina
Italia	Bulgaria	Chile
Filipinas	Canada	Japón
	Francia	México
	Grecia	Nueva Zelanda
	India	Rumania
	Iran	Turkia
	Israel	USA, California
	Perú	USA, Massachusett
	Portugal	
	España	
	Venezuela	
	Rusia	

3.2.4.3 Reglamento de Construcción en 1978

En 1978 el Consejo de Tecnología Aplicada de los Estados Unidos recomendó que el factor S del código de 1976 fuera reemplazado por los espectros específicos de sitio desarrollados por Seed, previamente modificados para este propósito. (Ver figura 3.2).

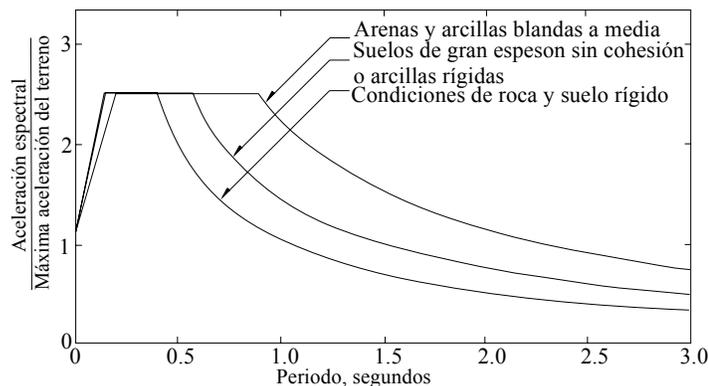


Figura 3.2. Espectros de diseño del reglamento de ATC-1978, (Seed, 1986; Dobry, 1976).

3.2.4.5 Reglamento de construcción en 1985

En 1985 la UBC estableció que la fuerza sísmica total o la fuerza de corte basal que actúa en una estructura debían ser igual a la siguiente expresión.

$$V = ZIKCSW \quad (3.3)$$

Donde: Z = Coeficiente de sismicidad

I = Factor de importancia

K = Factor de fuerza horizontal

C = Factor en función del periodo de la estructura, $C=1/15(T)^{0.5}$

S = Factor de sitio.

W = Peso total de la estructura.

Para determinar el factor Z, dividieron el territorio en cinco zonas sísmicas y obtuvieron curvas de contorno de acuerdo a la máxima aceleración de la roca (PGA).

En este caso el factor de sitio es calculado tomando en cuenta las condiciones del terreno o la relación entre el periodo del suelo y de la estructura. Cuando no se podía determinar el periodo del suelo, S debía ser definido por la descripción cualitativa del suelo. Para este caso, la caracterización del terreno se define, con base en la rigidez y profundidad, en tres tipos, S1, S2 y S3. (Véase tabla 3.7).

Tabla 3.7. Factor de suelo S (Seed. et al, 1986)

Tipo de suelo	Descripción del terreno	S
S1	Roca o materiales caracterizados con velocidad de onda de corte mayores a 762 m/s o suelos rígidos	1.0
S2	Suelo denso o rígido, espesor de capa de suelo mayor a 60 m.	1.2
S3	Perfil de suelo con 10 m. o mas de arcilla blanda a firme o arenas sueltas	1.5

Por otro lado, La National Earthquake Hazard Reduction Program (NEHRP-85), especificó que la fuerza lateral se debe calcular con la siguiente expresión:

$$V = C_s W \quad (3.4)$$

Donde: W = Peso de la estructura.

C_s = Coeficiente Sísmico.

El coeficiente sísmico es calculado de la siguiente ecuación.

$$C_s = \frac{1.2A_v S}{RT^{2/3}} \leq \frac{2.5A_a}{R} \quad (3.5)$$

Donde: A_v = aceleración relacionada a la velocidad máxima efectiva.

A_a = aceleración máxima efectiva

S = factor de sitio

R = factor de modificación de respuesta

T = Periodo fundamental del edificio

Con los valores de A_v y A_a se incluye el movimiento del terreno (roca), estos valores se podían obtener de dos mapas: mapa de contorno para la velocidad de máxima efectiva relacionado a la aceleración máxima del terreno y mapa de contorno para la aceleración máxima efectiva.

3.3 CÓDIGOS DE DISEÑO DESPUÉS DE 1985

3.3.1 México

En 19 de Septiembre de 1985 en la ciudad de México, ocurrió uno de los terremotos más devastadores ($M_w=8.1$), edificios totalmente destruidos y un gran número de pérdidas humanas. Una de las causas de esta destrucción fue el efecto de sitio, ya que el DF se encuentra emplazado en terreno lacustre. Es importante mencionar que los trabajos de evaluación de daños y observaciones de este evento fueron un punto clave para que los especialistas e investigadores de diferentes países modificaran o tomaran en cuenta los efectos de sitio dentro de sus códigos de diseño sísmico.

3.3.1.1 Reglamento de construcción del Distrito Federal después del terremoto de Michoacán.

Cuando ocurrió este sismo, en el D. F. se encontraba vigente el reglamento de construcciones de 1976. Este reglamento ya caracterizaba el terreno en tres tipos y los coeficientes de diseño y espectros de diseño sísmico eran dependientes de esta caracterización, sin embargo la gran cantidad de daños ocurridos hizo que la comunidad científica revisará las normas establecidas y después de dos años de consultar a los colegios y escuelas de profesionales se editó una nueva versión del Reglamento de Construcciones para el D.F, en este se estableció nuevos coeficientes sísmicos para los tres tipos de terrenos ya conocidos. (Véase tabla 3.8).

Tabla 3.8. Coeficientes Sísmicos para estructuras del grupo B (Reglamento de Construcciones para el DF, 1987).

Zona	Descripción	Coefficiente sísmico
I	Lomas	0.16
II	Transición	0.32
III	Lago	0.40

Los coeficientes de las estructuras del grupo A debían aumentarse 50%. Al comparar estos coeficientes con los anteriores, del reglamento de 1976, vemos que aumentaron en las Zonas II y III cerca del 80%.

La zona II y III se subdividieron en dos zonas, para estas zonas se especificó que el coeficiente de diseño fuera igual a 0.4 para las edificaciones del grupo B y 0.6 para las del grupo A. Este reglamento fue revisado y una nueva edición fue legal en 1991, en esta las especificaciones para el diseño sísmico no tuvieron ningún cambio, lo mismo ocurrió en las ediciones de 1994 y 1999.

3.3.1.2 Manual de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad en 1993

En 1993 se editó una nueva versión del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en esta edición el capítulo de Diseño por Sismo fue actualizado.

La clasificación de terrenos de cimentación adoptó tres tipos de terrenos según su estratigrafía, que es función del periodo dominante de vibración y de la velocidad efectiva de propagación del sitio.

Con base en estudios de peligro sísmico la República Mexicana se dividió en cuatro zonas y se determino espectros de aceleraciones para diseño sísmico. La tabla 3.9, muestra los valores de cada uno de estos parámetros.

Tabla 3.9. Parámetros para el espectro de diseño. (Normas técnicas complementarias, CFE-1993).

Zona Sísmica	Tipo de Suelos	a_0	c	T_a (s)	T_b (s)	R
A	I	0.02	0.08	0.2	0.6	1/2
	II	0.04	0.16	0.3	1.5	2/3
	III	0.05	0.20	0.6	2.9	1
B	I	0.04	0.14	0.2	0.6	1/2
	II	0.08	0.30	0.3	1.5	2/3
	III	0.10	0.36	0.6	2.9	1
C	I	0.36	0.36	0.0	0.6	1/2
	II	0.64	0.64	0.0	1.4	2/3
	III	0.64	0.64	0.0	1.9	1
D	I	0.50	0.50	0.0	0.6	1/2
	II	0.86	0.86	0.0	1.2	2/3
	III	0.86	0.86	0.0	1.7	1

Estos espectros son aplicables a estructuras del grupo B, para las estructuras del grupo A los valores de la ordenada espectral deben ser multiplicadas por 1.5.

3.3.1.3 Reglamento de construcción del Distrito Federal versión 2004.

El año 2004 se editó una nueva versión del Reglamento de Construcciones para el DF, esta nueva edición caracteriza el terreno en tres tipos de zona: Zona I, lomas; Zona II, Transición y Zona III, Lacustre, para efectos de diseño sísmico la Zona III se divide en cuatro subzona; III_a, III_b, III_c y III_d. Los valores del coeficiente de diseño sísmico para cada zona se muestran en la tabla 3.10,

Tabla 3.10. Parámetros para calcular el espectro de diseño (Normas Técnicas Complementarias para sismo, Reglamento de Construcción, 2004)

Zona	c	a_0	T_a	T_b	r
I	0.16	0.04	0.2	1.35	1.0
II	0.32	0.08	0.2	1.35	1.33
IIIa	0.40	0.10	0.53	1.8	2.0
IIIb	0.45	0.11	0.85	3.0	2.0
IIIc	0.40	0.10	1.25	4.2	2.0
III _d	0.30	0.10	0.85	4.2	2.0

El valor del T_s podrá ser tomado del mapa de isoperiodos del D.F. o podrá calcularse con ensayos y análisis de dinámica de suelos que tomen en cuenta la estratigrafía y las propiedades del subsuelo, en este caso se usará la siguiente fórmula.

$$T_s = \frac{4}{\sqrt{g}} \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{G_i}} \sqrt{(\sum \gamma_i d_i (X_i^2 + X_i X_{i-1} + X_{i-1}^2))} \quad (3.6)$$

Donde: $x_0 = 0$ (en la base)

G_i = módulo de rigidez al cortante en el i-ésimo estrato.

γ_i = Peso volumétrico en el i-ésimo estrato.

d_i = espesor del i-ésimo estrato.

x_1, x_2, \dots, x_n esta dado por la siguiente expresión.

$$x_i = \frac{\sum_{j=1}^i d_j / G_j}{\sum_{j=1}^N d_j / G_j} \quad (3.7)$$

La exploración del subsuelo deberá realizarse hasta la profundidad H_s ($H_s = \sum_{i=1}^N d_i$ profundidad de los depósitos firmes profundos en el sitio de interés).

3.3.2 Estados Unidos de Norte América

3.3.2.1 Normas para diseño sísmico en 1988

Después del terreno de 1985, la UBC puso en marcha una nueva revisión de las normas de diseño, es así que en 1988 se pone en vigencia las medidas de la UBC-88 en la que se especifica la fuerza lateral por la siguiente formula.

$$V = 1.25 \frac{Z.I}{R_w T^{2/3}} SW \quad (3.8)$$

Donde: Z = Factor de zona sísmica. Existen cinco zonas sísmicas cuyo valor fluctúa desde cero hasta 0.4 al igual que en la versión anterior

I = Coeficiente de importancia con valores de 1.0 a 1.25.

R_w = Coeficiente numérico dependiente del sistema estructural, varía entre 4 y 12.

T = Periodo fundamental de la estructura.

W = Peso total de la estructura.

S = Coeficiente de suelo

En esta nueva reglamentación el factor de sitio es especificado solamente por la descripción del terreno. Al igual que el código de 1985, la caracterización del terreno se describe con base en la rigidez y la profundidad, pero se añadió un nuevo factor de sitio, S_4 , es decir una cuarta categoría de terreno. Los coeficientes de sitio y la descripción de cada tipo de terreno se muestran en la tabla 3.11.

Tabla 3.11. Factor de suelo (Seed, 1986 o Roger Di Julio 1989).

Tipo de terreno	Descripción del terreno	S
S1	a) Material rocoso con velocidad de onda de corte mayor de 750 m/s o por otro medio adecuado de clasificación. b) Suelo rígido o denso donde el espesor de la capa de suelo es menor de 60 m.	1.0
S2	Suelo denso o rígido, espesor de capa de suelo mayor a 60 m.	1.2
S3	Perfil de suelo con 12 m. o mas de espesor que contiene más de 6 m de arcilla blanda o semi rígida pero no mas de 12 m de arcilla blanda.	1.5
S4	Un perfil de suelo que contiene más de 12 m de arcilla blanda.	2.0

3.3.2.3 Normas para diseño sísmico de 2000

La NEHRP en 1997 editó una nueva versión de medidas para el diseño sísmico, esta versión sirvió como base para las especificaciones de The International Building Code (IBC) en el año 2000, el cual fue desarrollado juntamente con el Building Seismic Safety Council (BSSC) para servir como único código de construcción de USA y que actualmente se encuentra vigente.

En el IBC-2000 La fuerza lateral esta dada por la siguiente expresión:

$$V = C_s W \quad (3.9)$$

Donde: C_s = Coeficiente de respuesta sísmica,
 W = Peso de la estructura.

El coeficiente de respuesta sísmico se determina para periodos largos y cortos con las siguientes expresiones:

$$C_s = \frac{S_{D1}}{\left(\frac{R}{I_E}\right)T} \quad (3.10)$$

Donde: S_{D1} = Aceleración para periodos largos (1 s) del espectro de diseño.
 R = Factor de modificación de respuesta definido en la IBC.
 I_E = Factor de ocupación definido (en el rango de 1.0 a 1.5).
 T = Periodo de la estructura.

$$C_s = \frac{S_{DS}}{\frac{R}{I_E}} \quad (3.11)$$

Donde: S_{DS} = Aceleración para periodos cortos del espectro de diseño.
 R = Factor de modificación de respuesta definido en la IBC.
 I_E = Factor de ocupación definido (en el rango de 1.0 a 1.5).

Asimismo especifica que el espectro de diseño se construya como se muestra en la figura 3.3.

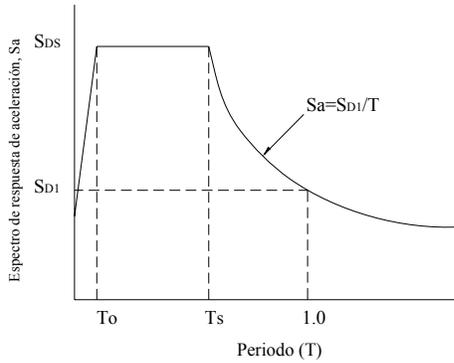


Figura 3.3. Espectro de diseño, IBC-2000 (Hamburger R., 2003 y Marshall, 2004).

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \quad \text{y} \quad S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \quad (3.12)$$

Donde S_{MS} y S_{M1} son los ajustes del espectro de respuesta por el efecto de sitio.

$$S_{MS} = F_a S_s \quad \text{y} \quad S_{M1} = F_v S_1 \quad (3.13)$$

T es el periodo fundamental de la estructura en segundos y T_0 y T_s se calculan con las siguientes formulas:

$$T_0 = \frac{0.2 S_{D1}}{S_{DS}} \quad \text{y} \quad T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (3.14)$$

F_a y F_v son los factores de sitio, dependientes de la clasificación de suelo, para periodo corto ($T=0.2$ s) y periodo largo ($T=1$ s) respectivamente. S_s y S_1 son las ordenadas espectrales en roca (clase B) para $T=0.2$ s y $T=1$ s, los cuales pueden obtenerse de mapas que registran la ordenada espectral para el máximo sismo considerado en el análisis probabilístico de peligro sísmico, es importante señalar que estos factores reemplazaron al factor sísmico (aceleración máxima del terreno), Z en la UBC-1997 y A_v y A_a NEHRP-1994. Las tablas 3.12 y 3.13 muestran estos factores de sitio.

Tabla 3.12. Factor de sitio para periodos largos, F_a , IBC-2000 (Ronald O. Hamburger, 2003 y Marshall, 2004)

Tipo de suelo	Intensidad de movimiento en roca (tipo B)				
	$S_1 \leq 0.25$	$S_1 = 0.50$	$S_1 = 0.75$	$S_1 = 1.0$	$S_1 = 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.8	1.7	1.2	0.9	a
F	a	a	a	a	a

Tabla 3.13. Factor de sitio para periodos cortos, F_v , IBC-2000 (Ronald O. Hamburger, 2003 y Masrhall, 2004)

Tipo de suelo	Intensidad de movimiento en roca (tipo B)				
	$S_s \leq 0.1$	$S_s = 0.20$	$S_s = 0.30$	$S_s = 0.4$	$S_s \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

Tipo de suelo	Intensidad de movimiento en roca (tipo B)				
	$S_s \leq 0.1$	$S_s = 0.20$	$S_s = 0.30$	$S_s = 0.4$	$S_s \geq 0.5$
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	a
F	a	a	a	a	a

Donde: “a” = estudio de geotecnia específico del sitio y análisis dinámico de respuesta de sitio puede ser usado para determinar los valores apropiados.

3.4 EFECTO DE SITIO RELACIONADO CON LA INTENSIDAD DE MOVIMIENTO DE LA ROCA EN LAS NORMAS DE DISEÑO SÍSMICO.

Seed en 1986 reportó: *aparte de los depósitos que contienen arcillas blandas y semirígidas, los valores de la aceleración pico sobre los diferentes tipos de suelo no difieren apreciablemente entre sí, sobre todo para niveles de aceleración comprendidos entre 0.1 y 0.4 g.*

Para esta afirmación Seed se basó en los resultados de aceleraciones pico de cuatro tipos de depósitos: rocas, depósitos de suelos rígidos que contengan suelos sin cohesión o arcillas rígidas hasta de 60 m de espesor, depósitos potentes de suelos sin cohesión, con espesores mayores a 75 m y depósitos formados por arcillas blandas a semirígidas. Seed extendió su conclusión mencionando que incluso para niveles altos de aceleración sobre roca (0.7 g) las aceleraciones en depósitos, que no contengan arcillas blandas o semirígidas, son menores en un 25%, y que por lo tanto no existe influencia importante de las condiciones del suelo en los valores de la aceleración pico.

Sin embargo, las investigaciones que surgieron después del sismo de Loma Prieta en 1989 dieron otros resultados que se presentan en la figura 3.4. En esta figura se observa que mientras las aceleraciones en roca se encuentran alrededor de 0.08 g o 0.1 g, las aceleraciones en suelos blandos se amplifican de 2 a 3 veces (0.2 o 0.3 g) y que la amplificación de la ordenada espectral en periodo corto (0.2 a 0.3 s) también amplifica de 2 a 3 veces.

Un resultado parecido fue obtenido por Joyner et. al., 1994 al calcular la amplificación con estudios estadísticos usando espectros de respuesta entre rocas y suelos blandos (llamado también relación de espectros de respuesta, RRS) para el sismo de Loma Prieta (ver figura 3.5). Dobry et. al., 2000 reportan que Housner, 1990 y Chang, 1991 encontraron un comportamiento de amplificación similar entre suelos rígidos y roca pero con valores más bajos de RRS.

Por otro lado, Idriss et. al.1991, a partir de más registros en suelos blandos del sismo de Loma Prieta, encontraron la curva que se muestra en la figura 3.6. Donde se observa que para aceleraciones bajas en roca, 0.05g a 0.10g, la aceleración en el suelo blando se amplifica de 1.5 a 4, este factor de amplificación decrece conforme aumenta la intensidad de movimiento de la roca y llega a ser aproximadamente 1 alrededor de 0.4g de aceleración en roca, con tendencia a deamplificar para aceleraciones más grandes. Dobry et. al., 2000 hacen notar que esta respuesta

de suelo blando frente al incremento de aceleraciones en roca está directamente relacionado a la conducta de esfuerzo-deformación no lineal de los suelos.

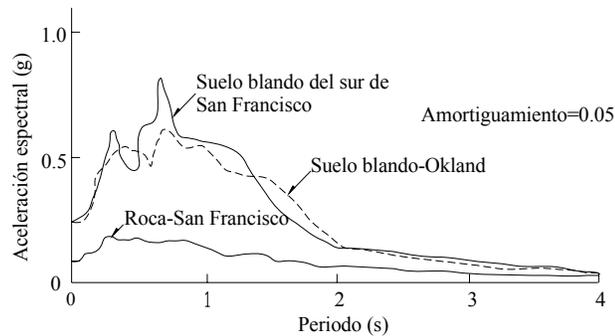


Figura 3.4. Espectros promedio registrados durante el sismo de Loma Prieta en la Bahía de San Francisco, terrenos en roca y terrenos blandos (Dobry et al., 2000).

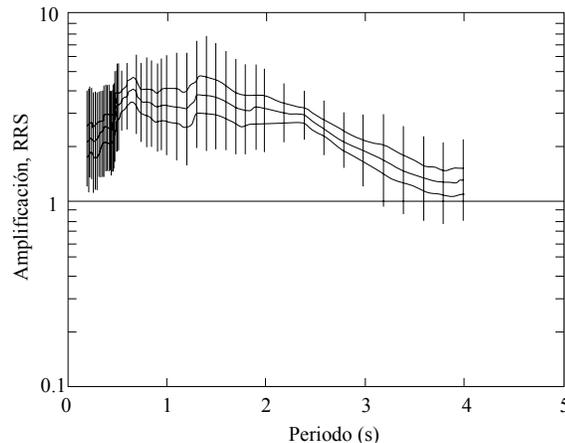


Figura 3.5. Cálculo para la curvas RRS promedio con 5% de amortiguamiento de los registros del sismo de Loma Prieta en suelo blando. La curva de en medio representa la razón del promedio geométrico como función del periodo, las curvas de la parte superior e inferior representan el rango máximo y mínimo de la desviación estándar para el promedio de la razón de logaritmos. Las líneas verticales muestran el máximo y mínimo de la desviación estándar para la razón de logaritmos (Dobry et al., 2000).

Dobry et. al., 2000 también mencionan que la similitud encontrada por Seed et. al. es relativamente cierta para diferentes suelos, incluyendo suelos blandos, en zonas altamente sísmicas (aceleraciones cercanas a 0.4g) y que no es cierta en ciudades donde los niveles de aceleración máxima de la roca son bajos (0.1 o 0.2 g) y las aceleraciones de los suelos blandos se encuentran alrededor de 0.2 a 0.3g con amplificaciones en la ordenada espectral en periodos cortos considerables.

Estas observaciones hicieron que la NERHP cambiara el concepto de enfocar el peligro sísmico sólo a movimientos en roca o terreno firme y en 1997 puso a disposición de la comunidad ingenieril un nuevo código de diseño, en el cual presentó dos factores de amplificación o factores de respuesta de sitio, como se vio en las tablas 3.12 y 3.13, que dependen de la clasificación de sitio (presentaron un nuevo sistema de clasificación) y de la intensidad de movimiento de la roca

(S_a , ordenada espectral para periodos cortos y S_v , ordenada espectral para periodos largo). Por lo tanto, estos factores, F_a , factor para periodos cortos de la intensidad del movimiento de la roca, y F_v , factor para periodos largos del movimiento, modifican el espectro de diseño para terrenos firmes o roca obteniendo los espectros para cada tipo de suelo (tipo de terreno según las normas nacionales), tal como se muestra en la figura 3.7.

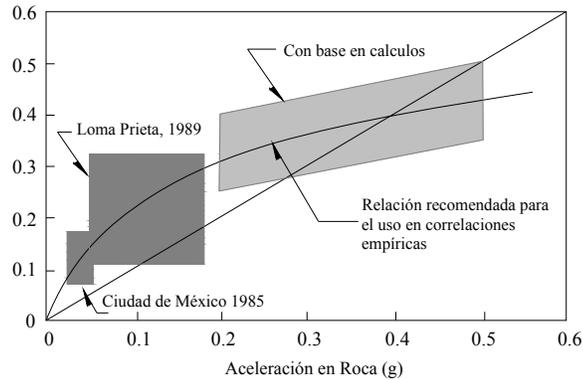


Figura 3.6. Relación entre la aceleración máxima de roca y suelos blandos (Dobry et al., 2000).

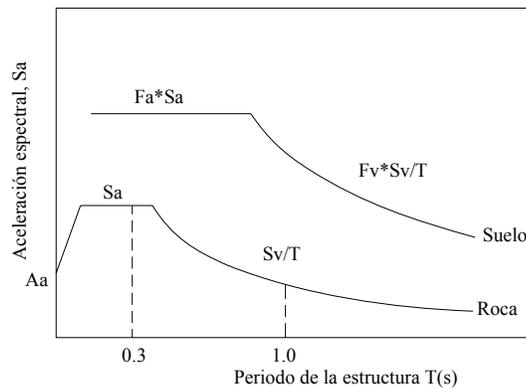


Figura 3.7. Factores que corrigen el espectro de diseño en roca o suelo firme. Dobry et. al. 2000

Estos factores tienden a crecer en áreas de baja a mediana sismicidad y decrecen en áreas de alta sismicidad, lo cual refleja implícitamente el comportamiento no lineal del terreno observado en el sismo de Loma Prieta.

Las normas de la CFE de 1993 atendieron esta problemática mediante una regionalización sísmica de la República, a partir de un análisis de peligro sísmico en roca, con la clasificación del terreno en tres tipos, obteniendo así 12 espectros de diseño para todo el país y considerando implícitamente el comportamiento no lineal del terreno para el tipo I y II, tal como se vio anteriormente.

3.5 COMENTARIOS

Las primeras normas de diseño sísmico que consideraron el efecto de sitio se basaron en mediciones de microtemores en diferentes suelos (Kanai, 1954) y coeficientes sísmicos de acuerdo con el tipo de suelo (reglamento chileno de 1956).

En el contexto nacional, con el Reglamento de Construcción de 1960 del D.F., se comienza a tomar en cuenta el efecto de sitio en México adoptando coeficientes sísmicos dependientes del tipo de estructura y terreno considerando la compresibilidad del terreno. Años después, la CFE editó los primeros Manuales para Obras Civiles, aceptado a nivel nacional, el cual especificó coeficientes de diseño sísmico según una regionalización sísmica de la República, la clasificación del terreno (se clasificó en tres tipos en función de sus propiedades físicas).

La edición de 1976 de las normas para diseño sísmico para el D.F dividió la ciudad en tres zonas: Zona I (firme), Zona II (transición) y Zona III (compresible). Los coeficientes sísmicos fueron dependientes de esta clasificación y se les asignó valores más altos a los de la edición anterior. Para construir el espectro de diseño se añadió dos parámetros más, a_0 (aceleración del terreno) y r (coeficiente que define la curva del espectro en la parte de periodos largos). En este mismo año, USA toma en cuenta el efecto de sitio en sus códigos de diseño y la SEAOC propone el coeficiente de sitio "S", el cual dependía del periodo fundamental de la estructura y del terreno. Dos años más tarde se cambió el factor S por espectros de diseño específicos de sitio (condiciones de roca y suelo rígido, tipo I; suelos de gran espesor sin cohesión o arcillas, tipo II, y arenas y arcillas de blandas a medias, Tipo III).

En este contexto, la CFE presentó una nueva versión de los manuales de obras civiles en la cual se presentaba la regionalización del país en cuatro zonas usando por primera vez curvas de intensidad de movimiento del terreno en el análisis de peligro sísmico, aunque esta regionalización fue reglamentada en 1981. Asimismo, se presentó la clasificación de terreno en tres tipos según la rigidez del terreno expresado con el módulo al cortante, en esta edición al igual que en las normas del D.F del 76 se presentó los parámetros a_0 y r para construir los espectros de diseño, a comparación de la edición anterior, la pendiente del espectro para periodos largos fue más plana en los terrenos tipo I y II.

Después del sismo del 85 se puso en marcha la revisión del reglamento vigente (reglamento del 76) y en 1988 se editó la nueva versión, ésta presentó coeficientes de diseño mayores a los del código anterior y para las zonas II y III el valor aumento, aproximadamente en un 80%, y se extendieron las fronteras que dividían las zonas. La aceleración máxima del terreno no fue tomada en cuenta para construir los espectros de diseño y la pendiente del espectro en periodos largos fue la misma que se especificó en el reglamento anterior.

En los siguientes reglamentos del D.F, las fronteras de las zonas fueron cambiando, más no los coeficientes sísmico manteniéndose igual hasta la versión de 2004.

Después de dos ediciones de los Manuales de Obras Civiles, en 1993 la CFE edita una nueva edición, en la cual se presenta las Normas Técnicas Complementarias para Diseño Sísmico que es la herramienta y guía de diseño sísmico para varios estados de la República actualmente. En esta

versión se clasifica el terreno en tres tipos, Tipo I, II y III, en función de la rigidez (expresado como una velocidad de onda de corte efectiva, β_S) y el periodo del terreno (dado por, $T=4H/\beta_S$). La profundidad de terreno es considerada implícitamente al considerar el terreno firme cuando la velocidad de onda de corte sea mayor a 700 m/s para calcular β_S . En esta versión, la regionalización de la republica presentó fronteras diferentes, pero las zonas sísmicas siguieron siendo cuatro zonas sísmicas, además los coeficientes sísmicos fueron mayores.

La metodología de USA para tomar en cuenta los efectos de sitio ha sido mediante la adopción de coeficientes de sitio (S), los cuales eran dependientes de la clasificación de suelo, al principio se propuso una clasificación en tres tipos de suelo para cualquier zona sísmica, estas zonas dependían de la regionalización del país (se propuso cuatro zonas sísmicas) en función de las intensidades máximas del terreno (factor Z, para la UBC y A_a y A_v para la NEHRP), después del sismo del 85 se adoptó un nuevo tipo de suelo, al cual le correspondía el factor S4. Esta clasificación (cuatro tipos de suelo) estuvo vigente hasta 1994. En este año se presentó una nueva clasificación la cual constó de seis tipos de suelo y el factor sísmico Z o A_a y A_v (aceleración máxima del terreno) fue reemplazado por S_v y S_a (ordenadas espectrales para periodos cortos y largos). El factor "S" para periodos largos también fue reemplazado por los factores F_a y F_v dependientes de S_a y S_v y de la clasificación de suelos propuesta.

Con el avance del conocimiento geológico, geotécnico, geofísico y sísmico, estos reglamentos han ido evolucionando. El mayor conocimiento de los periodos dominantes, espesor de la arcilla y las amplificaciones de las ondas sísmicas dieron lugar a que en las normas de 2004 para la ciudad de México la Zona III se divida en cuatro subzonas y que cada una tenga asignada un coeficiente sísmico diferente. Asimismo, la IBC-2000 ahora caracteriza el terreno en seis clases y asigna dos factores de sitio por clase, siendo el parámetro de entrada el V_{S30} .

Finalmente, para obtener factores de amplificación sería más conveniente usar promedios de RRS o funciones de transferencia obtenidas con la técnica estándar (SSR), la técnica de Nakamura para temblores (HVSr) o microtemblores (HVNR) según los resultados obtenidos por Dobry et. al.2000.

CAPÍTULO 4: CLASIFICACIÓN DE TERRENOS DE CIMENTACIÓN CON FINES DE DISEÑO SÍSMICO

4.1 INTRODUCCIÓN

La clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico nace con la necesidad de tomar en cuenta el efecto de sitio en el diseño estructural y ser parte de los códigos de construcción. Es decir, esta clasificación debe ser dependiente de la amplificación del terreno frente a un evento sísmico. A pesar de la complejidad de factores que intervienen en esta amplificación, se puede clasificar los terrenos en función de parámetros como: la velocidad de onda de corte, V_{SH} , espesor del terreno, periodo dominante, número de golpes de la prueba SPT, etc.

Con el objetivo de comparar las clasificaciones usadas en el país y las que se usan en otros países, se estudió los sistemas de caracterización para los códigos nacionales e internacionales. En el ámbito nacional se estudió los reglamentos de construcción de las ciudades de Acapulco, Veracruz-Boca del Río, Oaxaca, El Manual de Obras Civiles, diseño por Sismo, de la Comisión Federal de Electricidad, CFE (1993) y Las Normas Técnicas Complementarias del DF (2004). En el plano internacional se analizó las normas de la NEHRP (2007), IBC (2000) y el Eurocode 8 (Eurocode-8) juntamente con el parámetro V_{S30} que es el factor principal para la clasificación de los terrenos en estos códigos. Asimismo, se menciona algunas aportaciones del sistema de clasificación con base en el V_{S30} y finalmente, se presenta un sistema de clasificación diferente que se encontró en la bibliografía.

4.2 CODIGOS NACIONALES

Aunque, en el capítulo anterior se describieron las Normas Técnicas complementarias para Sismos de CFE y del Reglamento de Construcciones del DF, en esta sección volveremos a describir estas normas pero daremos más detalles de las consideraciones en cuanto a la clasificación del terreno.

4.2.1 Clasificación de terrenos de cimentación en el Manual de Obras Civiles, diseño por sismo de la CFE-1993.

Esta norma reconoce que la respuesta de sitio ante una excitación sísmica es función de varios factores que están relacionados con la geometría y la heterogeneidad de los materiales que conforman el depósito, sin embargo reduce esta complejidad caracterizando el sitio con dos parámetros: periodo predominante de vibración y la velocidad efectiva de propagación del sitio, pues la amplificación del terreno provocado por el efecto de sitio se puede relacionar con estos parámetros mediante el remplazo del perfil estratigráfico por un estrato equivalente con profundidad y periodo fundamental de vibrar similares a los de la estratigrafía real.

En el estrato equivalente no se incluyen efectos de irregularidades laterales, debido a esto se puede tomar como modelo un depósito de estratificación horizontal (capas planas) que descansa sobre una base rígida (representación de la roca basal) tal como se muestra en la figura 4.1. La

profundidad de la roca basal queda definida donde la velocidad de propagación de ondas de corte (β_s) tenga valores mayores a 700 m/s.

También especifica que la velocidad efectiva se determine con el concepto de velocidades o lentitudes recíprocos (técnicas aproximadas). Para el primer caso se asume que el tiempo que tarda una onda de corte en recorrer un estrato uniforme de espesor H_s y β_s ($T = H_s / \beta_s$) es el mismo tiempo cuando recorre un estrato estratificado ($T = \sum_m h_m / \beta_m$, donde h_m y β_m son el espesor y la velocidad de propagación en el m-ésimo estrato).

Al igualar estos dos tiempos tenemos la siguiente expresión:

$$\beta_s = \frac{H_s}{\sum_{m=1}^M \frac{h_m}{\beta_m}} \quad (4.1)$$

Además se especifica, cuando los valores de velocidades de los estratos sean parecidos, la velocidad efectiva de propagación se calculará con la integración del perfil de velocidades y la división de este valor por la profundidad del depósito (Véase expresión 4.3).

$$\beta_s = \frac{\sum_{m=1}^M \beta_m h_m}{H_s} \quad (4.2)$$

El periodo fundamental de vibración se calculará a partir de la velocidad efectiva usando la siguiente fórmula.

$$T_s = \frac{4H}{\beta_s} \quad (4.3)$$

Con estas consideraciones, la norma de CFE considera que para clasificar un determinado terreno se procede de la siguiente forma:

- 1.- Ubicar la profundidad del terreno firme, este estrato debe tener velocidades de propagación β_0 mayores o iguales a 700 m/s o módulos de rigidez G_0 mayores o iguales a 85,000 t/m².
- 2.- Los suelos comprendidos entre el terreno firme y la superficie se clasificaran según el periodo fundamental de vibración (periodo predominante), T_s y la velocidad efectiva, β_s .
- 3.- Se calcula la velocidad característica β_c y el periodo característico T_c , para la zona en estudio dependiendo de la zona sísmica en la que se encuentra. Los valores de estos parámetros se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Valores de β_c y T_c (CFE, 1993).

Zona Sísmica	β_c (m/s)	T_c (s)
A	400	5.3
B	400	5.3
C	500	4.7
D	500	2.5

Con los parámetros dinámicos T_s y β_s y característicos T_c y β_c de la zona de estudio se procede a dibujar la carta de microzonificación sísmica que a continuación se presenta.

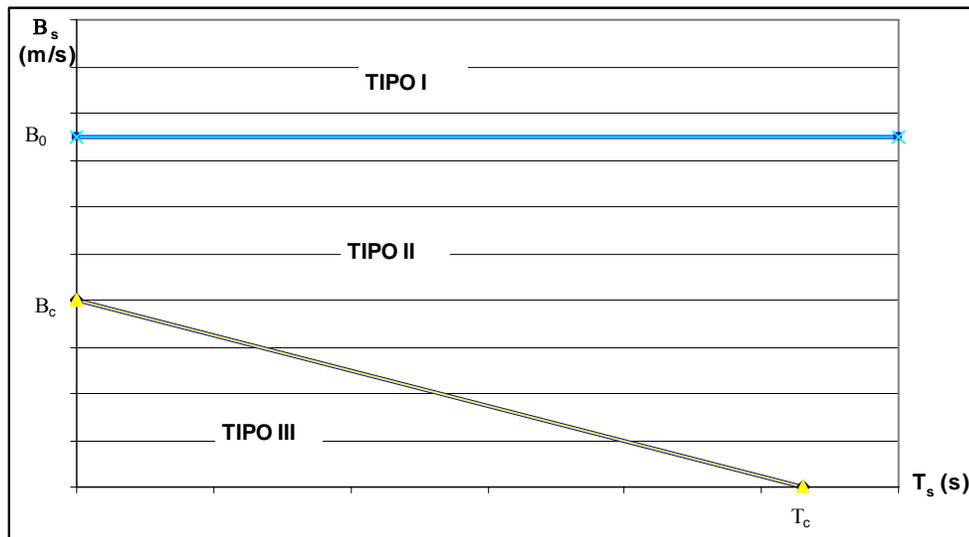


Figura 4.1. Carta de microzonificación (CFE, 1993).

Con esta carta el terreno se clasifica en:

Tipo I, Terreno firme, en los cuales los depósitos de suelo están formados solamente por estratos con velocidades de propagación β_0 mayores o iguales a 700 m/s o módulos de rigidez G_0 mayores o iguales a 85,000 t/m².

Tipo II, Suelo intermedio, depósitos de suelo con periodo fundamental de vibración y velocidad efectiva que cumplan la siguiente relación:

$$\beta_c T_s + \beta_s T_c \geq B_c T_c \quad (4.4)$$

Tipo III, Terreno blando, con periodo fundamental de vibración y velocidad efectiva de propagación correspondiente a la siguiente relación:

$$\beta_c T_s + \beta_s T_c < B_c T_c \quad (4.5)$$

4.2.2 Clasificación de terrenos de cimentación en las NTC para diseño por sismo del Distrito Federal

Los estados que no tienen Reglamento de Construcción muchas veces usan las Normas Técnicas Complementarias para Diseño del Reglamento del Distrito Federal, por eso consideramos importante mencionar las especificaciones en cuanto a la clasificación del terreno.

El Reglamento de Construcción del D.F.-2004 divide a la ciudad de México en tres:

Zona I. Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y de rellenos no controlados.

Zona II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros.

Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son generalmente medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

Esta norma divide el terreno según las características geológicas y geotécnicas de los depósitos a diferencia de la norma de CFE que divide el terreno con base en β_s y T_s . Aunque subdividen la Zona III en cuatro subzonas, con fines de diseño sísmico, las características geotécnicas son las mismas.

En el apéndice de esta norma se especifica que el periodo dominante puede ser calculado usando la ecuación 4.6 o a partir de las curvas de isoperiodo mostrado en la figura 4.2.

$$T_s = \frac{4}{\sqrt{g}} \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{d_i}{G_i}} \sqrt{(\sum \gamma_i d_i (X_i^2 + X_i X_{i-1} + X_{i-1}^2))} \quad (4.6)$$

Donde:

$$x_i = \frac{\sum_{j=1}^i d_j / G_j}{\sum_{j=1}^N d_j / G_j} \quad (4.7)$$

Gómez A. (2000), menciona que los parámetros dinámicos involucrados en esta expresión deben ser calibrados con la velocidad de onda S medidas experimentalmente. El H_{\max} es considerado

para $V_S > 760$ m/s. También señala: *es conveniente calcular valores de T_S mediante pruebas dinámicas de sitio para cerrar las correlaciones entre los diferentes valores obtenidos.*

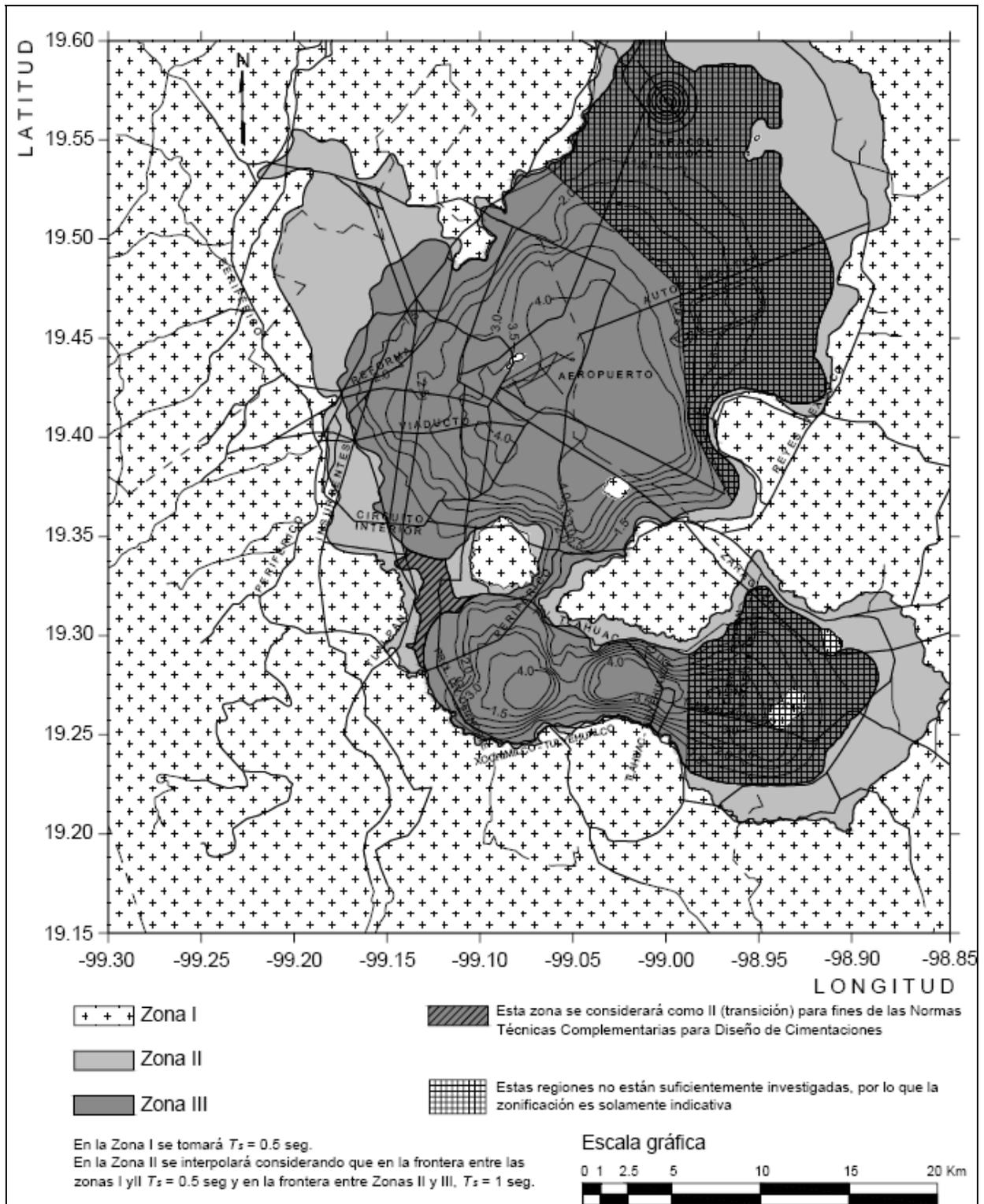


Figura 4.2. Mapa de isoperiodos (RCDF-2004, NTC).

En esta clasificación el periodo, T_s , para la zona I (Terreno firme) es menor a 0.5s, para la zona II (terreno de transición) se encuentra entre 0.5s y 1.0 s y para la zona III (suelo lacustre) los valores de T_s son mayores a 1.0 s.

4.2.3 Clasificación de terrenos de cimentación en la Zona Conurbada de Veracruz-Boca del Río (ZCV)

El reglamento que rige en la ZCV es el Reglamento de Construcciones del Estado de Veracruz, el cual en 1998 fue revisado y actualizado. La propuesta para el nuevo reglamento también contempla la revisión y actualización de las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo, es importante señalar que esta propuesta de reglamento todavía no ha sido aprobada.

Para la actualización de estas normas se tomó como base la estructura de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del DF (NTC-DF), (propuesta de las normas técnicas complementarias para diseño por sismo).

La clasificación de terrenos de cimentación es un inciso nuevo en esta propuesta (con el nombre de clasificación de suelos), bajo este inciso el terreno se debe clasificar de la siguiente forma:

- I) Si se tienen mapas de microzonificación sísmica aprobados por los Ayuntamientos, se hará referencia a ellos.
- II) Para las ciudades en que no existan estos mapas, se procederá como sigue:
 - a) Para estructuras cuyo peso unitario medio sea menor a 5 ton/m^2 y que de acuerdo con lo especificado en la Norma Técnica de Cimentaciones no requieran de una exploración geotécnica. Se utilizarán los mapas de zonificación geológica y morfología incluidos en la Norma Técnica de Cimentaciones, con la siguiente clasificación general de suelos.

Tabla 4.2. Clasificación de terrenos para estructuras con peso unitario menor a 5 t/m^2 . (Propuesta de Reglamento de Construcciones del Estado de Veracruz, 1998)

Tipo de Suelo	Descripción
I	En todas las zonas de roca
II	En todos los suelos terciarios
III	En todos los suelos cuaternarios

- b) Para otras estructuras se usará la siguiente clasificación:

Tabla 4.3. Clasificación de terrenos para estructuras con peso unitario mayor a 5 t/m^2 . (Propuesta de Reglamento de Construcciones del Estado de Veracruz, 1998)

Tipo de Suelo	Descripción
I	Rocas con velocidades efectivas de propagación de onda de corte mayor a 750 m/s.
II	Suelos firmes con velocidades efectivas de propagación de onda de corte entre 180 m/s y 750 m/s, o bien con una resistencia efectiva de penetración estándar entre 15 y 50 golpes.

III	Suelos blandos firmes con velocidades efectivas de propagación de onda de corte menor de 180 m/s, o bien con una resistencia efectiva de penetración estándar menor a 15 golpes o contenidos de agua superiores al 40%.
-----	---

La velocidad efectiva de propagación se calculará como:

$$\bar{V}_s = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{si}}} \quad (4.8)$$

Donde: h_i es el espesor del estrato i y V_{si} es la velocidad de propagación de onda de corte del estrato i . La resistencia efectiva a la penetración se calculará como:

$$\bar{N}_i = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{N_i}} \quad (4.9)$$

Donde: N_i es el número de golpes de una prueba de penetración estándar del estrato i .

Es importante señalar que esta propuesta considera suficiente 30 m de exploración para definir la velocidad efectiva de propagación o la resistencia efectiva del terreno.

Según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones, la ZCV se ubica en una parte de la zona sur del estado, en la cual, el suelo es de origen cuaternario. La tabla 4.4 describe la región fisiográfica y los materiales en el subsuelo de estos depósitos.

Tabla 4.4. Descripción de la fisiografía y materiales del subsuelo que se encuentra en la ZCV. (Propuesta de Reglamento de Construcciones del Estado de Veracruz, 1998).

Naturaleza Geológica	Región Fisiográfica	Materiales en el Subsuelo
Suelos Cuaternarios	Playas y Dunas	Suelos transportados. Estratigrafía homogénea, arenas, arenas limosas, intercalaciones de coral y materia orgánica.
Suelos Cuaternarios	Llanura y Valles	Suelos transportados. Estratigrafía homogénea. Materia orgánica, suelos aluviales, gravas, arena, limos, arcillas y sus combinaciones.
Suelos Cuaternarios	Lomerío	Suelos residuales. Estratigrafía heterogénea, gravas, arena, limos, arcillas y sus combinaciones.

Es decir para edificios de menos de 5 t/m² siempre se diseñaría con las especificaciones para el suelo tipo III.

4.2.4 Clasificación de terrenos de cimentación en el Reglamento de Construcción para la Ciudad de Acapulco.

En la ciudad de Acapulco rige el Reglamento de Construcciones para el Estado de Guerrero de 1988, el cual tuvo su última revisión en 1989. Las Normas Técnicas Complementarias de este Reglamento son una adaptación de las NTC-DF de 1989. (Reglamento de Construcciones para los Municipios del Estado de Guerrero, 1989). En lo que respecta a la clasificación de terrenos, este manual divide a los terrenos en tres tipos (Véase la tabla 4.5)

Tabla 4.5. Clasificación de los terrenos de cimentación para la ciudad de Acapulco-Estado de Guerrero (Reglamento de Construcciones del Estado de Guerrero, 1989).

Tipos de Terreno	Descripción
I	Terreno firme, tal como tepetate compacto, areniscas medianamente cementadas y arcilla muy compacta. Se incluye la roca basal.
II	Suelo de baja rigidez, tal como arenas no cementadas o limos, de mediana o alta compacidad, arcillas de mediana compacidad y depósitos aluviales compactos, todo lo anterior de espesor menor de 40 m
III	Arcillas blanda muy compresibles, depósitos aluviales sueltos y depósitos de barra en las costas, todo lo anterior de espesor menor de 40 m.

Estos tipos de suelo corresponden a las zonas sísmicas C y D indicadas en el mapa de regionalización del Estado (la ciudad de Acapulco se encuentra en la zona sísmica D).

Tipo I, el terreno se considerará firme, del tipo I, cuando se encuentre la roca basal o terrenos con módulos de rigidez mayores a 7500 t/m^2 o requieran más de 50 golpes de penetración estándar, bajo el nivel donde se transmita las aceleraciones horizontales a la construcción.

Tipo II y III, para los estratos comprendidos entre el terreno firme y el nivel donde se transmite las aceleraciones a la edificación se debe calcular la velocidad efectiva del terreno, β y T_0 .

$$\bar{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i}{\sum_{i=1}^n \frac{H_i}{\beta_i}} \quad \text{y} \quad T_0 = \frac{4H}{\beta} \quad (4.10)$$

Donde: H_i = espesor de i-ésimo estrato en m.

$$\beta_i = \sqrt{g(G_i / \gamma_i)}$$

G_i = módulo de rigidez (t/m^2)

γ_i = Peso volumétrico (t/m^3)

g = aceleración de la gravedad, en m/s^2

Para considerar el terreno de tipo II se debe cumplir: $\bar{\beta} < 700 - 550T_0$ y Tipo III, $\bar{\beta} \geq 700 - 550T_0$, sino se tiene información precisa de γ_i o G_i se pueden tomar los siguientes valores. 1.5 t/m^3 y $0.35 E_i$ respectivamente.

Las especificaciones para el terreno firme en estos dos tipos de terrenos son los mismos que para el tipo I. La profundidad de los sondeos necesaria para decidir cuándo todos los suelos subyacentes son firmes queda a juicio de los técnicos responsables de la obra. Para asignar un tipo de terreno la norma especifica lo siguiente:

Cuando las construcciones sean ligeras o medianas (consta de no más de tres niveles y cuya área construida por nivel no excede de 400 m^2) que no pertenezcan al grupo A (hospitales, museos, construcciones públicas, gubernamentales y municipales) se podrá utilizar los mapas de regionalización (en las normas se incluye estos mapas de regionalización), cuando los predios se ubiquen en los mapas a menos de 200 m de la frontera entre dos tipos de terreno se supondrá ubicados en el zona más desfavorable.

Se requerirá el estudio del subsuelo para determinar el tipo de terreno en las construcciones del grupo A y las que se consideren ligeras o livianas, pero sino se realizará los estudios del subsuelo, se trabajará con el tipo de terreno que conduzca a los efectos más desfavorables para la estructura de interés. Esta disposición es aplicable a cualquier construcción.

Cuando se trate de una estructura ligera o mediana en lugares donde no existan mapas de regionalización, el técnico responsable podrá decidir que tipo de terreno le corresponde al sitio de interés con base en la inspección visual del sitio y sus alrededores y en la obtención de información sobre la experiencia que exista en la zona, también podrá incluir estudios realizados en construcciones cercanas y encuestas realizadas a los vecinos del lugar. En esta obtención de información se debe tener como prioridad la información de: proximidad a lagos, lagunas o pantanos, tipos de depósitos (poner atención en depósitos aluviales), etc. La información obtenida puede completarse con pozos a cielo abierto a profundidades que el responsable de la obra considere suficiente.

4.2.5 Clasificación de terreno en el Reglamento de Construcción del Estado de Oaxaca

El Reglamento de construcción y seguridad estructural para el estado de Oaxaca de 1998, menciona que la clasificación de terrenos para fines de diseño sísmico sea como sigue:

Tipo I: Terrenos formados por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estados suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas y de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena.

Tipo II: Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m. de profundidad, o menos, y que esta constituida predominantemente por estratos arenosos y limo-arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de estas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros.

Tipo III: Lacustre, integrado por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados de limo o arcilla. Estas capas arenosas son de consistencia firme a muy dura y de espesores variables de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

El estado se encuentra dividido en tres zonas sísmicas B, C y D de acuerdo con la regionalización establecido en el manual de CFE (el área de estudio en esta tesis corresponde a la zona sísmica C). Los coeficiente sísmicos adoptados en este reglamento son los mismos que los de CFE-1993 (se hace notar que esta medida es provisional hasta que se expidan las Normas Técnicas Complementarias).

4.3 CODIGOS INTERNACIONALES

Mencionaremos las especificaciones en cuanto a la clasificación de terreno (llamados en estos códigos, Clasificación de Suelos) en los Reglamentos de Construcción de la IBC-2000 y el Eurocode 8 (Euro-8). Estas normas especifican que la clasificación de suelos se realice con base en un único parámetro de entrada, V_{S30} , como se muestras en las tablas 4.6 y 4.7

Tabla 4.6. Clasificación de suelos usando VS30 como indicador de la respuesta de suelo según

Tipo de suelo	Descripción del suelo	V_{S30} (m/s)
A	Roca dura	>1500
B	Roca	760 – 1500
C	Suelo muy denso	360 – 760
D	Suelos arenosos	180 – 360
E	Suelos blandos	<180
F	Suelos especiales	-

Tabla 4.7. Clasificación del tipo de suelo de acuerdo a las características mecánicas principales de las capas superficiales según al Eurocode 8.

Tipo de suelo	Descripción del suelo	V_{S30} (m/s)
A	Roca u otro formación geológica semejante, incluyendo hasta 5 m de material blando.	>800
B	Depósitos de suelos muy densos	360 – 800
C	Depósitos de Suelos densos	180 – 360
D	Depósitos de Suelos blandos	<180
S ₁	Depósitos de suelos con arcillas tipo zona del lago de la cuenca de México	<100
S ₂	Depósitos de suelos licuables	-

Con respecto a la IBC-2000, cuando se tiene una estratigrafía con más de 3.0 m de arcilla blanda se hace una excepción a esta regla, ya que en este caso el terreno es clasificado como clase E, sin necesidad de calcular el V_S hasta 30 m. De esta forma se asegura que un depósito de suelo blando sea clasificado como clase E, aun cuando la profundidad del terreno firme o roca sea menor a 30 m.

Cuando se trate de depósitos de arcillas muy blandas o medianamente rígidas se estudia las propiedades hasta 36 m. En este caso la clase de sitio generalmente será F y además requiere una evaluación específica del sitio, un ejemplo de este caso son las arcillas de la ciudad de México. Además la clase F incluye: suelos vulnerables a una falla potencial o colapso frente a cargas sísmicas como licuación de suelos, arcillas altamente sensitivas o colapsables; depósitos de mas de 3 m de arcilla altamente orgánica y depósitos de arcillas muy plásticas ($PI > 75$) con más de 8 m de espesor. (Dobry et al. 2000).

En caso de no tener el V_{S30} se puede utilizar la resistencia a la penetración estándar (N o N_{ch}) o esfuerzo de corte no drenado (S_u).

4.3.1 Parámetro V_{S30}

En 1994 la National Earthquake Hazards Reduction Program NEHRP recomendó un nuevo procedimiento para caracterizar el terreno, este nuevo procedimiento describía 6 clases de sitio (Suelo tipo A, B, C, D, E y F) según la velocidad de onda de corte representativa para 30 m de profundidad, V_{S30} . Estas medidas fueron luego adoptadas en la siguiente revisión de 1997 de la NEHRP y la UBC para finalmente ser parte de la IBC-2000.

El V_{S30} se define como la velocidad de la onda de corte para 30 m de profundidad. $V_{S30} = 30/\text{tiempo de viaje de la onda de corte para recorrer 30 m}$. Para un suelo de n capas la expresión matemática sería la siguiente:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{n=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (4.11)$$

Donde: $\sum_{n=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}$ es el tiempo que tarda la onda SH en recorrer 30 m. d y V son el espesor y la velocidad de cada capa respectivamente. No se trata de un simple promedio aritmético.

Probablemente, el primero que propuso el V_{S30} como parámetro de clasificación de terrenos fue Borchardt, cuando analizó la respuesta de sitio en varios lugares de USA con los registros del terremoto de Loma Prieta (1989). En los siguientes párrafos describiremos el trabajo que realizó este investigador para definir el V_{S30} .

Borchardt, correlacionó la velocidad de onda de corte V_S con parámetros que describen las propiedades físicas de los materiales para caracterizar la respuesta de sitio. Como base de datos usó 130 regiones de pozos in situ de San Francisco y Los Ángeles, estos datos mostraron que las unidades de roca y suelo pueden dividirse, con base en la velocidad de onda de corte y propiedades físicas, en 13 grupos distinguibles. Al hacer una inspección más rigurosa encontró cuatro principales clases de sitio según la velocidad de corte y las propiedades físicas.

Para distinguir las clases de sitio, planteo tres criterios: Velocidad de onda de corte hasta 30 m, propiedades físicas y el espesor mínimo. Este último fue seleccionado para garantizar un espesor suficiente en el cual ocurra la existencia de la amplificación de resonancia en una banda de

periodos de interés en ingeniería (>0.1 s). Con esta clasificación se tiene cuatro grupos principales de suelo, la primera clasificación se divide en SC Ia y SC Ib, lo mismo que en la cuarta clasificación, la tabla 4.8 presenta dicha clasificación.

Por otro lado, Mediante el cálculo de factores de amplificación promedio usando razones de Espectros de Fourier entre roca o suelo firme y suelos de poca resistencia (con datos de los registros del sismo de Loma Prieta) Borchedt encontró que la amplificación es proporcional a la velocidad de onda de corte hasta los 30 m, V_{S30} , elevado a un exponente. Borchedt y Glasmoyer (1994) encontraron el mismo resultado con otro conjunto de datos, Midorikawa et al. (1994) y Boore et al. (1994 y 1997) también obtuvieron el mismo resultado usando razones de Espectros de Respuesta o Espectros de Fourier entre suelo firme y suelos de baja resistencia. (Dobry et al. 2000).

Para movimientos en roca con intensidad de $0,1 g$ el factor de amplificación es proporcional a $V_{S30}^{-0.4}$ para periodos cortos (0.1 a 0.5 s) y a $V_{S30}^{-0.6}$ para periodos largos (0.4 a 2.0 s). Este hecho sugiere que la respuesta sísmica del terreno se encuentra, tanto en el rango de periodos largos como en el de periodos cortos, entonces se puede obtener dos factores de amplificación: F_a , para periodos cortos y F_v , para periodos largos. La figura 4.3 muestra estos factores de amplificación dependientes de la clasificación de sitio.

Tabla 4.8 Clasificación de suelos usando VS30 como indicador de la respuesta se suelo según NEHRP.

Clase de Sitio		Criterio de Clasificación				
Nombre	Descripción General	Velocidad de Onda de Corte			Espesor	
		Mínimo m/s	Promedio m/s	Máximo m/s	Mínimo m	
SC-I		Roca Firme y Dura				
SC-Ia	Ao	Rocas duras				
SC-Ib	A	Roca duras o firmes				
SC-II	B	Suelo Gravoso y Roca Firme o Blanda				
SC-III	C	Arcillas Rígidas y Suelos Arenosos				
SC-IV	D	Suelos Blandos				
SC-IVa	D1	Suelos blandos no se necesita estudios específicos				
SC-IVb	E	Suelos blandos, se necesita estudios específicos				

Con base en estos estudios, Borchedt plantea tres formas de obtener el V_{S30} para clasificar el terreno. A continuación se presentan estas formas:

Clasificación de sitio por propiedades físicas: Esta clasificación puede ser realizada conociendo sólo las propiedades de los materiales cerca de la superficie. Con esta opción se asume las velocidades de onda de corte en base a información primaria de los materiales superficiales, sin embargo se debe tener en cuenta que la amplificación decrece con la profundidad, por lo tanto un terreno clasificado sólo con las propiedades de los materiales superficiales podrían sobreestimar

las características de amplificación del sitio. Esta clasificación puede ser mejorada con información adicional de las propiedades físicas y el conocimiento de la distribución a profundidad de los suelos. Cuando se presente algún tipo de incertidumbre puede ser resuelto asignando una clase de sitio conservadora.

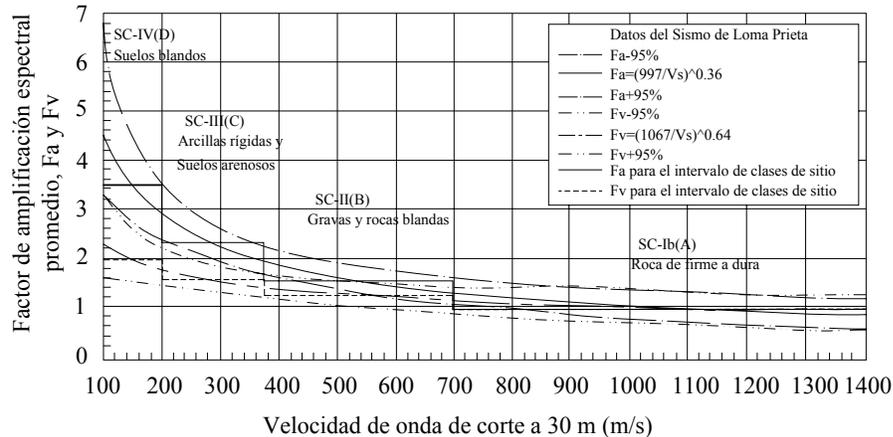


Figura 4.3. Clasificación de suelos usando VS30 como indicador de la respuesta de suelo según NEHRP.

Clasificación con la estimación de la velocidad de onda de corte por inferencia: Para esta clasificación se necesita la información de los espesores y propiedades físicas de las capas de suelo, velocidades de onda de corte se obtiene por inferencia de otros lugares con características geológicas comparables al área de estudio. Para refinar la clasificación se puede usar parámetros geotécnicos como el número de golpes de la penetración estándar, Esfuerzo de corte no drenado o relación de vacíos. Esta forma de obtener el VS30 puede ser más segura que la anterior.

Clasificación calculando directamente el VS30: Se estima la velocidad de onda de corte VSH hasta 30 m de profundidad. Este procedimiento es mucho más seguro y necesario para proyectos especiales.

4.3.2 Aplicaciones y Aportaciones

En esta sección se habla un poco de las implicancias del V_{S30} en la normas de diseño sísmico e investigaciones acerca de la obtención del V_{S30} y de la clasificación de suelos.

4.3.2.1 Factores de sitio para periodo corto y largo en función del VS30

Como se observa en la figura 4.2, los factores de amplificación decrecen a medida que la velocidad V_{S30} aumenta, los valores para intensidades bajas en roca fueron obtenidos de los registros de Loma Prieta y con base en el modelado numérico de la respuesta de sitio se calculo los valores para intensidades mayores a 0.1 g donde los registros de Loma Prieta sirvieron de base para calibrar los modelos unidimensionales. Los valores de estos factores fueron presentados en el capítulo anterior (tablas 12 y 13, UBC-2000).

4.3.2.2 Cálculo del VS30 a partir de perfiles de velocidad menores a 30 m

Boore (2004) determinó cuatro métodos de extrapolación para calcular el VS30 a partir de perfiles de velocidades (modelo de velocidades) menores a 30 m usando modelos de velocidad de onda en 277 sondeos y 135 modelos de velocidades con profundidades menores a 30 m. Todos los barrenos fueron realizados en California, estos pertenecen a depósitos de la época geológica Holoceno y Pleistoceno.

Una primera aproximación para determinar el VS30, que menciona Boore, es el uso de correlaciones entre las clases de IBC y VSd (velocidad de onda de corte a profundidad d). Un ejemplo de esta correlación se muestra en la figura 4.4, donde se presenta las clases del IBC en función de VS16 (en este caso la profundidad de velocidad de onda de corte llega a 16 m)

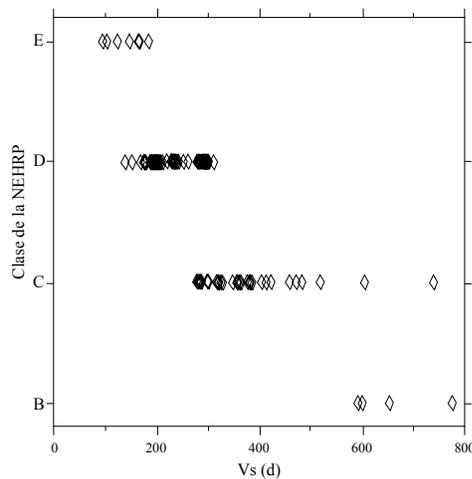


Figura 4.4. Correlación entre las clases de suelo de la IBC y el VS16.

Otro método para aproximar el VS30, planteado por Boore, es la extrapolación asumiendo la velocidad a profundidad, d, constante. En este método se usa la ecuación 4.9.

$$V_{S30} = 30(tt(d) + (30 - d)/V_{eff}) \tag{4.12}$$

Donde: tt(d), es el tiempo de viaje de la onda de corte hasta la profundidad, d.

V_{eff}, es la velocidad efectiva a profundidad entre d y 30m.

En este caso se asume que esta velocidad, V_{eff}, es igual a la velocidad de la última capa del modelo de velocidades (V_{eff}=VS_d). Este método de extrapolación puede subestimar el valor de VS30 y en consecuencia definir clases de suelos con letras menores.

El tercer procedimiento que Boore realizó es la extrapolación usando correlaciones entre VS30 y VSd. Para este método graficó los logaritmos de los valores de VS30 contra los logaritmos de VSd, las graficas de la figura 4.5 muestran algunos resultados para diferentes profundidades.

Con base en estos resultados, Boore, estableció la siguiente fórmula.

$$\log V_{s30} = a + b \log V_s(d) \quad (4.13)$$

La ecuación 4.10 considera profundidades superficiales (10 m.). Los coeficientes a y b de esta regresión se muestra en la tabla 4.10.

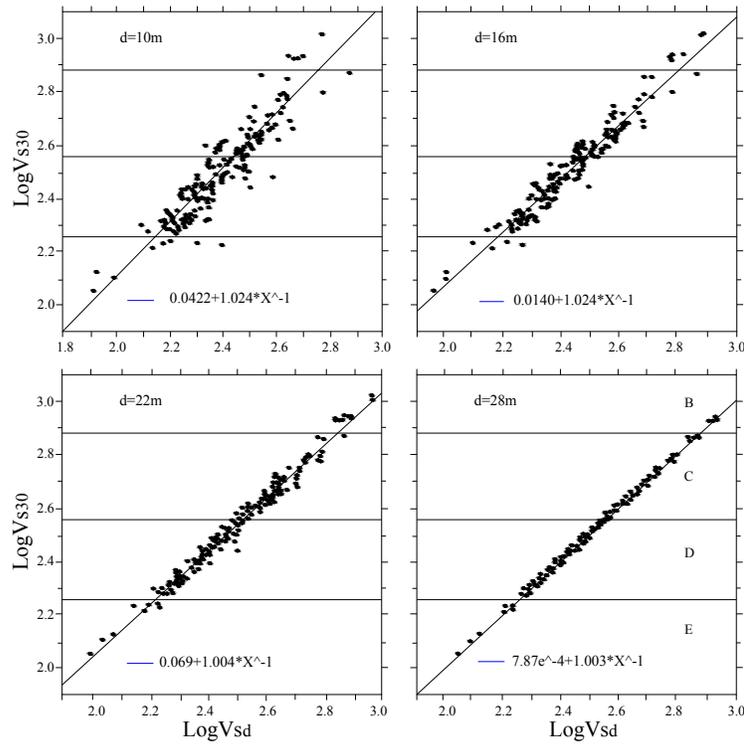


Figura 4.5. Relación de V_{s30} y V_{sd} (Boore, 2004)

Tabla 4.10. Coeficientes a y b para la ecuación 4.10. (Boore, 2004)

d	a	b
10	4.2026E-02	1.0292E+00
11	2.2140E-02	1.0341E+00
12	1.2571E-02	1.0352E+00
13	1.4186E-02	1.0318E+00
14	1.2300E-02	1.0297E+00
15	1.3795E-02	1.0263E+00
16	1.3893E-02	1.0237E+00
17	1.9565E-02	1.0190E+00
18	2.4879E-02	1.0144E+00
19	2.5614E-02	1.0117E+00
20	2.5439E-02	1.0095E+00
21	2.5311E-02	1.0072E+00
22	2.6900E-02	1.0044E+00
23	2.2207E-02	1.0042E+00
24	1.6891E-02	1.0043E+00
25	1.1483E-02	1.0045E+00
26	6.5646E-02	1.0045E+00

d	a	b
27	2.5190E-02	1.0043E+00
28	7.7322E-02	1.0031E+00
29	4.3143E-02	1.0015E+00

El último método planteado por Boore es la extrapolación con base en velocidades estadísticas para determinar la clase de sitio. Para este método usó cuatro pasos:

1. Calculó el V_{S30} con la ecuación 4.29 (extrapolación simple) y se obtiene una clase de suelo.
2. Calculó la razón V_{eff}/V_{Sd} necesaria para subir un nivel en la clasificación de suelo.
3. Evaluó la siguiente ecuación:

$$P(\xi > V_{eff} / V_S(d)) = a(V_{eff} / V_S(d))^b$$

$P(\xi > V_{eff}/V_S(d))$ es la probabilidad de excedencia de $V_{eff}/V_S(d)$ y es usada para decidir si la clase de sitio determinada en el paso 1 es cambiada.

4. Si $P=100$, se sube de nivel en la clasificación de suelos, si $P \neq 100$, se genera un número aleatorio uniforme distribuido entre 0 y 100, entonces si $r \leq P$, la clase de suelo es cambiada por una mayor resistencia, si $r > P$ la clase de suelo no es cambiada.

El porcentaje de error en la clasificación de suelos, con estos cuatro métodos, es menor a 10% para los sondeos muy superficiales e insignificantes para los sondeos cercanos o mayores a 30 m. (Boore, 2004). Pero se debe tener en cuenta que estos estudios fueron realizados en depósitos de suelos con clasificación C y D, y no se comprueba su aplicabilidad para suelos tipo E o B.

William R. A. et. al., (2003) calcularon el V_{S30} y la velocidad de onda de corte para 15 m, V_{S15} , en 65 lugares de Memphis, Tennessee, nosotros usamos estos datos para calcular una relación entre el V_{S30} y el V_{S15} . Para ello graficamos los valores logarítmicos de V_{S30} entre los logaritmos de V_{S15} (Véase figura 4.6). El cuadrado de la correlación de estas dos variables es 0.70, es decir: la variación lineal entre V_{S30} y V_{S15} explica el 70% de la variación de las dos variables. Los datos con los que se hizo esta gráfica se muestra en la tabla 4.11, donde también se muestra la clasificación de suelos según la IBC-2000.

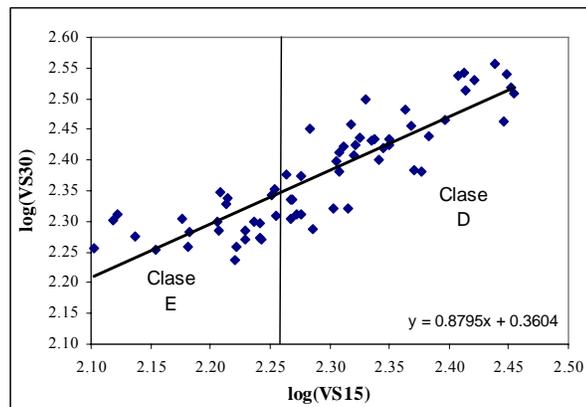


Figura 4.6. Correlación entre V_{S30} y el V_{S15} de los datos obtenidos por William, 2003.

La clasificación de suelos con el V_{S15} coincide con los resultados obtenidos usando V_{S30} para valores mayores a 180 m/s (tipo de suelo D, como también se muestra en la figura 4.5), cuando

tenemos valores menores, el resultado nos arroja un tipo de suelo de letra menor, en este caso tipo E.

Es importante mencionar que los valores de velocidades de onda de corte calculados pertenecen a un área de depósitos de Loes del Pleistoceno y depósitos aluviales del Pleistoceno y Holoceno, y por otro lado, la clase de suelo dominante para esta ciudad es la D. Sin embargo debido a los bajos valores de velocidad de onda de corte, William et al., decidieron subdividir esta clase según el V_{S30} en: valores bajos (180 a 210 m/s), medios (210 a 300 m/s), y altos (300 a 360 m/s).

4.4 OTROS SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN

Rodríguez Marek y Bray en el 2001 propusieron otro sistema de clasificación, en esta clasificación se incluye la medición de la rigidez y profundidad del terreno.

Para caracterizar el suelo se usa el periodo del terreno (debido a la relación existente entre la amplificación y el periodo del terreno), el cual se obtiene con dos parámetros importantes, la rigidez y el espesor del terreno ($T=4H/V_s$). Las bases teóricas de este sistema de clasificación se mencionan a continuación:

La respuesta sísmica de un sitio varía con la intensidad de movimiento del terreno debido a la respuesta esfuerzo-deformación no lineal de los suelos, la no linealidad de los suelos es función del tipo de suelo y pueden también ser afectados por la edad geológica y la cementación de los suelos y rocas.

En consecuencia, el periodo natural del terreno depende del tipo de suelo y de la aceleración máxima del terreno, en algunos sitios el valor del periodo se puede encontrar en la parte de la energía alta del movimiento de entrada, como resultado se tendría aceleraciones espectrales grandes asociadas al incremento de la aceleración máxima del terreno, para otros lugares el periodo se encuentra donde la energía de movimiento es baja, en este caso el resultado sería el decrecimiento de la amplificación para periodos bajos. Esto último puede resultar en bajos nivel de PGA y aún, posible atenuación de la aceleración máxima del terreno.

Tabla 4.11. Clasificación de terrenos propuesta por Rodríguez- Bray et al., 2001.

Tipo de terreno	Descripción	Periodo del terreno	Comentarios
A	Roca dura.	$\leq 0.1s$	Roca intacta resistente y dura, $V_s > 1500$ m/s.
B	Roca.	$\leq 0.2s$	Mayormente rocas de California sin intemperismo, $V_s > 760$ m/s o suelos < 6 m.
C-1	Roca metamorfozada o roca blanda.	$\leq 0.4s$	Zona intemperizada > 6 m y < 30 m; $V_s > 360$ m/s e incrementándose a 700 m/s.
C-2	Suelo rígido superficial.	$\leq 0.5s$	Depósitos de suelos > 6 m y < 30 m.
C-3	Suelos rígidos de profundidad intermedia.	$\leq 0.8s$	Depósitos de suelo > 30 m y < 60 m.
D-1	Suelos Rígidos del Holoceno profundos. Arcillas o arenas.	$\leq 1.4s$	Depósitos de suelo > 60 m y < 200 m. Arenas con poco contenido de finos ($< 15\%$) o finos no plásticos $IP < 5$. Arcillas con alto contenido de

Tipo de terreno	Descripción	Periodo del terreno	Comentarios
			finos (> 15%) y con IP>5.
D-2	Suelos Rígidos del Pleistoceno profundos. Arcillas o arenas.	$\leq 1.4s$	Suelos con profundidad >60 m y < 200 m. Ver D-1 para subclasificar como arcilla o arena.
D-3	Suelos rígidos muy profundos.	$\leq 2.0s$	Suelos con profundidad >200 m.
E-1	Arcillas blandas de profundidad media.	$\leq 0.7s$	Espesor de arcillas blandas de 3 a 12 m.
E-2	Capas de arcillas blandas profundas.	$\leq 1.4s$	Espesor de arcilla blandas > 12 m.
F	Suelos especiales, por ej: arenas licuables.	$\leq 1.0s$	Arena suelta del Holoceno o turba orgánica

De acuerdo con la base teórica expuesta en los párrafos anteriores, Rodríguez-Bray et al. (2001), usaron cuatro parámetro (dos principales y dos secundarios) para construir este sistema de clasificación.

- El tipo de terreno, como: roca dura, roca competente, roca metamorfizada, suelo rígido, suelo blando, y potencialidad de licuación en las arenas. En esta división general se mide la rigidez de cada uno de los tipos de terreno con el promedio de la velocidad de onda de corte V_s .
- La profundidad a la que se encuentra el suelo firme ($V_s > 760$ m/s) o la impedancia significativa entre el depósito de suelo y el suelo firme.

Los parámetros secundarios son:

- La edad del depósito de suelo. Con este parámetro se tiene dos grupos, depósitos de Holoceno y Pleistoceno.
- El tipo de suelo. Principalmente se considera dos grupos de suelos, suelos cohesivos y suelos sin cohesión.

Para evaluar esta clasificación se analizó y usó los datos de los sismos de Loma Prieta y Northridge (1994), es importante señalar que este último sismo presentó factores de sitio (amplificaciones máximas) que no decrecen tan rápidamente con el incremento de la intensidad de movimiento del terreno. Los datos de movimiento del terreno fueron usados para desarrollar relaciones de atenuación (de los espectros de respuesta elástica en 5% de amortiguamiento) de las clases de sitio B, C y D, estas relaciones de atenuación fueron luego usadas para calcular los factores de amplificación dependientes de la clase de sitio.

4.5 COMENTARIOS

La clasificación de suelos en el reglamento de construcción del D.F. esta basada en características geotécnicas de los suelos, el reglamento de CFE-1993 caracteriza los tipos de terrenos con la velocidad efectiva, periodo efectivo (como función de la velocidad efectivas y espesor del terreno, $T=4H/V_s$) y la zona sísmica en la que se ubica el sitio de interés (parámetros característicos de la zona sísmica, β_c y T_c). En ninguna de estas normas se especifica la profundidad a la cual se puede definir la velocidad efectiva, sino más bien se propone como límite, hallar 760 m/s de velocidad de onda de corte.

Los reglamentos de los estados de Guerrero, Oaxaca y Veracruz están elaborados con base en las normas del D.F y de CFE. Estos reglamentos clasifican al terreno en tres tipos de terreno o suelos. La descripción de los tipos de terrenos en los estado de Oaxaca es el mismo que se usa en las normas del D.F. , en el estado de Guerrero y Veracruz, la descripción del tipo de terreno es el mismo que se encuentra en las normas de CFE. En la propuesta de reglamento de construcción para el estado de Veracruz existe una diferencia para las estructuras menores a 5.0 t/m² y además se especifica que el valor aproximado para definir la velocidad efectiva es 30 m.

Las normas internacionales clasifican los terrenos en cinco o seis clases de suelo, esta clasificación caracteriza el suelo con un único parámetro, el V_{S30} . Este parámetro esta relacionado a la amplificación de los diferentes tipos de suelo como se puede observar en la figura 4.2, en donde también se observa la existencia de dos factores de amplificación (una para periodo corto, F_a y otro para periodo largo, F_v).

El uso del V_{S30} en las normas internacionales limita la exploración del terreno o medición de la velocidad de onda de corte con técnicas geofísicas. Además parece ser más factible para los ingenieros o especialistas obtener la información a 30 m de profundidad.

La mayoría de las exploraciones (sondeos, SPT) o refracciones sísmicas llegan a profundidades menores a 30 m. Por ello consideramos buena la alternativa limitar la profundidad de medición de onda de corte y obtener una velocidad efectiva (que seria la profundidad propuesta entre el tiempo de viaje de la onda de corte, mas que un simple promedio aritmético).

En caso de tratar con depósitos cuaternarios (edad del Holoceno o Pleistoceno), cuya clase de suelos es C o D, con velocidades de onda de corte menores a 30 m se puede utilizar las relaciones encontradas por Boore (bajo las condiciones requeridas por estos métodos). En esa investigación se demostró que la velocidad de onda de corte a 28 m tiene muy buena correlación con el V_{S30} , por lo tanto, cuando se trate de estos tipos de materiales no será necesario llegar a los 30 m. En caso de contar con velocidades de onda de corte menores a 20 m se puede tomar en cuenta la velocidad V_{S15} teniendo en cuenta la corrección para valores de V_{S15} menores a 180 m/s.

Como se dijo en el capitulo anterior la amplificación de un suelo rígido o blando depende de la velocidad de onda de corte, pero no se debe dejar de tomar en cuenta el periodo que esta implícito en la amplificación. Por lo tanto, la clasificación de suelos propuesta por Rodriguez-Bray (2001), es considerable. Otro aspecto importante en la clasificación propuesta por estos investigadores,

con base en caracterización geotécnica general del sitio, es la inclusión de la rigidez y la profundidad del suelo.

La clasificación de Rodriguez-Bray et. al., (2001) divide al terreno en 11 clases, esta clasificación subdivide la clase de roca en tres (roca dura, roca y roca metamorfizada) y subdivide los suelos rígidos según la edad geológica. Esta subdivisión concuerda con los datos encontrados por William et al. (2003) para depósitos del Holoceno y Pleistoceno.

Bajo estos aspectos, consideramos que la clasificación del terreno que cuantifique mejor el efecto de sitio y que sea factible para los ingenieros debe estar caracterizada por la velocidad de onda de corte, el periodo dominante del suelo y además se debe incluir la profundidad del suelo. Analíticamente estos tres parámetros se encuentran relacionados bajo la fórmula: $T_s=4H_s/V_s$. Para aplicar esa expresión sólo dos parámetros son independientes y el tercero queda definido con ellos. Además se debe considerar que la respuesta del terreno es dependiente de dos parámetros, T_s , periodo del terreno, (define la posición del pico resonante) y el $\rho_s V_s / \rho_o V_o$, contraste de impedancia suelo-basamento (define la amplificación).

CAPÍTULO 5: PROCEDIMIENTO PARA CLASIFICAR LOS TERRENOS DE LA ZCV, OAXACA Y ACAPULCO

5.1 INTRODUCCIÓN

Las normas para diseño sísmico estudiadas en el capítulo anterior clasifican los terrenos utilizando parámetros como: la velocidad efectiva de onda de corte (β_s), el periodo dominante del terreno (T_s) (en caso de las normas nacionales) y el V_{S30} (en caso de las normas de USA).

En forma general, para calcular estos parámetros es necesario conocer la estratigrafía del terreno y las velocidades de onda de corte de cada estrato. Pero como una ciudad esta constituida por diferentes estratigrafías debido a su origen geológico, no es simple calcular estos parámetros.

Por tal motivo, en este capítulo presentamos un procedimiento para obtener esos parámetros y aplicar los sistemas de clasificación de terreno estudiados, este procedimiento se basa en la evaluación de la respuesta de sitio usando familias espectrales de las funciones de transferencia empírica promedio (FTEP), para encontrar estas familias primero calculamos las funciones de transferencia empíricas (FTE) con registros de microtemores y sismos.

El objetivo de la evaluación del efecto de sitio es dividir una ciudad en zonas (microzonación) de acuerdo a las formas espectrales de las FTEP, calcular la función de transferencia teórica (FTT) de cada zona con el método de Haskell (1962), ya que para aplicar este método se necesita un modelo estratigráfico representativo (este modelo esta conformado por: espesores, velocidades, peso volumétrico y amortiguamiento), comparar las FTEP y la FTT para ajustar los datos de los modelos estratigráficos de cada zona. Finalmente, utilizar los datos de estos modelos para calcular los parámetros de clasificación de terrenos. Una vez obtenido estos parámetros se identifica cada zona con un tipo o clase de terreno para así obtener la clasificación de terrenos de una ciudad.

Para la evaluación del efecto de sitio se contó con mediciones de microtemores y registros sísmicos de estaciones acelerográficas existentes en el área de interés o de redes sismográficas o acelerográficas temporales antiguas. Para el modelo estratigráfico se utilizó información geológica (mapas geológicos), geotécnica (sondeos de penetración estándar, SPT y peso volumétrico) y datos geofísicos.

5.2 INFORMACIÓN GEOLÓGICA, GEOTÉCNICA Y GEOFÍSICA

En el país existe buena información geológica (litología, geomorfología, geología superficial, etc.) así como mapotecas administradas por instituciones como: el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, INEGI, Sociedad Geológica Minera, SGM e Instituto de Geología de la UNAM y una extensa bibliografía al respecto que nos ayudaron a conocer la geología de la ciudad en estudio.

Por otro lado, se recopiló información geotécnica (perfiles estratigráficos, número de golpes a la Penetración Estándar, SPT, peso específico, contenido de agua) para conocer el tipo de suelo y analizar la resistencia y espesores de los materiales.

Asimismo, se obtuvo y se realizó estudios geofísicos para conocer las velocidades de onda de corte del terreno. En la ciudad de Veracruz y Oaxaca se midió la velocidad de onda de corte V_{SH} por medio de prospección sísmica (método de refracción de ondas), sin embargo también se usó correlaciones entre el V_{SH} y el número de golpes, la técnica prueba y error al calcular la función de transferencia teórica con el modelo de Haskell, para obtener los valores de V_{SH} .

5.3 CÁLCULO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA EMPÍRICA PROMEDIO (FTEP)

Para calcular la FTEP, primero se debe calcular las Funciones de Transferencia Empírica (FTE) con los registros de microtemores (vibración ambiental), sismos leves o moderados. Estas funciones son calculadas para caracterizar el comportamiento dinámico de los terrenos, en otras palabras, para evaluar las características de amplificación y periodo dominante del movimiento sísmico debido al efecto de sitio,

Para registrar vibración ambiental en Acapulco y la ZCV se usaron tres sensores marca Kinometrics con periodo natural de 20 s (a cada sensor le corresponde una componente, nortesur, NS; este-oeste, EO, y vertical). La grabación de las señales se efectúa con un registrador digital. Las señales de los sismómetros se digitalizan con un intervalo de 0.01 s y cada muestra se graba en 24 bits. La curva de magnificación de este sistema es plana entre 0.05 y 30 Hz.

En cada punto de medición se realizaron tres muestreos de 150 s de duración cada uno, es decir, se obtuvo tres registros para cada componente. El procesado de las señales y el cálculo de las FTE se describen a continuación:

- Los datos grabados en versión binaria fueron transformados a formato ASCII. Una vez realizado este proceso se pudo visualizar las señales de los tres registros en cada componente. En cada registro se seleccionó de 3 a 6 ventanas con una duración de 40 s (estas ventanas fueron las mismas para cada componente), la selección se realizó determinando segmentos de registros lo más estacionario posible o sin señales transitorias como: señales de corta duración debido a el transito de vehículos o peatones en la proximidad de los instrumentos.
- Obtenida las señales en cada registro, no contaminadas, se procedió a calcular los espectros de amplitud de Fourier para cada componente. Los espectros fueron corregidos por línea base y suavizados con una ventana cuadrada de 1/3 de octava de ancho.
- Con estos espectros se calcularon las FTE para las dos componentes horizontales con el método de Nakamura (cociente espectral entre los espectros de amplitud de Fourier de las componentes horizontales, NS y EW, y la vertical, V, llamada también técnica HVNR).

Con el procedimiento descrito en el párrafo anterior se obtiene en cada punto de medición, de 5 a 10 FTE para cada componente horizontal. A partir de estos datos se calcula la FTEP en cada componente de un punto de medición. Un ejemplo de estos resultados se presenta en la figura 5.1.

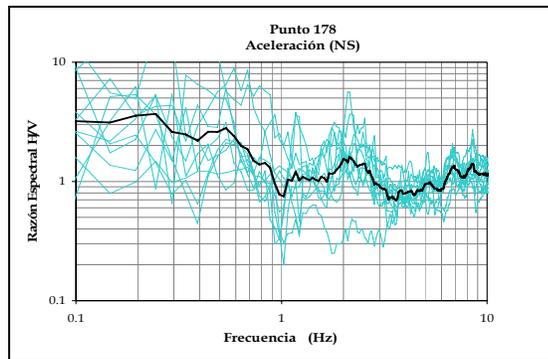


Figura 5.1 Funciones de transferencia empírica y promedio para una componente horizontal. FTE, líneas de delgadas de color verde. FTEP, línea gruesa de color negro.

Para calcular las FTE con los datos sísmicos se usó la técnica estándar (SSR), para ello se procedió de la siguiente forma:

- Se escogió la estación de referencia, esta estación debe ser la que se encuentre desplantada en roca o suelo firme (esta información se obtiene de la geología y geotecnia). En la ciudad de Acapulco, existen cuatro estaciones ubicadas en suelo firme, por ello se calcularon las FTE con la técnica de Nakamura para sismos (HVSR) y se obtuvo la FTEP de cada estación con la intención de compararlas y así escoger la que presente menor amplificación y la que tenga mayor registros simultáneos con otras estaciones (este procedimiento se explica a más detalle en el siguiente capítulo).
- Definida la estación de referencia, se escogió los sismos registrados simultáneamente en la estación de referencia y en la mayor cantidad de estaciones, con el propósito de tener datos comparables.
- Para procesar estas señales se usó una ventana de 30 s centrada alrededor de la parte más energética de la señal, onda S. Esta ventana fue común a la estación de referencia y la estación de interés en cada componente horizontal.
- Seleccionada la señal se procedió a calcular los espectro de amplitud de Fourier de las componentes horizontales de las estaciones, al igual que en el caso de microtremores los espectros fueron suavizados con una ventana de 1/3 de octava de ancho.
- Las FTE de las dos componentes horizontales fueron calculadas con los cocientes espectrales entre los espectros de Fourier de la estación de referencia y la estación de estudio.

Así se obtuvo varias FTE para cada componente horizontal en las estaciones de interés (se consideró como mínimo 3 eventos sísmicos por estación).

Para obtener la FTEP se calculó la media geométrica de las FTE, esta media fue escogida porque los valores extremos tienen menor influencia.

Los registros sísmicos se obtuvieron de las siguientes fuentes principales: La base de sismos fuertes de la República Mexicana de 1998, una red acelerográfica temporal que pertenece a la red acelerográfica de la ciudad de Veracruz y para la ciudad de Oaxaca se contó con los registros sísmicos de la red fija administrada por el Instituto de Ingeniería. También se usó datos de redes

sismológicas temporales ubicadas en el valle del río La Sabana en la ciudad de Acapulco (Chávez García, 1994) y en la zona urbana de la ciudad de Oaxaca (Lermo, et al., 1991).

5.4 OBTENCIÓN DE FAMILIAS ESPECTRALES SEGÚN LAS FORMAS ESPECTRALES DE LAS FTEP Y MICROZONACIÓN.

Las FTEP fueron agrupadas de acuerdo al depósito geológico al que pertenecían, pero se encontró que no todos los puntos de medición tenían la misma forma espectral (el mismo comportamiento dinámico), por ello se reagruparon sin tener en cuenta la clasificación geológica y se encontró diferentes familias espectrales. Con estas familias, las ciudades quedan divididas según el efecto de sitio del terreno. Se presenta la ciudad de Veracruz-Boca del Río como un ejemplo (ver figura 5.2).

Estos niveles de efecto de sitio fueron delimitados en un mapa y se obtuvo la zonación de la ciudad. Luego, cada zona fue identificada con las características geológicas y la geotécnicas del área encerrada sobreponiendo el mapa de zonación con los mapas geológicos y mapas de zonificación geotécnica para obtener modelos estratigráficos representativos de cada zona.

5.5 CÁLCULO DE LAS FTT Y MODELOS ESTRATIGRÁFICOS

Para calcular la función de transferencia teórica (FTT) se utilizará el método de Haskell (1962), el cual es un modelo unidimensional para un medio estratificado.

Este método requiere características de los estratos como: espesor, velocidad de propagación de ondas, densidad y amortiguamiento, estos valores fueron obtenidos para cada zona planteando un modelo estratigráfico representativo de acuerdo con la información geológica, geotécnica y geofísica.

Asimismo, se requiere conocer el tipo de ondas incidentes (P o S), el ángulo de incidencia (γ) y el ángulo de polarización (θ) de las mismas. En el presente estudio, se consideró el caso de incidencia vertical ($\gamma=0$) de ondas S polarizadas horizontalmente ($\theta=0$, ondas SH), ya que Seed (1986) reportó que la mayor parte de la energía que alcanza la superficie de un depósito de suelo con efecto de sitio es el resultado de una propagación de ondas casi vertical y que para fines prácticos se puede tratar como ondas de incidencia vertical.

Es importante señalar que la incidencia vertical se presenta cuando $\rho_s V_s / \rho_o V_o$ es pequeño, es decir en terrenos que presentan efecto de sitio, como los estudiados en este trabajo, en cambio cuando el contraste de impedancia se acerca a la unidad el ángulo de incidencia se aproxima mucho al ángulo de arribo de las ondas S al basamento.

A continuación se menciona la forma en que se determinó cada dato para conformar el modelo estratigráfico.

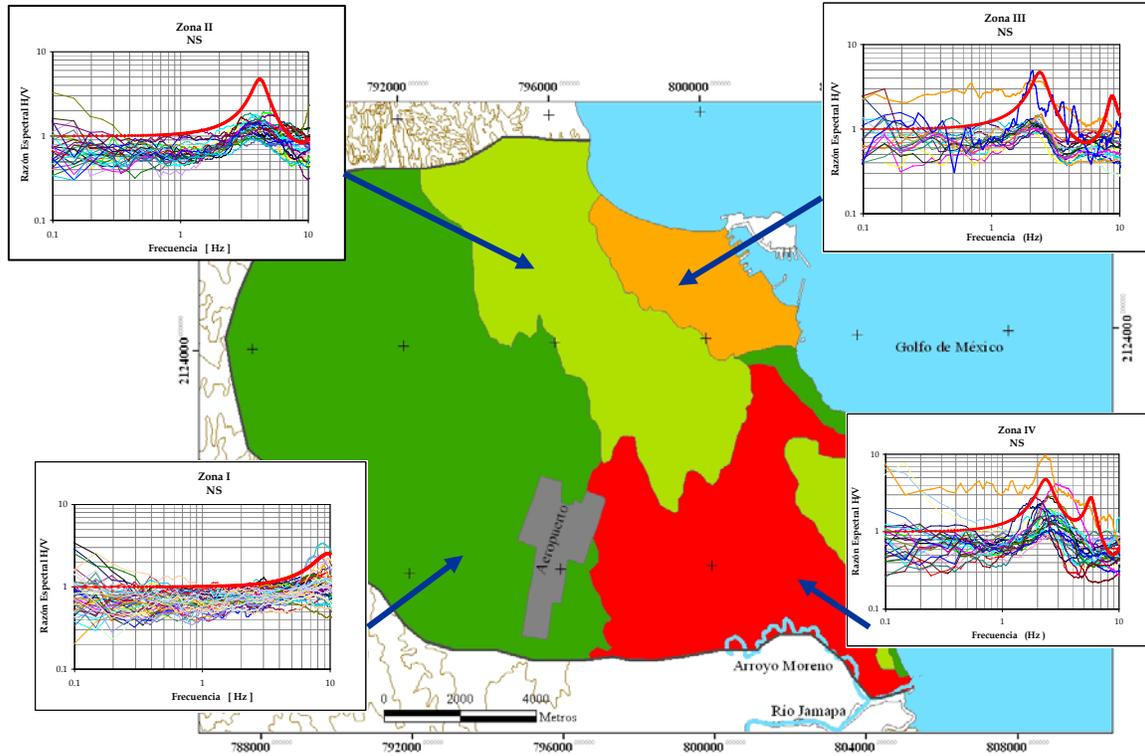


Figura 5.2. División de ciudad de Veracruz-Boca del Río según el efecto de sitio.

5.5.1 Espesores de los estratos

Para determinar los espesores promedio de cada zona se utilizó el cambio de resistencia de los estratos evaluada con el número de golpes de la prueba de penetración estándar (SPT). Con este fin se recopiló sondeos de SPT para cada ciudad.

5.5.2 Velocidad de onda de corte

Los valores de velocidad de ondas V_S para cada estrato fueron calculados con: refracción sísmica, o asumiendo valores de acuerdo a las propiedades físicas de los materiales y corrigiéndolos con el método de prueba y error al determinar las FTT. En el caso de Acapulco se usó una relación entre el V_S y el número de golpes (N) de la prueba SPT reportado por el Dr. Ovando en 1989.

Cuando se hizo refracción sísmica se registró las ondas SH con la siguiente técnica.

- Se usó una fuente de energía sísmica con un mecanismo simple. El mecanismo consiste en un tablón de madera, presionado por un vehículo, y un martillo.
- Con el martillo se da un primer golpe a la tabla en uno de sus extremos con la intención de propagar las ondas en dirección perpendicular al tablón y hacia los geófonos, los sensores que se usan para registrar esta onda son sensores horizontales y están orientados en dirección paralela al tablón y en el mismo eje de movimiento de las partículas (Véase figura 5.3).

- Para confirmar el registro de la onda SH se da un segundo golpe en el otro extremo del tablón, al superponer los dos registros se observa el cambio de polaridad de la onda, como en la figura 5.4a.

Para interpretar los datos se usaron los primeros arribos de las ondas, asumiendo que estas fueron refractadas de alguna interfase (Ver figura 5.4a). Las velocidades fueron calculadas de la pendiente de la línea que conecta los primeros arribos. La figura 5.4b muestra la dromocrónica R01 con las velocidades aparentes.

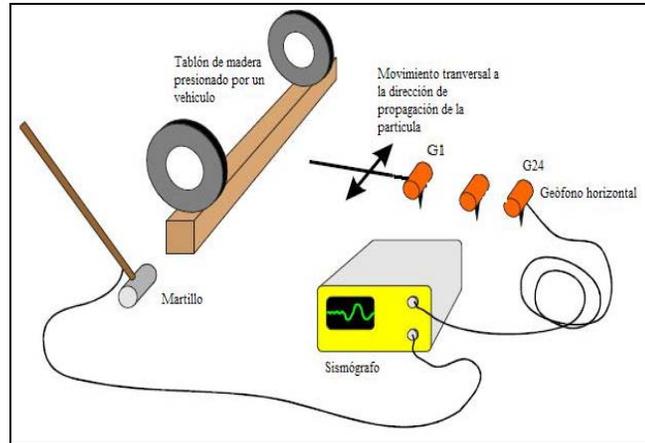
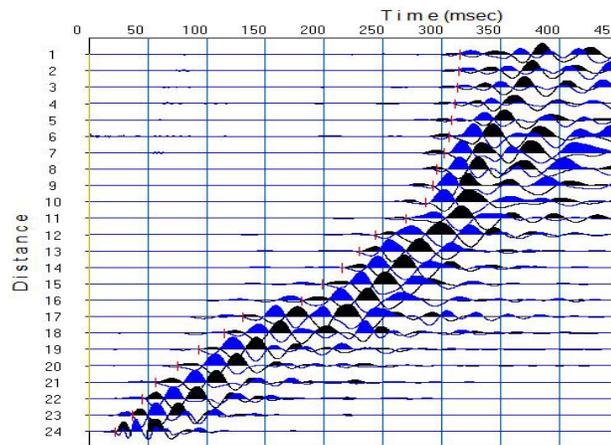


Figura 5.3. Refracción sísmica para obtener velocidades de onda SH

Para calcular las velocidades aparentes se partió de la hipótesis de que el terreno se encuentra conformado por estratos inclinados. En la figura 5.5 se muestra el ejemplo para dos capas y las ecuaciones implicadas en el cálculo de las velocidades aparentes, las cuales son aplicables para las ondas S y P. (Cantos. F., 1974). Es esta figura V_{1a} corresponde a la velocidad aparente en el sentido AD (ascendente), T_{ABCD} el tiempo total, “A” corresponde al punto de disparo o generación de ondas y “D” el punto de registro. Cuando se dispara de “D” hacia “A” se obtiene un dato más la velocidad aparente V_{1d} descendente, ya que por el principio de reciprocidad $T_{DCBA} = T_{ABCD}$.



(a)

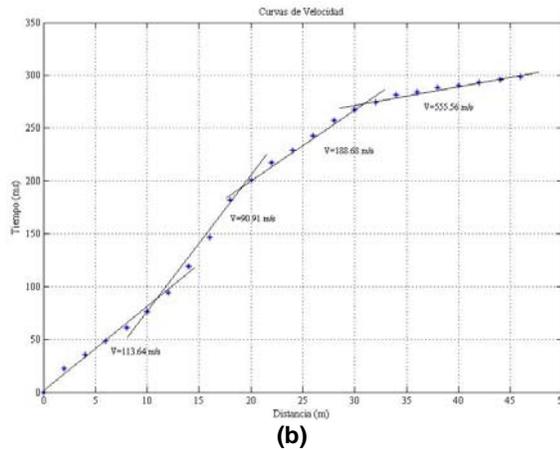


Figura 5.4. Procesamiento de datos de las refracciones sísmicas. (a) Identificación de primeros arribos, (b) dromocrónica.

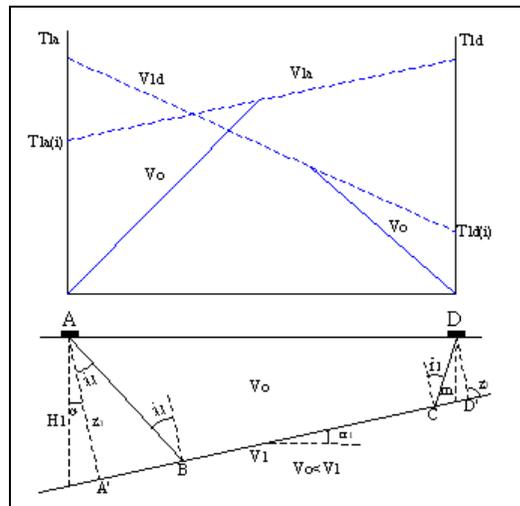


Figura 5.5. Refracción sísmica para estratos de capas inclinadas (Cantos F.1974)

Donde: T_1 = tiempo ascendente.

T_2 = tiempo descendente.

V_0 = velocidad entre la superficie y el refractor (estrato o capa de suelo).

V_1 = velocidad del refractor.

V_{1a} = velocidad aparente ascendente (disparando en A).

V_{1d} = velocidad aparente descendente (disparando en D).

$T_{1a(i)}$ y $T_{1d(i)}$ = tiempos interceptados en los orígenes A y D.

Por otro lado, si asumimos que las velocidades y las pendientes de las capas (refractores) son constantes, tenemos la siguiente ecuación para el tiempo.

$$TD = \frac{AB}{V_0} + \frac{BC}{V_1} + \frac{CD}{V_0}, \quad AB = \frac{Z_1}{\cos i_1}, \quad CD = \frac{Z_1}{\cos i_1} = \frac{Z_1 - AD \cdot \sin \alpha_1}{\cos i_1}$$

$$BC = A'D' - A'B - CD' = AD \cos \alpha_1 - AB \sin i_1 - CD \sin i_1$$

Además, $\frac{V_o}{V_1} = \text{sen}i_1$ entonces: $V_1 = \frac{V_o}{\text{sen}i_1}$

$$TD = \frac{AB}{V_o} + \frac{BC}{V_1} + \frac{CD}{V_o} = \frac{AB}{V_o} + \frac{AD \cos \alpha_1 - AB \text{sen}i_1 - CD \text{sen}i_1}{V_o} \text{sen}i_1 + \frac{CD}{V_o}$$

Finalmente: $TD = \frac{AD}{V_o} \text{sen}(i_1 - \alpha_1) + 2 \frac{Z_1 \cos i_1}{V_o}$

Por lo tanto, el tiempo ascendente en un punto x cualquiera del perfil AD será:

$$T_{ax} = \frac{x}{V_a} \text{sen}(i_1 - \alpha_1) + 2 \frac{Z_1 \cos i_1}{V_o} \quad 5.1$$

Si dispáremos en el punto D y se registra en A, obtendríamos el tiempo descendente usando la fórmula anterior pero cambiando α_1 por $-\alpha_1$ y Z_1 por z_1 . Entonces el tiempo se puede expresar de la siguiente forma:

$$T_{dx} = \frac{x}{V_a} \text{sen}(i_1 + \alpha_1) + 2 \frac{z_1 \cos i_1}{V_o} \quad 5.2$$

Estas dos ecuaciones representan rectas y si definimos que la velocidad aparente ascendente y descendente pueden ser: $W = \frac{dx}{dt}$ se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$V_{1a} = \frac{V_o}{\text{sen}(i_1 - \alpha_1)} \quad 5.3$$

$$V_{1d} = \frac{V_o}{\text{sen}(i_1 + \alpha_1)} \quad 5.4$$

De estas ecuaciones se deduce que: $V_{1a} > V_1 > V_{1d}$, es decir, la velocidad ascendente es siempre igual o mayor que la real y ésta a su vez igual o mayor que la descendente.

De las ecuaciones 5.1, 5.2, 5.3 y 5.4 se puede calcular la inclinación de las capas con las siguientes ecuaciones.

$$i_1 - \alpha_1 = \text{arc. sen} \frac{V_o}{V_{1a}} \quad \text{y} \quad i_1 + \alpha_1 = \text{arc. sen} \frac{V_o}{V_{1d}} \quad 5.5$$

$$i_1 = \frac{1}{2} \left[\text{arc. sen} \frac{V_o}{V_{1d}} \alpha_1 + \text{arc. sen} \frac{V_o}{V_{1a}} \right] \quad 5.6$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \left[\text{arc. sen} \frac{V_o}{V_{1d}} \alpha_1 - \text{arc. sen} \frac{V_o}{V_{1a}} \right] \quad 5.7$$

Las velocidades V_o , V_{1a} y V_{1d} se obtienen de las dromocrónica como las inversas de las pendientes de la recta que unen los primeros arribos.

Obtenidos los valores de i_1 y α_1 la velocidad V_1 se calcula con la siguiente fórmula:

$$V_1 = \frac{V_o}{\text{sen} i_1} \text{ o } V_1 = 2 \frac{V_{1a} V_{1d}}{V_{1a} + V_{1d}} \cos \alpha_1 \quad 5.8$$

De igual forma se puede deducir las fórmulas para mayor número de capas.

5.5.3 Amortiguamiento

En cuanto al amortiguamiento; existen varias relaciones empíricas propuestas para determinar este valor, por ejemplo: Seed e Idriss (1970) sugieren el uso de curvas para determinar el amortiguamiento en arenas, estas curvas relacionan el amortiguamiento con la deformación angular del material (véase figura 5.6), al respecto se debe tener en cuenta que la deformación angular (γ) inducida por los sismo intensos se encuentran en el rango de $2 \cdot 10^{-2} \%$ a $8 \cdot 10^{-2} \%$ (Díaz Rodríguez, 2000).

Asimismo, Aviles y Trueba (1991) proponen valores de amortiguamiento para suelos no drenados como se muestra en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Valores de ξ , propuestos por Aviles y Trueba.

Tipo de suelo		Amortiguamiento
Suelos granulares y limos no plásticos	Seco	$1\% \leq \xi \leq 5\%$
	Saturado	$3\% \leq \xi \leq 10\%$
Arcillas y Limos no plásticos	IP $\leq 100\%$	$2\% \leq \xi \leq 12\%$
	IP $> 100\%$	$2\% \leq \xi \leq 6\%$

5.5.4 Densidad de los suelos

Los valores de densidad fueron calculados mediante el peso volumétrico ($\gamma = \rho \cdot g$). Esta propiedad del material fue tomada de las referencias bibliográficas. Finalmente, con estos datos se conforma el modelo estratigráfico representativo.

5.6 CLASIFICACIÓN DE TERRENOS

Se utilizó las normas de CFE, la de cada estado, la de USA y la clasificación de Bray et. al, 1997. Se consideró esta última clasificación porque a diferencia de las demás esta usa el periodo como parámetro de entrada.

Cuando se aplicó las normas nacionales se calculó la velocidad efectiva (β_s), para cada zona, con los valores de velocidades de onda de corte y espesores del modelo estratigráfico representativo, asimismo se calculó el periodo dominante con: $T_s = 4H / \beta_s$, donde H es la profundidad del modelo estratigráfico.

También se utilizó la fórmula que especifica las NTC para sismos del reglamento de construcciones del D.F. (2004) para calcular el periodo dominante, obtenido este valor se calculó

la velocidad efectiva con la expresión: $\beta_s = 4H/T_s$ para clasificar el terreno de cada zona siguiendo las especificaciones de CFE.

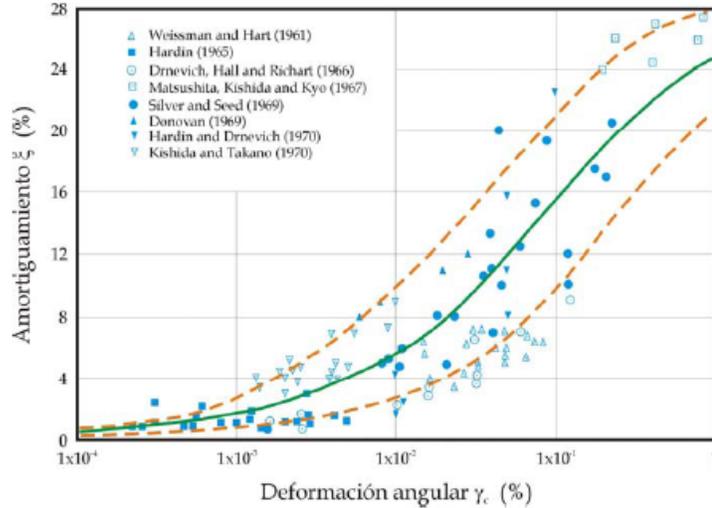


Figura 5.6 Relación de amortiguamiento con la deformación angular (Seed et al., 1970)

Cuando se clasificó usando el IBC-2000, el V_{S30} también se calculó usando las velocidades y espesores del modelo estratigráfico, sin embargo en este cálculo se presentó tres condiciones:

- Cuando la profundidad del modelo estratigráfico es menor a 30 m.
- Igual a 30 m.
- Y mayor a 30 m.

Para resolver la primera condición se aplicó tres casos:

- **Primer caso**, clasificamos los terrenos usando las mismas letras del la IBC-2000 pero con el valor de V_{Sd} calculado a la profundidad “d”, a la cual el modelo estratigráfico llega.
- **Segundo caso**, se calculó el V_{S30} considerando la velocidad de la onda de corte de la capa base del modelo estratigráfico representativo hasta llegar a 30 metros, ya que con este modelo calculamos la FTT.
- **Tercer caso**, se tomó en cuenta los coeficientes de extrapolación hallados por Boore, 2004.

En la segunda condición, el cálculo de V_{S30} fue directo y en la tercera sólo se restringió el modelo estratigráfico a los 30 metros.

Finalmente, se comparó las clasificaciones obtenidas para determinar la que mejor representa el efecto de sitio de la ciudad estudiada.

5.7 COMENTARIOS

Se presentó el procedimiento, de cinco pasos, que utilizamos para llegar a clasificar los terrenos de las tres ciudades objetos de estudio de esta tesis, usando las normas nacionales e internacionales actuales

Se escogió las formas espectrales de las FTEP debido a que la geometría espectral de las funciones de transferencia es una característica del movimiento sísmico del terreno y por consiguiente el efecto local tiene gran influencia sobre esta geometría.

Para calcular la FTT se usó el programa de computación elaborado por el Dr. Sánchez Sesma en 1985, este programa basado en el método de Haskell (1962) calcula la FTT en medios estratificados para incidencia de ondas elásticas en la base de los estratos y además toma en cuenta los efectos no lineales que presentan los materiales al estar sometidos a altos niveles de deformaciones al hacer un procedimiento de linealización equivalente.

La FTT es más susceptible a los cambios en los valores de espesor y velocidad de onda de corte que a los cambios de los otros valores del modelo estratigráfico. Por tal motivo, se estableció los espesores de los estratos como el primer dato para este modelo y las velocidades de onda de corte como los valores que ajustarán la FTT a las FTEP. Es decir las velocidades de onda de corte obtenidas por refracción o propuestas en un primer momento, pueden variar para obtener la FTT que se ajuste a la respuesta dinámica de una zona.

Las funciones de transferencia empírica y teórica serán calculadas para bandas de frecuencia menores a 10 Hz ($>0.1s$), debido a que está es la banda de interés para propósitos de ingeniería (Borcherdt, 1994) y en donde no se espera una contribución importante de las ondas superficiales (Seed, 1986).

CAPÍTULO 6: CLASIFICACIÓN DE TERENOS DE LAS CIUDADES DE VERACRUZ-BOCA DEL RÍO, ACAPULCO Y OAXACA.

6.1 INTRODUCCIÓN

El Manual de Diseño de obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad de 1993, las Normas Técnicas Complementarias del reglamento de construcción del estado de Guerrero de 1989 y la propuesta del Reglamento de Construcción del Estado de Veracruz atienden los efectos de sitio adoptando una clasificación de terreno (tres tipos de terrenos) en función del periodo dominante y de la velocidad de onda de corte del suelo. Otros reglamentos como The International Building Code de USA, IBC-2000 y el Eurocode 8 - 2004 clasifican el terreno en 5 tipos usando el parámetro V_{S30} .

Con la finalidad de comparar los sistemas de clasificación nacionales y el de la IBC-2000, en esta sección clasificaremos el terreno de las tres ciudades usando el manual de la CFE y los reglamentos aplicando el procedimiento presentado en el capítulo anterior. También se tomó en cuenta el sistema de clasificación propuesto por Rodríguez-Bray et. al. 2001, para analizar los resultados y hacer una comparación de estos.

6.2 CIUDAD DE VERACRUZ-BOCA DEL RIO (ZCV)

El reglamento de construcción del estado de Veracruz no cuenta con Normas Técnicas Complementarias para el Diseño Sísmico, aunque desde 1998 existe una propuesta en revisión (la cual se describió en el capítulo IV). Por otro lado, no obstante que según la carta de zonificación sísmica de la República Mexicana la ZCV se encuentra en un área de riesgo sísmico moderado se deben considerar los efectos devastadores ocurridos en sismos pasados y el crecimiento económico y poblacional los cuales se verían afectados si no se toma en cuenta los efectos locales de sitio.

Como antecedentes de clasificación de los terrenos en la ZCV se conoce los trabajos realizados por Esquivel en el año 1976, quien zonificó los suelos de la ciudad de Veracruz en función de la compacidad; Lermo et. al. (1998), propusieron una microzonificación sísmica; y Leyva Soberanis (2004), elaboró un mapa de isoperiodos con el cual dividió la ZCV en dos zonas. Es importante mencionar que este último trabajo tomó en cuenta las zonas de expansión urbana.

6.2.1 Geología

Los trabajos de Esquivel, 1976, Paéz Andrade, 2001 y los mapas geológicos del INEGI dividen la ZCV en cinco depósitos geológicos. (el mapa geológico se presenta en la figura 6.1).

6.2.1.1 Depósito de Arenisca-Conglomerado *T(ar-cg)*

Este depósito se ubica en la parte central-oeste de la ZCV y forma parte de la secuencia continental de conglomerados constituidos de diferentes materiales dentro de una matriz. Los materiales que conforman el esqueleto son clastos redondeados a subredondeados de basalto,

andesita, caliza y travertinos. El material de la matriz es arena escasamente cementada por carbonatos. Las areniscas de este depósito son de grano medio a grueso de color gris y pardo claro con clastos de feldespato, plagioclasas y fragmentos de roca redondeados a subredondeados.

6.2.1.2 Depósito de Coral (Qc)

Se ubica frente a la costa de la ZCV y se extiende desde la ciudad de Veracruz hasta Punta Antón Lizardo. Este depósito se formó aproximadamente a finales del Terciario y a principios del Cuaternario sobre los suelos marinos de mayor antigüedad. Este tipo de depósito, los cuales están desplantados sobre una superficie llana denominada suelo marino o plataforma continental, se conoce como arrecife diseminado y esta compuesto por una roca muy porosa de caliza de color blanco amarillento, conocida como madrepora, y por abundantes fragmentos de conchas de moluscos. La formación de este tipo de depósito se debe a la regresión de la línea de costa algunos corales han sido sepultados por sedimentos de arena.

6.2.1.3 Depósito de Playa (Qp)

Se localiza en la franja costera y en el centro de la ciudad de Veracruz. Esta formado de arenas y arenas limosas con presencia de conchas y fósiles marinos. Los minerales que constituyen la arena son feldespatos, micas y cuarzos.

6.2.1.4 Depósito de Dunas (Qd)

De origen eólico, está compuesto por arenas y arenas limosas de grano medio a fino con minerales de feldespato, mica, cuarzo y fragmentos de fósiles. La acción predominante de los vientos del norte hace que este depósito se extienda en la dirección norte-sur formando lomeríos que alcanzan 15 m de altura.

6.2.1.5 Depósito Aluvial (Qal)

Está ubicado entre los cordones de dunas y el río Jamapa que por su origen fluvial está compuesto por materiales alternados de arena, limo arcilloso y suelos orgánicos.

El nivel topográfico más alto es 40 msnm, en los depósitos de dunas y el nivel en los depósitos de playa se encuentra debajo de los 10 msnm (alrededor de 5 msnm). El depósito aluvial esta dividido por la cota de 10 m, en dos zonas, la parte oeste (en dirección del conglomerado) y la sección del este (en dirección al depósito de dunas y playas) la cual se conoce como una zona de inundación. La figura 6.2, muestra las cotas topográficas.

6.2.2 Geotecnia

La resistencia de los suelos se midió con el número de golpes de la prueba de penetración estándar (SPT). Con este fin, se recopiló información de 24 estudios con un total de 40 sondeos de exploración con muestreo alterado combinado con pruebas de penetración estándar (los 24 perfiles estratigráficos se muestran en el anexo A, figuras del uno al seis), en estos sondeos se

evaluó la resistencia al cortante mediante el número de golpes del ensayo de penetración estándar, así como la clasificación del tipo de suelo encontrado.

Las coordenadas de cada uno de estos estudios se indican en la tabla 6.1 y en la figura 6.2, la ubicación de cada estudio.

Tabla 6.1 Estudios encontrados en la ZCV.

Nº de sondeo	Ubicación	Coordenadas UTM	
		X	Y
1	Astilleros de Veracruz	801906.5	2126593.53
2	Dique Seco	801906.5	2126592.53
3	Zona Portuaria	805087.1	2114801.73
4	Edificio Morelos	800920.1	2125450.53
5	Edificio Coopel-Hidalgo	800980.2	2124567.53
6	Almacenes de Polvo-TAMSA	791842.0	2122389.90
7	Miravalles	796704.5	2126876.13
8	Hotel Bello-Boca del Río	803665.1	2121625.53
9	Soriana-Boca del Río	804224.9	2120993.73
10	Centro Comercial Invernadero	800693.3	2119281.93
11	Vía Muerta, Boca del Río.	804287.9	2117402.73
12	Edificio Corintos, Boca del Río	804737.9	2115521.73
13	Edificio Tampiquera, Boca del Río	804433.7	2115467.73
14	Boulevard del Mar, Boca del Río	805129.1	2114513.40
15	Calle Santa Ana, Boca del Río	804735.8	2114470.79
16	Villas Topacio, Boca del Río	803588.2	2119359.68
17	Edificio Ferrari, Boca del Río	805087.1	2114801.73
18	Puente del Río Jamapa, Boca del Río	804293.7	211226.85
19	Cd. Industrial Bruno Pagliai	790454.0	2120422.0
20	Torre las Américas, Boca del Río	804362.6	2118962.0
21	Puente Jiménez, Veracruz	799665.0	2125202.25
22	Puente Circunvalación, Veracruz	799019.71	2124947.88
23	Campus Calazán	800278.09	2118830.29
24	Abrah Díaz	804501.98	2116814.54

Los estudios del subsuelo encontrados no abarcan toda la zona de estudio, sin embargo se analizaron los posibles cortes estratigráficos que se podrían formar. Para obtener el perfil estratigráfico representativo de un estudio se tomó las características medias de los sondeos realizados en el terreno de estudio. Con estos perfiles se obtuvo los cortes estratigráficos A-A', B-B' y C-C', la ubicación de estos se muestra en la figura 6.2 y las características de cada uno en la figura 6.3.

6.2.3 Datos geofísicos

6.2.3.1 Refracción sísmica

Las velocidades de ondas de corte (SH) de los depósitos fueron medidas a partir de refracción sísmica, se hicieron siete prospecciones sísmicas distribuidas como se muestra en la figura 6.2.

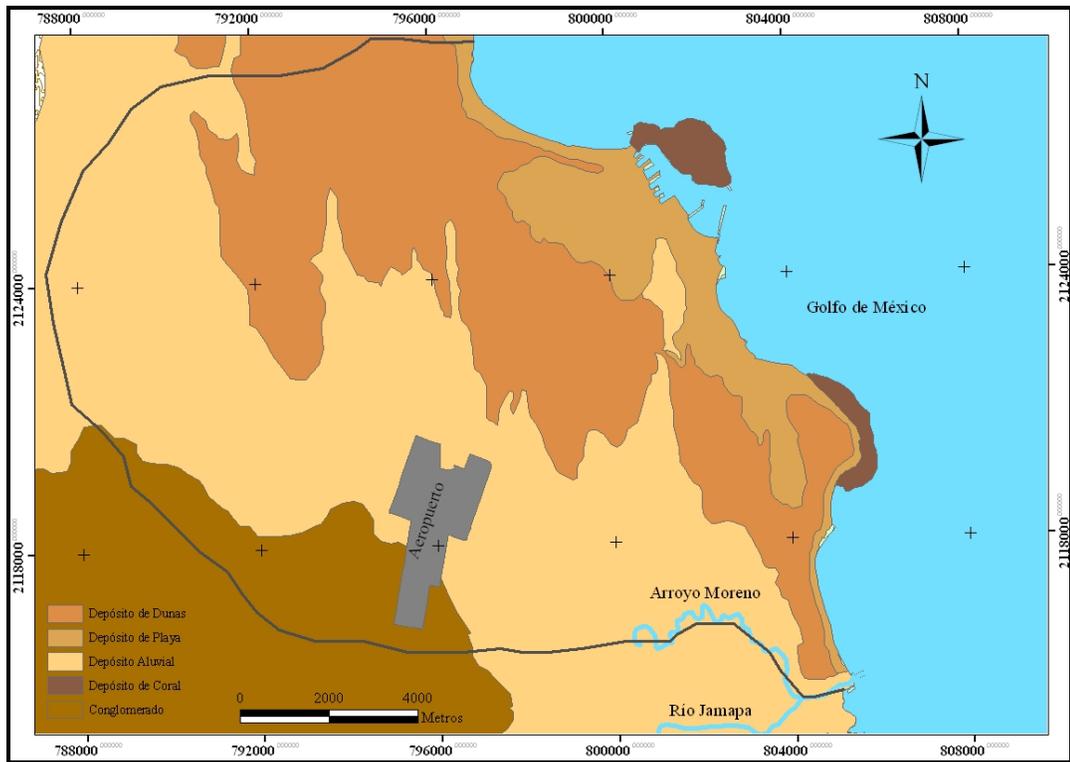


Figura 6.1 Geología, topografía y límite de estudio de la ZCV (representado por la línea negra).

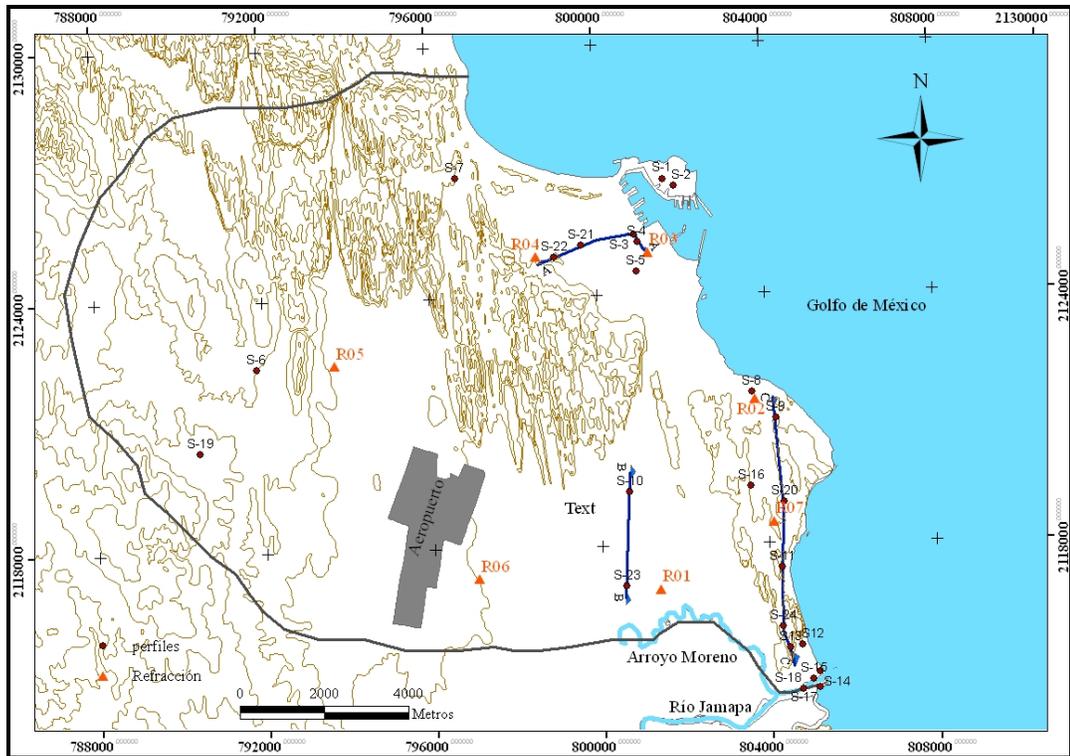
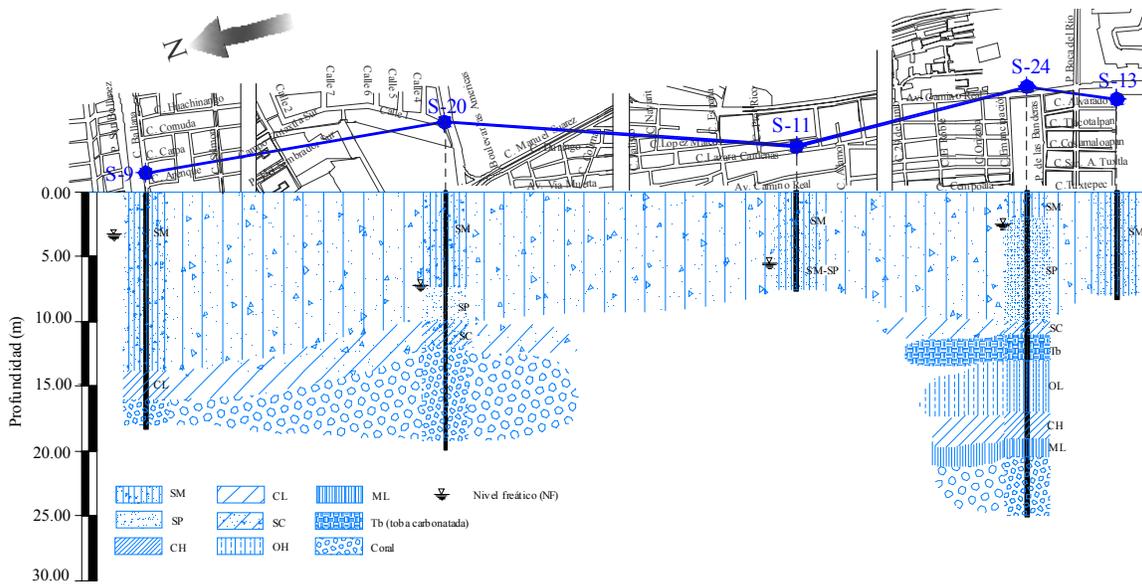


Figura 6.2 Ubicación de perfiles estratigráficos, ejes de los cortes estratigráficos (A-A, B-B y C-C) y refracciones sísmicas.



(3c)

Figura 6.3 Perfiles estratigráficos. 2a, eje A-A; 2b, eje B-B y 2c, eje C-C

La generación de ondas SH y el método de interpretación se describió en el capítulo anterior. El equipo con el cual se trabajó consta de 24 geófonos los cuales se coloraron a diferentes distancias (de 2.00 m a 3.00 m) dependiendo del acceso y de las condiciones del terreno para trabajar. Asimismo, la profundidad explorada se encuentra en el rango de 15.0 m a 30.0 m. El registro de los siete perfiles sísmicos de refracción se muestra en el anexo A (figuras del 10 al 15), a continuación se presenta la descripción de cada refracción y las dromocrónicas se muestran en las figuras 6.4 y 6.5.

Refracción sísmica N°1: Esta refracción se ubica en el depósito aluvial en la zona IV, la distancia de la fuente al primer geófono horizontal y la distancia entre estos fue de 2.00 m. El tiro a la derecha y a la izquierda se realizó en la dirección NS (sólo tiro de ida). La dromocrónica se presenta en la figura 6.4.

Refracción sísmica N°2: Se ubicó en el depósito de playa en el límite de la zona IV y I, la distancia de la fuente al primer geófono horizontal fue de 3.00 m y la distancia entre estos fue de 1.50 m. Se realizó dos secuencias de tiros, a la derecha y a la izquierda, en la dirección NS (sólo un tiro de ida). La figura 6.4 muestra la dromocrónica correspondiente.

Refracción sísmica N°3: Se ubicó en el depósito de playa, en la zona III, en el área del centro histórico de la ciudad de Veracruz. La distancia de la fuente al primer geófono y la distancia entre estos fue de 2.00 m. Se realizó dos secuencias de tiros, a la derecha y a la izquierda, en la dirección NS (sólo un tiro de ida). La figura 6.4 muestra la dromocrónica.

Refracción sísmica N°4: La figura 6.4 muestra las velocidades de onda SH obtenidas, esta prospección se ubicó en el depósito de playa muy cerca de las dunas, en el límite de la zona III y II. La distancia de la fuente al primer geófono y la distancia entre estos fue de 2.00 m. Se realizó un tiro a la derecha y a la izquierda, en la dirección NS y EW (tiro de ida y de regreso).

Refracción sísmica N°5: Se ubicó en los depósitos aluviales, zona I, muy cerca de la estación de referencia de la red acelerográfica de la ciudad de Veracruz. La distancia de la fuente al primer geófono y la distancia entre estos fue de 2.50 m. Se realizó un tiro a la derecha y a la izquierda, en la dirección NS y EW (tiro de ida y de regreso), los valores de velocidad se presentan en la figura 6.5.

Refracción sísmica N°6: Los valores de velocidad de onda se presentan en la figura 6.5, esta prospección se ubicó en depósitos aluviales en el límite entre la zona I y IV. La distancia de la fuente al primer geófono y la distancia entre estos fue de 2.50 m. Se realizó un tiro a la derecha y a la izquierda en dirección NS (sólo tiro de ida).

Refracción sísmica N°7: Se ubicó en el depósito de playa, en el área que pertenece a la zona I en el límite con la zona II. La distancia de la fuente al primer geófono y la distancia entre estos fue de 2.00 m. Se realizó un tiro a la derecha y a la izquierda en dirección NS (sólo tiro de ida). La dromocrónica se presenta en la figura 6.5.

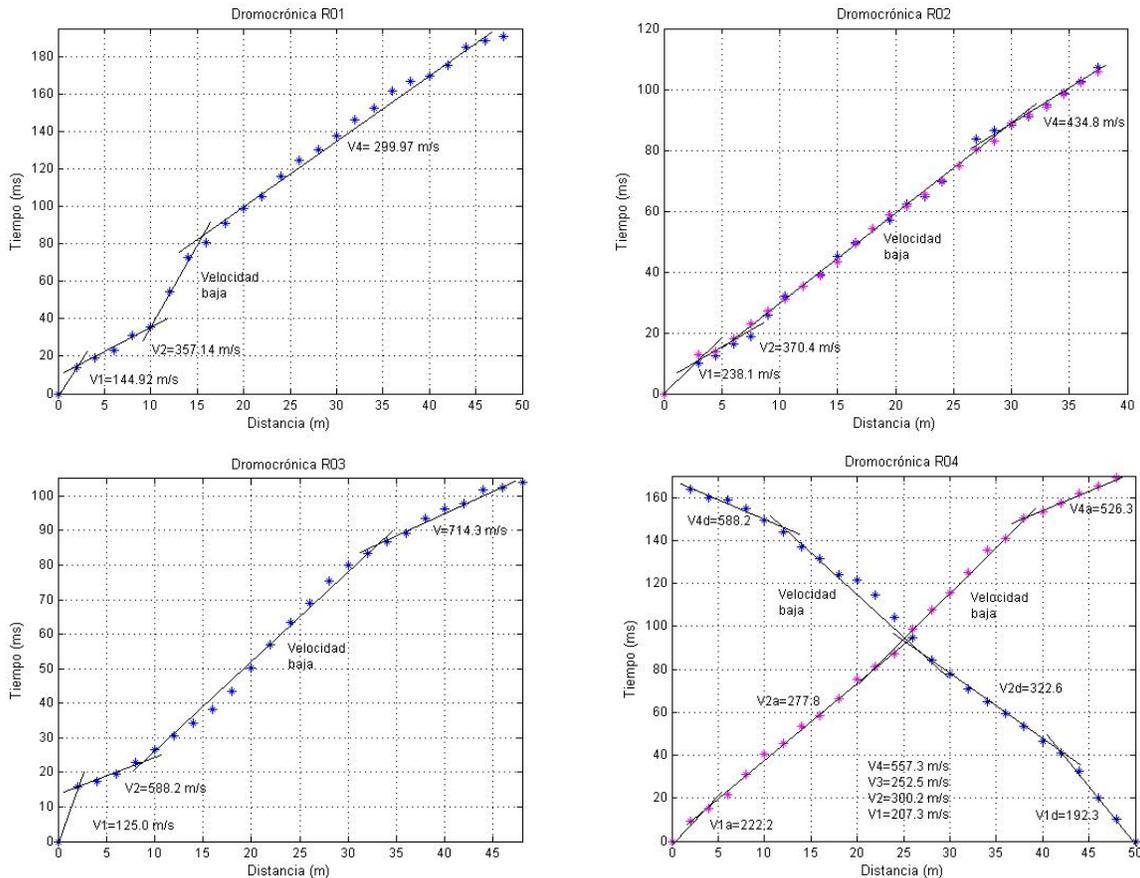


Figura 6.4. Velocidades de onda SH en la refracción 1 al 4.

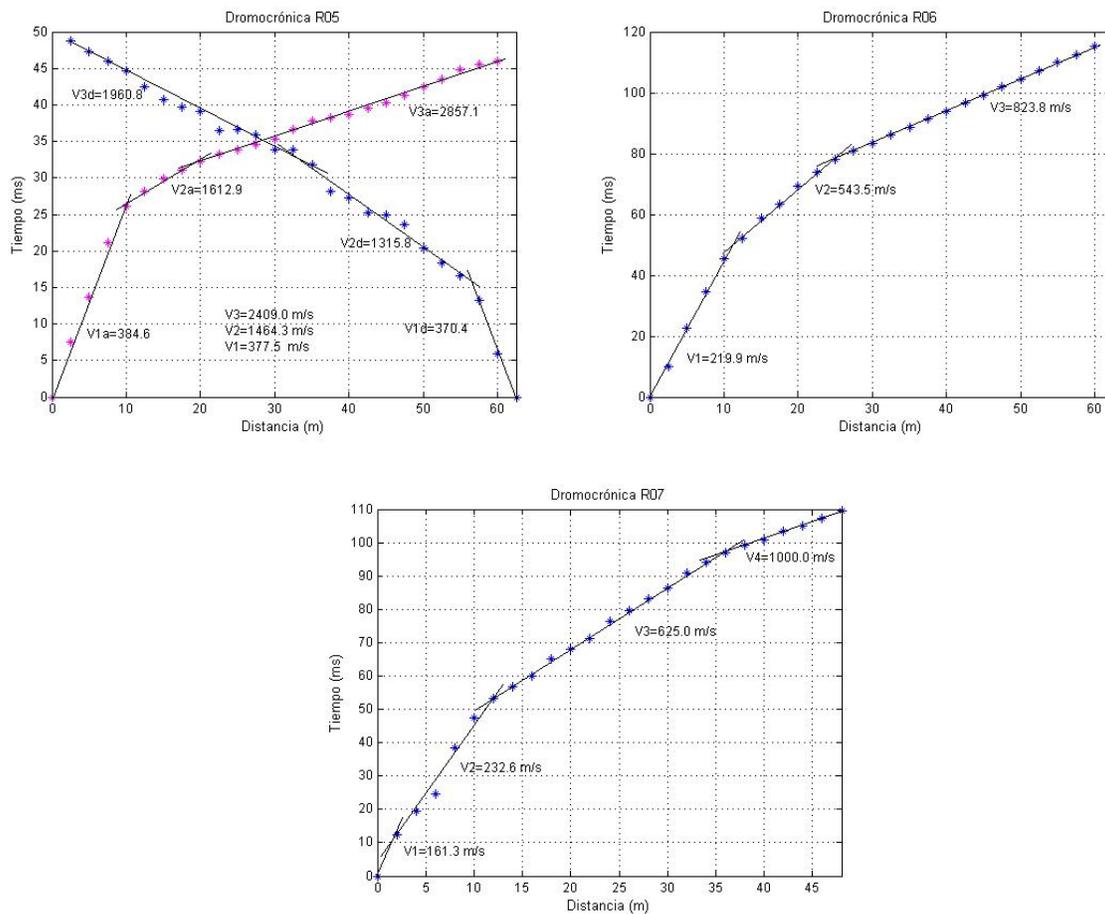


Figura 6.5. Velocidades de onda SH en las refracciones 5 al 7.

6.2.3.2 Vibración ambiental

Se usó 187 puntos de microtemores distribuidos uniformemente en toda la ZCV (aproximadamente un registro por kilómetro cuadrado) como se observa en la figura 6.6. De estos, 176 fueron medidos por Leyva (2004) y 11 para este trabajo con la intención de corroborar algunos resultados. El procesamiento de estos datos se hizo con la técnica de Nakamura, descrita en el capítulo anterior.

6.2.3.3 Registro de Temblores

Williams et al. (2003) obtuvieron cocientes espectrales de algunas áreas de la ZCV con registros de sismos locales y regionales de una red acelerográfica temporal (la red temporal pertenece a la red acelerográfica de la ciudad de Veracruz). Los métodos que ellos usaron para obtener estos cocientes fueron: el método estándar (SSR) y el HVSr para algunos casos. En este trabajo se tomaron los resultados obtenidos por estos investigadores con la finalidad de conocer la amplificación real de los terrenos. La ubicación de las estaciones temporales se muestra también en la figura 6.6. Para obtener las funciones de transferencia teórica se usó el método estándar usando como estación de referencia la estación POVE.

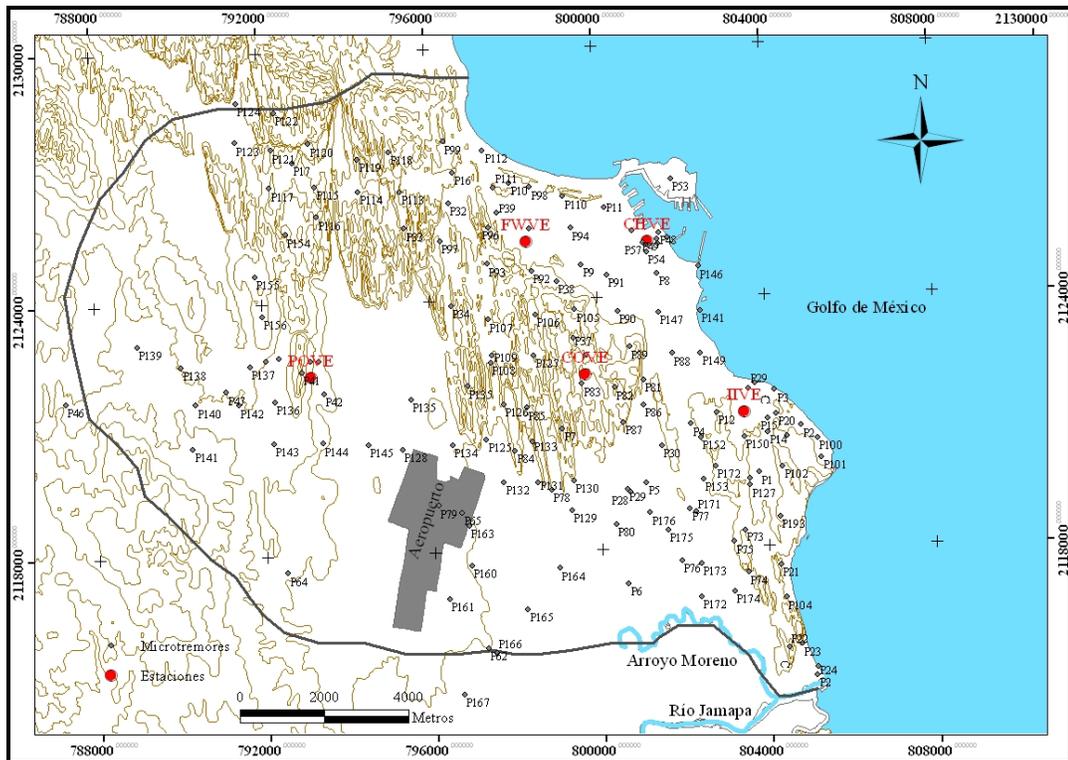


Figura 6.6. Ubicación de los puntos de microtremores y estaciones acelerográficas

Para obtener las FTE se siguió el procedimiento descrito en el capítulo anterior, tanto para registros de vibración ambiental, como para registros sísmicos.

Leyva, 2004 y nosotros obtuvimos alrededor de 5 a 10 FTE por cada punto en el que se midió vibración ambiental, la media geométrica de estas funciones fueron agrupadas y se obtuvo la FTEP de cada punto, las FTE y la FTEP para los 11 puntos antes mencionados se presentan en el anexo A y las FTE y la FTEP de los 176 puntos se encuentran en el trabajo de Leyva, 2004.

6.2.4 Obtención de familias espectrales según las formas espectrales de las FTEP y microzonación.

La FTEP de cada punto de medición fueron agrupadas y se obtuvo cuatro familias espectrales cuya ubicación espacial se presenta en la figura 6.7. Las familias espectrales se presentan mas adelante, en la descripción de cada zona.

6.2.5 Cálculo de las FTT y modelos estratigráficos

Las zonas encontradas (familias espectrales) se identifican con las características geológicas y geotécnicas para obtener un modelo estratigráfico que las identifique. A continuación se describirá cada zona y se determinaran los datos de este modelo.

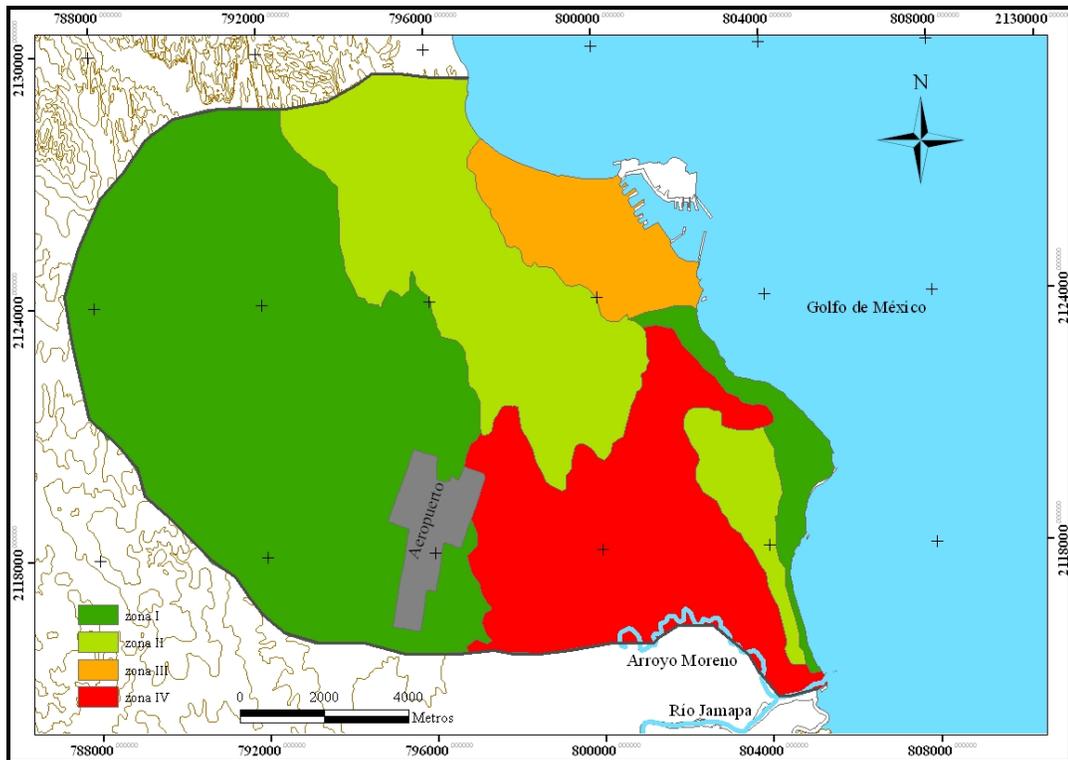


Figura 6.7. Microzonificación dinámica de la ZCV.

6.2.5.1 Zona IV

Esta zona se encuentra en el área más baja de los depósitos aluviales y está delimitada por la cota de 10 m.s.n.m. en dirección este, es importante señalar que esta zona se encuentra dentro de la zona de inundación en épocas de lluvias y de pantanos formados, alguna vez, por la margen izquierda del río Jamapa. Con el corte estratigráfico B-B y con otros perfiles estratigráficos ubicados dentro de la zona o en los límites, se determinó las características y resistencia media del subsuelo.

Se encuentra conformada básicamente por suelos finos (arena limosa, limos de alta y baja compresibilidad y presencia de estratos de arcilla de baja y alta plasticidad), el nivel freático (NAF) se encuentra cercano a la superficie (0.8 m a 1.07 m). Estos suelos pueden estar alternados por material orgánico tal como lo reporta Páez A. ,2001 (estratos de material orgánico, OH u OL, a profundidades que varían entre 0 y 10 metros y con espesor menor a 2 m los cuales se encuentran en el límite con la zona III, en la calles de Xalapa y Av. Díaz Mirón). La resistencia de estos materiales según la profundidad es la siguiente (tabla 6.2):

Tabla 6.2. Resistencia promedio de los estratos

Profundidad aproximada (m)	Resistencia promedio	Número de golpes (N)
0.0 - 0.30	baja	5<N<20
3.00 - 5.00	media	10<N<30
5.00 - 11.00	baja	5<N<20
1100 - 16.00	alta	30<N<50

Las velocidades de onda SH asignadas para esta zona son un promedio de los valores obtenidos de las refracciones R01 y R02.

Los valores de amortiguamiento fueron asumidos suponiendo el rango de deformaciones inducidas para un sismo intenso de $2 \cdot 10^{-2} \%$ a $8 \cdot 10^{-2} \%$. Entonces los valores aproximados de amortiguamiento crítico para las capas de resistencia baja y media sería 0.04 % y 0.01% para la capa base (este último valor fue tomado de la bibliografía Bollinger, 1979). La densidad para cada capa fue asumida con la información de Esquivel (1976) quien reporta los siguientes valores, tabla 6.3.

Tabla 6.3. Valores de densidad según el tipo de suelo (Esquivel, 1976)

Tipo de Suelo (SUCS)	Profundidad (m)	Densidad (t/m^3)
SP, SM y SP-SM	0.0 a 30	1.590 a 1.950
OH	variable	1.250 a 1.740
Coral	variable	1.997 a 2.142

Con todos estos datos se construyó el modelo estratigráfico representativo de la tabla 6.4.

Tabla 6.4 Modelo estratigráfico representativo para la zona IV.

Nº	H (m)	ρ (t/m^3)	β (m/s)	ξ (1)
1	3.0	1.4	144.92	0.04
2	2.0	1.6	357.14	0.04
3	6.0	1.4	147.05	0.04
4	5.0	1.6	380.00	0.04
5	6.0	1.5	200.00	0.04
Base	-	1.9	900.00	0.01

La FTT para las componentes horizontales se muestra en la figura 6.8 con una línea gruesa de color rojo y es una curva envolvente de las FTEP que se muestran en la misma figura con líneas delgadas. La frecuencia dominante para esta zona se encuentra en el rango de 2.0 Hz a 3.0 Hz con amplificación promedio de 6 veces. Una estación acelerográfica temporal (IIVE) se ubica en esta zona, por lo tanto se validó la FTT con la función de transferencia obtenida de los registros de temblores (Riquer et al. 2003), la cual esta representada en la figura 6.8 con una línea de color naranja.

6.2.5.2 Zona III

Esta zona abarca parte de los depósitos de playa y de dunas. Con el corte estratigráfico A-A se determinó las características y resistencia media del subsuelo, el nivel freático se encuentra menos superficial que en la zona anterior, entre 1.50 m a 3.30 m de profundidad.

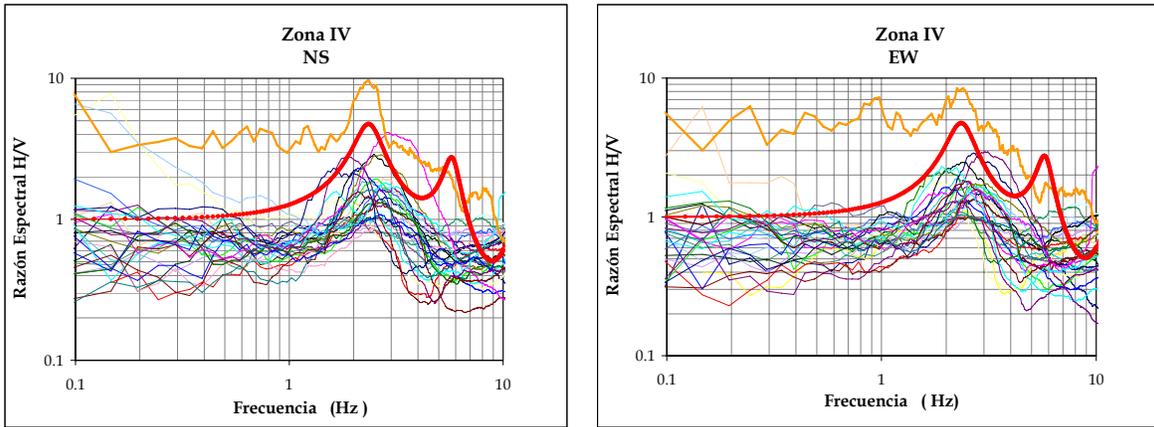


Figura 6.8. FTEP, Líneas delgadas; FTT línea gruesa roja; FTT con el método SSR, línea gruesa naranja,

El terreno de esta zona está formado por arenas finas limosas con resistencias según se indica a continuación (ver tabla 6.5).

Tabla 6.5. Resistencia promedio de los estratos

Profundidad aproximada (m)	Resistencia promedio	Número de golpes (N)
0.0 - 4.00	Baja a media	5<N<30
4.00 - 7.00	alta	30<N<40
7.00 - 15.50	baja	5<N<10
15.5 - 21.0	alta	30<N<40

Se debe mencionar la presencia de corales de 8 m a 12 m, aproximadamente, en el perfil estratigráfico S-4 (área portuaria), esta estructura es resistente y muy porosa de esqueletos orgánicos y calcáreos; según Esquivel (1976), *el coral se encuentra empacado en una matriz de arena con graduación fina a media con presencia de conchas.*

Los perfiles estratigráficos B-B y D-D hallados por Esquivel, 1976 reportan la presencia de material orgánico (OH) en el área limítrofe con la zona IV, este material se encuentra a 3 m de profundidad con 2 m de espesor aproximadamente. Según Esquivel esta arcilla orgánica es: *de color oscuro de mediana a alta plasticidad y consistencia media con algo de arena.*

Las velocidades de onda SH se obtuvieron del perfil sísmico de refracción R03 y R04, los valores de amortiguamientos y densidades fueron asumidos bajo las mismas condiciones descritas en la zona IV. Por lo tanto, tenemos el modelo estratigráfico de la tabla 6.6.

Tabla 6.6 Modelo estratigráfico de la zona III.

Nº	H (m)	ρ (t/m ³)	β (m/s)	ξ (1)
1	4.0	1.4	166.13	0.04
2	3.0	1.6	444.20	0.04
3	8.5	1.4	150.00	0.04

4	6.0	1.7	635.80	0.04
Base	-	1.9	900.00	0.01

La FTT para cada componente se muestra en la figura 6.9 con una línea gruesa roja. En esta misma figura se presenta la FTT usando la técnica SSR (con una línea naranja) y HVSR con los sismos de la estación CHVE (con una línea azul). Finalmente, la frecuencia dominante de esta zona se encuentra en el rango de 2.0 Hz. a 3.0 Hz. con una amplificación aproximada de 5 veces.

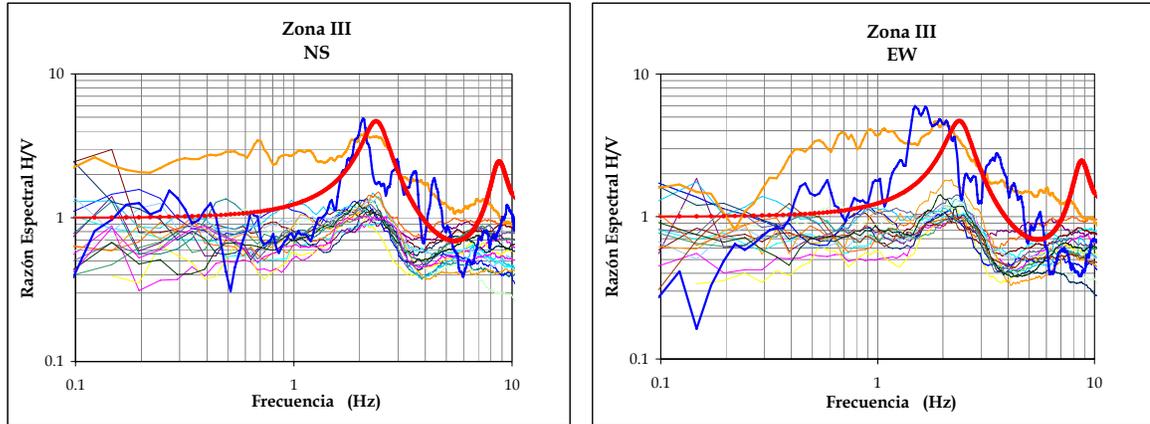


Figura 6.9. Líneas delgadas, FTEP; línea gruesa roja, FTT; línea gruesa azul, función de transferencia teórica con HVSR; línea gruesa naranja, función de transferencia teórica con SSR.

6.2.5.3 Zona II

Esta zona abarca la mayor parte del depósito de dunas. El subsuelo está formado básicamente por depósitos de arena fina limosa el cual tiene la siguiente resistencia.

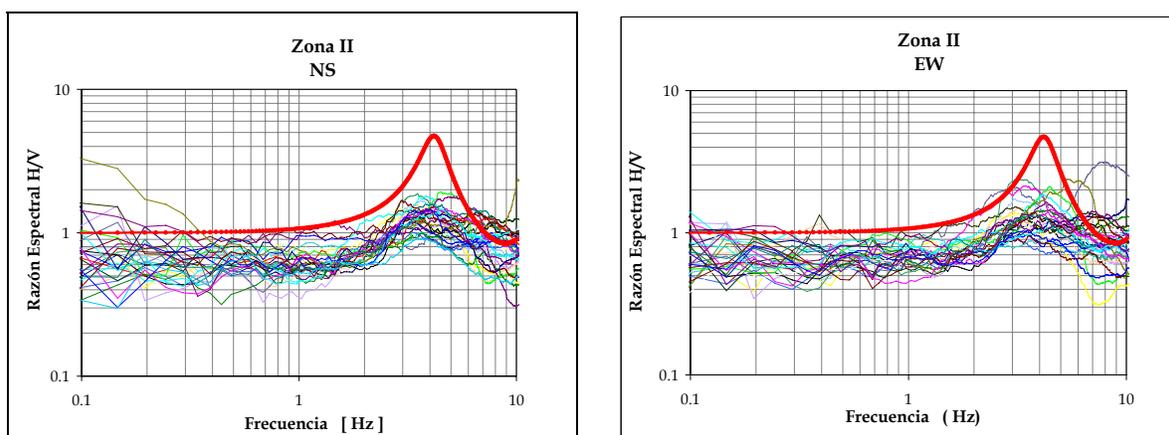
Tabla 6.7. Resistencia promedio de los estratos

Profundidad aproximada (m)	Resistencia promedio	Número de golpes (N)
0.0 - 3.00	baja	5<N<10
3.00 - 4.50	media	10<N<30
4.50 - 8.0	baja	5<N<10
8.0 - 11.0	alta	30<N<50

Es de importancia resaltar la presencia de una capa de arcilla orgánica (OH y OL) de consistencia baja, a 5.0 m de profundidad y 2.0 m de espesor, en el perfil estratigráfico S-7 (en el área cercana a la zona I) y suelos finos (CL, ML) y material orgánico (OL y TB) en el límite con la zona I y IV (perfil S-24). Para cada una de las capas se asumieron velocidades de corte, con base a los valores de velocidad encontrados en el análisis de refracción sísmica R02 y R04. Los valores de amortiguamiento y densidad fueron tomados bajo las mismas consideraciones de las zonas anteriores. El modelo estratigráfico se presenta en la tabla 6.8 y las FTT en las dos componentes horizontales en la figura 6.10.

Tabla 6.8 Modelo estratigráfico para la zona II

Nº	H (m)	ρ (t/m ³)	β (m/s)	ξ (1)
1	3.0	1.4	162.3	0.04
2	1.5	1.5	250.0	0.04
3	4.5	1.4	150.0	0.04
4	3.0	1.7	580.0	0.04
Base	-	1.9	900.0	0.01


Figura 6.10. Líneas delgadas FTEP, línea roja, FTT.

La FTT es una envolvente de las FTEP y la frecuencia dominante se encuentra en el rango de 3.0 Hz a 4.0 Hz con una amplificación relativa aproximada de 4 veces. La componente N-S tiene menos amplificación que la componente E-O, esto se debería a que las dunas se encuentran orientadas en dirección NS.

6.2.5.4 Zona I

Esta zona abarca la mayor parte de los depósitos aluviales, parte de los depósitos de playa y de dunas. Para definir mejor las características y resistencia de los suelos se puede dividir esta zona en dos subzonas como; Zona Ia y Zona Ib.

La primera zona, Zona Ia, se encuentra en parte de los depósitos de playa y dunas cuyo subsuelo, de acuerdo con los perfiles S-9, S-11, S-12 y S-20 del corte estratigráfico C-C, está formado por depósitos de arena fina limosa desde la superficie de terreno natural hasta, aproximadamente 3.0 metros de profundidad. En la tabla 6.9 se muestra la resistencia de los estratos.

Tabla 6.9. Resistencia promedio de los estratos

Profundidad aproximada (m)	Resistencia promedio	Número de golpes (N)
0.00 - 3.00	baja	5<N<20
3.00 - 5.00	media	10<N<30
5.00 - 9.50	alta	40<N<60

Es importante mencionar la existencia de capas de corales, en algunos perfiles estos se pueden encontrar a 6.00 m de profundidad y en otros entre 12 y 16 m aproximadamente.

El subsuelo de la Zona Ib está formado por una capa superficial de 9.50 m, aproximadamente, de arena fina limosa con resistencia media ($10 < N < 30$). Debajo de los depósitos de resistencia media se encuentra un material arenoso (SP-SM) con alta resistencia (N, mayores a 40 golpes). Es de importancia mencionar que por ser esta zona un depósito de aluvial puede existir capas de arcilla (CH o CL) sobre todo en áreas cercanas a la zona IV.

Con esta información se propone un modelo estratigráfico promedio que represente a esta zona, en este modelo se asume el espesor de la capa superficial 9.50 m, ya que en las dos subzonas llegan hasta esta profundidad.

El valor de velocidad de onda de corte SH fue asumido con los datos de los perfiles sísmicos R07 y R02, R05 y R06. Los valores de amortiguamiento y densidad fueron tomados bajo las mismas consideraciones anteriores. El modelo estratigráfico se presenta en la tabla 6.10.

Tabla 6.10 Modelo estratigráfico para la zona I

Nº	H	ρ	β	ξ
	(m)	(t/m ³)	(m/s)	(l)
1	3.00	1.4	195.00	0.04
2	2.00	1.5	355.00	0.04
3	4.50	1.7	150.00	0.04
Base	-	1.9	900.00	0.01

En cuanto a la función de transferencia empírica promedio, muestra un pico predominante a 9 HZ en las curvas espectrales como se observa en la figura 6.11. La FTT resultó ser una curva envolvente de la FTEP, lo cual indica que los modelos supuestos son los aproximados.

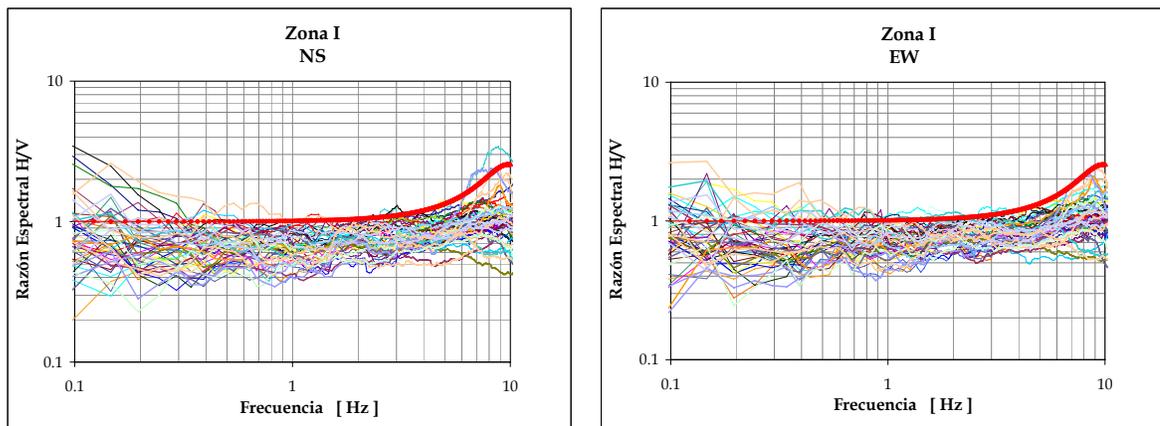


Figura 6.11 Funciones de transferencia en la zona I. Líneas delgadas: FTEP, línea gruesa roja: FTT para la zona Ia y línea gruesa roja oscura: FTT para la zona Ib.

La tabla 6.11 resume el periodo y la amplificación de las cuatro zonas.

Tabla 6.11. Periodo predominante y amplificación de la ZCV.

ZONA	T (s)	F (Hz)	Amplificación Relativa
I	<1.25	>8	1.0
II	0.22-0.29	3.50-4.50	2-3
III	0.33-0.40	2.50-3.00	3-4
IV	0.40-0.67	1.50- 2.50	4-8

6.2.6 Clasificación de terrenos

6.2.6.1 Clasificación con la IBC-2000

Primero calculamos el V_{S30} , para este valor se necesita conocer el tiempo que tarda la onda SH en recorrer los 30 primeros metros, es decir la exploración estudiada debe llegar hasta 30 m, sin embargo en ninguna de las cuatro zonas la exploración llego a tal profundidad. Por lo tanto, nos encontramos en la primera condición establecida en el capítulo V, la cual resolveremos aplicando los tres casos, también mencionados en ese capítulo.

- V_{S30} en la zona IV

El modelo estratigráfico de esta zona llega hasta 22 m de profundidad,

Primer Caso: Calculamos la velocidad de onda de corte hasta 22 m de profundidad (V_{S22}).

Segundo Caso: Tomaremos en cuenta la velocidad de la onda de corte de la capa base del modelo estratigráfico representativo de esta zona para calcular el V_{S30}

Se usará la fórmula 4.9 para calcular el V_{S22} y el V_{S30} , los resultados se muestra a continuación:

Caso 1		
d_i [m]	V_{si} [m/s]	d_i/V_{si}
3.0	144.9	0.02070
2.0	357.1	0.00560
6.0	147.1	0.04079
5.0	380.0	0.01316
6.0	200.0	0.03000
$\Sigma=$	22.0	0.1102476
$V_{S22} =$	199.55 m/s	

Caso 2		
d_i [m]	V_{si} [m/s]	d_i/V_{si}
3.0	144.9	0.02070
2.0	358.0	0.00559
6.0	147.1	0.04079
5.0	380.0	0.01316
6.0	200.0	0.03000
8.0	900.0	0.00889
$\Sigma=$	30.0	0.1191227
$V_{S30} =$	251.84 m/s	

Tercer Caso: Otra forma de determinar el V_{S30} seria usando la ecuación 4.10 junto con los coeficientes de correlación encontrados por Boore, 2004 mostrados en la tabla 4.10, el cual se presenta a continuación:

a	b	$V_{S(d)}$ (m/s)	V_{S30} (m/s)
0.02690	1.04400	199.551	268.013

• **VS30 en la zona III**

La profundidad que alcanzó el modelo estratigráfico en esta zona fue de 21.5 m. La aplicación de los tres casos se presenta a continuación

Caso 1			Caso 2		
d_i [m]	V_{si} [m/s]	d_i/V_{si}	d_i [m]	V_{si} [m/s]	d_i/V_{si}
4	166.1	0.0241	4	166.1	0.0241
3.0	444.2	0.0068	3.0	444.2	0.0068
8.5	150.0	0.0567	8.5	150.0	0.0567
6.0	635.0	0.0094	6.0	635.0	0.0094
			8.5	900.0	0.0094
$\Sigma=$ 21.5			$\Sigma=$ 30.0		0.1064
$V_{S21.5} =$ 221.77 m/s			$V_{S30} =$ 281.98 m/s		

Caso 3: Si usamos la ecuación propuesta por Boore, 2004 obtenemos el siguiente valor de V_{S30} .

a	b	$V_{S(d)}$ (m/s)	V_{S30} (m/s)
0.02531	1.00310	221.771	244.403

• **VS30 en la zona II**

El modelo estratigráfico llegó hasta 12.0 m de profundidad, la aplicación de los casos se presenta en lo que sigue:

Caso 1			Caso 2		
d_i [m]	V_{si} [m/s]	d_i/V_{si}	d_i [m]	V_{si} [m/s]	d_i/V_{si}
3.0	162.3	0.018484	3.0	162.3	0.018484
1.5	250.0	0.006000	1.5	250.0	0.006000
4.5	150.0	0.030000	4.5	150.0	0.030000
3.0	580.0	0.005172	3.0	580.0	0.005172
			18.0	900.0	0.020000
$\Sigma=$ 12.0		0.059657	$\Sigma=$ 30.0		0.079657
$V_{S12} =$ 201.15 m/s			$V_{S30} =$ 376.61 m/s		

Caso 3: Con los coeficientes determinados por Boore el V_{S30} es igual a:

a	b	$V_{S(d)}$ (m/s)	V_{S30} (m/s)
0.01257	1.03520	201.150	249.56

• **VS30 en la zona I**

Las velocidades de onda de corte para 9.5 m de profundidad, así como el valor de V_{S30} con el método aplicado en las demás zonas son las siguientes:

Caso 1		
d_i [m]	V_{si} [m/s]	d_i/V_{si}
3.0	195.0	0.0154
2.0	355.0	0.0056
4.5	400.0	0.0113
$\Sigma=$ 9.5		0.032268
$V_{S30} =$		294.40 m/s

Caso 2		
d_i [m]	V_{si} [m/s]	d_i/V_{si}
3.0	195.0	0.0154
2.0	355.0	0.0056
4.0	750.0	0.0053
21.0	900.0	0.0233
$\Sigma=$ 30.0		0.049685
$V_{S30} =$		603.80 m/s

Caso 3: Tomando los coeficientes de correlación para 10.0 m de profundidad se obtiene el V_{S30} igual a:

a	b	$V_{S(d)}$ (m/s)	V_{S30} (m/s)
0.04200	1.02920	294.405	382.8610

A continuación clasificaremos las zonas según los valores de velocidad encontrados en cada caso.

Caso 1: Si clasificamos cada zona con el valor de V_{sd} calculado para las profundidades de los métodos estratigráficos tenemos el siguiente resultado (ver tabla 6.12).

Tabla 6.12 Clasificación con la IBC-2000 usando V_{sd}

Zona	V_{sd} (m/s)	Tipo de suelo	Descripción
I, $V_{S9.5}$	332.203	D	Suelos arenosos
II, V_{S12}	201.151	D	Suelos arenosos
III, V_{S21}	221.771	D	Suelos arenosos
IV, V_{S28}	199.551	D	Suelos arenosos

Caso 2: En la tabla 6.13 se muestra los valores de V_{S30} para cada zona y la correspondiente clasificación según el IBC-2000.

Tabla 6.13 Valores de V_{S30} y clasificación con la IBC-2000

Zona	V_{S30} (m/s)	Tipo de suelo	Descripción
I	614.766	C	Roca o suelo duro

II	376.616	C	Rocas o suelo duro
III	281.978	D	Suelos arenosos
IV	251.841	D	Suelos arenosos

Caso 3: Al usar los valores de V_{S30} corregidos con los coeficientes de Boore, 2004 tenemos la clasificación que se muestra en la tabla 6.14.

Tabla 6.14 V_{S30} corregido (Boore, 2004) y Clasificación usando la IBC-2000

Zona	V_{S30} (m/s)	Tipo de suelo	Descripción
I	382.861	C	Roca o suelo duro
II	249.561	D	Suelos arenosos
III	244.403	D	Suelos arenosos
IV	268.013	D	Suelos arenosos

También se hizo el ejercicio de calcular el V_{S15} (velocidad de onda de corte en los primeros 15 m de profundidad) para analizar estos resultados con los obtenidos por William et. al., 2003. Este cálculo sólo se pudo hacer en las zonas III y IV, obteniendo los siguientes resultados: zona III, $V_{S15}=143.24$ m/s y zona IV, $V_{S15}= 178.22$ m/s, la clasificación de terrenos para estas dos zonas es el tipo E. Según William et al (2003) la zona II y III corresponden a la subzona de valores medios de la clase D.

6.2.6.2 Clasificación con el Manual de Obras Civiles de la CFE-1993 y con las NTC D.F-2004.

Según la norma de CFE, la ZCV pertenece a la zona sísmica B de la carta de zonificación sísmica de la República Mexicana, los valores de velocidad de ondas de corte y periodo dominante característicos de esta zona son 400 m/s y 5.3 s respectivamente. Los valores de velocidad promedio efectiva y periodo dominante específicos de cada zona se hallaron con las fórmulas 4.1 y 4.3, los valores de estos parámetros son presentados en la tabla 6.15, así como la clasificación de las zonas con base en las condiciones 4.4 y 4.5 establecidas por esta norma.

Tabla 6.15 Clasificación de la ZCV con el manual de la CFE de 1993.

Zonas	B_C (m/s)	T_C (s)	B_S (m/s)	T_S (s)	$B_C * T_C$	$B_C * T_S + B_S * T_C$	Tipo de suelo
I	400	5.3	332.203	0.103	2120.000	1801.756	Tipo III
II	400	5.3	201.151	0.239	2120.000	1161.551	Tipo III
III	400	5.3	221.771	0.388	2120.000	1330.503	Tipo III
IV	400	5.3	199.576	0.441	2120.000	1234.125	Tipo III

Otra forma de clasificar la ZCV es la siguiente:

- Aplicar la ecuación 4.6 de las normas técnicas complementarias del D.F-2004 para determinar el periodo predominante de cada zona.
- Calcular la velocidad efectiva usando la ecuación 4.3 bajo la forma de la ecuación 6.1.

$$V_s = \frac{4H}{T_s} \quad (6.1)$$

Estos dos cálculos se presentan a continuación:

Zona I									
N°	d m	γ t/m ³	G t/m ²	V _s m/s	d _i /G _i 2	x _i 3	$\gamma_i d_i$ 4	$x_i^2 + x_i x_{i-1} + x_{i-1}^2$ 5	4*5
3	3.0	1.4	5323.50	195.0	0.00056	1.00	4.20	1.26	5.29
2	2.0	1.5	18903.75	355.0	0.00011	0.21	3.00	0.06	0.19
1	4.5	1.7	95625.00	750.0	0.00005	0.07	7.65	0.00	0.03
	9.5				0.0007164				5.51
T_s= 0.080 F= 12.46 V_s= 473.51									
Zona II									
N°	d m	γ t/m ³	G t/m ²	V _s m/s	d _i /G _i 2	x _i 3	$\gamma_i d_i$ 4	$x_i^2 + x_i x_{i-1} + x_{i-1}^2$ 5	4*5
4	3.0	1.4	3687.78	162.3	0.001	1.00	4.20	2.12	8.89
3	1.5	1.5	9375.00	250.0	0.000	0.67	2.25	1.21	2.73
2	4.5	1.4	3150.00	150.0	0.001	0.60	6.30	0.38	2.38
1	3.0	1.7	57188.00	580.0	0.000	0.02	5.10	0.00	0.00
	12				0.002				14.00
T_s= 0.24 F= 4.22 V_s= 202.8									
Zona III									
N°	d m	γ t/m ³	G t/m ²	V _s m/s	d _i /G _i 2	x _i 3	$\gamma_i d_i$ 4	$x_i^2 + x_i x_{i-1} + x_{i-1}^2$ 5	4*5
4	4	1.4	3863.88	166.1	0.001	1.00	5.60	2.28	12.75
3	3.0	1.6	31570.18	444.2	0.000	0.74	4.80	1.57	7.54
2	8.5	1.4	3150.00	150.0	0.003	0.71	11.90	0.52	6.22
1	6.0	1.7	68548.25	635.0	0.000	0.02	10.20	0.00	0.01
	21.5				0.004				26.51
T_s= 0.41 F= 2.43 V_s= 208.99									
Zona IV									
N°	d m	γ t/m ³	G t/m ²	V _s m/s	d _i /G _i 2	x _i 3	$\gamma_i d_i$ 4	$x_i^2 + x_i x_{i-1} + x_{i-1}^2$ 5	4*5
4	3.0	1.4	2940.33	144.9	0.001	1.00	4.20	2.35	9.86
3	2.0	1.6	20506.24	358.0	0.000	0.76	3.20	1.70	5.43
2	6.0	1.4	3029.38	147.1	0.002	0.74	8.40	0.84	7.03
1	5.0	1.6	23104.00	380.0	0.000	0.28	8.00	0.20	1.59
0	6.0	1.5	6000.00	200.0	0.001	0.23	9.00	0.05	0.48
	22				0.004		32.80	5.13	24.39
T_s= 0.41 F= 2.41 V_s= 212.4									

- Obtenido el valor de V_s y T_s se aplica el manual de la CFE-1993. La tabla 6.16 muestra esta clasificación

Tabla 6.16. Clasificación de la ZCV según la CFE-1993, calculando el T_s como específica la norma del D.F.-2004.

Zonas	B_c (m/s)	T_c (s)	B_s (m/s)	T_s (s)	$B_c * T_c$	$B_c * T_s + B_s * T_c$	Tipo de suelo
I	400	5.3	419.989	0.092	2120.000	2262.729	Tipo II
II	400	5.3	202.767	0.237	2120.000	1169.357	Tipo III
III	400	5.3	208.988	0.412	2120.000	1272.240	Tipo III
IV	400	5.3	212.392	0.414	2120.000	1291.411	Tipo III

6.2.6.3 Clasificación con las NTC para diseño sísmico propuesto para el estado de Veracruz

Para estructuras menores a 5 t/m^2 la clasificación de las cuatro zonas sería el tipo III, ya que los depósitos pertenecen al cuaternario (según las tablas 4.2 y 4.4), para estructuras mayores a 5 t/m^2 es necesario calcular la velocidad efectiva con la ecuación 4.7 y así clasificar cada zona, en la tabla 6.17 se presenta este cálculo así como la clasificación.

Tabla 6.17. Clasificación de terrenos de la ZCV según la propuesta de las NTC para sismos del estado de Veracruz (edificaciones mayores a 5 t/m^2).

Zona	V_s (m/s)	Tipo de suelo	Descripción
I	332.203	II	Suelo firme
II	201.151	II	Suelo firme
III	221.771	II	Suelo firme
IV	199.576	II	Suelo firme

6.2.6.4 Clasificación con el sistema propuesto por Rodriguez-Bray et al., 2001

La clasificación según este sistema requiere el periodo predominante del suelo, la velocidad de onda de corte y el espesor de los estratos. En la tabla 6.18 se muestra estos parámetros así como la clasificación correspondiente de cada zona.

Tabla 6.18. Clasificación de terrenos de la ZCV según Rodriguez-Bray et. al.2001

ZONA	T (s)	F (Hz)	Tipo de Suelo	Descripción	Comentarios
I	< 1.25	>8.0Hz	B	Roca	Roca sin intemperismo (espesor de suelo < 6 m)
II	0.22-0.29	3.50-4.50	C-1	Roca intemperizada o blanda	Zona intemperizada (espesor de suelo < 30 m y $V_s > 360 \text{ m/s}$)
III	0.33-0.40	2.50-3.00	C-2	Suelo rígido superficial	Espesor de suelo > 6 m y < 30 m.
IV	0.40-0.67	1.50- 2.50	D	Suelos rígidos profundos que pertenecen al Holoceno o Pleistoceno	Depósitos cuaternarios (Pertenecen al Holoeceno y Pleistoceno)

La zona IV fue clasificada tomando en cuenta el periodo geológico al que pertenece, aunque por el valor del periodo predominante, esta zona es comparable a un suelo rígido de profundidad intermedia (tipo C-1) y un suelo de arcilla blanda de profundidad media con espesores entre 3 y 12 m (tipo E).

6.2.6.5 Comparación de los sistemas de clasificación

Se presenta la clasificación obtenida con cada una de las normas con el fin de comparar el detalle de cada una.

Tabla 6.19 Comparación de los sistemas de clasificación usados.

Zonas	CFE	CFE y T_s (NTC-DF)	IBC y V_{sd}	IBC y V_{s30}	IBC y Boore	Rodriguez-Bray,2001
I	III	II	D	C	C	B
II	III	III	D	C	D	C-1
III	III	III	D	D	D	C-2
IV	III	III	D	D	D	D

Comparando estos sistemas de clasificación, vemos que la IBC-2000 y la de Rodriguez-Bray nos dan un resultado más detallado que usando las normas nacionales.

6.2.7 Comentarios

La respuesta dinámica de los suelos no es dependiente de la clasificación geológica, pues se pudo agrupar diferentes formas espectrales en una misma zona geológica.

El efecto de sitio es mayor en la zona IV esto se debería a la existencia de paquetes de material arcilloso y limos-arcillosos provenientes del depósito aluvial en la zona baja y de inundación de la ZCV. Asimismo el menor efecto de sitio se encuentra en la zona I, la cual se localiza en la otra parte de los depósitos Aluviales, en las inmediaciones de la zona industrial y del aeropuerto donde la resistencia del suelo es mayor, y en los depósitos de Playa. Dentro de esta zona se encuentra un área cuya respuesta dinámica corresponde a la zona II, esto se debería a la intercalación de materiales finos y granulares de origen aluvial los cuales tienen mayor efecto de sitio.

Se debe tener precaución en el diseño estructural dentro de la zona IV, ya que su amplificación es casi 6 veces, además las referencias bibliográficas (Páez I., 2000) señalan que algunas edificaciones ubicadas dentro de esta área sufrieron asentamientos diferenciales después de su construcción.

El efecto de sitio de la zona III es menor al de la zona IV, pero es de importancia por encontrarse el periodo dominante en el rango de 2.0 Hz a 3.0 Hz, además dentro de esta zona se ha encontrado material de baja resistencia a los 4.0 m de profundidad, el cual sería el causante del efecto de sitio. Se debe tener presente que la amplificación de esta zona es moderado (4 veces). La Zona II es la que ocupa mayor área después de la zona I, el efecto de sitio de esta zona es moderado, sin embargo se debe tener en cuenta el efecto bidimensional debido a la orientación de

las dunas, ya que la amplificación en la componente NS es menor que en la EW, esto se debería a que las dunas se encuentran alineadas en dirección EW y por lo tanto puede existir el efecto topográfico, al respecto, Lermo et. al. 1993 mencionan que existe una buena relación entre los periodos dominantes predecidos con modelos 2D y los obtenidos con la técnica de Nakamura (HVNR).

Por otro lado, las FTT de todas las zonas son una curva envolvente de las FTEP, esto comprueba que los modelos estratigráficos se aproximan a las condiciones de los suelos. Las formas espectrales en todas las zonas a excepción de la zona III son muy parecidas en las dos componentes horizontales, lo cual indica efectos unidimensionales y hace valido el uso de modelos unidimensionales para obtener la FTT. Por otro lado, los valores de periodo predominante calculados con la ecuación propuesta por las NTC para sismo del D.F-2004 son muy parecidos a los obtenidos con microtemores.

Al clasificar las zonas con los reglamentos nacionales se obtuvo un solo tipo de suelo o dos, consideramos que este resultado es conservador y para edificaciones ubicadas en algunas zonas (como la zona I y II) se puede llegar a sobredimensionar por el análisis sísmico.

Aunque las normas internacionales dan resultados más detallados en cuanto al tipo de suelo, cuando se pone en práctica surgen algunas complicaciones, por ejemplo: la IBC-2000 especifica que se debe calcular el V_{S30} para clasificar los terrenos, al respecto observamos que se pueden dar tres casos: el primero, si la profundidad de la exploración no llega a los 30 m por problemas de equipo o porque la información recopilada no llega hasta esta profundidad, entonces se puede asumir que la última capa se extiende hasta los 30 m o en todo caso usar los coeficientes calculados por Boore, 2004; el segundo, cuando la profundidad de exploración no llega a la profundidad requerida porque antes se encuentra el terreno firme (suelos muy rígidos, roca intemperizada o roca sana con $V_S > 700$ m/s), en este caso se puede asumir la velocidad de onda de corte de la capa firme en el cálculo (como se hizo en este estudio), pero ello resulta en valores mayores de V_{S30} y por lo tanto se asigna letras también mayores (este es el caso de la zona IV) y el tercer caso se da cuando se encuentran depósitos mayores a 30 m de profundidad, para este caso se podría limitar el modelo estratigráfico a 30 m, pero ello al igual que en el caso anterior nos llevaría a asignar una letra mayor del sistema de clasificación.

En cuanto al sistema de clasificación propuesto por Rodriguez-Bray et. al. 2001, nos parece que los rangos de profundidad de los estratos y periodo predominante definidos para cada tipo de suelo son muy grandes. En el caso de la profundidad ninguna zona coincidió con los propuestos en los modelos estratigráficos, por ello no se tomó en cuenta para la clasificación y mas bien se consideró como único parámetro de entrada el periodo predominante para aplicar este sistema.

Además, consideramos que el conocimiento de la geología, geotecnia y geofísica son importantes en la determinación de los tipos de terreno debido al efecto de sitio, donde la frecuencia o periodo predominante juegan un papel importante, un ejemplo de ello es la zona IV cuya frecuencia predominante se encuentra entre 1.5 Hz y 2.5 Hz, el perfil estratigráfico con profundidad de exploración de 23 m (encontrándose material muy resistente después de esta profundidad, terreno firme, $N > 50$) reporta la presencia de materiales de poca resistencia, el perfil sísmico también reporta la presencia de capas de baja velocidad, si a esto datos les sumamos que pertenece a depósitos aluviales de origen fluvial, se ubica en zonas bajas de inundación y que la velocidad de

onda de corte hasta llegar a la capa firme es de 196 m/s, pensar en clasificar esta zona como tipo D porque el valor de V_{S30} es igual a 251.84 m/s (calculado considerando la velocidad de la capa firme hasta llegar a los 30 m) nos parece conservador.

6.3 CIUDAD DE OAXACA

La ciudad de Oaxaca se encuentra en una de las zonas más sísmicas de la República Mexicana, por ello se debe tomar en cuenta el diseño sísmico en los proyectos de construcción. En este contexto, el estudio del efecto de sitio es uno de los aspectos importantes que se debe considerar para el diseño.

Lermo et al., 1991 presentaron un mapa de microzonificación en la que proponen las siguientes zonas: zona alta, $T_o > 0.25$, $A_r < 4.0$; zona de pendientes, pendientes $> 15^\circ$; zona intermedia, $T_o = 0.25-0.50$, $A_r = 3.00-7.00$ y zona baja, $T_o = 0.50-0.80s$, $A_r = 5.00-17.00$. León, J., 1976 también propuso una zonación geotécnica la cual divide a la ciudad en tres zonas: zona I, depósitos aluviales; zona II, depósitos clásticos continentales y depósitos de abanico aluvial y zona III, arenisca, lutitas, calizas, areniscas y conglomerados metamorfizados, rocas metamórficas y tobas andesíticas.

Por otro lado, el reglamento de construcción no tiene normas técnicas complementarias para diseño por sismo, en cuanto a la clasificación de terreno, especifica que se adopte el que se encuentra en las NTC de la CFE-1993.

6.3.1 Geología

La secuencia estratigráfica de las formaciones existentes en el área de estudios se describe a continuación (León, J., 1976):

6.3.1.1 Rocas metamórficas

Situadas al oeste de la ciudad, en los cerros de la zona arqueológica de Monte Albán y al pie del cerro del Fortín, en esta zona afloran rocas metamórficas del Paleozoico las cuales se encuentran intemperizadas en su superficie y dan lugar a un suelo limo-arenoso de color amarillento. Es importante mencionar que el desarrollo urbano de esta zona se limita a la franja que se ubica en la parte baja del cerro del Fortín.

6.3.1.2 Calizas, areniscas, lutitas y conglomerados metamorfizados

Esta formación que se encuentra sobreyaciendo las rocas metamórficas se originó a partir de calizas, areniscas, lutitas y conglomerados. El contacto entre la formación paleozoica y estos materiales está indicado por una falla con dirección E-W. El material que predomina son los conglomerados de grano fino y una fuerte silicificación. En cuanto al color es muy variable; en su parte inferior, en estratos delgados, el color de la roca es blanco; y en la parte superior donde se observa un conglomerado en bancos de 1 m de espesor aproximadamente, el color es gris oscuro con intercalaciones de estratos delgados de areniscas y lutitas. La edad de esta formación es variable pudiendo estar entre el Triásico y el Jurásico. El desarrollo urbano en estas áreas es nulo.

6.3.1.3 Areniscas y lutitas

Se encuentra sobreyaciendo las rocas anteriores como una sucesión de capas formadas por areniscas y lutitas del terciario. Son de color café amarillento y están recubiertas parcialmente por una capa de materiales intemperizados del mismo color. Una parte de la ciudad de Oaxaca se ha desarrollado sobre esta formación.

6.3.1.4 Tobas andesíticas

Situada al noreste de la ciudad, de color verde claro, explotado como piedra para cantera y sobreyace la formación antes mencionada, el contacto de este depósito con los depósitos clásticos no se define con exactitud, ya que se encuentra parcialmente recubierto por estos. El desarrollo urbano de la ciudad se ha extendido sobre estos depósitos, aunque en pequeña proporción.

6.3.1.5 Depósitos clásticos continentales

Una erosión entre fines del Terciario y principios del Cuaternario dio origen a la sedimentación de los depósitos clásticos. La parte superior de estos depósitos están constituidos por limos arenosos de color café rojizo mientras que a profundidad el material está constituido por grava compacta dentro de una escasa matriz arenosa. Es importante mencionar que la mayor parte de la ciudad de Oaxaca se ha desarrollado sobre estos depósitos.

6.3.1.6 Depósitos aluviales

Constituidos por limos y arenas sueltas del cuaternario que provienen de aluviones de los ríos que entran al valle. Estos materiales se localizan en gran parte a lo largo del río Atoyac, presentan un espesor promedio de 30 m (León J., 1976) y son explotados para obtener agua subterránea. En algunas ocasiones estos depósitos son afectados por inundaciones.

6.3.1.7 Depósitos de abanico aluvial

Se localiza en las partes bajas del cerro del Fortín, están constituidos por grava subredondeada y angulosa en una matriz limo-arenosa. En la figura 6.12 se presenta geográficamente cada uno de estos depósitos.

6.3.2 Geotecnia

La geotecnia de esta ciudad fue estudiada con perfiles estratigráficos reportados en el trabajo de León J., 1976 (estos perfiles provienen de 11 estudios de mecánica de suelos). En la figura 6.13 se presenta la ubicación de estos perfiles y en el anexo B se muestran cada uno de ellos.

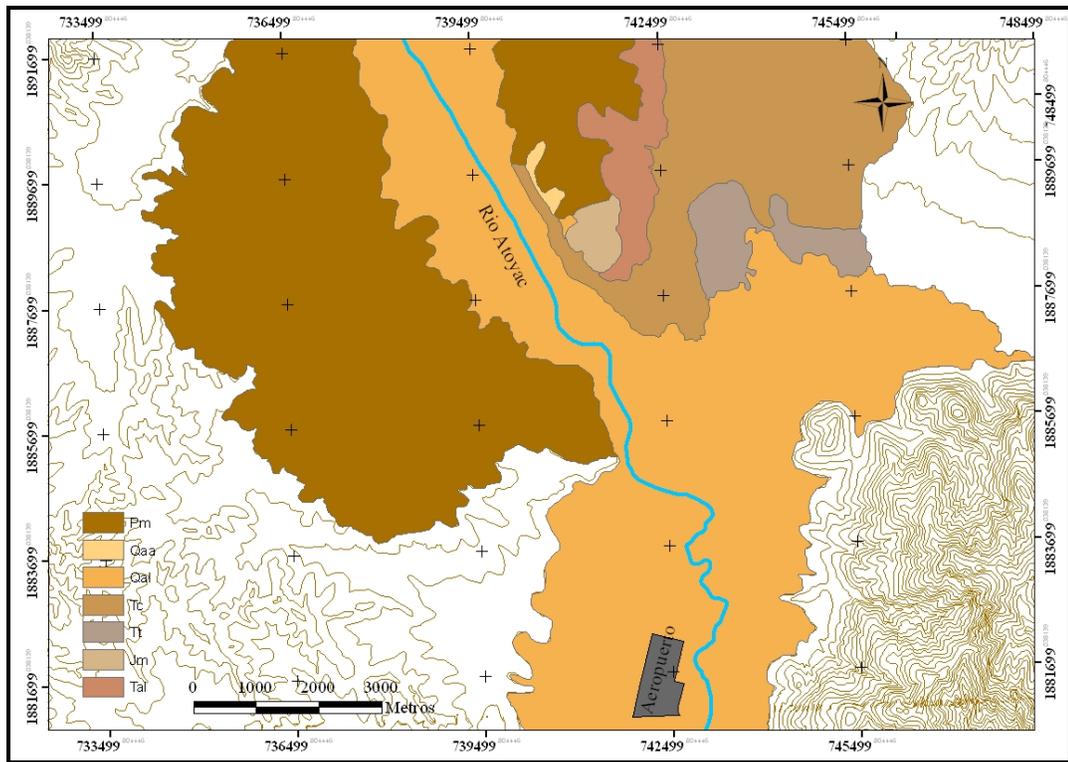


Figura 6.12. Geología de la ciudad de Oaxaca (León J., 1976)

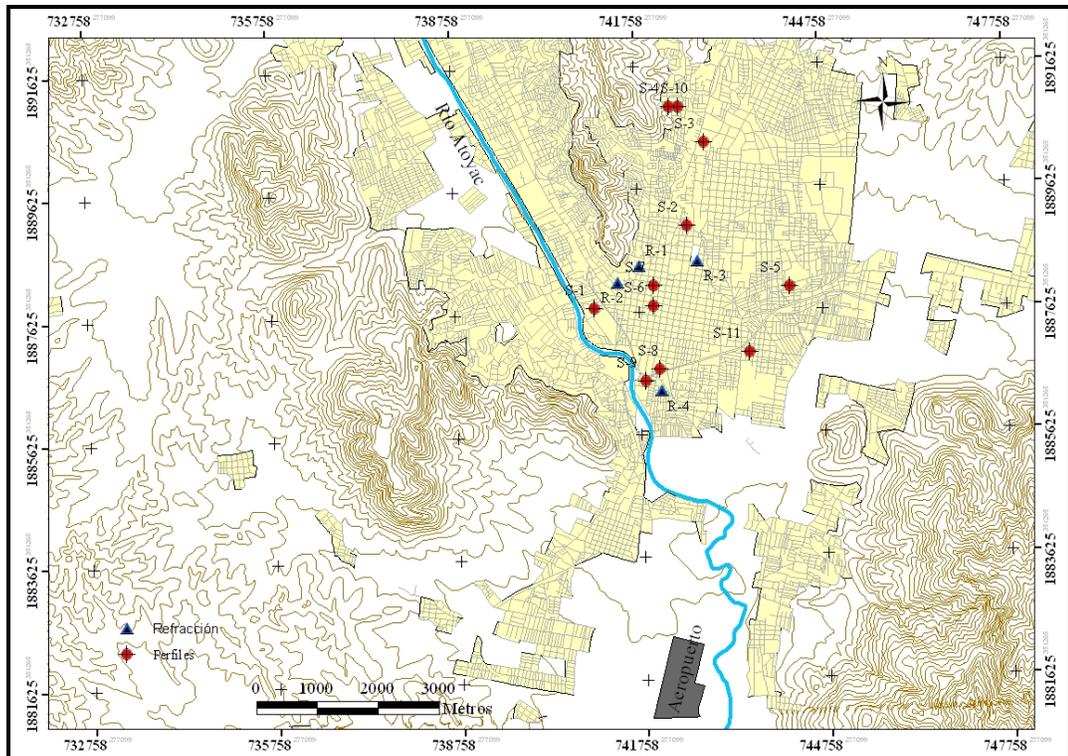


Figura 6.13. Ubicación de perfiles estratigráficos y refracciones sísmicas (León J., 1976).

6.3.3 Datos geofísicos

6.3.3.1 Refracción sísmica

Se cuenta con cuatro perfiles sísmicos distribuidos como se muestra en la figura 6.14. La generación de ondas SH y el método de interpretación se realizaron de la misma forma que para el estudio de la ZCV y se encuentra explicado en el capítulo V de este trabajo. En esta ocasión se trabajó con 12 geófonos los cuales se coloraron a diferentes distancias (de 2.00 m a 3.00 m) dependiendo del acceso y de las condiciones del terreno para trabajar. La profundidad explorada aproximada se encuentra entre 10.0 m a 12.0 m.

A continuación se presenta la dromocrónica de las cuatro refracciones, así como los valores de velocidad aparente de las ondas de corte SH.

Refracción sísmica N°1: Esta refracción se ubica en el límite de la formación de calizas, areniscas, lutitas y conglomerados metamorfizados. La distancia de la fuente al primer geófono horizontal y la distancia entre estos fue de 1.50 m. El tiro a la derecha y a la izquierda se realizó en la dirección NS (dos tiros a la derecha y dos a la izquierda siendo estos solamente tiros de ida).

Refracción sísmica N°2: Se ubica entre las formaciones de calizas, areniscas, lutitas y conglomerados metamorfizados y los depósitos clásticos continentales. En este caso sólo se generó ondas P (se usó geófonos verticales, la forma de generar estas ondas se describen en el capítulo II), los valores de estas velocidades serán tomados para determinar una velocidad de onda de corte promedio según la siguiente relación.

$$V_p = \sqrt{3} * V_s$$

La distancia de la fuente al primer geófono y la distancia entre estos fue de 1.50 m, se realizó dos tiros, el tiro de ida en dirección NS y el de regreso en dirección EW.

Refracción sísmica N°3: Se ubica en los depósitos clásticos continentales. La distancia de la fuente al primer geófono horizontal y la distancia entre estos fue de 3.0 m. El tiro a la derecha y a la izquierda se realizó en la dirección NS (sólo tiro de ida).

Refracción sísmica N°4: Ubicado en los depósitos aluviales. La distancia de la fuente al primer geófono horizontal y la distancia entre estos fue de 1.50 m. El tiro a la derecha y a la izquierda se realizó en la dirección NS (sólo tiro de ida).

6.3.3.2 Vibración ambiental

Se usó 38 mediciones de vibración ambiental realizados por Lermo et al. 1994, la ubicación espacial de estos puntos de medición se presentan en la figura 6.15. 21 puntos fueron también estaciones temporales donde se registró temblores leves (CRUZ, FMED, VHO, IXC, ITO, UBJ, NORIA, NOTX, MAZA1, MAZA2, SED, PCO, YALE, MILI, JAL, BETO, ROSO, ROSH, IND, TEQUIO E IVO)

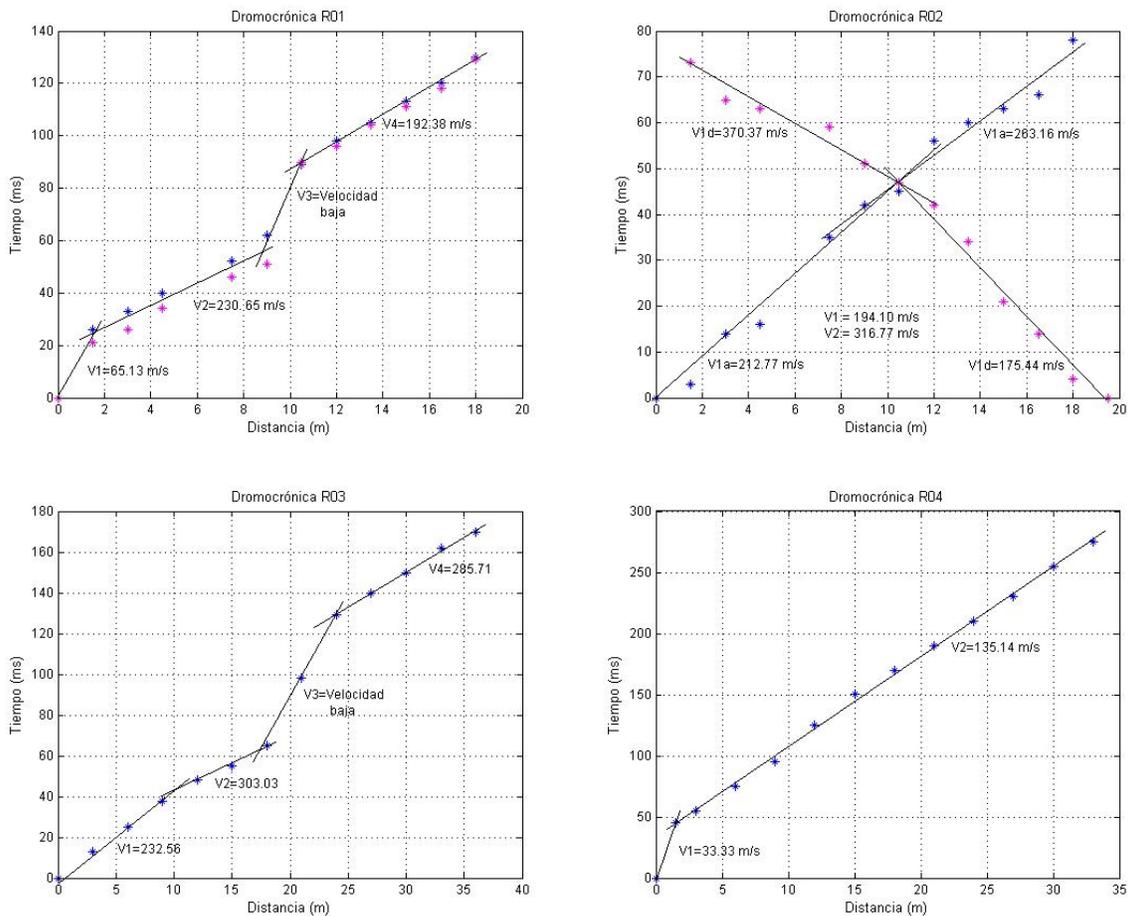


Figura 6.14. Velocidades aparentes para la refracción 04

Para procesar estos datos se utilizaron la técnica de Nakamura, al igual que en los otros casos. En el anexo B se presenta las FTE obtenidas en las 38 mediciones.

6.3.3.3 Registro de temblores

Se usó los registros de sismo de la red temporal de sismógrafos la cual fue monitoreada por Lermo et. al., 1991, esta red registró 32 eventos débiles (magnitud de coda entre 2.3 y 5.2), la estación de referencia fue VHO. Las FTE de estos registros se muestran en el anexo B.

Asimismo, se utilizó los registros de sismos de la red acelerográfica permanente de Oaxaca monitoreada por el Instituto de Ingeniería de la UNAM, la estación de referencia en esta red es OXLC (se ubica en un lugar conocido como la ciudad de las canteras). Los registros sísmicos se muestran en el anexo B, donde también se muestra la magnitud de cada uno (tabla N°1) y las FTE para cada estación. La figura 6.15 muestra la ubicación de estas redes.

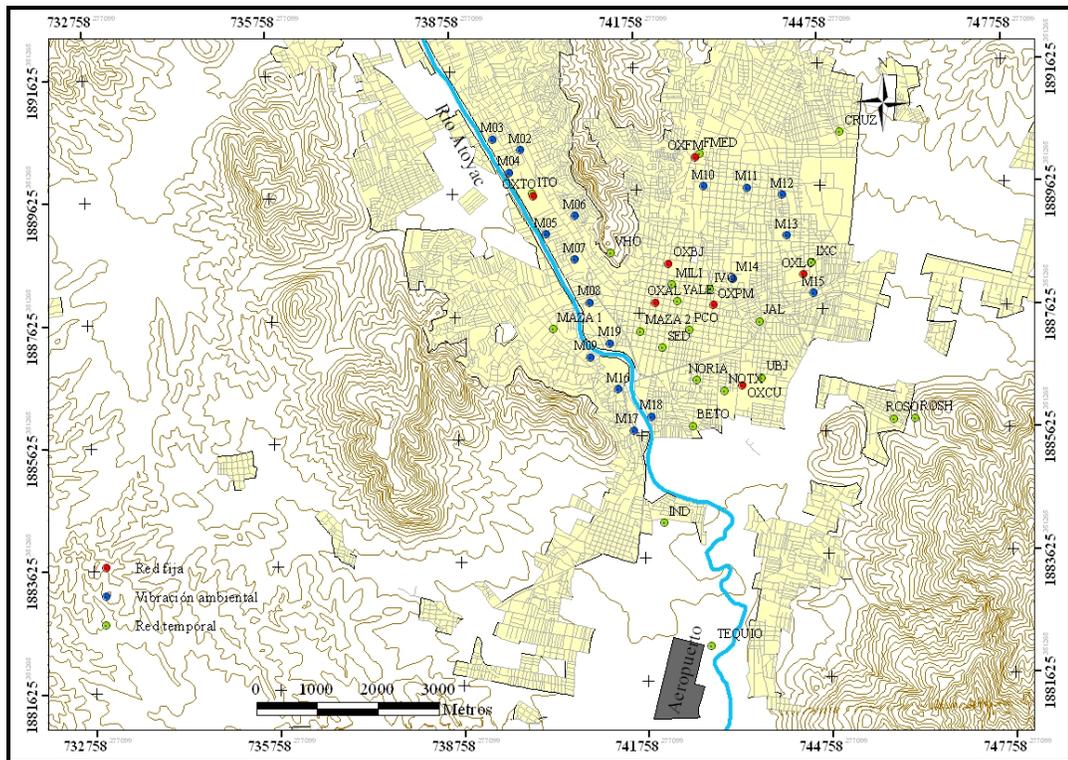


Figura 6.15 Ubicación de los puntos de vibración ambiental y puntos de estaciones de la red permanente (IIGEN) y temporal (Lermo et. al., 1991).

Obtenidas las FTE y datos geológicos, geotécnicos y geofísicos, se procede a obtener las FTEP, las familias espectrales, la microzonación y la FTT tal como se describió en el capítulo anterior.

6.3.4 Obtención de familias espectrales según las formas espectrales de las FTEP y microzonación.

Las FTE calculadas para cada punto de medición fueron promediadas (promedio geométrico) para obtener la FTEP de un punto, al agrupar estas funciones se obtuvo seis familias espectrales (que muestran el efecto de sitio, amplificación y frecuencia dominante), las cuales son mostradas más adelante. La figura 6.16 muestra la delimitación espacial de estas familias (microzonación).

6.3.5 Cálculo de las FTT y modelos estratigráficos

La delimitación de las familias espectrales (zonas) es identificada con la geología y geotecnia para determinar el modelo estratigráfico representativo y calcular la FTT. En lo que sigue, se describe estas zonas en forma decreciente del efecto de sitio y se presentan las familias espectrales y las FTT.

6.3.5.1 Zona VI

Esta zona comprende los depósitos de aluviales provenientes de los aluviones del río Atoyac, es importante recalcar que el espesor de este depósito se encuentra alrededor de 30 m (León, 1976).

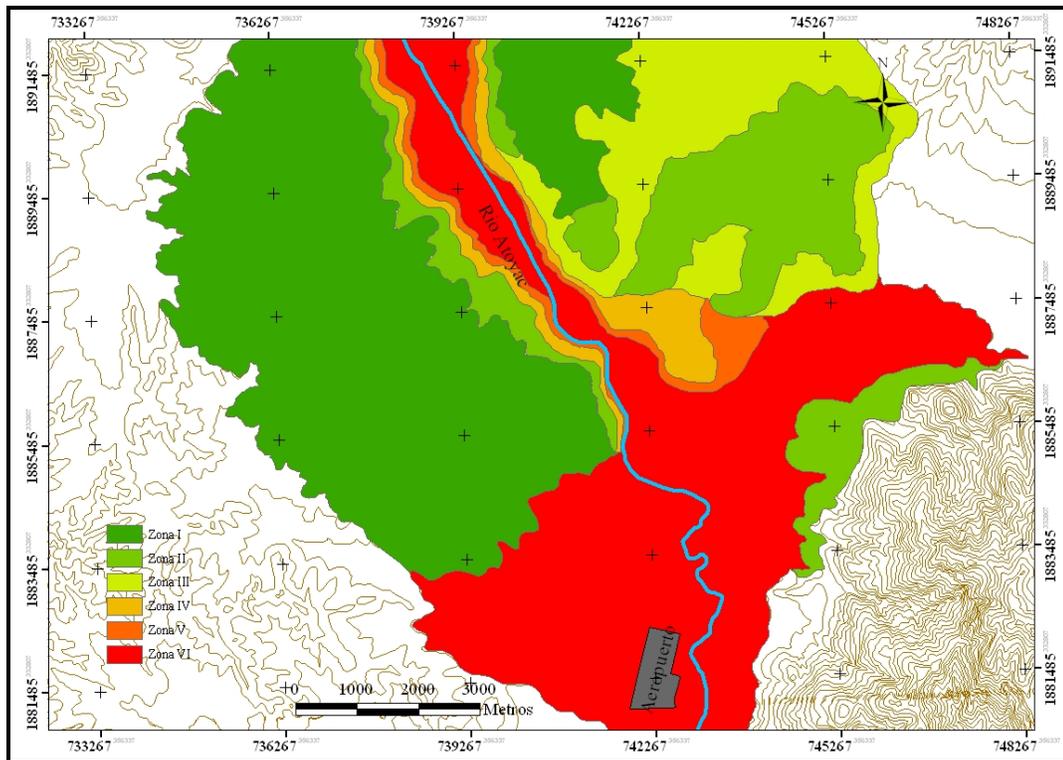


Figura 6.16. Zonación de la ciudad de Oaxaca, a partir de familias espectrales.

Para determinar el modelo estratigráfico se fijará los espesores de los estratos, con el cambio de resistencia de los estratos (evaluados por el número de golpes de la prueba de penetración estándar, SPT), para ello se evaluará los perfiles S-1, S-8 y S-9 por encontrarse dentro de la zona.

La resistencia promedio que se plantea en función de estos se presenta a continuación (ver tabla 6.20).

Tabla 6.20. Resistencia promedio de los estratos

Profundidad aproximada (m)	Resistencia promedio	Número de golpes (N)
0.00 - 5.00	baja	$5 < N < 20$
5.00 - 10.50	media	$20 < N < 35$
10.50 - 14.50	baja	$5 < N < 20$
14.50 - 21.00	media	$20 < N < 35$
21.00 - 31.5	alta	$N > 50$

Se debe tener en cuenta que por el origen aluvial de este depósito existen estratos intercalados de limos, arcillas y materias orgánicas tal como lo muestra los tres perfiles mencionados.

Los valores de amortiguamiento fueron asumidos bajo las mismas consideraciones expuestas en el estudio de la ciudades anterior, en cuanto a la densidad de cada estrato, fueron asumidas con base en los valores presentados por León, 1976. (Tabla de propiedades índice de la ciudad de Oaxaca). Los valores de onda de corte se asumieron en función de las velocidades aparentes calculados con la refracción sísmica R04, estos valores fueron probados con el método de prueba y error al calcular la FTT. La tabla 6.21 muestra los valores de cada uno de estos parámetros así como el modelo estratigráfico representativo de esta zona para obtener la FTT (la cual se presenta en la figura 6.17)

Tabla 6.21 Modelo estratigráfico para la zona VI

Nº	H	ρ	β	ξ
	(m)	(t/m ³)	(m/s)	(1)
1	5.0	1.4	135.0	0.04
2	5.5	1.5	200.0	0.04
3	4.0	1.4	120.0	0.04
4	6.5	1.4	180.0	0.04
5	9.5	1.6	320.0	0.04
base	-	2.5	2200.0	0.01

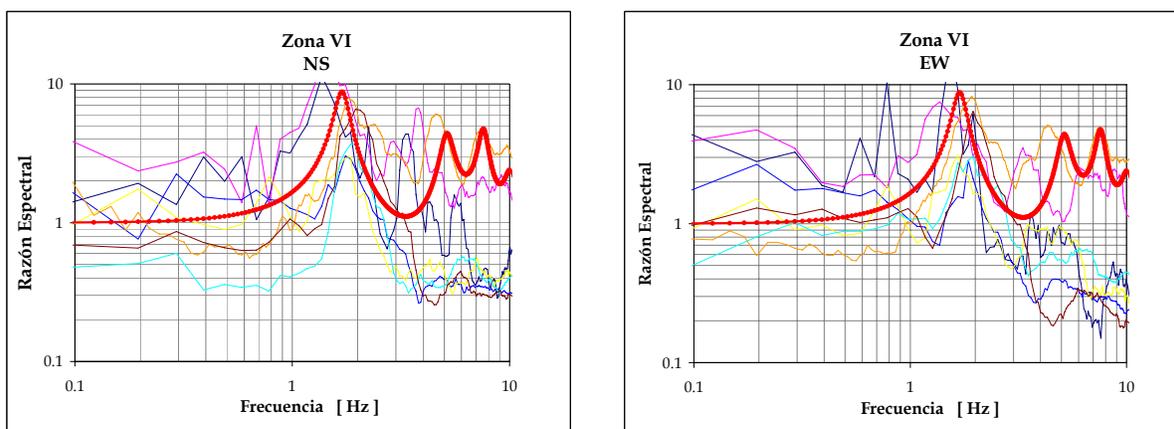


Figura 6.17. FTE, líneas delgadas; FTT, Líneas rojas.

6.3.5.2 Zona V

Se ubica en parte de los depósitos aluviales, en las inmediaciones del río Atoyac, a diferencia de la zona anterior, esta zona no abarca el área baja de estos depósitos. En cuanto a su resistencia, expondremos la resistencia promedio asumida, ya que el único perfil ubicado en esta zona es el S-11.

Tabla 6.22. Resistencia promedio de los estratos

Profundidad aproximada (m)	Resistencia promedio	Número de golpes (N)
0.00 - 10.00	media	5<N<20
10.00 - 12.00	media	5<N<20
12.00 - 16.00	media	5<N<20
16.00 - 32.00	alta	N>40

De 0.00 m a 10.00 m de profundidad el perfil S-11 reporta estratos intercalados de arcilla, limo y materia orgánica, aun cuando este perfil no reporta el número de golpes, se considera que la resistencia es media.

Los amortiguamientos fueron asumidos bajo la misma condición de la zona anterior, los valores de onda de corte también fueron asumidos tomando como referencia los resultados de las refracciones R04 y R02, estos valores fueron luego probados al determinar un modelo estratigráfico de la zona con el método prueba y error, los valores de densidad de los estratos

fueron también asumidos en función de los datos reportados por León, 1976. Estos parámetros son mostrados en la tabla 6.23 y la figura 6.18 presenta la FTT obtenida con este modelo.

Tabla 6.23. Modelo estratigráfico representativo de la zona V.

Nº	H	ρ	β	ξ
	(m)	(t/m ³)	(m/s)	(1)
1	4.5	1.5	200.0	0.04
2	5.5	1.5	250.0	0.04
3	2.0	1.4	150.0	0.04
4	4.0	1.5	280.0	0.04
5	16.0	1.6	320.0	0.04
base	-	2.0	2200.0	0.01

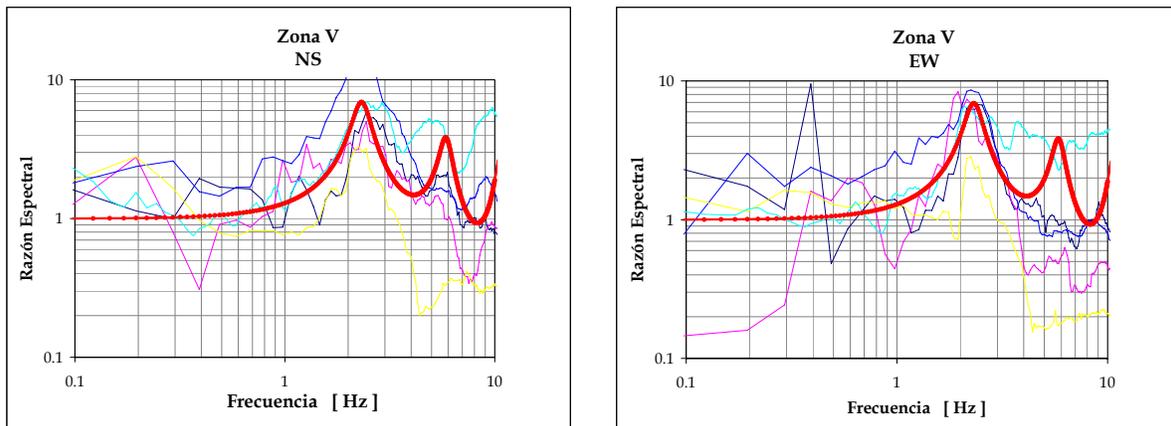


Figura 6.18. FTE, líneas delgadas; FTT, Líneas rojas.

6.3.5.3 Zona IV

Abarca un área contigua a la zona anterior en la cual se depositan materiales aluviales, sobre todo a lo largo del río Atoyac y materiales que pertenecen a las Tobas Andesíticas (en el área baja de la ciudad cerca de los depósitos fluviales), esta zona puede ser considerada una zona de transición entre los depósitos aluviales y la roca metamórfica de la margen derecha del río Atoyac.

En el límite de esta zona con la zona III se encuentra un perfil estratigráfico (S-7), en función de este perfil y del perfil S-11 (perfil más cercano a la zona) se puede definir la siguiente resistencia promedio de acuerdo a los espesores (también promedio).

Tabla 6.24. Resistencia promedio de los estratos

Profundidad aproximada (m)	Resistencia promedio	Número de golpes (N)
0.00 - 3.00	baja	5<N<20
3.00 - 9.00	alta	20<N<40
9.00 - 11.00	baja	5<N<20
11.00 - 15.00	alta	N>50

Al igual que en los casos anteriores en esta zona predominan las estratificaciones de arenas y limos.

Los valores de velocidad de onda de corte fueron asumidos con base en los resultados de la refracción R02, sin embargo fueron probadas por método de prueba y error al igual que en los casos anteriores el resultado final de este método se presenta en la tabla 6.25, la cual muestra también los parámetros para determinar el modelo estratigráfico representativo de la zona. Asimismo, en la figura 6.19 se presenta la FTEP para las dos componentes.

Tabla 6.25 Modelo estratigráfico representativo de la zona IV.

Nº	H	ρ	β	ξ
	(m)	(t/m ³)	(m/s)	(1)
1	3.0	1.5	150.0	0.04
2	6.0	1.6	300.0	0.04
3	2.0	1.4	100.0	0.04
4	4.0	1.6	350.0	0.04
base	-	2.5	2200.0	0.01

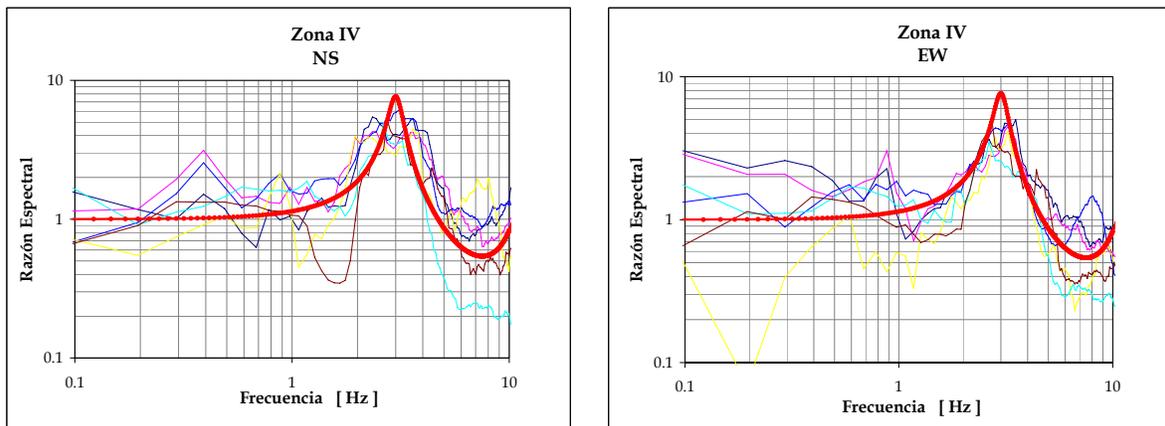


Figura 6.19 FTEP, líneas delgadas; FTT, Líneas rojas.

6.3.5.4 Zona III

Esta zona se encuentra ubicada en parte de la margen izquierda del río Atoyac, abarcando los depósitos de abanico aluvial (partes bajas del cerro del Fortín) y en dirección sur-este abarca el área formada por los depósitos clásticos continentales terciarios y los depósitos de arenas y lutitas.

Los perfiles que se ubican en esta zona son: S-2 S-3, S-4, S-5, S-7 y S-10, la resistencia promedio en función de estos perfiles se menciona a continuación en la tabla 6.26.

Tabla 6.26. Resistencia promedio de los estratos

Profundidad aproximada (m)	Resistencia promedio	Número de golpes (N)
0.00 - 8.00	media	10 < N < 30

8.00 - 11.00	alta	30<N<50
11.00 - 18.00	alta	5<N<20
11.00 - 15.00	alta	N>50

El modelo estratigráfico representativo de esta zona se presenta en la tabla 6.27, los parámetros de este modelo son propuestos bajo las mismas condiciones tomadas en las zonas anteriores.

Tabla 6.27 Modelo estratigráfico representativo de la zona III.

Nº	H	ρ	β	ξ
	(m)	(t/m ³)	(m/s)	(1)
1	8	1.5	280.0	0.04
2	3	1.6	340.0	0.04
3	7	1.4	310.0	0.04
base	-	2	2200.0	0.01

La figura 6.20 muestra la FTE en las dos componentes.

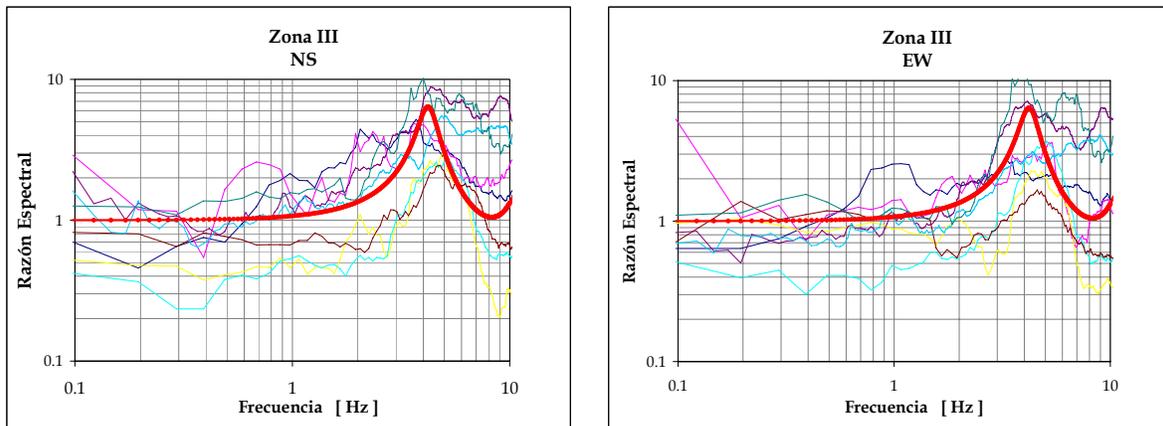


Figura 6.20. FTE, líneas delgadas; FTT, Líneas rojas.

6.3.5.5 Zona II

Abarca los depósitos de Tobas andesíticas, conocido por su explotación de piedra para cantera, de calizas, areniscas y conglomerados metamorizados, alrededor del cauce del río Atoyac se puede considerar como una zona de transición entre los depósitos aluviales y las rocas metamórficas.

En los límites de esta zona con la zona III se encuentran los S-2 y S-5, a partir de estos se puede presentar la resistencia promedio según las profundidades tal como sigue:

Tabla 6.28. Resistencia promedio de los estratos

Profundidad aproximada (m)	Resistencia promedio	Número de golpes (N)
0.00 - 3.00	media	10<N<25
3.00 - 5.00	media*	10<N<25
5.00 - 6.00	baja	5<N<20
6.00 - 8.00	alta	N>50

*con valores de N que pueden llegar a 40.

Los parámetros de densidad, amortiguamiento fueron asumidos con las condiciones mencionadas en las zonas anteriores, con base en la refracción R03 se propone las velocidades de onda de corte tal como se muestra en la tabla 6.29. La figura 6.21 muestra las FTT obtenida en función de este modelo estratigráfico.

Tabla 6.29. Modelo estratigráfico representativo de la zona II.

Nº	H (m)	ρ (t/m ³)	β (m/s)	ξ (1)
1	6.0	1.5	250.0	0.04
2	4.0	1.6	350.0	0.04
3	3.0	1.7	450.0	0.04
base	-	2.0	2200.0	0.01

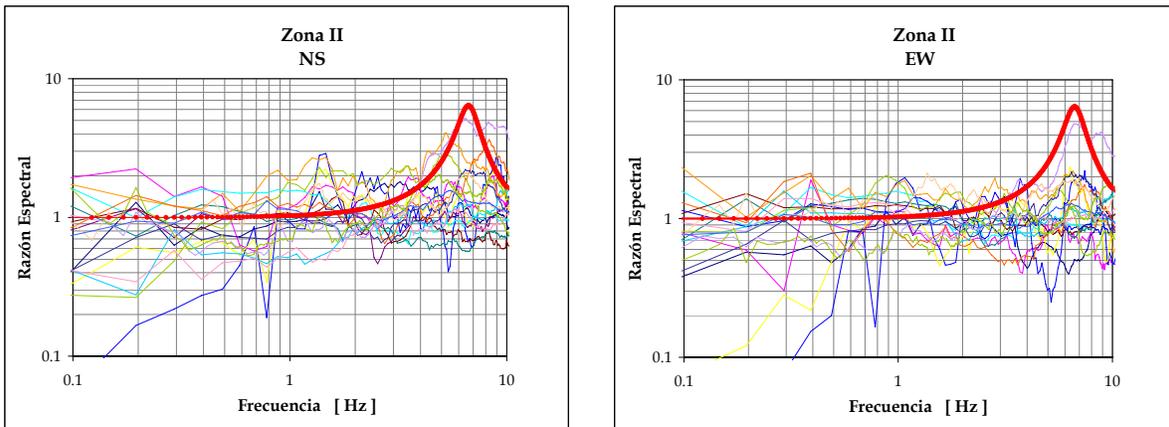


Figura 6.21. FTE, líneas delgadas; FTT, Líneas rojas.

6.3.5.6 Zona I

Ubicada donde se encuentran las Rocas Metamórficas, el desarrollo urbano es nulo en esta zona no se tienen registros sísmicos ni de microtremores, sin embargo por la geología inferimos que el efecto de sitio debe ser menor que el de la zona II. En esta zonas se localiza la estación VHO la cual fue usada por Lermo et al. 1991 como estación de referencia, la figura 6.22 muestra su FTE obtenida con el método de Nakamura.

Como se observa en la figura esta estación de referencia presenta efecto de sitio en 5.5 Hz aproximadamente, este efecto se debe al efecto topográfico (en donde existe amplificación en la parte convexa de los cerros y reamplificación en las partes cóncavas), ya que esta estación se encuentra ubicada en el Cerro del Fortín. Lermo et. al., 1993 calcularon la función de transferencia en 2D (para lo cual trazaron un perfil aproximado a través de la estación VHO en dirección EW) usando incidencia vertical de ondas SV y encontraron una buena correlación en la frecuencias predominante para las componentes horizontales.

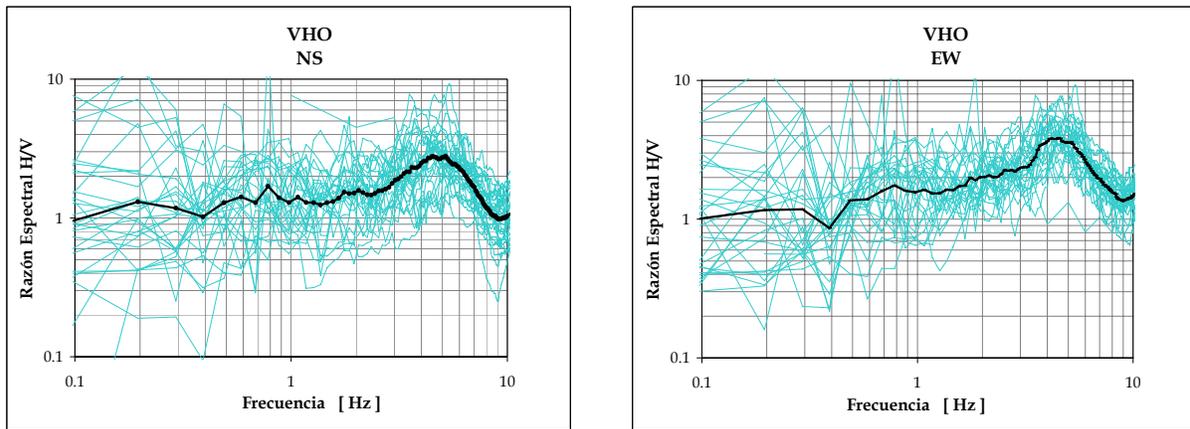


Figura 6.22. FTE, líneas delgadas; FTEP, Línea negra gruesa

Con el fin de resumir el efecto de sitio de estas zonas se presenta la tabla 6.30.

Tabla 6.30. *Periodo dominante y amplificación de los terrenos de Oaxaca*

Zonas	T (s)	F (Hz)	Amplificación Relativa
II	0.1-0.17	6.0-10.0	7.0
III	0.20-0.25	4.0-5.0	7.0
IV	0.33-0.40	2.5-3.0	7.0
V	0.40-0.50	2.0-2.5	8.0
VI	0.50-0.67	1.5-2.0	9.0

6.3.6 Clasificación de terrenos

6.3.6.1 Clasificación con la IBC-2000

De acuerdo a la profundidad de los modelos estratigráficos de las zonas se encontró dos condiciones: la zona II, III y IV, no llegan a los 30 m y las zonas V y VI, llegan a más de 30 m. Para estas dos condiciones se aplicará los tres casos mencionados en el capítulo V.

Caso 1: Se calcula el V_{sd} (velocidad de onda de corte hasta la profundidad que alcanzó el modelo estratigráfico).

Tabla 6.31 *clasificación con la IBC-2000 usando V_{sd}*

Zonas	V_{sd} (m/s)	Tipo de suelo	Descripción
II, V_{S13}	301.158	D	Suelo Rígido
III, V_{S18}	300.122	D	Suelo rígido
IV, V_{S15}	210.000	D	Suelo rígido
V, V_{S32}	262.040	D	Suelo rígido
VI, $V_{S30.5}$	186.350	D	Suelo blando

Caso 2: En las zonas II, III y IV, se asumió la velocidad de onda de corte de la capa firme para el cálculo del V_{S30} y en las zonas V y VI, sólo se restringió la profundidad hasta 30 m.

La tabla La tabla 6.32 muestra los valores del V_{S30} , así como la clasificación obtenida con este sistema.

Tabla 6.32 V_{S30} y clasificación con la IBC-2000

Zonas	V_{S30} (m/s)	Tipo de suelo	Descripción
II	589.961	C	Roca
III	458.504	C	Suelo muy denso
IV	383.402	C	Suelo rígido
V	258.913	D	Suelo rígido
VI	185.064	D	Suelo blando

Caso 3: Este caso sólo se puede aplicar a las zonas II, III y IV, sin embargo no se aplicó a la zona II, pues llega a menos de 10.0 m, el resultado se presenta en la tabla 6.33.

Tabla 6.33 V_{S30} y clasificación de terrenos con el método de Boore, 2004

Zonas	a	b	V_{Sa}	V_{S30}	Tipo de suelo
III	0.024879	1.0744	300.122	485.834	C
IV	0.013795	1.0263	210.00	249.510	D

6.3.6.2 Clasificación con el Manual de Obras Civiles de la CFE-1993

Oaxaca se ubica en la zona sísmica C de la carta de zonificación sísmica de la República Mexicana de la CFE-1993, los valores de velocidad de ondas de corte y periodo dominante característicos de esta zona sísmica se presentan en la tabla 6.34, así como las velocidades y periodos efectivos, y la clasificación de terrenos para cada zona.

Tabla 6.34. Clasificación de los terrenos de la ciudad de Oaxaca según el manual de la CFE-1993.

Zonas	B_c	T_c	B_s	T_s	$B_c * T_c$	$B_c * T_s + B_s * T_c$	Tipo de suelos
II	500.00	4.70	301.16	0.12	2350.00	1501.78	Tipo III
III	500.00	4.70	300.12	0.24	2350.00	1530.52	Tipo III
IV	500.00	4.70	210.00	0.29	2350.00	1129.86	Tipo III
V	500.00	4.70	262.04	0.49	2350.00	1475.82	Tipo III
VI	500.00	4.70	186.35	0.65	2350.00	1203.19	Tipo III

Si aplicamos este reglamento, pero calculamos el periodo específico de cada zona con la especificación de las NTC para diseño sísmico del D.F.-2004 tenemos el resultado que se muestra en la tabla 6.35.

Tabla 6.35. Clasificación según la CFE-1993, calculando el T_s como especifica la norma del D.F.-2004.

Zonas	B_c (m/s)	T_c	B_s	T_s	$B_c * T_c$	$B_c * T_s + B_s * T_c$	Tipo de suelos
II	500.00	4.70	370.211	0.15	2350.00	1675.42	Tipo III

Zonas	B _C (m/s)	T _C	B _S	T _S	B _C *T _C	B _C *T _S +B _S *T _C	Tipo de suelos
III	500.00	4.70	303.81	0.24	2350.00	1546.40	Tipo III
IV	500.00	4.70	183.96	0.33	2350.00	1027.67	Tipo III
V	500.00	4.70	301.06	0.43	2350.00	1627.56	Tipo III
VI	500.00	4.70	208.56	0.58	2350.00	1272.72	Tipo III

6.3.6.3 Clasificación con la norma técnica complementaria para diseño por sismo del reglamento de construcciones del estado de Oaxaca

Este reglamento especifica que se determine la clasificación de terrenos con las mismas condiciones establecidas en la CFE-1993.

6.3.6.4 Clasificación con el sistema propuesto por Rogriguez-Bray et. al.,2001

La tabla 6.36 muestra los parámetros necesarios para este sistema de clasificación, así como el resultado de la clasificación para la ciudad de Oaxaca.

Tabla 6.36. Clasificación de terrenos de Oaxaca según Rodriguez- Bray et. al., 2001

ZONA	T (s)	F (Hz)	Tipo de Suelo	Descripción	Comentarios
II	0.1-0.17	6.0-10.0	C-1	Roca intemperizada o blanda	Zona intemperizada (espesor de suelo >6.0 m y < 30 m, V _S > 360 m/s)
III	0.20-0.25	4.0-5.0	C-1	Roca intemperizada o blanda	Zona intemperizada (espesor de suelo >6.0 m y < 30 m, V _S > 360 m/s)
IV	0.33-0.40	2.5-3.0	C-1	Roca intemperizada o blanda	Zona intemperizada (espesor de suelo >6.0 m y < 30 m, V _S > 360 m/s)
V	0.40-0.50	2.0-2.5	C-2	Suelos rígidos superficial	Depósito de suelo > 6 m y < 30 m.
VI	0.50-0.67	1.5-2.0	C-3	Suelos rígidos de profundidad intermedia	Suelos con profundidad 30 m y < 60 m

6.3.6.5 Comparación de los sistemas de clasificación

Con el fin de comparar estos sistemas de clasificación se presenta la tabla 6.37.

Tabla 6.37. Comparación de los sistemas de clasificación usados.

Zonas	CFE	CFE y T _S (NTC-DF)	IBC y V _{S30}	IBC y V _{sd}	IBC y Boore	Rodriguez-Bray. 2001
II	III	III	C	D	C	C-1
III	III	III	C	D	C	C-1
IV	III	III	C	D	D	C-1
V	III	III	D	D	D	C-2

Zonas	CFE	CFE y T_s (NTC-DF)	IBC y V_{S30}	IBC y V_{Sa}	IBC y Boore	Rodriguez- Bray. 2001
VI	III	III	D	D	D	C-3

Mientras los reglamentos de construcción nacionales clasifican los terrenos de la ciudad de Oaxaca en un solo tipo de suelo, las internacionales las clasifican en dos o tres tipos (clasificación más detallada).

6.3.7 Comentarios

La alta sismicidad de la ciudad de Oaxaca, el desarrollo urbano, así como la no existencia de un reglamento de construcción específico para esta ciudad hacen interesante su estudio.

La zonación con el uso de familias espectrales obtenidas de registros sísmicos microtremores dividió la ciudad en seis zonas, de las cuales, algunas pertenecen al mismo depósito geológico, este hecho comprueba una vez más que el conocimiento de esta materia es importante pero que el comportamiento dinámico no depende de ella.

En la zona I (situada en el área de las rocas metamórficas) no existe desarrollo urbano, sin embargo se considero como una zona porque en esta zona se encuentra el área arqueológica de Monte Albán.

La zona II, parte de esta zona abarca el área de las tobas andesíticas, de donde se explora piedra de cantera, las amplificaciones de esta zona están alrededor de 5, pero a frecuencias altas (6 Hz a 7 Hz), la parte situada al pie de las rocas metamórficas, sin embargo es un área susceptible de sufrir desplomes y fuertes deformaciones frente a un sismo severo debido a que el material se encuentra en pendientes mayores a 15° (reportado por Lermo et. al., 1991).

La zona III abarca el área de las lutitas y areniscas del terciario, esta zona esta caracterizada por una topografía plana, el factor de amplitud de esta zona se encuentra alrededor de 7 con frecuencia entre 4 Hz y 5 Hz.

La zona IV y V, se localizan en el cauce del Río de Atoyac, la zona V (más cerca del eje del río) presenta mayor frecuencia que la zona IV esto se debería a la distribución de sedimentos, lo cuales tienen mayor espesor conforme nos acercamos al eje del río.

La zona VI esta delimitada por la zona V y se extiende hasta el valle de Río Atoyac y el Salado, la amplificación de esta zona se encuentra alrededor de 10 con frecuencias entre 1.5 Hz y 2.0 Hz. Esta zona es conocida como un área de inundación con espesores aproximados a 30 m.

Las FTT calculadas para cada zona con el modelo unidimensional de Haskell son validas ya que las familias espectrales tienen la misma forma en las dos componentes.

Al igual que en la ciudad anterior los periodos obtenidos con microtremores son similares a los obtenidos con la formula establecida en las NTC para sismo del DF-2004.

6.4 CIUDAD DE ACAPULCO

De acuerdo con los datos estadísticos e históricos, la ciudad de Acapulco es un área de gran actividad sísmica por ubicarse en la zona de subducción más activa del país, este hecho hace relevante la importancia de considerar el diseño sísmico en estructuras y dentro de este, el efecto de sitio. Por otra parte, se debe de tomar en cuenta que la ciudad de Acapulco es una zona muy turística y los daños estructurales debido a un sismo afectarían grandemente esta condición y como consecuencia, la economía se vería también afectada. Este hecho fue reconocido por el gobierno federal del estado de Guerrero en 1988 cuando financió un proyecto para elaborar las Normas Técnicas Complementarias para diseño sísmico, esta norma dividió el terreno en tres tipos (terreno firme, de baja rigidez y blandos), actualmente esta norma todavía se encuentra en vigencia.

Como antecedentes de clasificación de los terrenos de la ciudad de Acapulco se conoce el trabajo de Flamand et. al., 1972, quienes propusieron clasificar esta ciudad en dos tipos de terreno: zona de Depresión Granítica (roca sana, roca alterada y depósitos aluviales que se dividen en 4 áreas) y la zona de Barra litoral; el estudio realizado por León, 1976, quien realizó un trabajo complementario al de Flamand et. al. y propuso tres tipos de zonas: zona I, compuesta por roca zona, zona II, caracterizada por depósitos aluviales y zona III, formada por depósitos de barra y la clasificación propuesta por Ovando, et al. 1989, quien propuso la división de la ciudad en tres tipos de suelo: tipo I (terrenos duros o muy firmes), tipo II (formado por los aluviones de la bahía de Acapulco y Puerto Marquez) y tipo III (constituida por los depósitos de barra).

En lo que sigue se describe los aspectos geológicos, geotécnicos y geofísicos que tomamos en cuenta para clasificar el terreno de acuerdo con las normas de CFE-1993, IBC-2000 y con la clasificación que propone Rodríguez-Bray et. al. 2001.

6.4.1 Geología

Según León, 1976, Flamand et al., 1972 y Lazares 2000, los depósitos geológicos que se encuentran en Acapulco son:

6.4.1.1 Rocas metamórficas

Son las rocas más antiguas que afloran y corresponde a la serie de Xolapa y están formadas por una secuencia potente de rocas metasedimentarias de intensidad metamórfica variable. El terreno que cubre en parte estas rocas, se caracteriza por una desecación muy avanzada y por la presencia de una cubierta de arbustos y de suelo de espesores variables.

6.4.1.2 Rocas intrusivas

Compuestas de rocas graníticas del Cretáceo, son de grano medio a grueso, de color claro. Este tronco granítico aflora en un área aproximada de 60 km² (el puerto de Acapulco se localiza sobre esta roca) y lo cubre pequeños remanentes de limolitas calcáreas y calizas, afectados por el metamorfismo de contacto. Rodeando a este tronco granítico se encuentra una ceja alta de serranías compuestas por ocas metamórficas de la serie Xolapa.

6.4.1.3 Depósitos sedimentarios

Son derivados de las rocas preexistentes, aunque predominan los suelos arenosos formados por la descomposición de los granitos, también están compuestos por peñascos, boleos, gravas, arenas gruesas y finas y algo de arcilla.

En las desembocaduras de los ríos y arroyos importantes existen depósitos de arcilla y turbas. Además de los sedimentos depositados por el viento y olas marinas que forman depósitos de barra compuestos de arena fina.

6.4.1.4 Depósitos recientes

Compuestos por suelos y aluviones que se encuentran en las partes protegidas de los valles principales, región costera y en la desembocadura de los ríos y arroyos pequeños que bajan de las partes altas. Estos depósitos, en algunas ocasiones se encuentran intercalados con material orgánico y turbas, como es el caso del valle del río de la Sabana.

En la figura 6.23 se muestra la geología superficial, así como los ejes de las secciones geológicas elaboradas por Flamand et. al., 1972, en el anexo C se muestran estas secciones.

6.4.2 Geotecnia

La información geotécnica fue tomada de las investigaciones mencionadas anteriormente, esta información consta de perfiles y cortes estratigráficos, en los perfiles se midió la resistencia del suelo al cortante con el número de golpes de la prueba de Penetración Estándar y se determinó el tipo de suelo de acuerdo a la clasificación SUCS. La mayoría de perfiles y ejes estratigráficos que se usaron fueron del trabajo de Flamand et. al., 1972. La tabla 6.38 muestra la fuente de información, perfiles estratigráficos y la numeración de los perfiles para este trabajo (los perfiles se muestran en el anexo).

Los ejes estratigráficos A-A hasta H-H fueron tomados del trabajo de Flamand en cambio los ejes J-J y K-K fueron elaborados por León et. al., 1976, esto ejes se muestran en el anexo (los cuales fueron elaboradas digitalizando la información encontrada en los trabajos mencionados). La ubicación de los perfiles y cortes estratigráficos se presentan en la figura 6.23.

Tabla 6.38 Relación de estudios geotécnicos

Fuente	Perfiles estratigráficos	Numeración usada
C. L. Flemand	S-68	S-1
Dr. Ovando	S-25	S-2
J. Lermo	S-1	S-3
J. Lermo	S-2	S-4
J. Lermo	S-3	S-5
Dr. Ovando	S-23	S-6
Dr. Ovando	S-104	S-7
C. L. Flemand	S-36	S-8
C. L. Flemand	S-41	S-9
C. L. Flemand	S-24	S-10

Fuente	Perfiles estratigráficos	Numeración usada
C. L. Flemand	S-23	S-11
C. L. Flemand	S-43	S-12
C. L. Flemand	S-21	S-13
TGC, L. F. Lazares	Est. Diana	S-14
J. Lermo	S-11	S-15

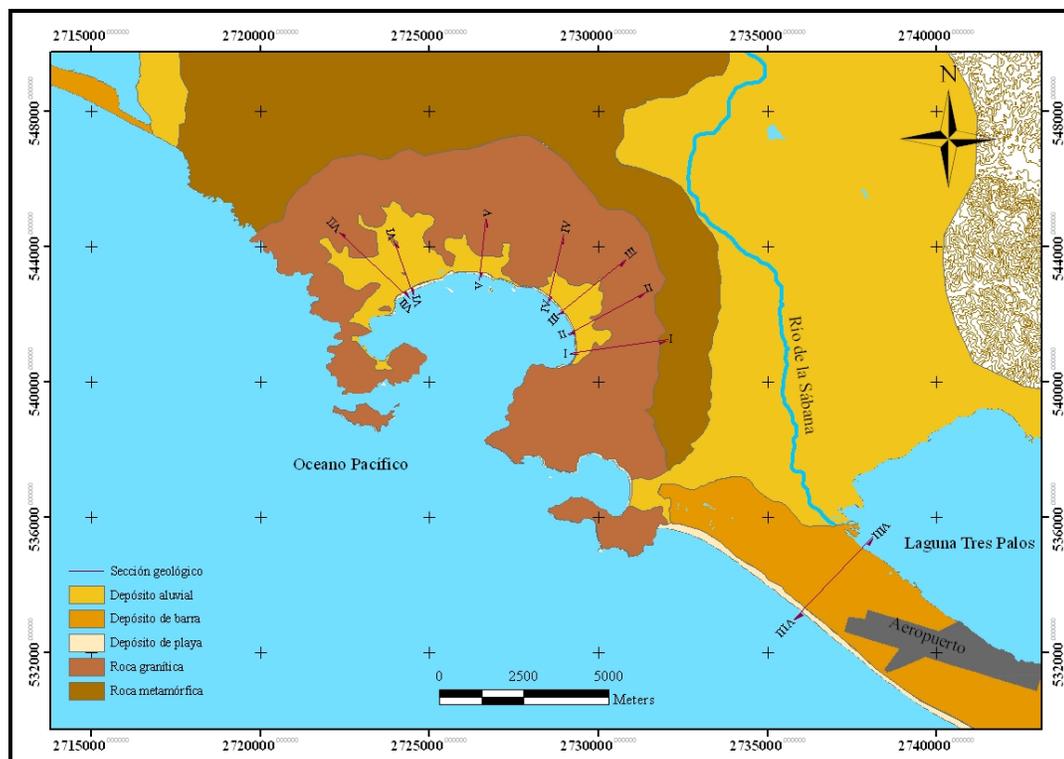


Figura 6.23 Geología de la ciudad de Acapulco y ejes geológicos (Flamand et al., 1972)

6.4.3 Datos geofísicos

6.4.3.1 Vibración ambiental

Se midió vibración ambiental en 15 puntos, en su mayoría ubicados en los depósitos de Barra, en la zona denominada Acapulco Diamante. La tabla 6.39 muestra las coordenadas de los puntos de medición.

Tabla 6.39 Medición de vibración ambiental.

Estudio	Coordenadas Geográficas	
	Latitud	Longitud
1	16.871	99.814
2	16.853	99.851
3	16.769	99.787
4	16.779	99.801

Estudio	Coordenadas Geográficas	
	Latitud	Longitud
5	16.793	99.825
6	16.791	99.819
7	16.766	99.785
8	16.861	99.893
9	16.873	99.868
10	16.791	99.815
11	16.846	99.846
12	16.734	99.746
13	16.770	99.773

La técnica que se usó para procesar estos registros y obtener la FTE fue Nakamura, en el anexo C se presentan estas funciones.

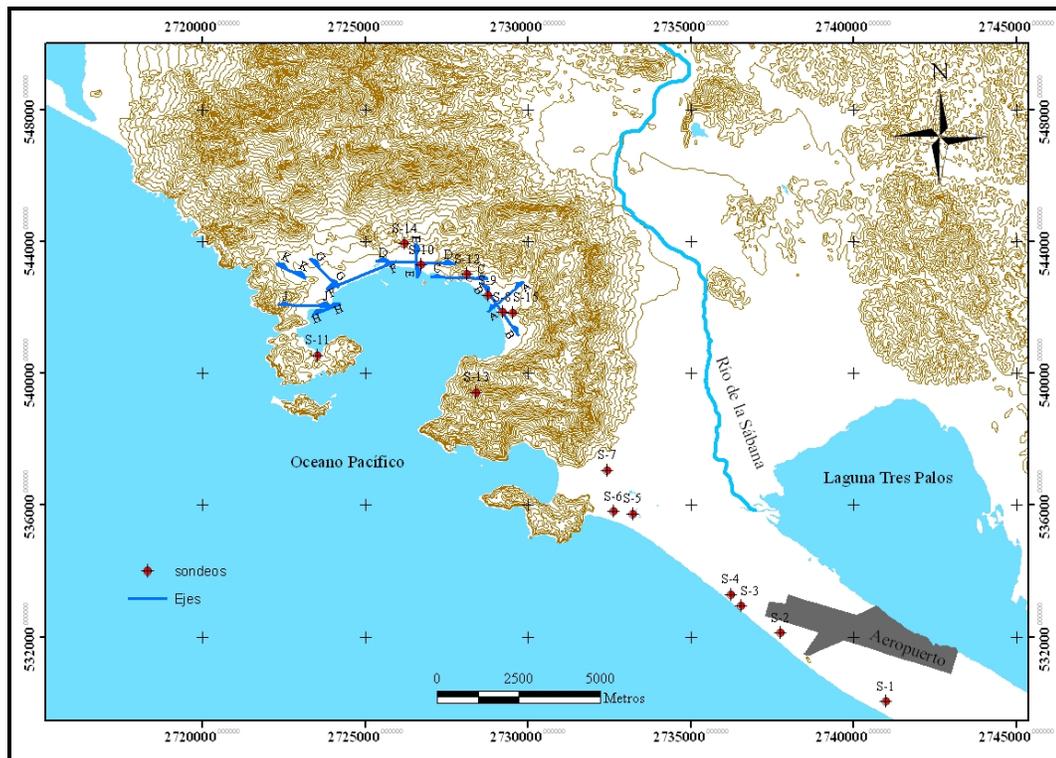


Figura 6.24. Mapa georeferenciado de la geología de Acapulco. Ubicación de sondeos y ejes geotécnicos (Flemand, 1972, León, 1976, Lazares, 2002).

6.4.3.2 Registro de temblores

Se analizó registros de temblores fuertes (magnitud $M_s > 5$) y débiles (magnitud $M_s \leq 5$) obtenidos de la red acelerográfica de la ciudad de Acapulco (la información se tomó de la base de datos de sismo fuertes de la República Mexicana de 1998), la tabla 1 del anexo C presenta los sismos que se utilizaron, así como también las estaciones de esta red acelerográfica.

También se utilizó el análisis de registros de temblores de la red sísmica temporal instalada durante seis meses en el año 2004 (Chávez et. al., 1994).

La ubicación espacial de las estaciones acelerográficas, sísmicas y los puntos de medición de vibración ambiental se muestran en la figura 6.25.

6.4.4 Obtención de familias espectrales según las formas espectrales de las FTEP y microzonación

Antes de calcular las FTEP se halló las FTE de la siguiente forma: Para calcular las FTE con vibración ambiental se utilizó la técnica HVNR, en el anexo C se presentan estas funciones juntamente con las FTEP.

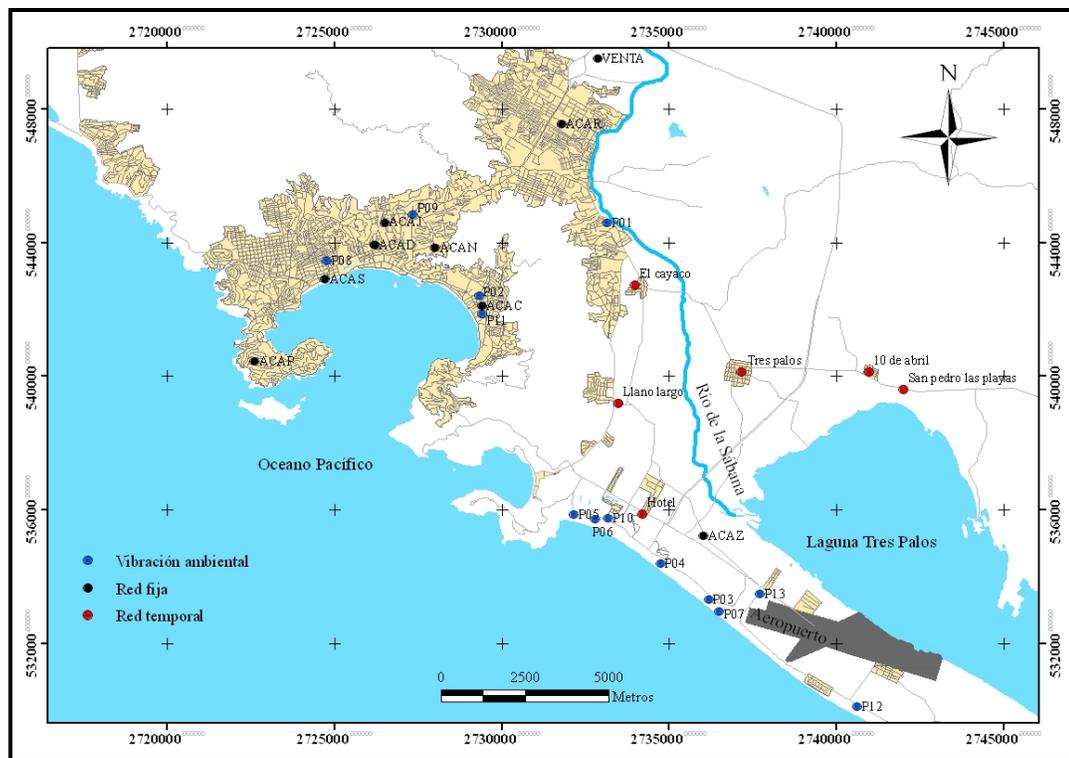


Figura 6.25. Ubicación de las redes acelerográficas y medición ambiental.

Las FTE y la FTEP de las estaciones que pertenecieron a la red acelerográfica temporal fueron digitalizadas del reporte: Estudio complementario de efectos de sitio en Acapulco, Guerrero, Chávez et al. 1994. Es importante señalar, que para obtener las FTE usaron la técnica estándar (SSR) escogiendo la estación de San Pedro de las Playas (SSP) como estación de referencia. En el anexo C se muestra las funciones para las seis estaciones.

Para obtener las FTE con los registros de las estaciones de la red fija de Acapulco, se utilizó la técnica SSR, pero antes de aplicar esta técnica se determinó la estación de referencia con las siguientes consideraciones.

Conocida la geología y la geotecnia se procedió a microzonificar por efecto de sitio el área de estudio agrupando las formas espectrales de las FTEP. El resultado de esta agrupación fue obtener seis zonas las cuales se muestran en la figura 6.26.

6.4.5 Cálculo de las FTT y modelos estratigráficos

Las zonas encontradas con las familias espectrales son identificadas con las características geológicas y geotécnicas para determinar un modelo estratigráfico representativo y calcular la FTT (la cual validará la zona encontrada). En lo que sigue, se describe estas zonas en forma decreciente del efecto de sitio y se presenta la FTT.

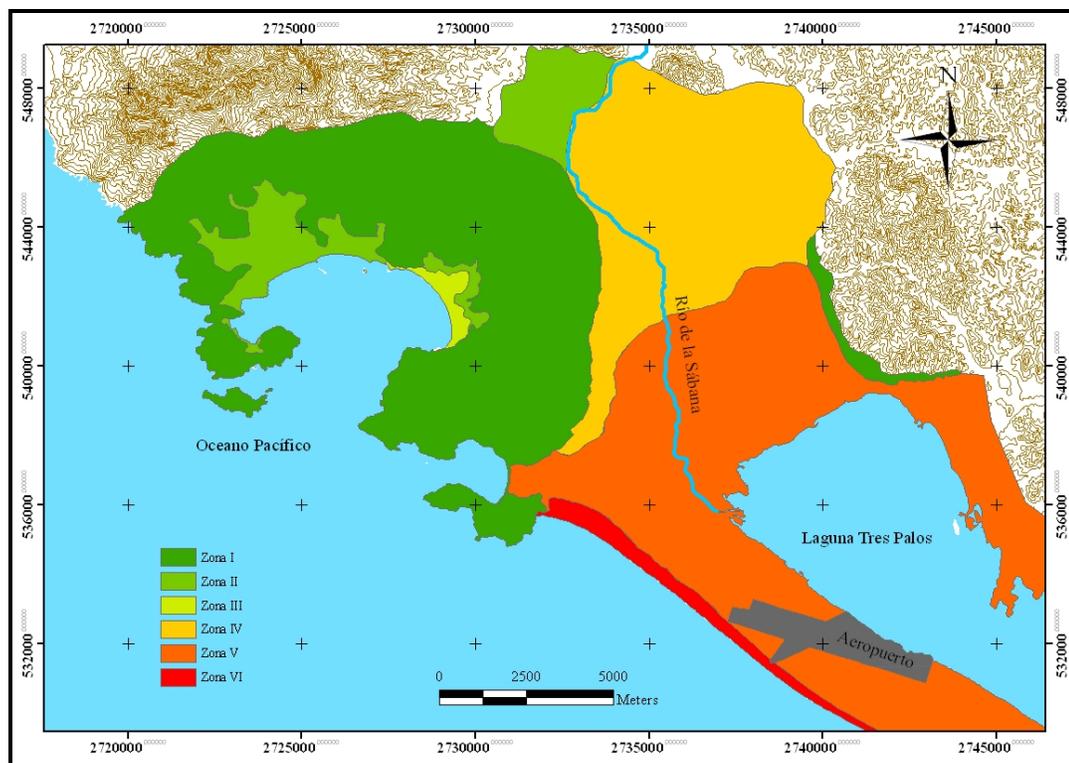


Figura 6.26. Microzonación por efecto de sitio de la ciudad de Acapulco.

6.4.5.1 Zona VI

Abarca los depósitos de playa y parte del depósito de barra, la topografía en esta zona es la más plana del área en estudio, lo cual talvez favoreció el desarrollo turístico de esta zona. Según Flamand, estos depósitos están compuestos de arena cuarzosa fina, café amarillento y en algunos lugares limosa, de color gris oscuro con presencia de gravas y gravillas, medianamente compactados a muy compactados, mal graduados y en ocasiones interestratificado con conchas. El contenido natural de agua varía de 10 a 25%. El nivel freático se encuentra entre 1.50 m a 4.50 m. Flamand et. al., 1972, reportaron que los sedimentos del depósito de tienen un espesor mayor a 45 m según la sección geológica representativa VIII-VIII'.

La resistencia del subsuelo, utilizando los sondeos S-2, S-3, S-4, S-5 y S-6, se describe a continuación:

Tabla 6.40. Resistencia promedio de los estratos

Profundidad aproximada (m)	Resistencia promedio	Número de golpes (N)
0.00 - 5.00	baja	5<N<10
5.00 - 12.00	alta	20<N<50
12.00 - 15.00	media	10<N<30
15.00 - 23.00	alta	N>40
23.00 - 40.00	media	10<N<30

Al igual que en la ZCV se asumió deformaciones inducidas para un sismo intenso, 0.04 % de amortiguamiento crítico para las capas de resistencia baja y media y 0.01% para la capa base.

La densidad fue asumida de la información de León et. al., 1976 (estudio N°54). Con estos datos se obtiene el modelo estratigráfico representativo de esta zona (ver tabla 6.41).

Tabla 6.41 Modelo estratigráfico representativo de la zona.

N°	H	ρ	β	ξ
	(m)	(t/m ³)	(m/s)	(l)
1	5	1.6	110.0	0.04
2	7	1.7	230.0	0.04
3	3	1.6	200.0	0.04
4	8	1.7	250.0	0.04
5	20	1.6	130.0	0.04
Base	-	2	2100.0	0.01

Los valores de velocidad de onda de corte fueron asumidos teniendo en cuenta la resistencia de los estratos y fueron comprobados con el método de prueba y error al calcular la FTT, en la figura 6.27 se presenta esta función como una curva envolvente de las FTEP lo cual valida los valores del modelo estratigráfico.

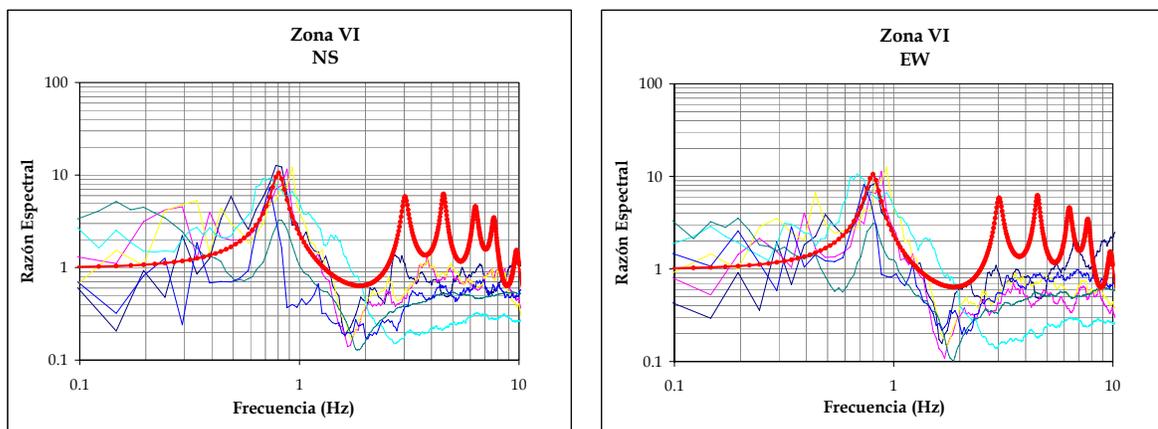


Figura 6.27. Líneas delgadas, FTEP; líneas gruesas rojas, FTT.

6.4.5.2 Zona V

Esta zona abarca la mayor parte de los depósitos de barra (la cual tiene 2 km de ancho), su topografía es plana y también ha sido considerada como un preferencial para el desarrollo urbano turístico. La sección geológica VIII-VIII representa estos depósitos, la primera parte de esta sección describe capas de arenas de diferente granulometrías, pero bastante homogéneas en los diferentes estratos con compacidad variable en sus formaciones naturales, la segunda parte, extendiéndose bajo la laguna, los estratos de los materiales son finos (arcillas y limos con alguna cantidad de materia orgánica) intercalados con arenas y capas de conchas. Es importante mencionar que los sedimentos encontrados tienen un espesor mayor a 45 (Flamand et. al., 1972).

Aunque no existe mucha información geotécnica en esta zona, describiremos su resistencia aproximada en función de los sondeos S-1, S-2 y de la sección geológica VIII-VIII en la tabla 6.42. El nivel freático de se encuentra entre 2:00 m a 5:00 m.

Tabla 6.42. Resistencia promedio de los estratos

Profundidad aproximada (m)	Resistencia promedio	Número de golpes (N)
0.00 - 3.00	baja	5<N<20
3.00 - 7.00	media	10<N<40
7.00 - 12.00	alta	N>50
12.00 - 16.00	media	10<N<40
16.00 - 23.00	alta	N>50
23.00 - 37.00	media	10<N<40

El amortiguamiento de cada uno los estratos definidos en el párrafo anterior fueron asumidos como en la zona VI. Los valores de densidad fueron también asumidos teniendo en cuenta la información de Flamand y León.

Teniendo los espesores, densidad, amortiguamiento y velocidad de onda de corte SH (estos valores de velocidad de onda de corte fueron asumidos y probados con el método de prueba y error al calcular la FTT valor asumido) se determinó el modelo estratigráfico presentado en la tabla 6.43. Asimismo en la figura 6.28 se presenta la FTT

Tabla 6.43 Modelo estratigráfico para la zona V.

N°	h	ρ	β	ξ_{β}
	[m]	[t/m ³]	[m/s]	[1]
1	3	1.5	100.0	0.04
2	4	1.6	110.0	0.04
3	5	1.7	230.0	0.04
4	4	1.6	200.0	0.04
5	7	1.7	250.0	0.04
6	14	1.6	130.0	0.04
base	-	2	2100.0	0.01

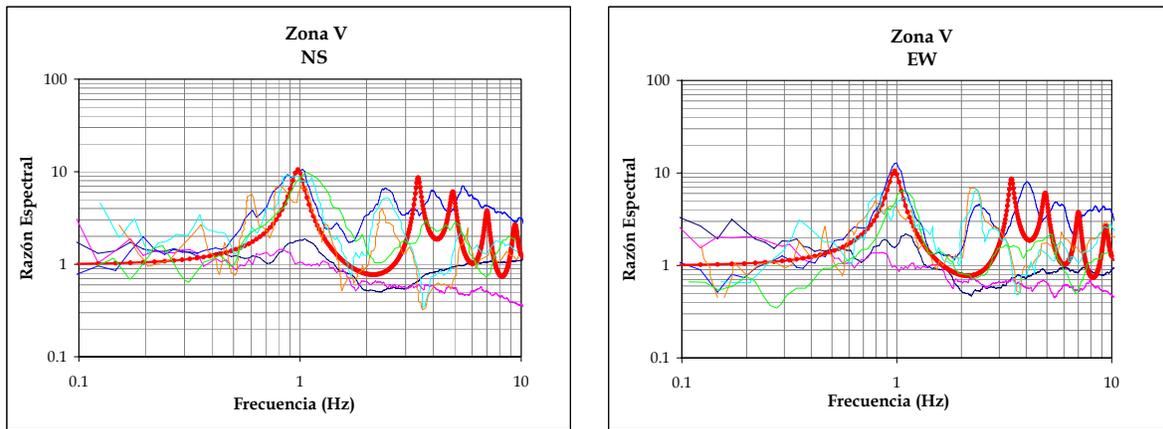


Figura 6.28. Líneas delgadas, FTEP; líneas gruesas rojas, FTT.

6.4.5.2 Zona IV

Se encuentra ubicada en los depósitos aluviales del valle del Río de la Sábana, poca información geotécnica existe disponible en esta área; dado que no hay muchas construcciones de importancia.

No existe un perfil estratigráfico dentro de esta zona, por lo tanto se obtendrá el modelo estratigráfico usando como referencia el perfil S-7, por ser el más cercano, y los datos del modelo anterior.

Los valores de velocidad de onda de corte fueron asumidos y probados con el método de prueba y error al calcular la FTT como en los casos anteriores. Pero en esta zona se tomó como primera aproximación los valores obtenidos de la siguiente relación ((Imai y Tonouchi et. al., 1982).

$$V_s = 97N^{0.314}$$

Al igual que en las zonas anteriores, el amortiguamiento fue asumido tomando en cuenta las deformaciones inducidas en un sismo severo.

La tabla 6.44 muestra cada parámetro usado para obtener el modelo estratigráfico representativo de la zona. La FTT así como las FTEP se muestran en la figura 6.29.

Tabla 6.44. Modelo estratigráfico para la zona IV.

Nº	h	ρ	β	ξ _β
	[m]	[t/m ³]	[m/s]	[1]
1	4	1.5	211.66	0.04
3	6	1.6	266.52	0.04
5	7	1.7	296.22	0.04
7	38	1.7	320.54	0.04
base	-	2	3000.00	0.01

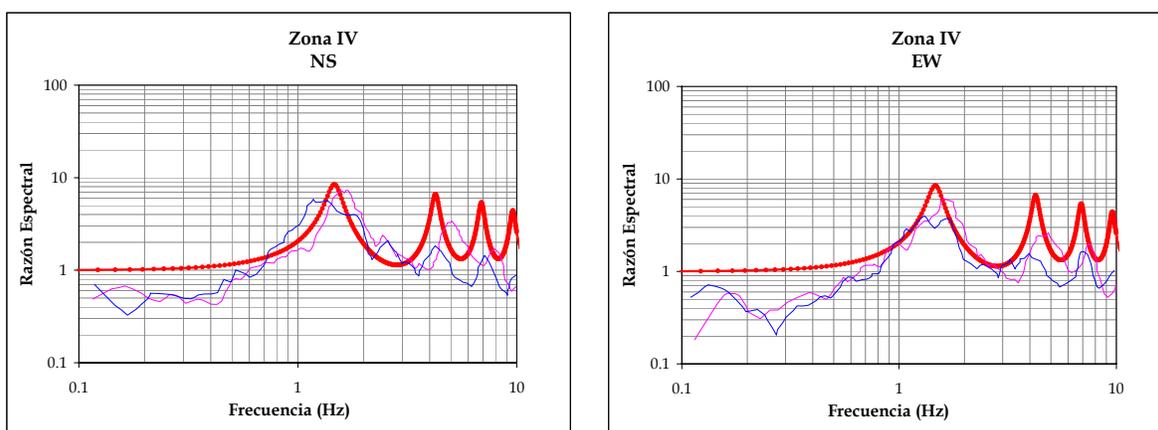


Figura 6.29. Líneas delgadas, FTEP; líneas gruesas rojas, FTT.

6.4.5.3 Zona III

Esta zona se ubica en la zona de aluviales, específicamente, se extiende desde la Base Naval de Icaos hasta la Roca el El Farallón del Obispo. Según las secciones geológicas I, II, III y IV el ancho de los suelos arenosos varía de 465 a 1335 m con una longitud en la costa de 2700 m. Flamand et. al., 1972, reporta que el espesor de suelo varía de 9 a 40 m y que ningún sondeo tocó la roca granítica. Esta zona forma parte del área 1 de la subzona de depósitos aluviales (zona de la Depresión Granítica) de la zonificación realizada por Flamand et. al., 1972.

El nivel freático se encuentra entre 1.00 y 2.00 m sobre el nivel del mar cerca a la costa y 5.00 m fuera de esta. Para describir la resistencia del subsuelo según la profundidad usamos los sondeos S-8, S-9 y S-15, así como los perfiles estratigráficos AA y BB. La resistencia de estos materiales según la profundidad se describe en la tabla 6.45.

Tabla 6.45. Resistencia promedio de los estratos

Profundidad aproximada (m)	Resistencia promedio	Número de golpes (N)
0.00 - 3.00	media	10<N<20
3.00 - 9.00	baja ¹	5<N<10
9.00 - 14.00	alta ²	20<N<40
14.00 - 48.00	Alta ³	N>50

¹ Flamand reporta que a esta profundidad se encuentra turba en capas con espesores de 1.00 m a 10.00 m

² Donde Flamand reporta la aparición de arena cuarzosa gruesa en general compacta a muy compacta

³ Según Flamand a estas profundidades existen varios estratos arcillosos de poco espesor intercalados con la arena compacta.

Los amortiguamientos para cada capa fueron asumidos al igual que en las demás zonas, en el caso de la densidad los valores se asumieron con base en el estudio 41 reportado por León, 1972 y los valores de velocidad de onda de corte fueron calculados con la ecuación anteriormente mencionada ((Imai y Tonouchi et. al., 1982). En la tabla 6.46 se presenta el modelo estratigráfico representativo de la zona y en la figura 6.30 la FTT calculada a partir de este modelo.

Tabla 6.46 Modelo estratigráfico para la zona III.

Nº	h	ρ	β	$\xi\beta$
	[m]	[t/m ³]	[m/s]	[1]
1	3	1.5	227.0	0.04
2	6	1.4	150.0	0.04
3	5	1.7	308.9	0.04
4	24	1.7	320.5	0.04
base	-	2	3000.0	0.01

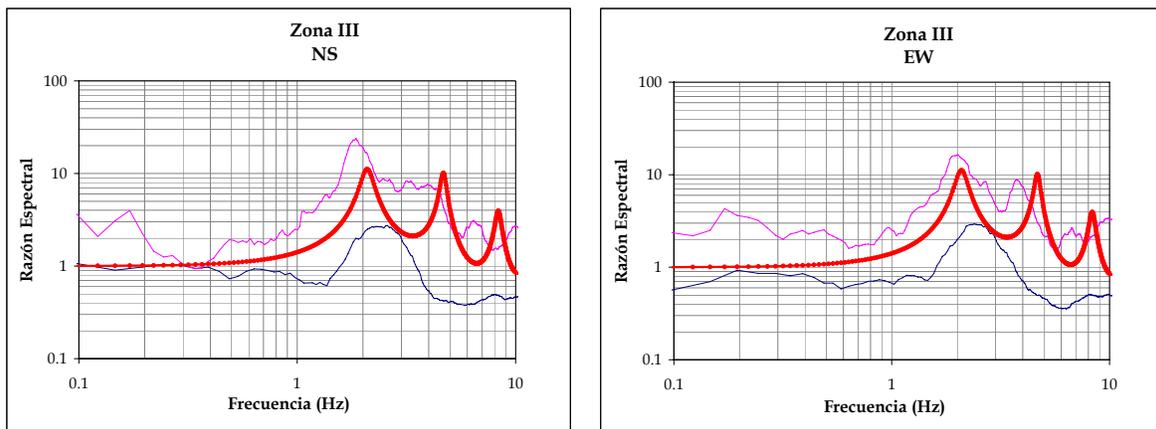


Figura 6.30. Líneas delgadas, FTEP; líneas gruesas rojas, FTT.

6.4.5.4 Zona II

La mayor área de esta zona se encuentra situada en los depósitos aluviales de la región costera, otra menor área se ubica en los depósitos aluviales del valle del Río de la Sabana, al norte de la ciudad. En la región costera, una primera área se ubica por encima de la zona III y la otra área entre la Roca Farallón del Obispo y el Club de Yates, en esta área, específicamente entre la roca de Farallón del Obispo y de San Lorenzo, los suelos arenosos tienen aproximadamente 400 m de ancho por 1500 de longitud costera según la sección geológica V donde el espesor de suelo tiene en promedio de 10 m a 15 m. Por otro lado, en esta zona se localiza el área más antigua de la ciudad de Acapulco (entre la Roca San Lorenzo y el hotel Casa Blanca) donde la extensión de suelo varía de 420 a 1200 m de ancho por 3000 m de longitud, según las secciones geológica VI y VII, y un espesor promedio de 5.0 m y 12.0 m.

Con base en los cortes estratigráficos CC, DD (en el área comprendida entre la Roca del Farallón del Obispo y la Roca de San Lorenzo), EE, FF, GG, HH, JJ (entre la Roca Farallón del Obispo y el Hotel Casa Blanca) y el sonde S-11 ubicado entre el hotel Casa Blanca y el Club de Yates se estimó la resistencia promedio de esta zona. (ver tabla 6.47)

Tabla 6.47. Resistencia promedio de los estratos

Profundidad aproximada (m)	Resistencia promedio	Número de golpes (N)
0.00 - 2.00	alta ¹	20 < N < 40
2.00 - 11.00	media ²	10 < N < 30

11.00 – 12.00	ata ³	N>50
12.00 – 15.00	mdia ⁴	10<N<30
15.00 – 21.00	ata ⁵	N>50

¹ Presencia de arena arcillosa muy compacta

² Presencia de arena poco limosa compacta con conchas

³ Esta profundidad se reporta la presencia de arcilla dura, poco arenosa con conchas, A esta profundidad aparece la roca alterada, Flamand menciona que esta roca se presenta como arena cuarzosa compacta de grano grueso con peso volumétrico del orden de 2.52 t/m³ (Flamand et. al., 1972).

⁴ Se encuentran arenas limpias y arcillosas medianamente compactadas

⁵ Material que se encuentra es arcilla dura y poco arenosa. Es importante mencionar que en el corte HH la roca sana aparece a 30.0 m de profundidad debajo del nivel del mar.

A partir de estas estratigrafías se determinó los espesores aproximados para nuestro modelo estratigráfico. La velocidad de onda de corte fueron calculados con la expresión anterior y el amortiguamiento y densidad asumidos como en los casos anteriores. La tabla 6.48 presenta estos parámetros así como modelo estratigráfico propuesto. La figura 6.31 muestra las FTT para la zona.

Tabla 6.48. Modelo estratigráfico

Nº	h	ρ	β	ξ _β
	[m]	[t/m ³]	[m/s]	[1]
1	2	1.8	320.54	0.04
2	9	1.7	282.22	0.04
3	1	1.6	331.22	0.04
4	3	1.7	308.90	0.04
5	6	1.9	331.32	0.04
base	-	2.6	3000.00	0.01

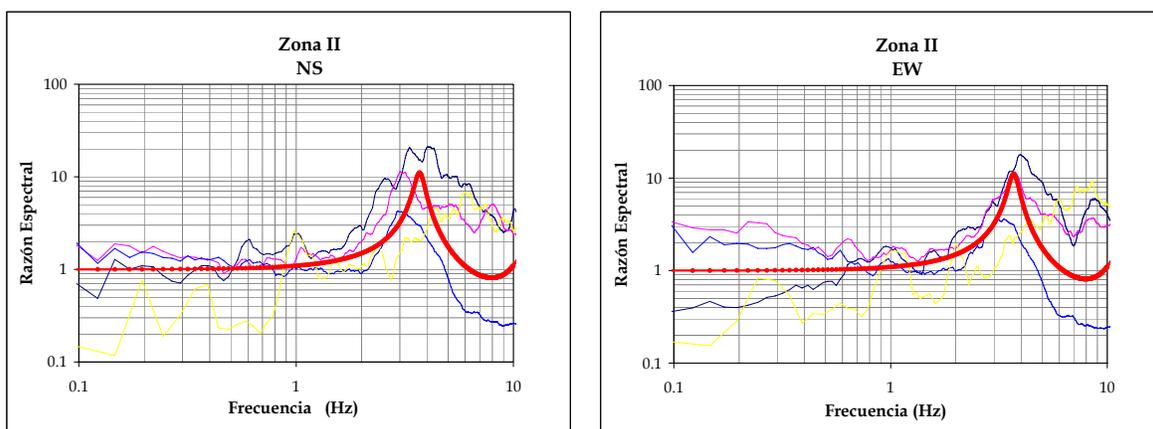


Figura 6.31. Líneas delgadas, FTEP; líneas gruesas rojas.

Las líneas de color amarilla en la figura 6.40 son las FTEP de la estación ACAS, la cual se ubica en el área aluvial esta estación presenta una respuesta anómala de la zona ya que la frecuencia predominante esta alrededor de 7 Hz en ambas componentes con amplificaciones entre 8 y 10 Hz.

Consideramos que esta respuesta se deba al origen aluvial del depósito donde se puede encontrar gravas muy potentes en áreas localizadas.

6.4.5.4 Zona I

Esta zona se localiza en la depresión granítica y parte de las rocas metamórficas, donde se puede encontrar la roca sana o alterada. En los límites con el depósito aluvial de la región costera, en donde la costra superficial de la roca se ha intemperizado para formar grandes bloques empacados en arenas o bien depósitos de talud en los que predominan grandes boleas, el sondeo S-12 es el representativo según Flamand, et. al., 1972.

En esta zona no existe mucha información geotécnica, sin embargo, en el extremo oeste y norte de los cortes estratigráficos CC y GG, respectivamente, se observa la roca granítica sana a profundidades entre 5 y 8 m. Asimismo en el corte CC se observa la roca intemperizada, la cual forma un suelo arenoso de grano grueso a medio y en general se encuentra bien graduada (Flamand et. al., 1972).

León, 1976 menciona que, en los estudios 39 y 79 ubicados al nor-este de la ciudad, la roca granítica se encuentra entre 3.00 m y 7.00 m de profundidad. El valor de onda de corte para esta roca reportado por Flamand es de 4000 m/s (estudio geofísico realizado para el túnel Icacos-Puerto Márquez).

Con estos datos se presenta en la tabla 6.49 el modelo estratigráfico de esta zona y en la figura 6.32 la FTT representativa para esta zona.

Tabla 6.49. Modelo estratigráfico de la zona I

Nº	h	ρ	β	$\xi\beta$
	[m]	[t/m ³]	[m/s]	[1]
1	9.0	1.5	520.0	0.04
base	-	2.4	3000.0	0.01

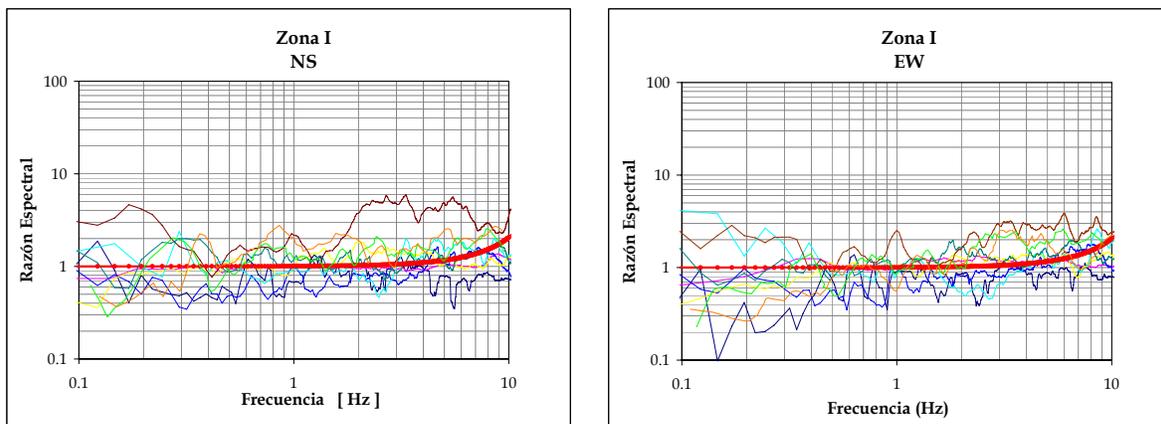


Figura 6.32. Líneas delgadas, FTEP; líneas gruesas rojas, FTT

En esta zona se localiza la estación de Pelandini (ACAP) cuya FTEP se muestran en la figura 6.47 con una línea café. El factor de amplitud a frecuencias altas en la componente NS se encuentra alrededor de 3, mientras que en la componente EW alrededor de 2, lo cual indicaría que la estación se encuentra afectada por amplificaciones topográficas, ya que se localiza en la parte alta de un cerro. Como se reportó en el estudio de la ciudad anterior, este caso se puede estudiar modelando el terreno en 2D o con el cálculo de las FTEP usando la técnica de Nakamura para temblores (HVSR), ya que los resultados son muy parecidos. Sin embargo, en la figura 6.30 se presenta la FTEP usando la técnica SSR (los resultados utilizando esta técnica y la técnica HVSR son bastante parecidos) y se observa que la amplificación promedio en las componentes horizontales se encuentra alrededor de 2, lo cual indica que el efecto de sitio no es considerable. El periodo dominante y la amplitud de cada zona se presentan en la tabla 6.50.

Tabla 6.50. Periodo dominante y amplificación de los terrenos de Acapulco

Zonas	T (s)	F (Hz)	Amplificación Relativa
I	≤ 0.1	≥ 10	1-2
II	0.25-0.33	3-4	10-20
III	0.33-0.5	2-3	2-20
IV	0.66	1.5	8
V	1.0	1.0	2-10
VI	1.11-1.43	0.7-0.9	10

6.4.6 Clasificación de terrenos

6.4.6.1 Clasificación con el IBC-2000

Para clasificar el terreno con este sistema primero se debe calcular la velocidad de onda de corte hasta 30 m de profundidad. Los modelos estratigráficos representativos de esta ciudad llegaron a profundidades mayores a 30 m (zona IV, V y VI) y algunos menor a 30 m, (zona II y III), estas condiciones se resolverán con las consideraciones mencionadas en el capítulo V.

Caso 1: Clasificamos usando las mismas letras de este sistema pero con el valor de V_S a la profundidad del modelo estratigráfico. La tabla 6.51 muestra los resultados.

Tabla 6.51 clasificación con la IBC-2000 usando V_{Sd}

Zonas	V_{Sa} (m/s)	Tipo de suelo	Descripción
I, V_{S7}	520.000	C	Suelo muy denso
II, V_{S19}	292.325	D	Suelo rígido
III, V_{S38}	263.386	D	Suelo rígido
IV, V_{S55}	299.429	D	Suelo rígido
V, V_{S37}	151.767	E	Suelo blando
VI, V_{S43}	155.383	E	Suelo blando

Caso 2: Calculamos el V_{S30} tomando en cuenta la velocidad de la capa base para las zonas I, II, debido a que en estas zonas el modelo estratigráfico no alcanzó 30 m de profundidad y

restringimos el modelo estratigráfico para las zonas IV, V y VI, ya que en estas zonas se alcanzó profundidades mayores a 30 m.

La tabla La tabla 6.52 muestra los valores del V_{S30} , así como la clasificación obtenida con este sistema.

Tabla 6.52. V_{S30} y clasificación con la IBC-2000

Zonas	V_{S30} (m/s)	Tipo de suelo	Descripción
I	1209.302	B	Roca
II	428.087	C	Suelo muy denso
III	251.431	D	Suelo rígido
IV	283.850	D	Suelo rígido
V	157.937	E	Suelo blando
VI	169.745	E	Suelo blando

No se consideró el caso 3, porque para aplicar los coeficientes de Boore, 2004 se necesita tener modelos estratigráficos mayores a 10 m y en la zona I sólo llega a 7.00 m de profundidad. En la zona II la profundidad es mayor a 10 m, pero consideramos que la aplicación no es necesaria ya que sólo se aplicaría a esta zona.

6.4.6.2 Clasificación con el Manual de Obras Civiles de la CFE-1993

La ciudad de Acapulco pertenece a la zona sísmica D de la carta de zonificación sísmica de la República Mexicana de la CFE-1993, los valores de velocidad de ondas de corte y periodo dominante característicos de esta zona sísmica se presentan en la tabla 6.53, así como las velocidades y periodos efectivos y la clasificación de terrenos para cada zona

Tabla 6.53. Clasificación con el manual de la CFE de 1993.

Zonas	B_C (m/s)	T_C	B_S	T_S	$B_C * T_C$	$B_C * T_S + B_S * T_C$	Tipo de suelos
Zona I	500	2.50	520.00	0.07	1250.00	1326.92	Tipo II
Zona II	500	2.50	292.32	0.26	1250.00	859.31	Tipo III
Zona III	500	2.50	263.39	0.58	1250.00	947.02	Tipo III
Zona IV	500	2.50	299.43	0.73	1250.00	1115.94	Tipo III
Zona V	500	2.50	151.77	0.98	1250.00	867.01	Tipo III
Zona VI	500	2.50	155.38	1.11	1250.00	941.93	Tipo III

Si usamos la fórmula establecida en la NTC del DF-2004 para calcular el periodo dominante de cada zona y con este valor calculamos la velocidad efectiva tenemos el resultado presentado en la figura 6.54.

Tabla 6.54. Clasificación según la CFE-1993, calculando el T_S como especifica la norma del D.F.-2004.

Zonas	B_C (m/s)	T_C	B_S	T_S	$B_C * T_C$	$B_C * T_S + B_S * T_C$	Tipo de suelos
Zona I	500	2.50	515.03	0.07	1250.00	1290.54	Tipo II
Zona II	500	2.50	287.32	0.28	1250.00	856.58	Tipo III

Zona III	500	2.50	331.47	0.46	1250.00	1057.96	Tipo III
Zona IV	500	2.50	338.57	0.65	1250.00	1171.32	Tipo III
Zona V	500	2.50	154.97	0.96	1250.00	864.94	Tipo III
Zona VI	500	2.50	141.30	1.22	1250.00	961.89	Tipo III

6.4.6.3 Clasificación con la norma técnica complementaria para diseño por sismo del reglamento de construcciones del estado de Guerrero

Para determinar el tipo de suelo al que pertenece cada zona se debe cumplir las siguientes condiciones:

Tipo de suelo	Condición
Tipo II	$\bar{\beta} < 700 - 550T_0$
Tipo III	$\bar{\beta} \geq 700 - 550T_0$

Al aplicar estas condiciones se obtiene los resultados mostrados en la tabla 6.55.

Tabla 6.55. Clasificación de terrenos de Acapulco con el reglamento de construcción del estado de Guerrero.

Zonas	B _s (m/s)	T _s (s)	Tipo de suelos	Descripción
I	520.00	0.05	Tipo II	Suelos de baja rigidez
II	292.32	0.26	Tipo II	Suelos de baja rigidez
III	263.39	0.58	Tipo II	Suelos de baja rigidez
IV	299.43	0.73	Tipo III	Arcillas blandas
V	151.77	0.98	Tipo II	Suelos de baja rigidez
VI	155.38	1.11	Tipo III	Arcillas blandas

6.4.6.4 Clasificación con el sistema propuesto por Rodriguez-Bray et al.2001

La tabla 6.56 presenta los parámetros necesarios para este sistema de clasificación, así como la clasificación correspondiente a cada zona.

Tabla 6.56. Clasificación de terrenos de Acapulco según Rodriguez-Bray et. al. 2001.

ZONA	T (s)	F (Hz)	Tipo de Suelo	Descripción	Comentarios
I	≤1.0	≥ 10	C-1	Roca intemperizada o blanda	Zona intemperizada (espesor de suelo >6.0 m y < 30 m, V _s > 360 m/s)
II	0.25-0.33	3-4	C-1	Roca intemperizada o blanda	Zona intemperizada (espesor de suelo >6.0 m y < 30 m, V _s > 360 m/s)
III	0.33-0.5	2-3	C-2	Suelo rígido superficial	Depósito de suelo > 6 m y < 30 m.
IV	0.66	1.5	C-3	Suelos rígidos de profundidad media	Depósitos cuaternarios (Pertenece al Holoceno y

					Pleistoceno)
V	1.0	1.0	D-1	Suelos rígidos muy profundos	Suelos con profundidad > 60 m y < 200 m
VI	1.11-1.43	0.7-0.9	D-1	Suelos rígidos muy profundos	Suelos con profundidad > 60 m y < 200 m

6.4.6.5 Comparación de los sistemas de clasificación

Con el fin de comparar estos sistemas de clasificación se presenta la tabla 6.57.

Tabla 6.57. Comparación de los sistemas de clasificación usados.

Zonas	CFE	CFE y T_s (NTC-DF)	NTC- Guerrero	IBC y V_{S30}	IBC y V_{sd}	Rodriguez- Bray, 2001
I	II	II	II	B	C	B
II	III	III	II	C	D	C-1
III	III	III	II	D	D	C-2
IV	III	III	III	D	D	C-3
V	III	III	II	E	E	D-1
VI	III	III	III	E	E	D-1

Las normas nacionales NTC para diseño sísmico de la CFE-1993 y las NTC para diseño sísmico del estado de Guerrero clasifican el terreno de la ciudad de Acapulco en dos tipos de terreno, en cambio el sistema de clasificación del código de la IBC o el propuesto por Rodriguez-Bray et. al., 2001 dan resultados más detallados.

6.4.7 Comentarios

Como ocurrió en los casos anteriores, en esta ciudad también se encontró diferente efecto de sitio en un mismo depósito geológico. Un ejemplo de ello es la existencia de dos zonas en el área de depósitos aluviales de la bahía de Acapulco, zona II y zona III, los estudios de geotecnia reportan la presencia de material orgánico, (Flamand et. al, 1972 dividieron esta área en cuatro zonas, sin embargo por la respuesta dinámica quedó dividida en dos). Este mismo caso ocurrió en el valle del Río de la Sabana, donde el área quedó dividida en tres zonas (una porción de la zona II, pendiente fuerte, zona IV, pendiente intermedia y la zona V, pendiente baja).

La zona VI, presenta el mayor efecto de sitio esto hecho es de importancia ya que, es en esta zona donde se encuentra la mayor inversión económica en infraestructura de los últimos años. La zona I, ubicada en el área de afloramiento de roca granítica (depresión granítica) y parte de las rocas metamórficas, presenta efecto de sitio prácticamente nulo.

El uso de modelos 1D para calcular las FTT se justifica por el buen acuerdo que existe entre las familias espectrales en las dos componentes horizontales.

CAPÍTULO 7: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Al comparar las clasificaciones usando las normas de diseño sísmico nacionales y la IBC-2000 se observa que esta última da resultados más detallados que las nacionales, pero encontramos algunas complicaciones al calcular el V_{S30} .

Dichas complicaciones no existen cuando se obtiene modelos estratigráficos de 30 m de profundidad, ya que la aplicación es directa, en cambio cuando el modelo estratigráfico es menor o mayor se tiene que asumir condiciones que pueden sobreestimar o subestimar el promedio de velocidades de onda de corte en la zona.

En la evaluación de los sondeos de las tres ciudades se encontró que la profundidad explorada es menor a 30 m. Los valores de las velocidades de onda de corte correspondientes a los estratos profundos, con número de golpes (N) de la prueba SPT entre 30 y 50, se encuentran aproximadamente entre 300 m/s y 550 m/s.

Los valores de velocidad de corte del terreno firme o basamento fueron asumidos tomando en cuenta los valores típicos publicados en la literatura de acuerdo a la geología. En el caso de Acapulco, además de los valores típicos se consideró la velocidad de onda de corte del granito reportado por Flamand, et. al., 1972 (4000 m/s, según los estudios realizados para la construcción del túnel Icacos-Puerto Marqués). Estos valores asignados son uno de los causantes de las diferencias en los resultados encontrados, ya que de éstos depende la amplificación del terreno, por ello consideramos necesario mayor investigación para determinar los valores reales.

La velocidad de onda de corte de la capa base en la ZCV se asumió 900 m/s, en la ciudad de Oaxaca, 2200 m/s y en Acapulco, 3000 m/s. Los valores de velocidad de onda de corte para la roca intemperizada de estas dos últimas ciudades se encuentra alrededor de 550 m/s según los modelos estratigráficos. Con estos datos se podría considerar el valor del terreno firme mayor a 900 m/s, sin embargo con la intención de ser conservadores y tomar en cuenta las recomendaciones de la CFE se propone 700 m/s como el valor que caracteriza el terreno firme.

Las velocidades de onda de corte efectivas (velocidades calculadas hasta llegar a la capa base o terreno firme, V_{sd}) se encontraron en el rango de 150 m/s a 550 m/s, aproximadamente.

Por otro lado, al evaluar el rango de frecuencias donde se encuentra la amplificación promedio de las familias espectrales se puede establecer una relación entre: la profundidad de los depósitos, la geología y la velocidad de onda de corte efectiva, como se describe a continuación:

- Si la frecuencia es mayor a 10 Hz (periodo < 0.1 s), el terreno que estamos tratando estaría conformado por roca dura cuya velocidad de onda de corte sería mayor a 700 m/s.
- Frecuencias menores iguales a 10 Hz (periodo ≥ 0.1 s) corresponderían a terrenos de roca intemperizada o las llamadas rocas blandas con V_{sd} entre 500 m/s y 700 m/s. Este es el caso de la zona de afloramiento de rocas graníticas en Acapulco, rocas metamórficas intemperizadas y rocas metamorfozadas en la zona I de la ciudad de Oaxaca.

- Cuando las frecuencias es ≤ 8.0 Hz (periodo ≥ 0.125 s) se trata de terrenos rígidos de poca profundidad la cual se puede cuantificar como menores a 10 m aproximadamente y con V_{sd} en el rango de 350 m/s a 500 m/s, estos terrenos pueden ser: depósitos aluviales de origen fluvial ubicados en pendientes fuertes (en estas zonas altas se puede encontrar fragmentos de roca y gravas) como el caso de la zona I de la ZCV, Tobas Andesíticas del terciario en la zona III de Oaxaca.
- Si la frecuencia es menor a 5.0 Hz (periodo ≥ 0.2 s) se trataría de un terreno rígido de profundidad intermedia (en promedio ≥ 10 m) con velocidad de onda de corte efectiva entre 250 m/s y 350 m/s. Estos depósitos pueden ser depósitos eólicos como dunas, depósitos de aluvión (en los cuales hay contenido de arcilla y material orgánico cuando existe la presencia de agua salada), areniscas y lutitas del terciario y depósitos clásticos continentales del terciario.
- Cuando el rango de frecuencia es ≤ 3.0 Hz (periodo ≥ 0.33) se trataría de suelos rígidos muy profundos (en promedio mayores iguales a 20 m) con velocidades de onda de corte efectiva entre 180 m/s y 250 m/s, estos depósitos pueden ser aluviales de origen fluvial localizados en las partes bajas (pendientes suaves) donde existe el riesgo de inundación (por su origen existen capas de arena, limo y arcilla alternadas e incluso se puede encontrar material orgánico) o depósitos de playa (un ejemplo de estos depósitos se encuentra en la ZCV, en la zona III).
- Finalmente, si la frecuencia del terreno es ≤ 1.5 (periodo ≥ 0.67) estaríamos tratando con suelos blandos con V_{sd} menores a 180 m/s y profundidad promedio mayor a 30 m. Estos depósitos pueden ser eólicos y marinos como el caso de los depósitos de Barra en Acapulco.

Este hecho nos lleva a proponer un sistema de clasificación el cual se describirá a continuación.

7.1 SISTEMA DE CLASIFICACIÓN PROPUESTO

Este sistema de clasificación designa a los rangos de frecuencia mencionados anteriormente letras mayúsculas de la A a la F (de menor frecuencia a mayor frecuencia), como se muestra en la tabla 7.1.

Tabla 7.1. Sistema de clasificación de terrenos con fines de diseño sísmico, propuesto.

F (Hz)	Profundidad h (m)	Tipo de terreno	Descripción
>10	-	A	Roca, $V_S > 700$ m/s
≤ 10	>6	B	Roca intemperizada, $500 < V_S < 700$
≤ 8.0	<10	C	Suelos rígidos de profundidad superficial $350 < V_S < 500$
≤ 5.0	>10	D	Suelos rígidos de profundidad intermedia $180 < V_S < 350$

≤ 3.0	≥ 20	E	Suelos blandos o rígidos muy profundos $180 < V_s < 250$
≤ 1.5	≥ 30	F	Suelos blandos $V_s \leq 180$

Esta clasificación resume la relación entre la frecuencia dominante, velocidad efectiva y la profundidad del terreno, además es obtenida con base en el estudio de efectos de sitio y es más detallada que el propuesto en las normas de diseño sísmico nacionales.

Si aplicamos este sistema de clasificación de terrenos a las tres ciudades estudiadas tenemos el siguiente resultado:

7.2 VERACRUZ-BOCA DEL RIO

Tabla 7.2 Clasificación de terrenos propuesta para la ZCV

ZONA	F (Hz)	Profundidad h (m)	Tipo de Suelo	Descripción
I	> 8.0 Hz	9.5	C	Suelos rígidos superficiales. Espesor de suelo. $V_{sd} = 332.203$ m/s
II	3.50-4.50	12.0	D	Suelos rígidos de profundidad intermedia. $V_{sd} = 201.15$ m/s
III	2.50-3.00	21.5	E	Suelos blandos. $V_{sd} = 221.77$ m/s
IV	1.50- 2.50	22.0	E	Suelos blandos. $V_{sd} = 250$ m/s

Al ubicar espacialmente esta clasificación se obtiene el mapa mostrado en la figura 7.1.

7.3 OAXACA

Tabla 7.3 Sistema de clasificación propuesta para la ciudad de Oaxaca

Zonas	F (Hz)	Profundidad h (m)	Tipo de Suelo	Comentarios
I	10		B	Roca blanda
II	6.0-7.0	13	C	Suelos rígidos superficiales. $V_s = 301.16$ m/s.
III	4.0-5.0	18	D	Suelos rígidos de profundidad. $V_s = 30012$ m/s
IV	2.5-3.0	15	E	Suelos rígidos muy profundos. $V_s < 210$ m/s
V	2.0-2.5	32	E	Suelos rígidos muy profundos. $V_s = 262.04$ m/s
VI	1.5-2.0	30.5	F	Suelos blandos. $V_s = 186.35$ m/s

En la figura 7.2 se presenta la ubicación espacial de esta clasificación. La zona I se considera una zona de alta resistencia y con efecto de sitio bajo por encontrarse donde afloran las rocas metamórficas.

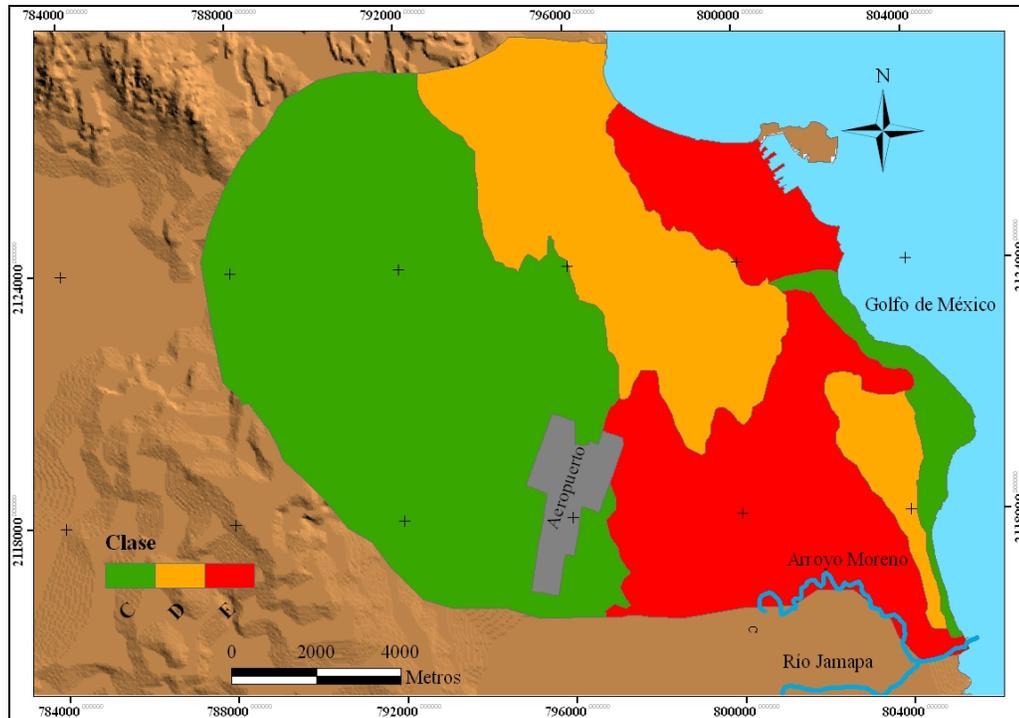


Figura 7.1. Clasificación de los terrenos de cimentación de la ZCV, con fines de diseño sísmico.

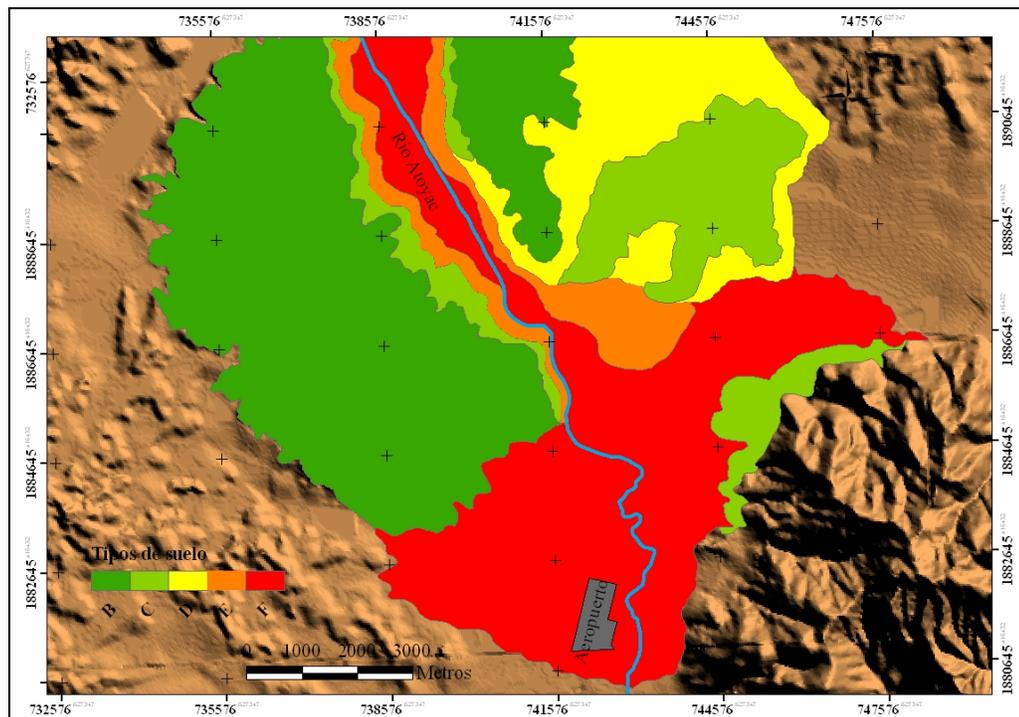


Figura 7.2 Clasificación de terrenos para la ciudad de Oaxaca.

7.4 ACAPULCO

Tabla 7.4. Sistema de clasificación propuesta para la ciudad de Acapulco.

ZONA	F (Hz)	Profundidad h (m)	Tipo de Suelo	Comentarios
I	≥ 10	9.0	B	Roca blanda. $V_S=520$ m/s
II	3.0-4.0	21.0	D	Suelos rígidos de profundidad intermedia. $V_S=292.32$ m/s
III	2.0-3.0	38.0	E	Suelos rígidos muy profundos. $V_S=263.39$ m/s
IV	1.5	55.0	E	Suelos rígidos muy profundos. $V_S=299.43$ m/s
V	1.0	37.0	F	Suelo blando. $V_S=151.77$ m/s
VI	0.7-0.9	43.0	F	Suelo blando $V_S=155.38$ m/s

En la figura 7.3. se presenta la ubicación espacial de esta clasificación.

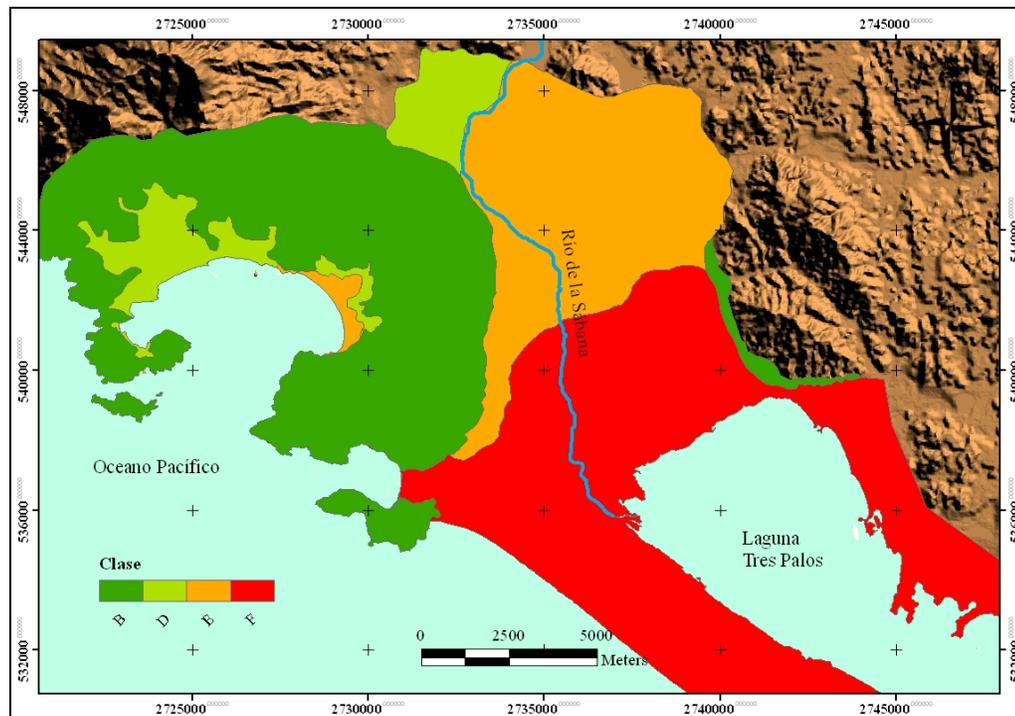


Figura 7.3. Clasificación del terreno de la ciudad de Acapulco.

Asimismo, proponemos una metodología para clasificar los terrenos con el sistema propuesto, ésta se basa en el procedimiento descrito en el capítulo V.

7.5 METODOLOGÍA PROPUESTA

Antes de aplicar el sistema de clasificación presentado, se propone seguir la siguiente metodología:

1. Obtener información geológica, geotécnica y geofísica, en caso de ser posible corroborar los datos con trabajos de campo.
2. Calcular funciones de transferencia empírica (FTE) con registros de microtremores, en caso de que la ciudad cuente con una red acelerográfica o sísmica, se debe considerar los registros de sismos locales o regionales y aplicar la técnica SSR y HVSR para complementar los datos obtenidos con microtremores.
3. Calcular la función de transferencia empírica promedio (FTEP) con la media geométrica de las FTE y agruparla tomando como base su forma espectral.
4. Cada zona encontrada con la agrupación de las FTEP deben ser caracterizadas con la geología, geotecnia y geofísica.
5. Obtener un modelo estratigráfico representativo para cada zona y calcular la función de transferencia teórica (FTT) con el modelo unidimensional de Haskell, 1962.
6. Aplicar el sistema de clasificación propuesto y elaborar un mapa de clasificación el cual debería estar georeferenciado.

Es importante mencionar que la velocidad de onda de corte efectiva V_{sd} se calcula asumiendo que los estratos son planos y homogéneos, y que se encuentran sobre terreno firme, el cual pueden ser suelos muy rígidos, roca intemperizada o roca sana con $V_s > 700$ m/s. Para calcular esta velocidad se usó la expresión 7.1.

$$V_{sd} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{si}}} \quad (7.1)$$

Donde: d_i = Espesor de cada los que forma el modelo estratigráfico.

V_{si} = Velocidad de los estratos del modelo estratigráfico.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES

La respuesta dinámica encontrada en las tres ciudades estudiadas no puede ser representada con el sistema de clasificación del terreno del Manual de Diseño de la CFE, ni con los sistemas de los reglamentos estatales. Veracruz-Boca del Río se dividió por su respuesta dinámica en cuatro zonas, sin embargo la clasificación del terreno usando el Manual de la CFE resultó en un solo tipo de terreno, tipo III, y usando las NTC del reglamento propuesto para el estado de Veracruz, tipo II. La ciudad de Oaxaca se dividió en seis zonas y la clasificación de terrenos usando el manual de CFE y la NTC del estado dio como resultado un solo tipo de terreno (tipo III). La respuesta dinámica dividió la ciudad de Acapulco en seis zonas, pero al aplicar la clasificación de terreno de la CFE se encontró dos tipos de terreno, Tipo I y Tipo II. En cambio, la clasificación de terreno de las tres ciudades estudiadas con el sistema propuesto es más detallada que las obtenidas con las normas nacionales e internacionales, tal como se muestra en la siguiente tabla.

Ciudad	Tipo de suelo	Zonas	T (s)	V _{sa} (m/s)
Veracruz-Boca del Río	C	I	< 1.25	332.203
	D	II	0.22-0.29	201.151
	E	III y IV	0.40-0.67	199.576- 221.771
Oaxaca	B	I	0.1	>700
	C	II	0.1-0.14	301.16
	D	III	0.20-0.25	300.12
	E	IV y V	0.40-0.50	210.00-262.04
	F	VI	0.50-0.67	186.35
Acapulco	B	I	≤1.0	520.00
	D	II	0.25-0.33	292.32
	E	III y IV	0.33-0.66	263.39-299.43
	F	V y VI	1.0-1.43	151.77-155.38

El sistema de clasificación propuesto divide al terreno de la ZCV en tres tipos (C, D y E), la zona III y IV pertenecen al mismo tipo de terreno, E, este resultado era de esperarse, ya que los valores de frecuencia dominante son muy parecidos, pero cabe resaltar que la amplificación en la zona IV es mayor, esto se corrobora con la velocidad efectiva, la cual es menor que en la zona III. Consideramos que esta clasificación esta más acorde con el efecto de sitio que se puede presentar en un sismo, ya que se considera, tres parámetros que son importantes en su evaluación (el periodo, la amplificación relacionado con la velocidad efectiva, y el espesor de los depósitos).

Esta clasificación propuesta divide a la ciudad de Oaxaca en cinco tipos de suelo (B, C, D, E y F). La zona I, con la letra más alta (B), ya que consideramos nulo el efecto de sitio. Aunque la mayor densidad de población se encuentra en las zonas II (tipo de suelo C) y III (tipo de suelo D), se debe considerar el crecimiento de los últimos años hacia la zona VI (tipo de suelo F).

La clasificación propuesta divide la ciudad de Acapulco en cuatro tipos de terreno (B, D, E y F) a comparación del reglamento actual del estado, el cual divide la ciudad en tres tipos de terreno, lo cual llevaría a sobredimensionar las estructuras en zonas como la I y II.

En la clasificación propuesta la frecuencia dominante es el parámetro principal (parámetro de entrada), la cual se determina a partir de un valor promedio de la amplificación obtenida del análisis de varios registros de sismos y microtemores para una zona, Dobry et. al, 2000 consideran que el valor promedio de la amplificación relativa en una frecuencia dada para un número de estaciones que tienen las mismas condiciones de suelo representa mejor la respuesta dinámica de la zona.

Aunque en la clasificación no se menciona la amplificación relativa como un parámetro, ésta es tomada en cuenta implícitamente cuando calculamos la velocidad específica del sitio ya que Dobry, et. al., 2000 y Borcherdt, 1994 así como otros autores mencionados en estos trabajos, han confirmado la utilidad de la velocidad efectiva, V_{sd} , para predecir la amplificación relativa del suelo. El rango de velocidades específicas propuesto para definir los tipos de terreno se basan en el modelo estratigráfico determinado, el cual se halló con las características geotécnicas, geológicas y geofísicas del terreno y fue probado cuando se calculó la FTT.

El sistema de clasificación propuesto, con base en el estudio del efecto de sitio de tres ciudades con características geológicas distintas y diferente actividad sísmica, toma en cuenta tres factores: el periodo dominante, la amplificación relativa y el espesor del suelo, estos factores son los que determinan el efecto de sitio. En la metodología para aplicar este sistema de clasificación se propone el uso de microtemores (y la técnica de Nakamura) por ser económico, sencillo de operar y porque se puede obtener resultados con rapidez, además en esta tesis así como en otros trabajos se ha comprobado que los periodos obtenidos con esta técnica son similares a los obtenidos con registros de sismos y amplificación, también cercana a los obtenidos con sismogramas.

Es importante mencionar que en el caso de los depósitos de barra de la ciudad de Acapulco (zona VI) desde 8.00 m a 28 m aproximadamente la resistencia es alta, ya que el número de golpes es mayor a 50. Sin embargo, debajo de los 28 m la resistencia disminuye. En consecuencia, el estrato debajo de esta profundidad sería causante de las bajas frecuencias observadas, estas bajas frecuencias (efectos de sitio alto) pueden ser detectadas registrando microtemores que después se analizan con herramientas fáciles de usar y económicas.

Aunque presentamos rangos de velocidad efectiva y frecuencia para la aplicación de este sistema, la toma de decisiones dependerá principalmente de la frecuencia, sin embargo cuando se tenga que elegir un tipo de terreno no se deberá ser rígido en cuanto a estos rangos, además el conocimiento de la zona en estudio por parte del especialista será decisivo.

Aunque el sistema de clasificación propuesto relaciona los parámetros T_S , V_S y H_S bajo la ecuación $T_S=4H_S/V_S$, se debe tener en cuenta que el contraste de velocidades, suelo/basamento (V_S/V_0) no es explícitamente considerado por la limitación que se tuvo con respecto a los valores de velocidades de onda de corte del basamento.

La clasificación de terreno así como los mapas de clasificación, obtenidos en cada ciudad con el sistema propuesto, son válidos para el análisis de peligro sísmico, ya que se determinaron evaluando el efecto de sitio. Asimismo, pueden ser una buena herramienta para determinar coeficiente de diseño sísmico en función de factores de amplificación tal como lo hizo Borcherdt en 1992.

La respuesta de sitio varía con la intensidad de movimiento de la roca debido al comportamiento esfuerzo-deformación no lineal del terreno, este comportamiento puede ser tomado en cuenta con factores de sitio (en función de factores de amplificación) que dependan tanto de la intensidad de movimiento en roca como del tipo de terreno. En este contexto, el sistema de clasificación que proponemos resulta una herramienta la cual puede ser probada para obtener esos factores y así definir espectros de diseño de sitio.

ANEXO A
CIUDAD DE VERACRUZ-BOCA DEL RÍO

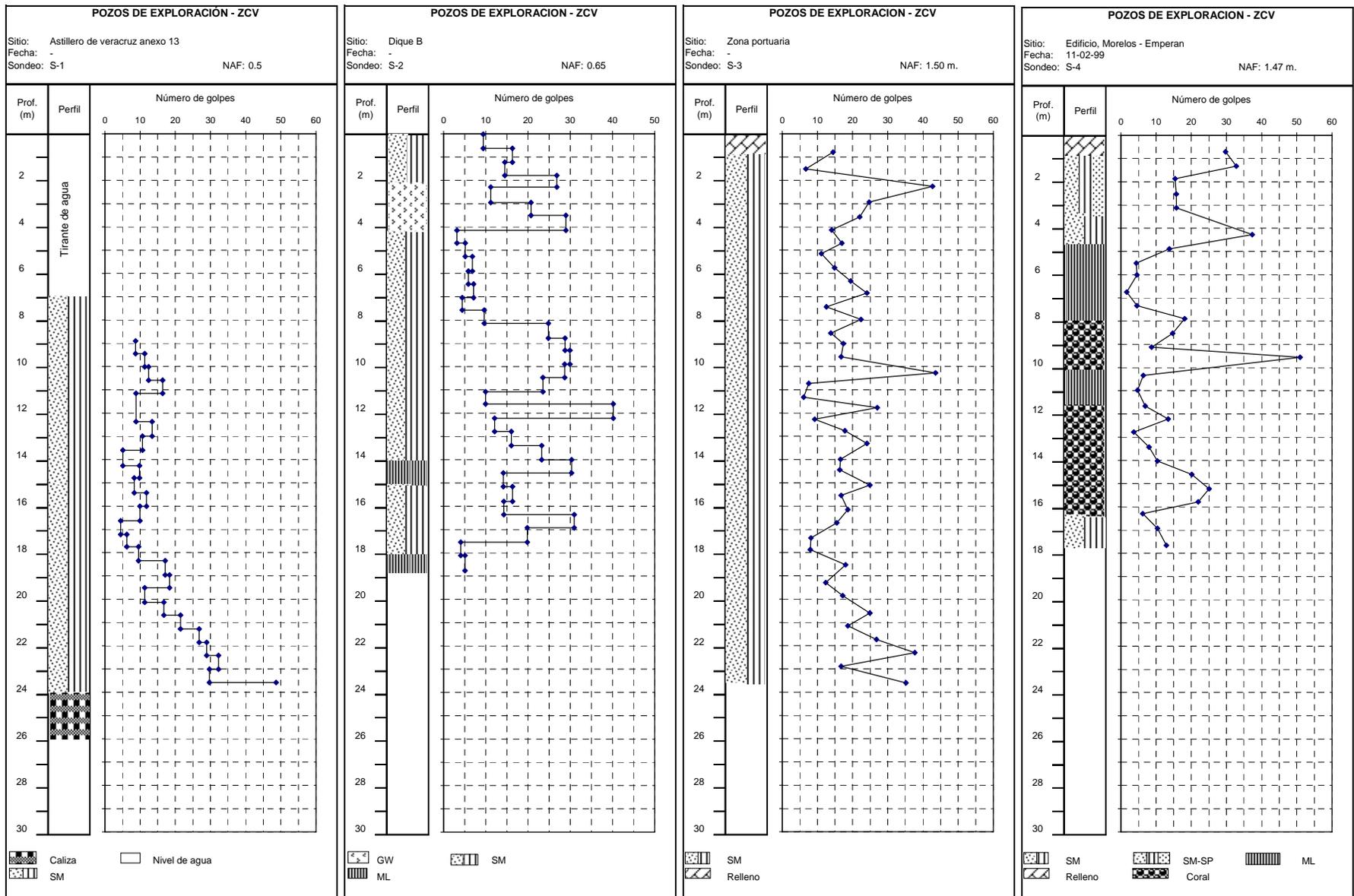


Figura 1. Sondeos S-1, S-2, S-3 y S-4 de penetración estándar recopilados en la ZCV.

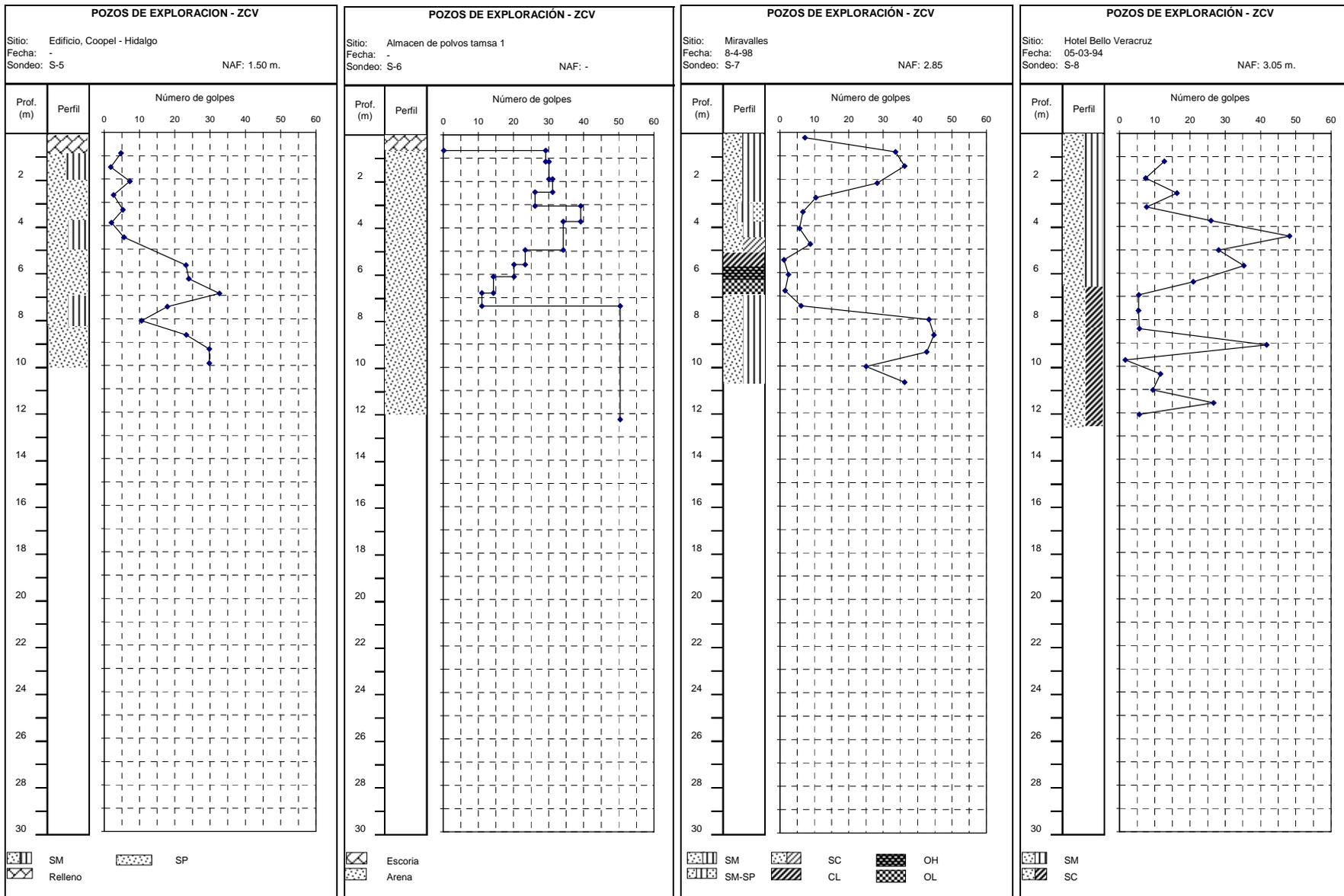


Figura 2. Sondeos, S-5, S-6, S-7 y S-8 de penetración estándar recopilados en la ZCV.

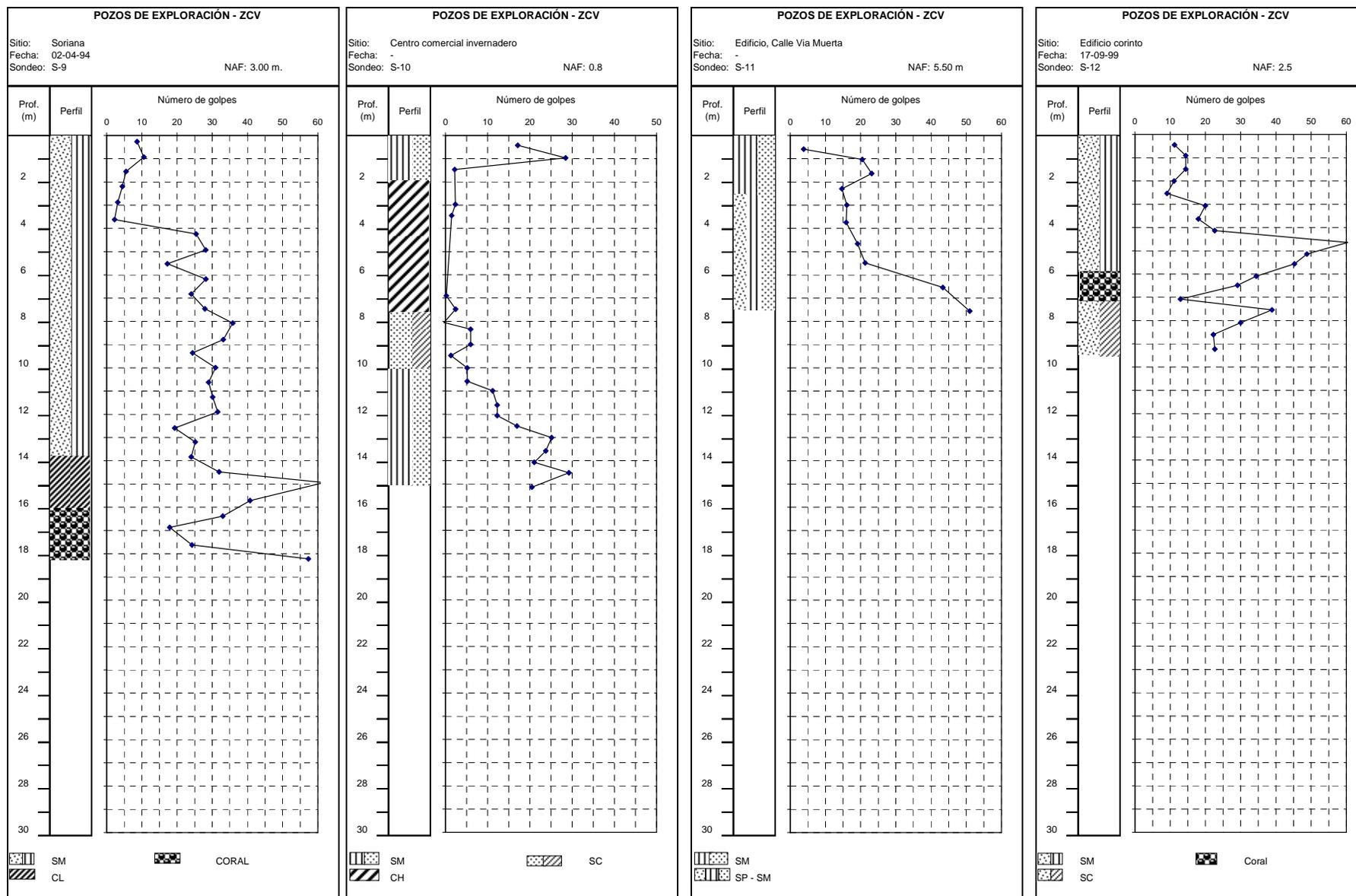


Figura 3. Sondeos S-9, S-10, S-11 y S-12 de penetración estándar recopilados en la ZCV.

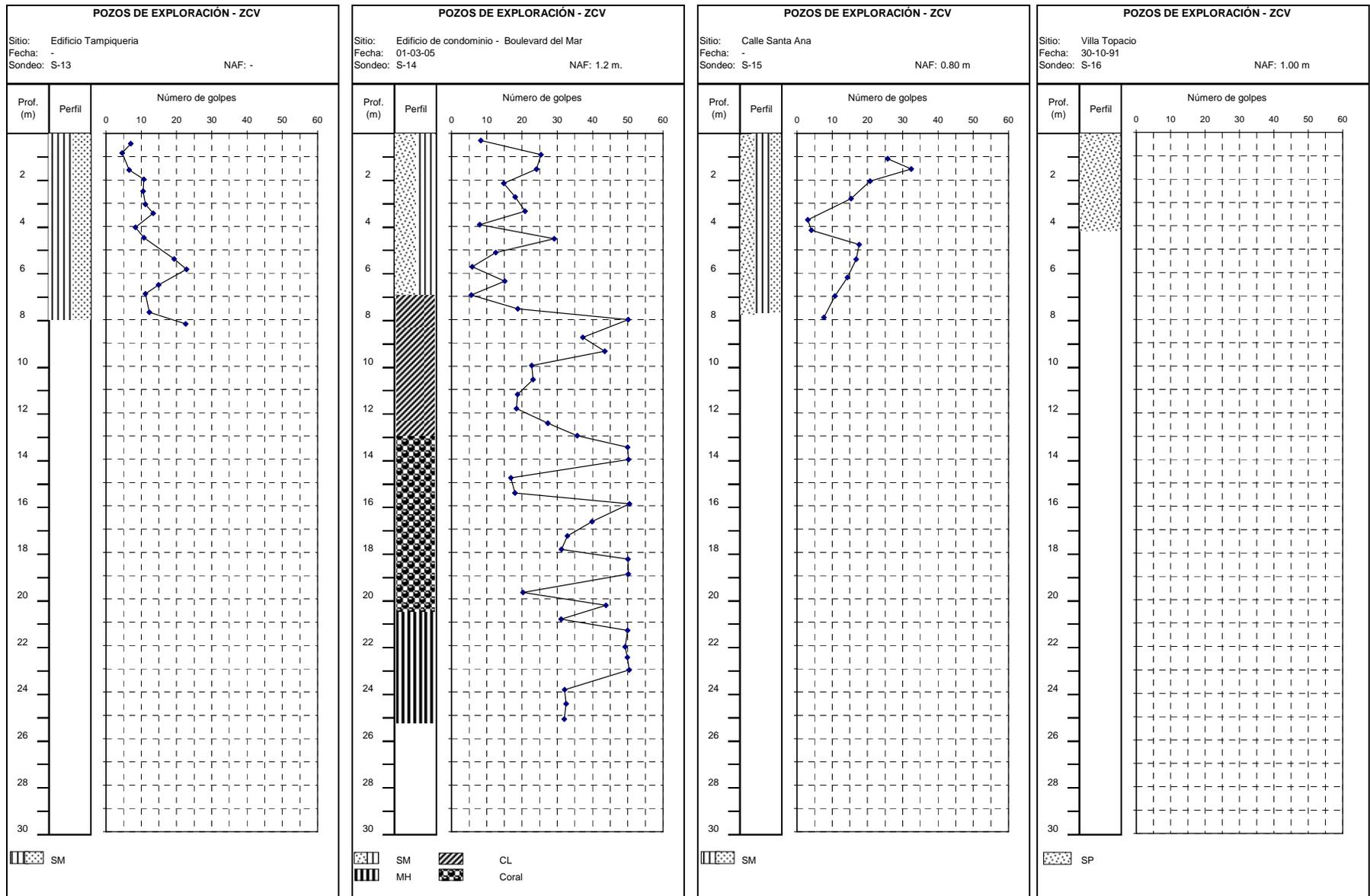


Figura 4. Sondeos S-13, S-14, S-15 y S-16 de penetración estándar recopilados en la ZCV.

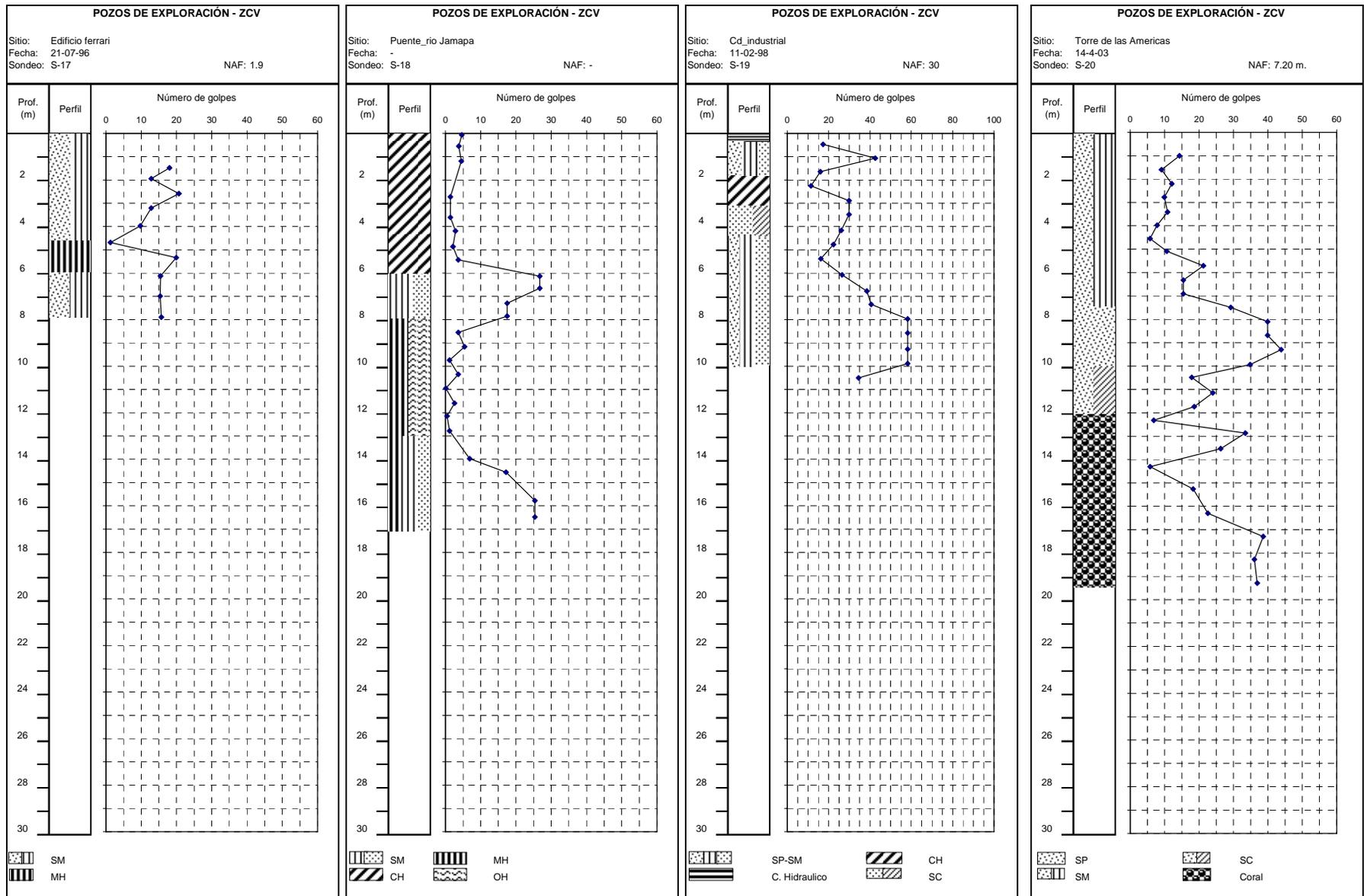


Figura 5. Sondeos S-17, S-18, S-19 y S-20 de penetración estándar recopilados en la ZCV.

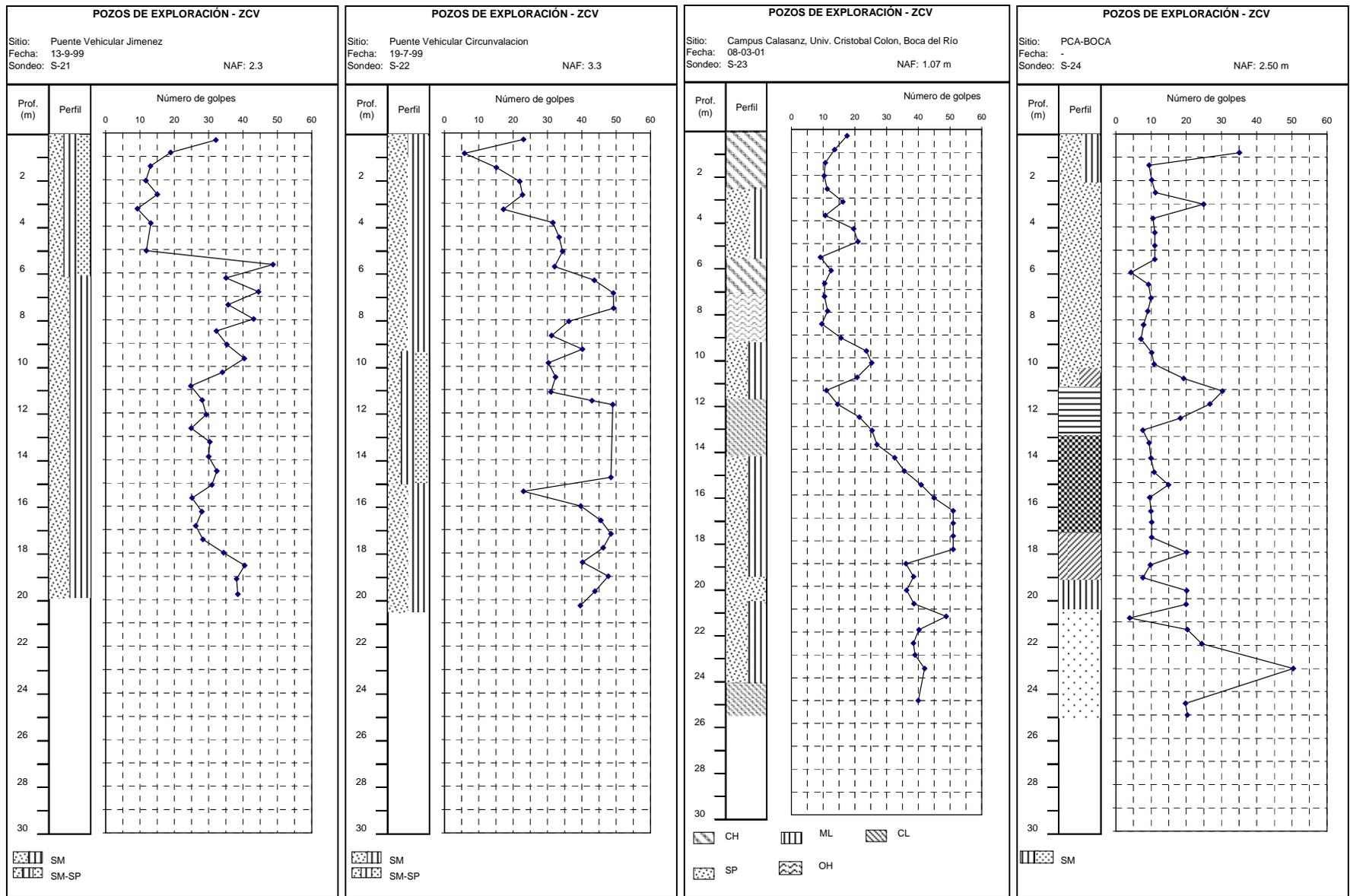


Figura 6. Sondeos S-21, S-22, S-23 y S-24 de penetración estándar recopilados en la ZCV.

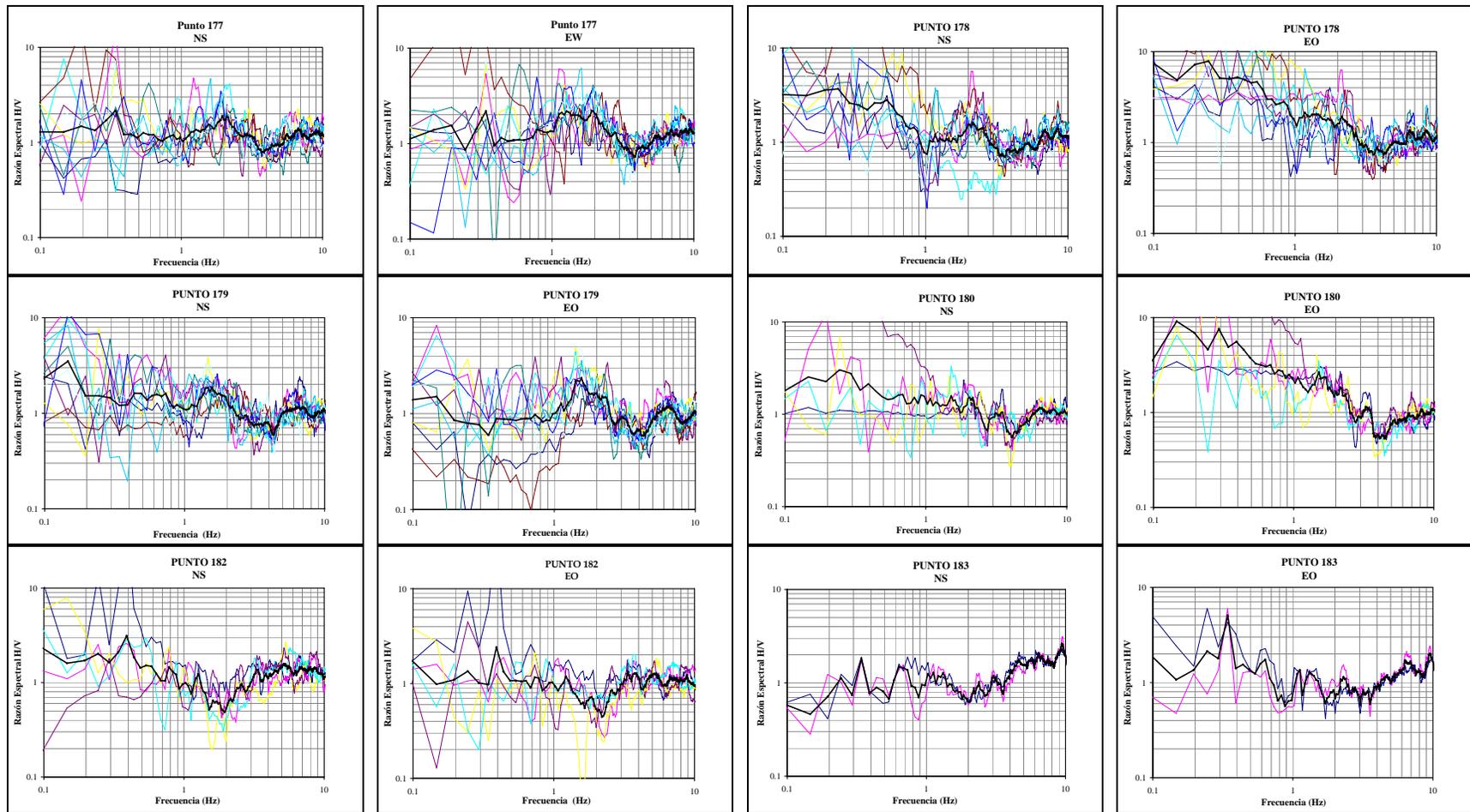


Figura 7. Funciones espectrales en las dos componentes de los puntos 177-183 de medición de microtremores. Funciones de transferencia empírica con la técnica HVNR. Líneas delgadas, FTE; líneas gruesas negras, FTEP.

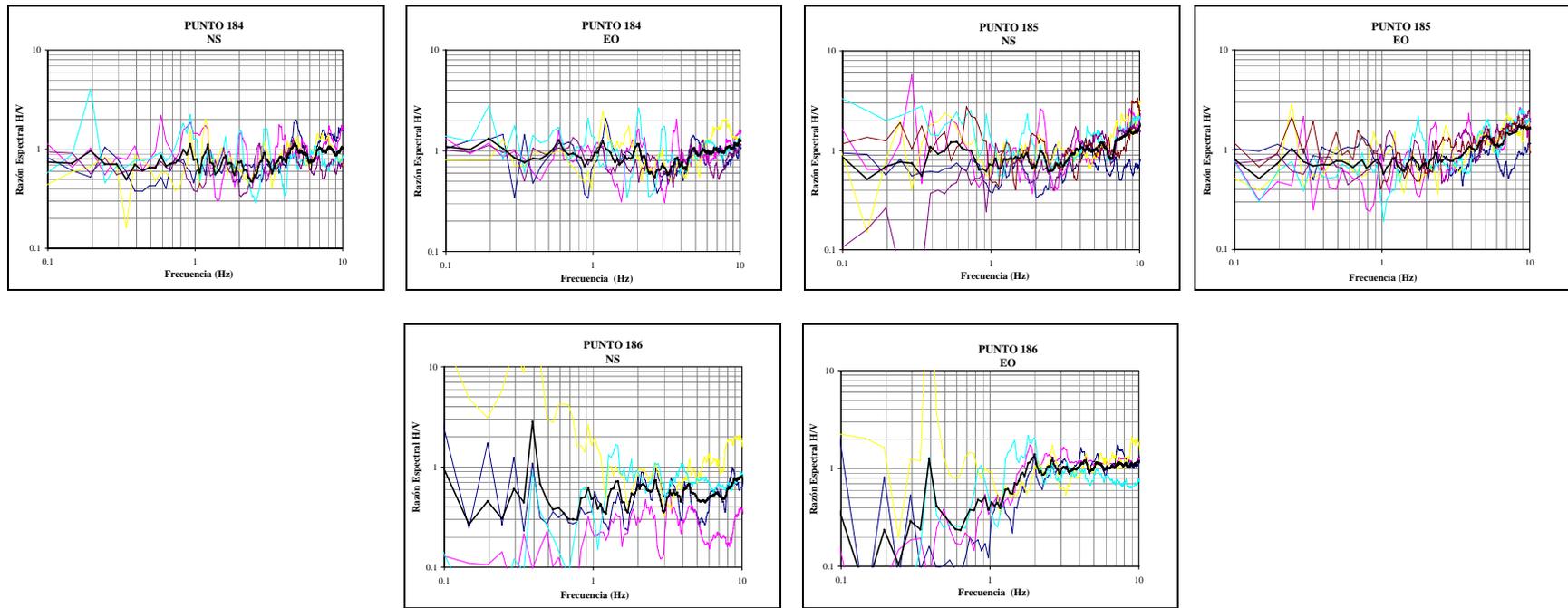


Figura 8. Funciones espectrales en las dos componentes de los puntos 184-186 de medición de microtremores. Funciones de transferencia empírica con la técnica HVNR. Líneas delgadas, FTE; líneas gruesas negras, FTEP.

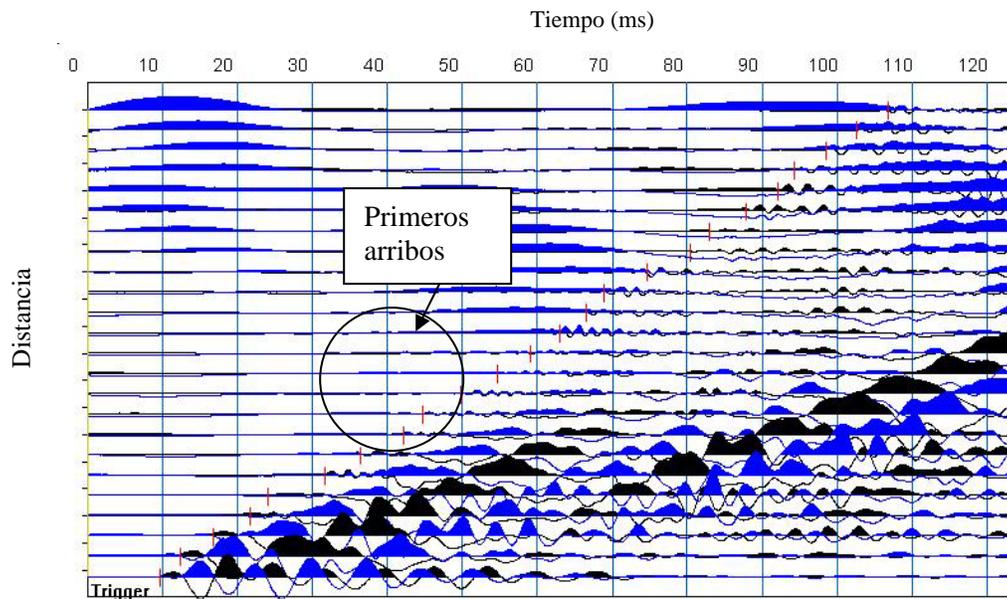


Figura 9. Primeros arribos de la refracción R01.

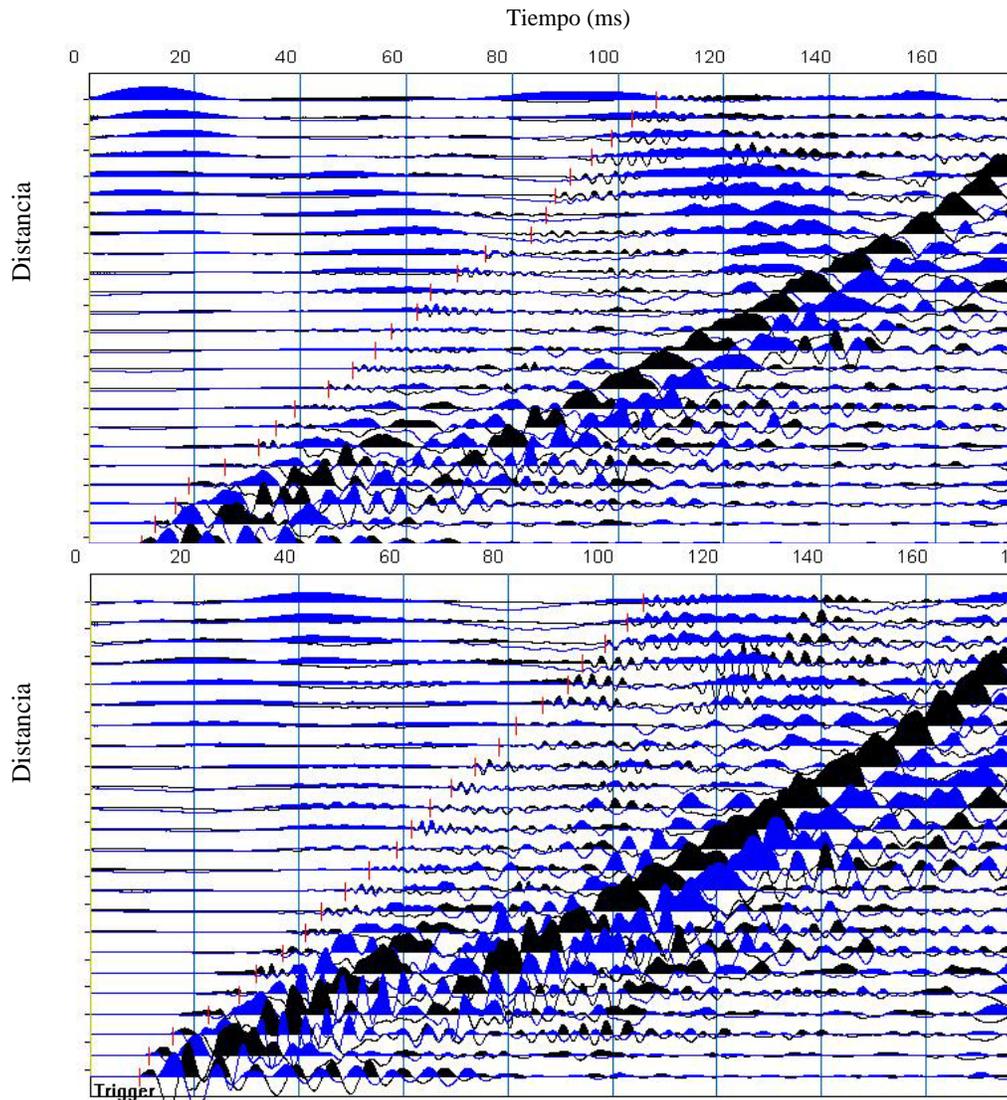


Figura 10. Primeros arribos de la refracción R02.

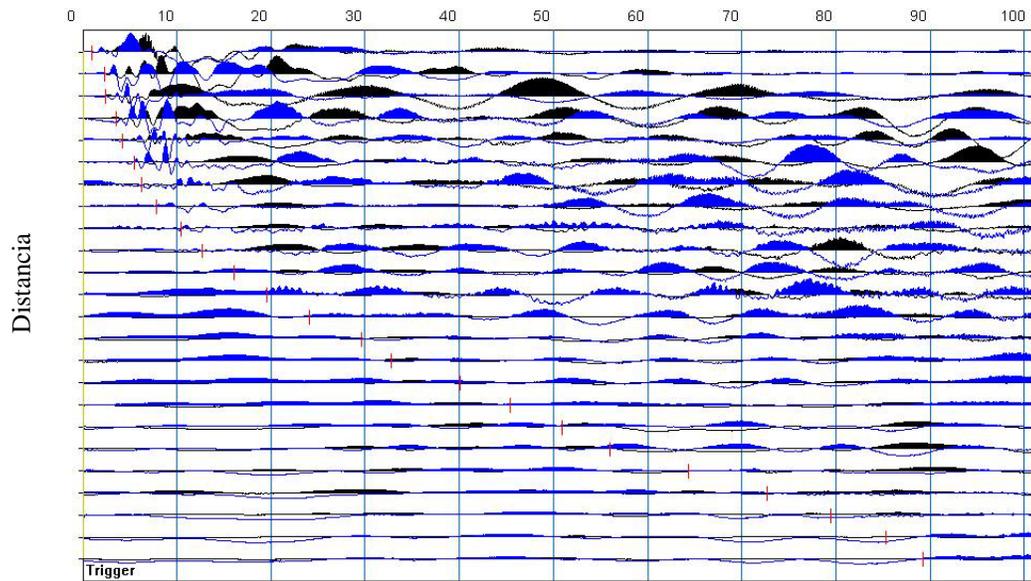


Figura 11. Primeros arribos de la refracción R03.

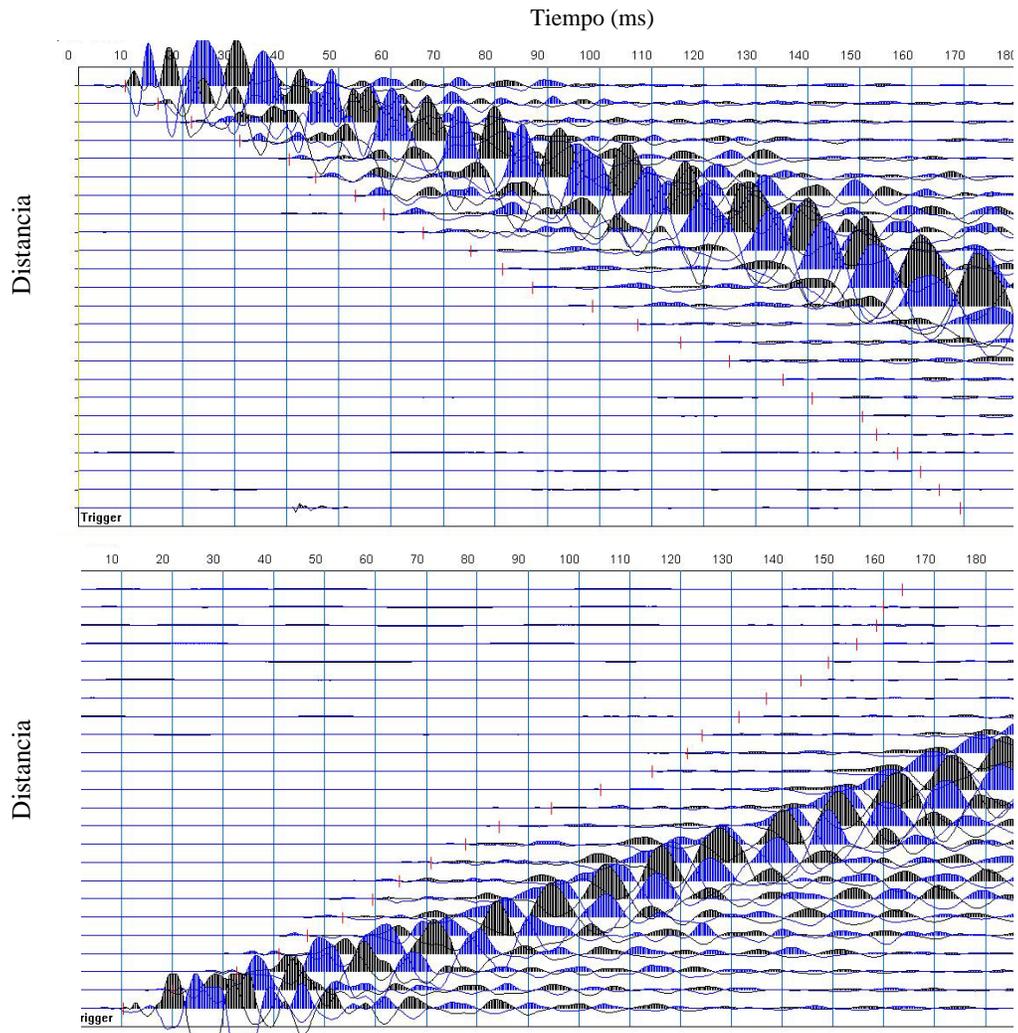


Figura 12. Primeros arribos de la refracción R04.

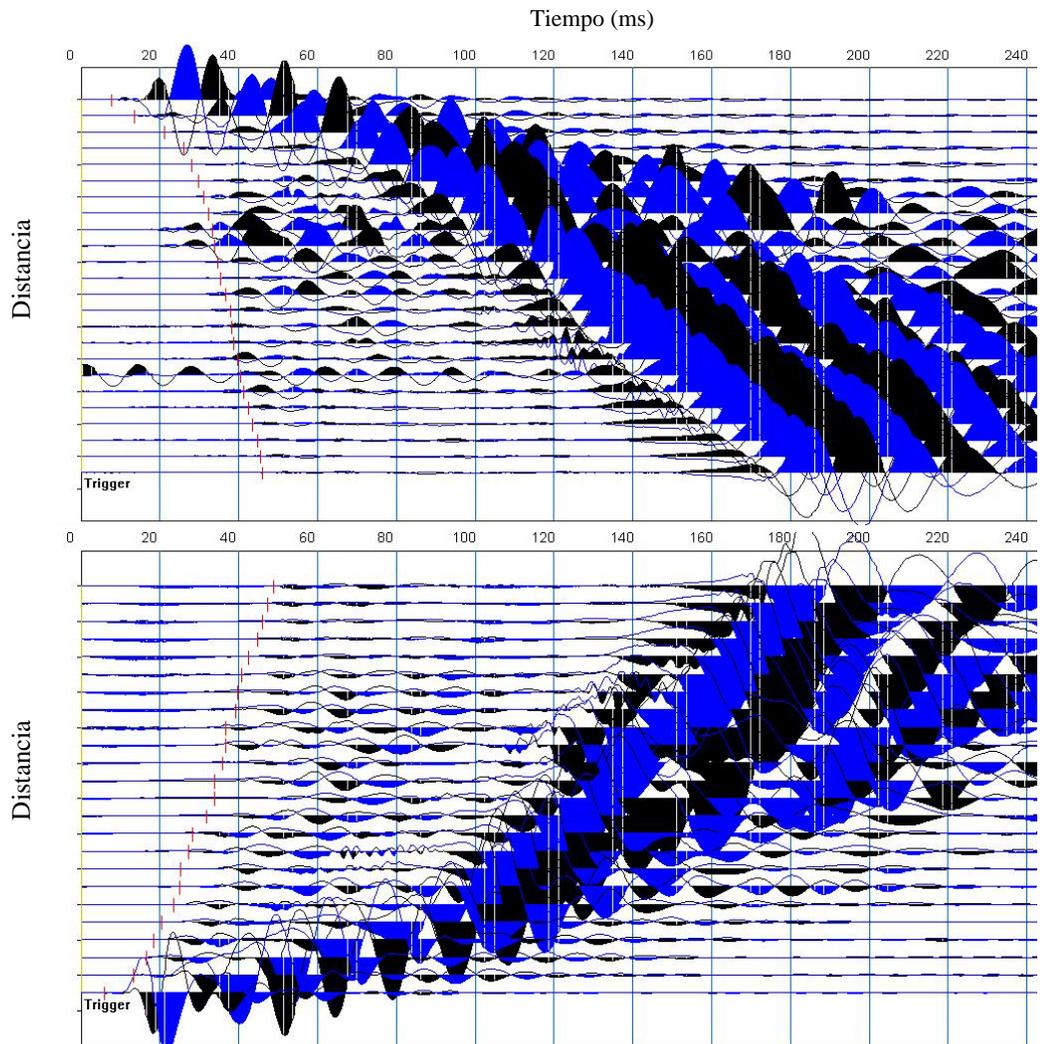


Figura 13. Primeros arribos de la refracción R05.

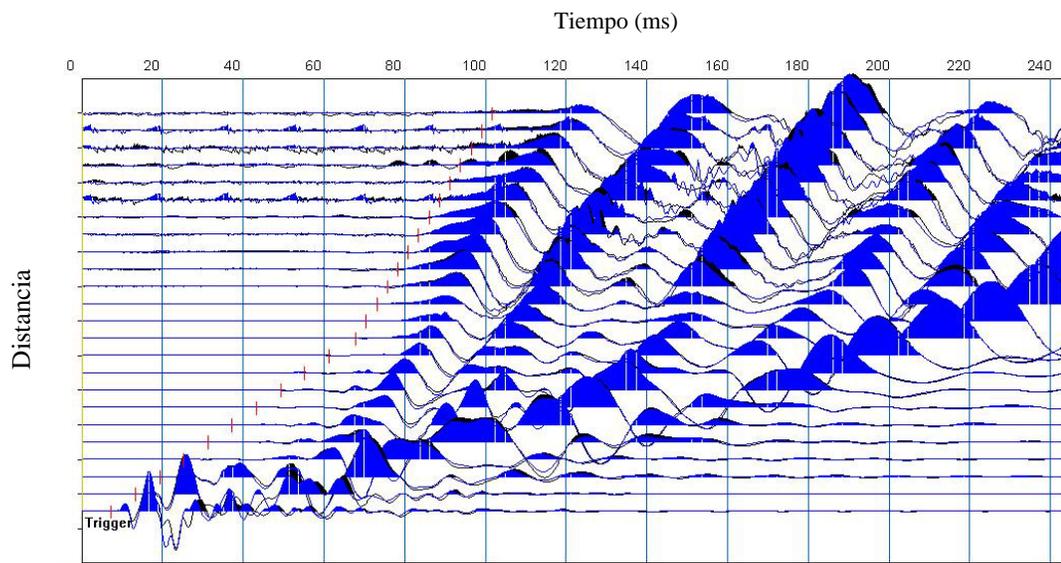


Figura 14. Primeros arribos de la refracción R06.

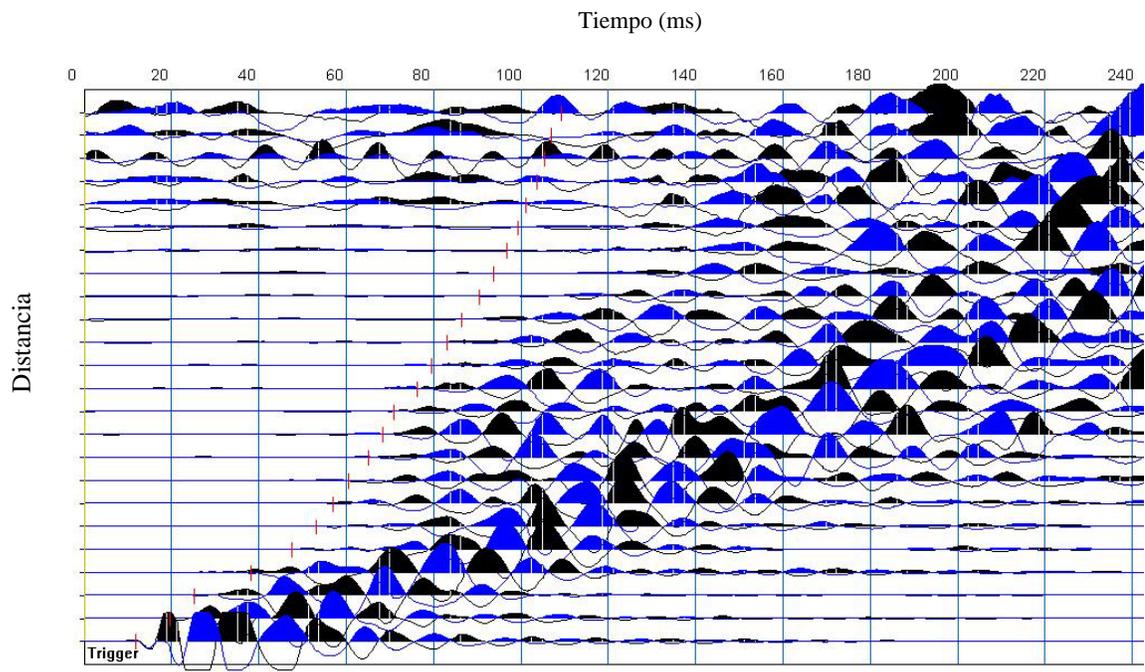


Figura 15. Primeros arribos de la refracción R07.

ANEXO B
CIUDAD DE OAXACA

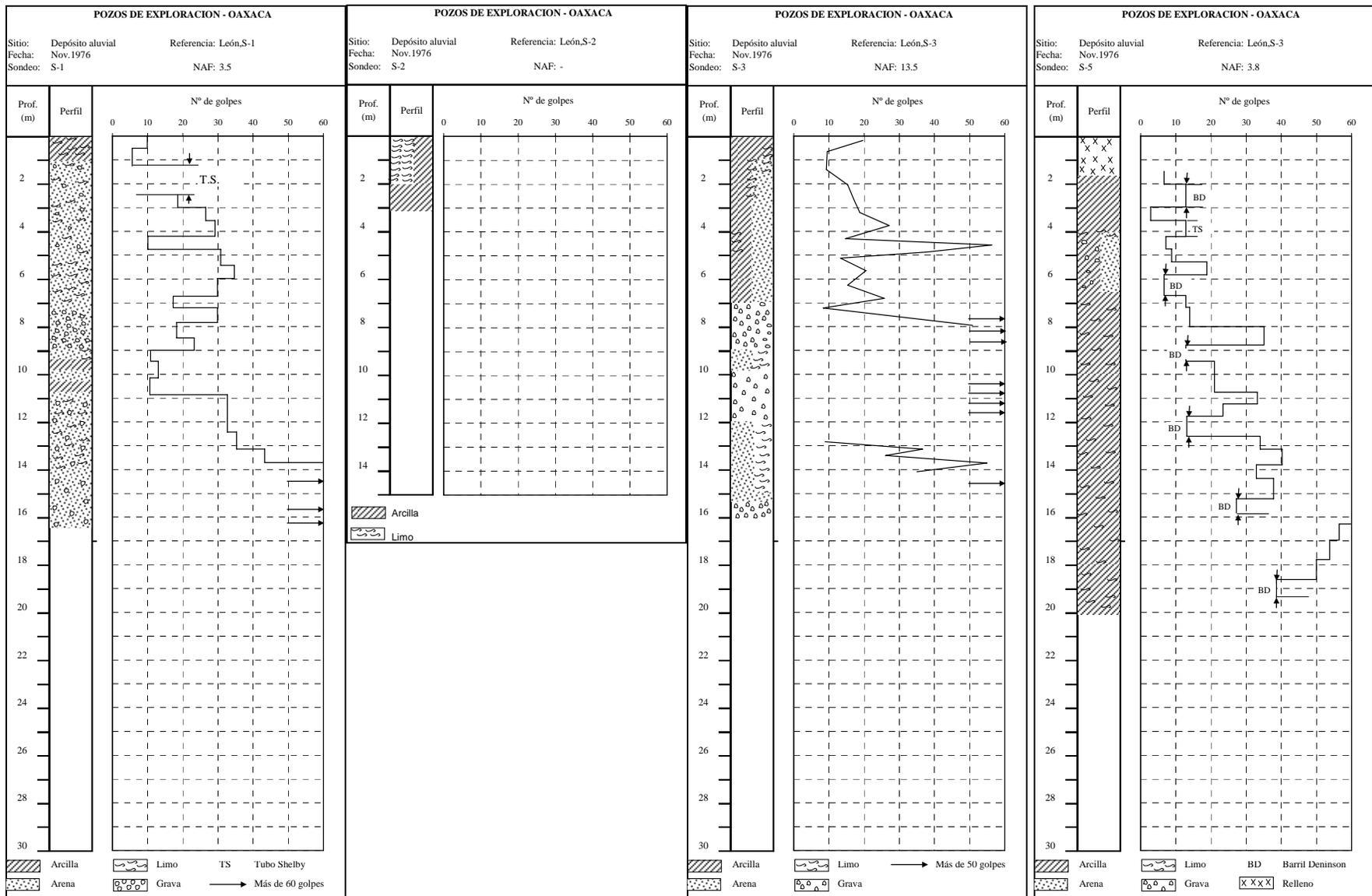


Figura 16. Sondeos de penetraciones estándar S-1, S-2, S-3 y S-5 (León, 1976).

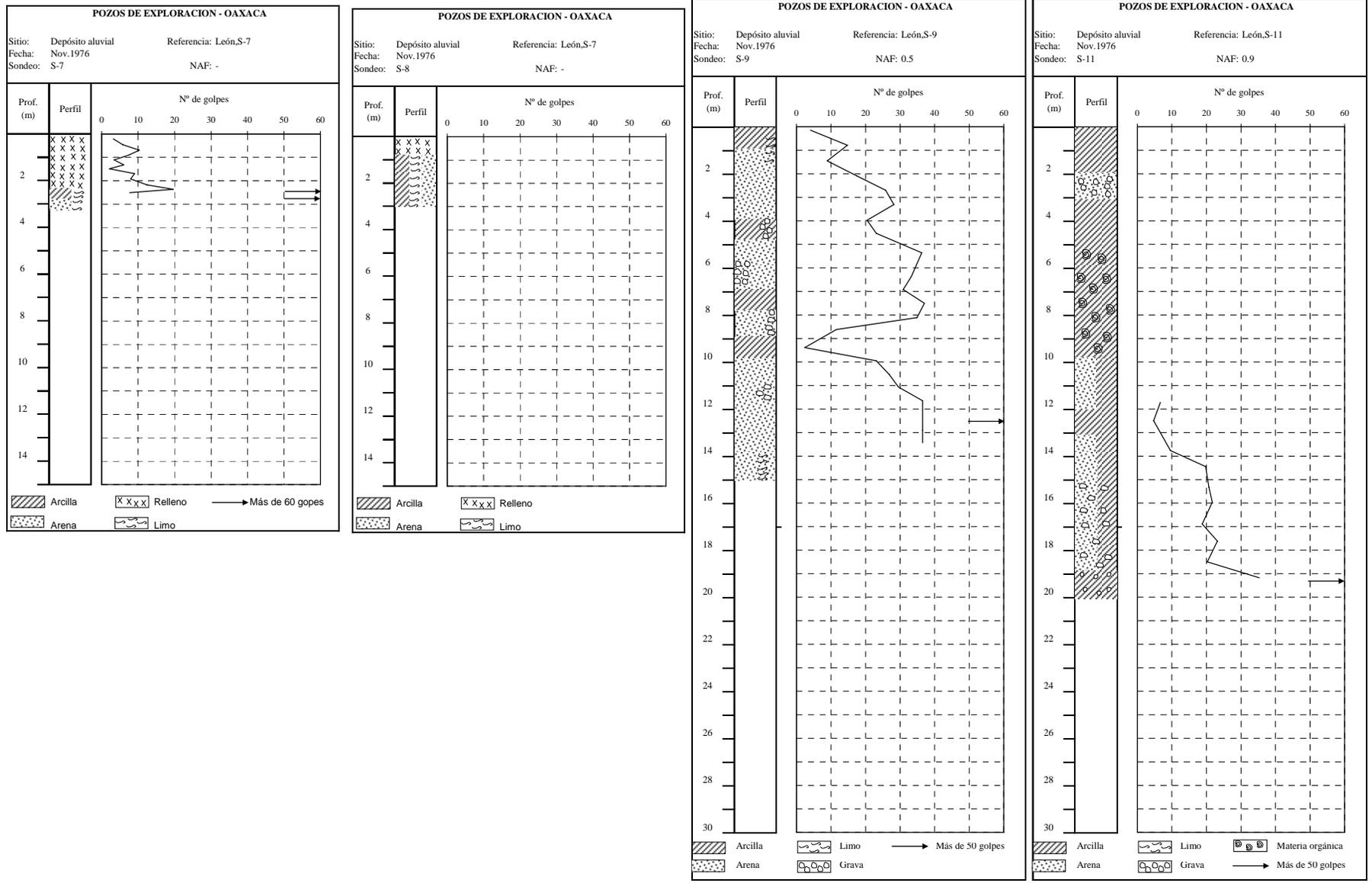


Figura 17. Sondeos de penetraciones estándar S-76, S-8, S-9 y S-11 (León, 1976).

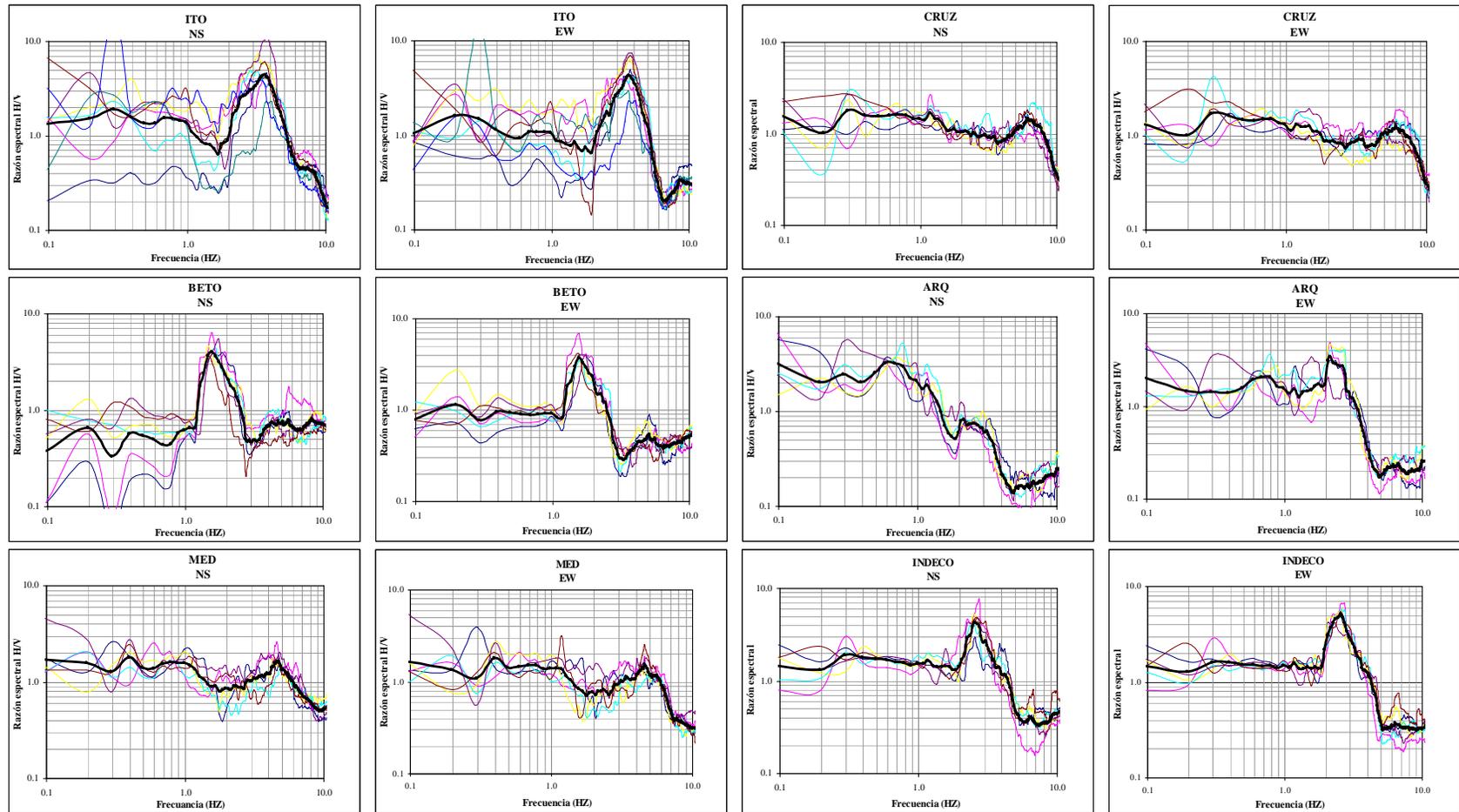


Figura 18. Funciones espectrales en las dos componentes de la medición de microtremores en los puntos ITO, CRUZ, BETO, ARQ, MED e INDECO. Funciones de transferencia empírica con la técnica HVNR. Línea delgada, FTE; líneas gruesa negra, FTEP. (Lermo et al., 1991).

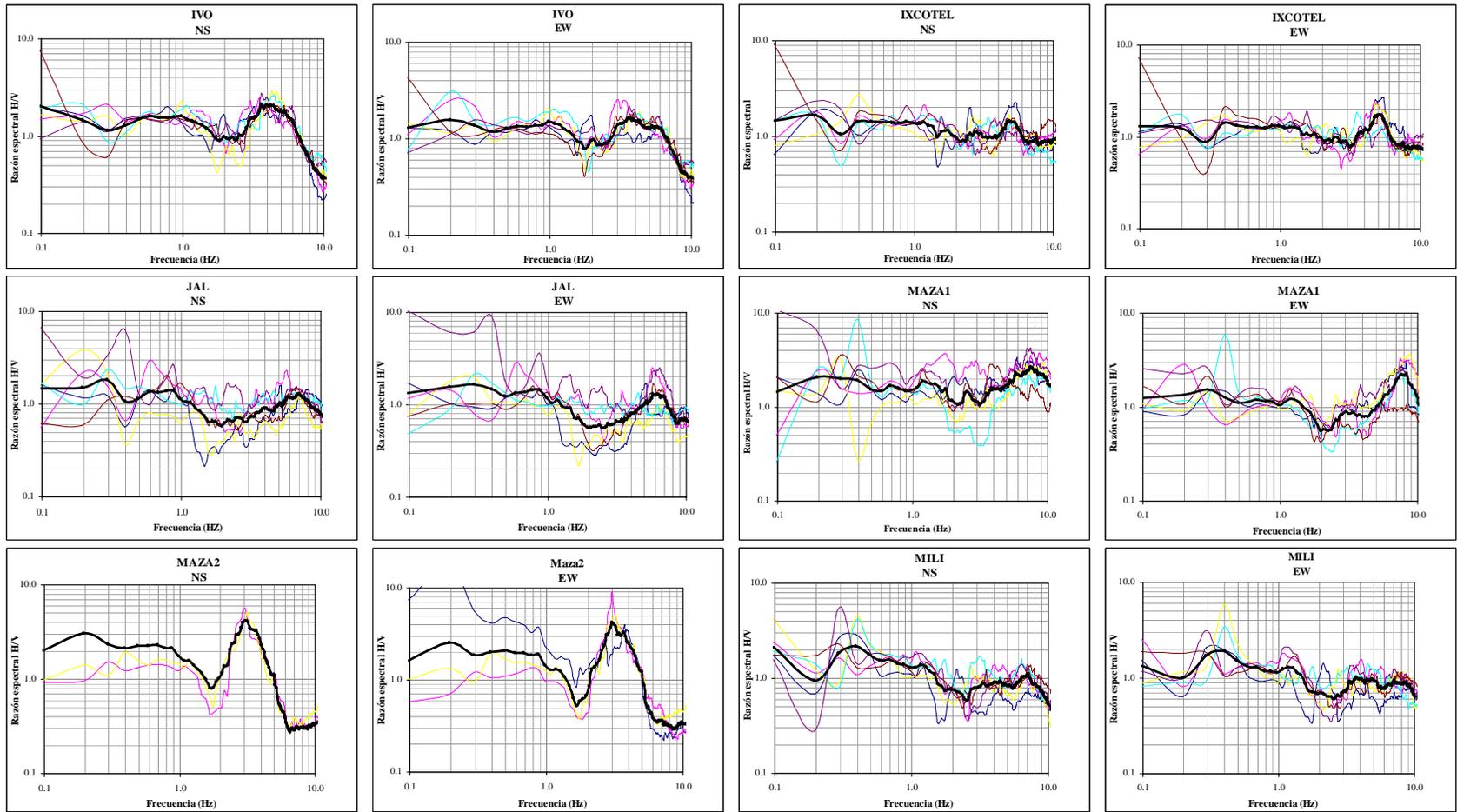


Figura 19. Funciones espectrales en las dos componentes de la medición de microtremores en los puntos IVO, IXCOTEL, JAL, MAZA1, MAZA2 Y MILI. Funciones de transferencia empírica con la técnica HVNR. Línea delgada, FTE; línea gruesa negra, FTEP. (Lermo et. al., 1991).

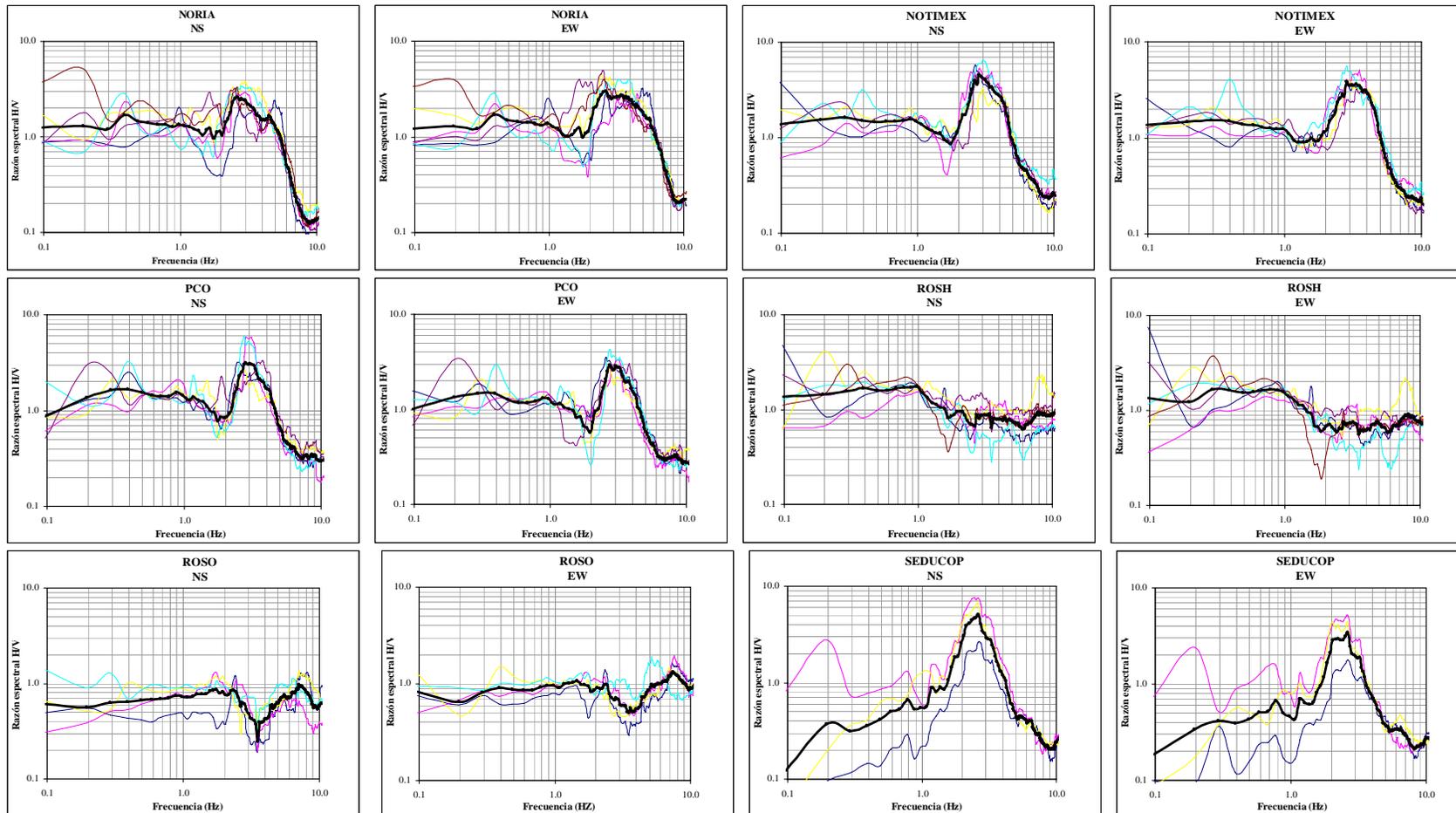


Figura 20. Funciones espectrales en las dos componentes de la medición de microtremores en los puntos NORIA, NOTIMEX, PCO, ROSH, ROSO Y SEDUCOP. Funciones de transferencia empírica con la técnica HVNR. Línea delgada, FTE; línea gruesa negra, FTEP. (Lermo et. al., 1991).

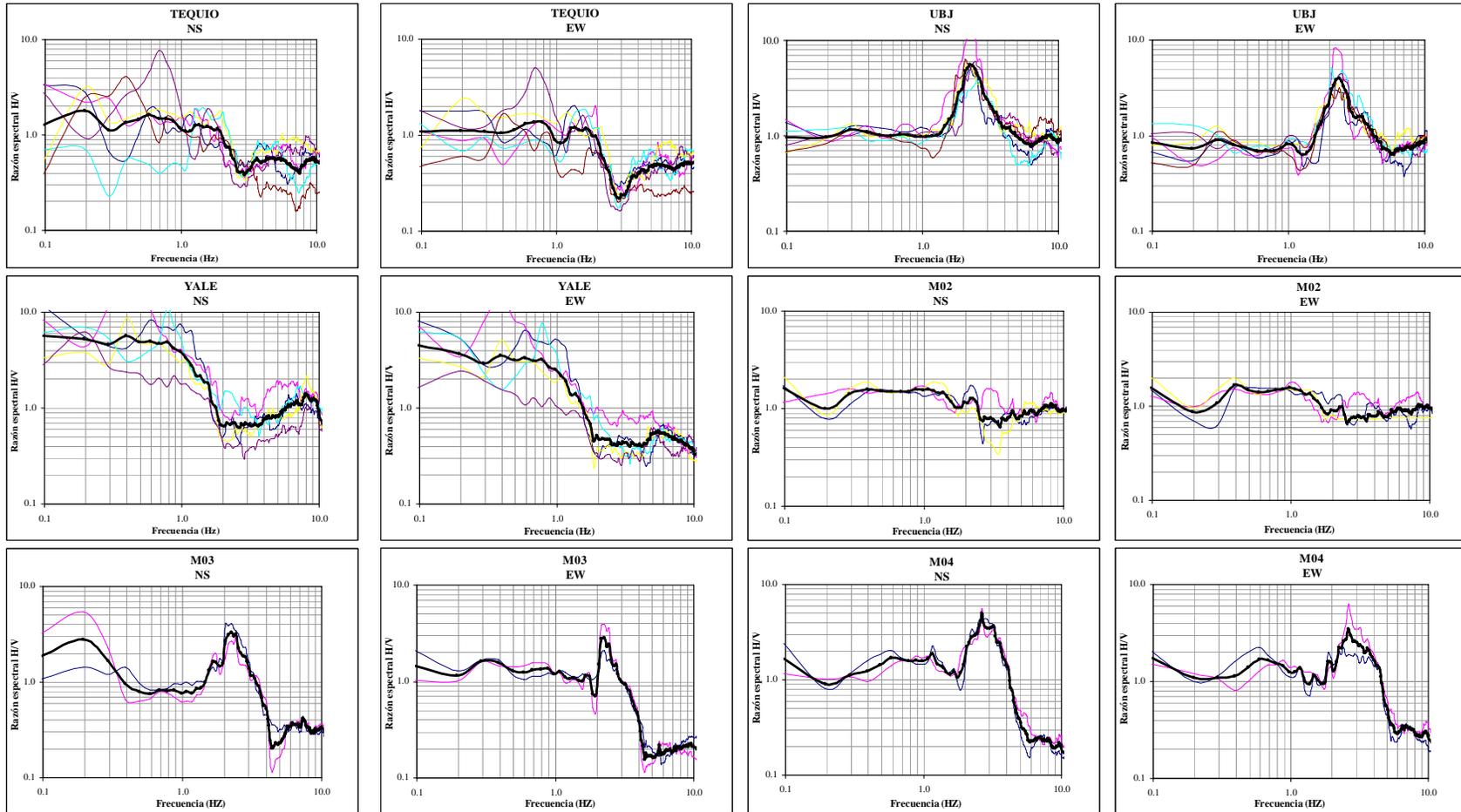


Figura 21. Funciones espectrales en las dos componentes de la medición de microtrémores en los puentes TEQUIO, UBJ, YALE, M02, M03 Y M04. Funciones de transferencia empírica con la técnica HVNR. Línea delgada, FTE; línea gruesa negra, FTEP. (Lermo et. al., 1991).

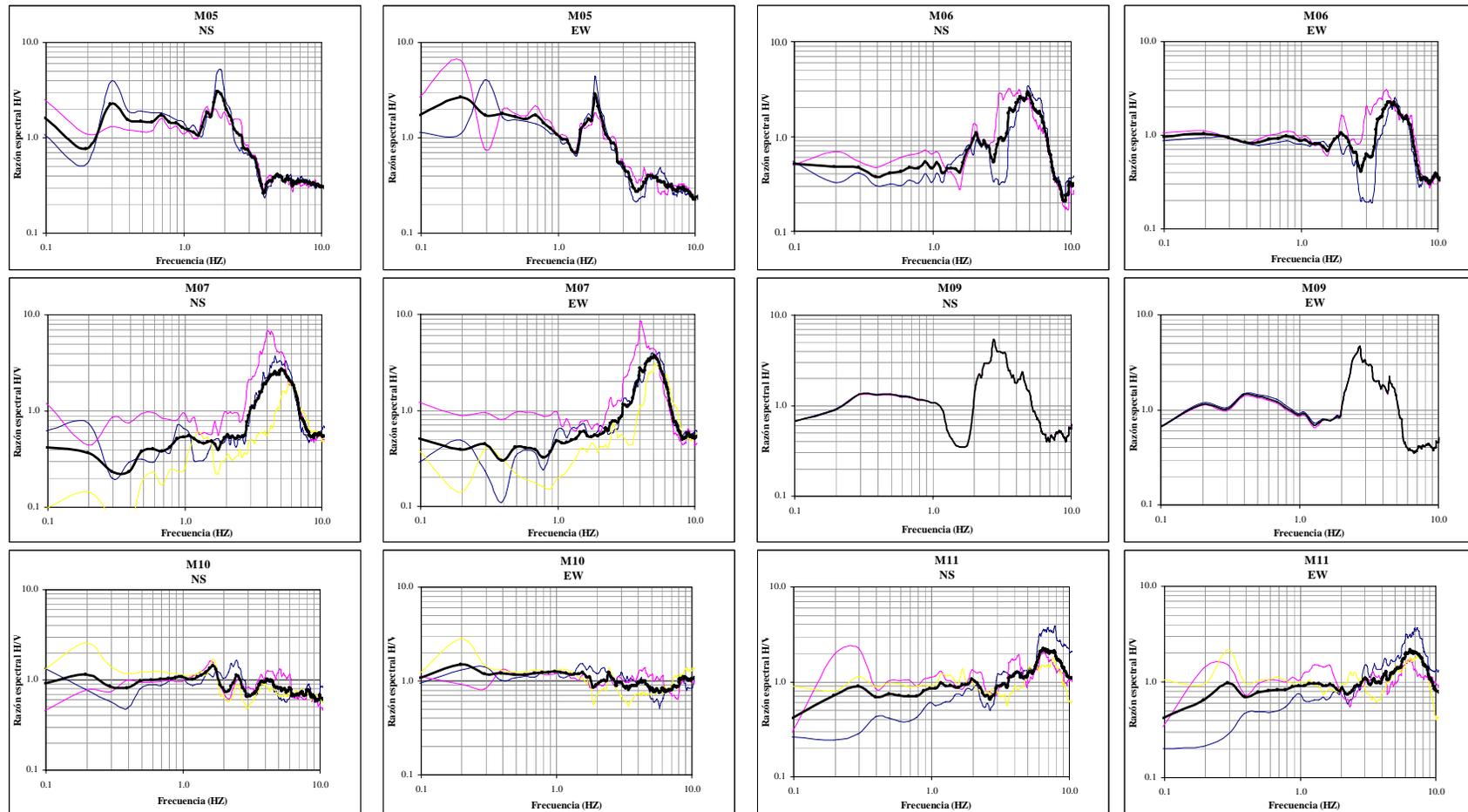


Figura 22. Funciones espectrales en las dos componentes de la medición de microtremores en los puntos M05, M06, M07, M09, M10 y M11. Funciones de transferencia empírica con la técnica HVNR. Líneas delgadas, FTE; líneas gruesas negras, FTEP. (Lermo et. al., 1991).

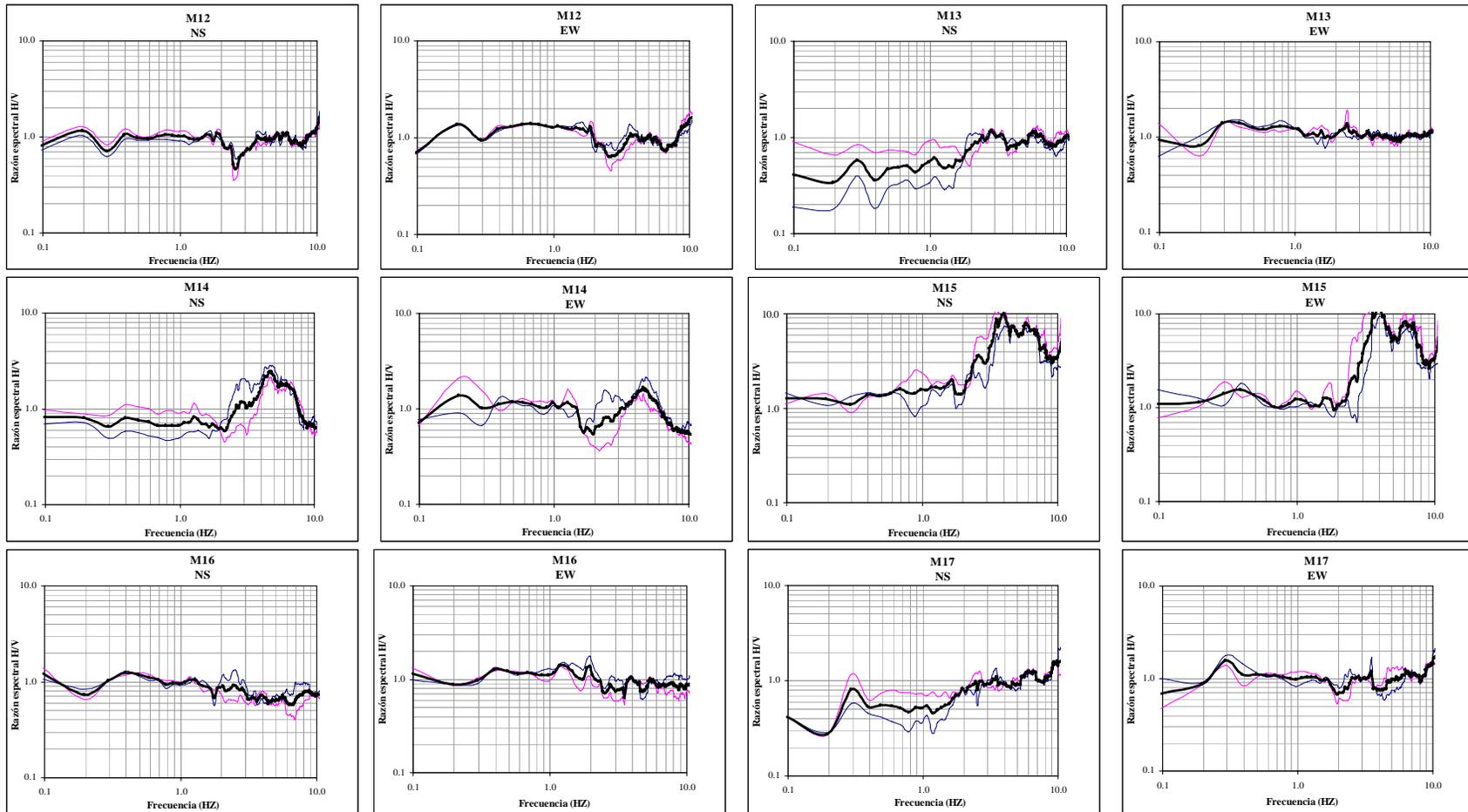


Figura 23. Funciones espectrales en las dos componentes de la medición de microtrémores en los puentes M12, M13, M14, M15, M16 y M17. Funciones de transferencia empírica con la técnica HVNR. Línea delgada, FTE; línea gruesa negra, FTEP. (Lermo et. al., 1991).

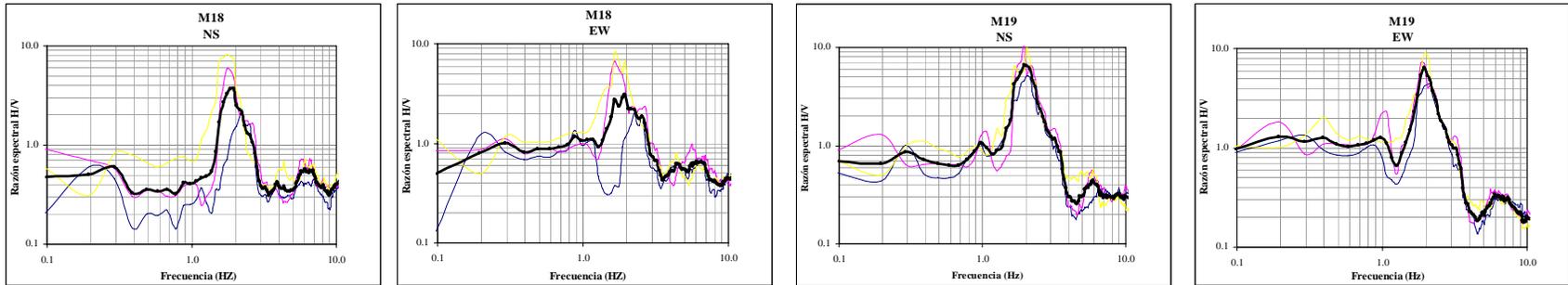


Figura 24. Funciones espectrales en las dos componentes de la medición de microtremores en los puntos M18 y M19. Funciones de transferencia empírica con la técnica HVNR. Línea delgada, FTE; línea gruesa negra, FTEP. (Lermo et. al., 1991).

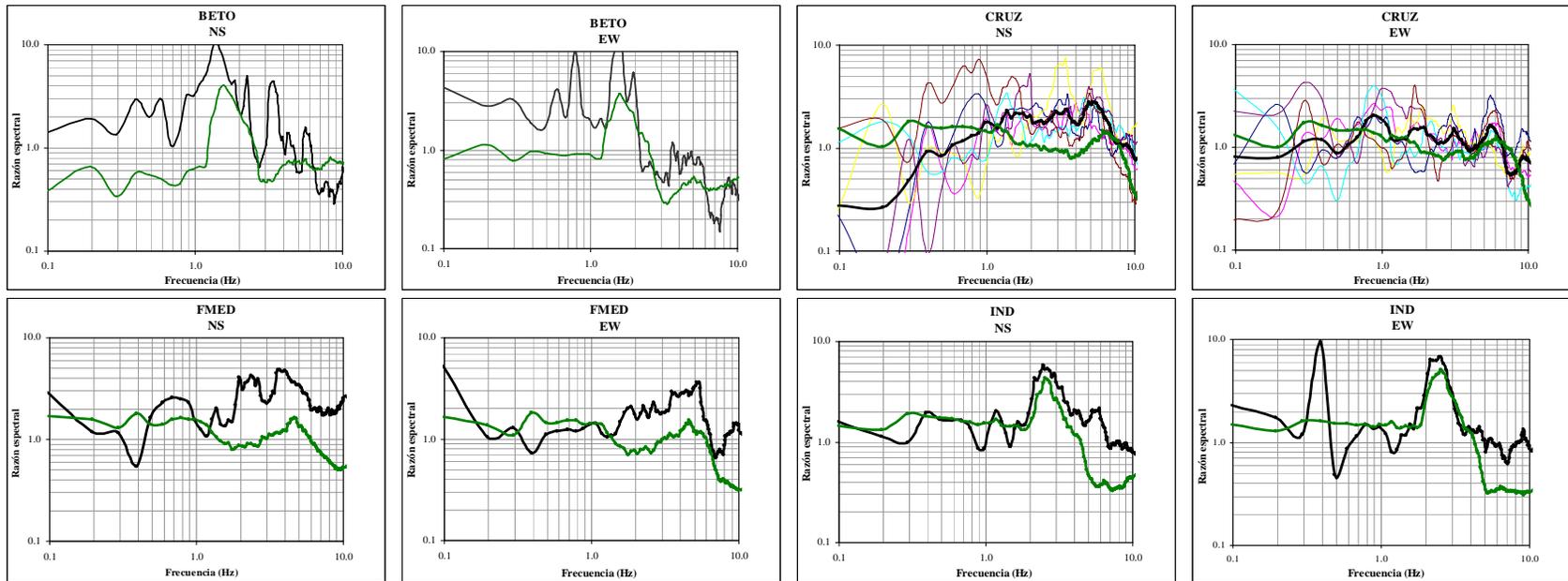


Figura 25. Funciones espectrales y comparación de las FTEP con sismos y microtremores en los puentes, BETO, CRUZ, FMED Y IND. Línea delgada, FTE con la técnica SSR; línea gruesa negra, FTEP con la técnica SSR y línea clara gruesa FTEP con microtremores. (Lermo et. al., 1991).

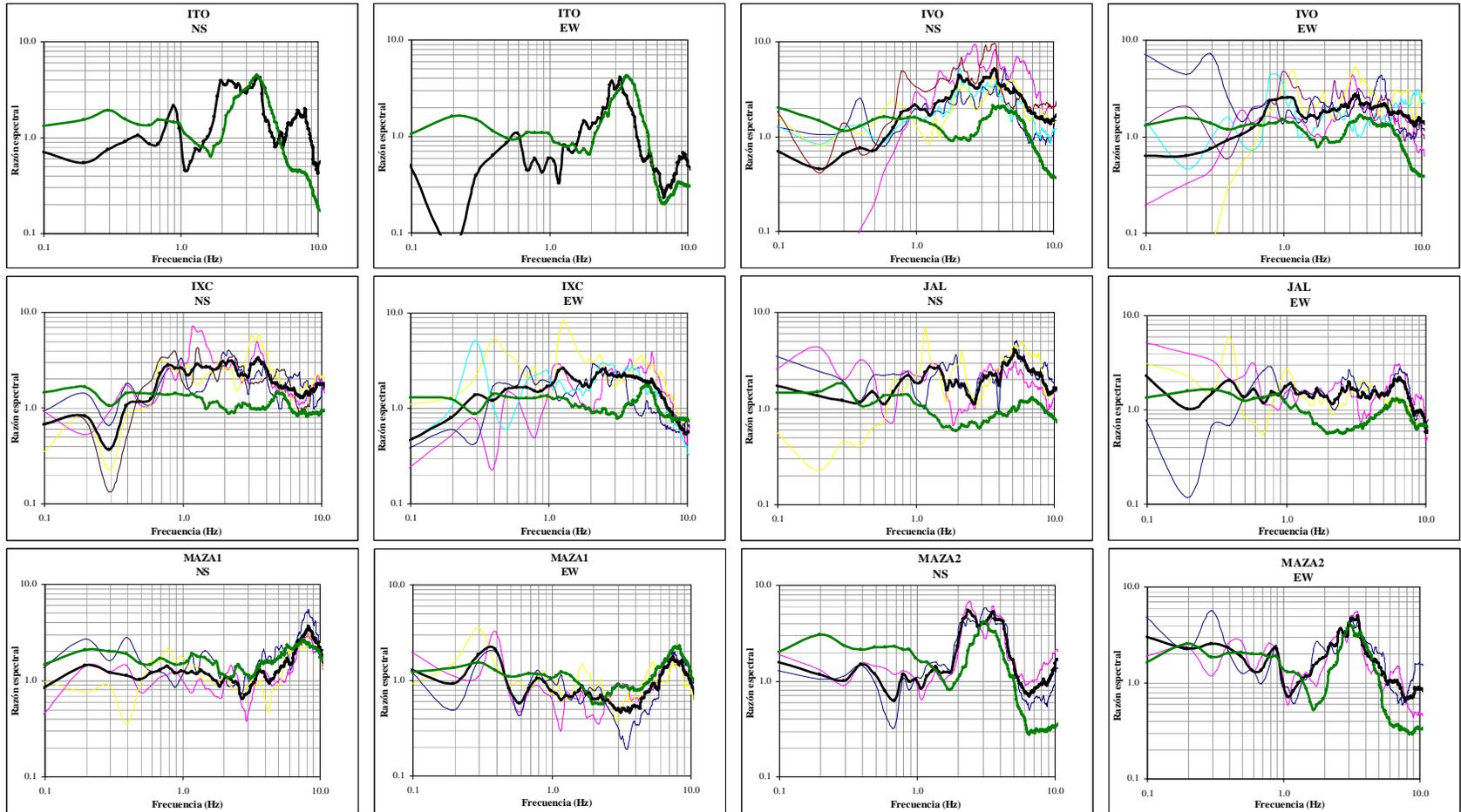


Figura 26. Funciones espectrales y comparación de las FTEP con sismos y microtremores en los puntos ITO, IVO, IXC, JAL, MAZA1 Y MAZA2. Línea delgada, FTEP con la técnica SSR; línea gruesa negra, FTEP con la técnica SSR y línea clara gruesa FTEP con microtremores. (Lermo et. al., 1991).

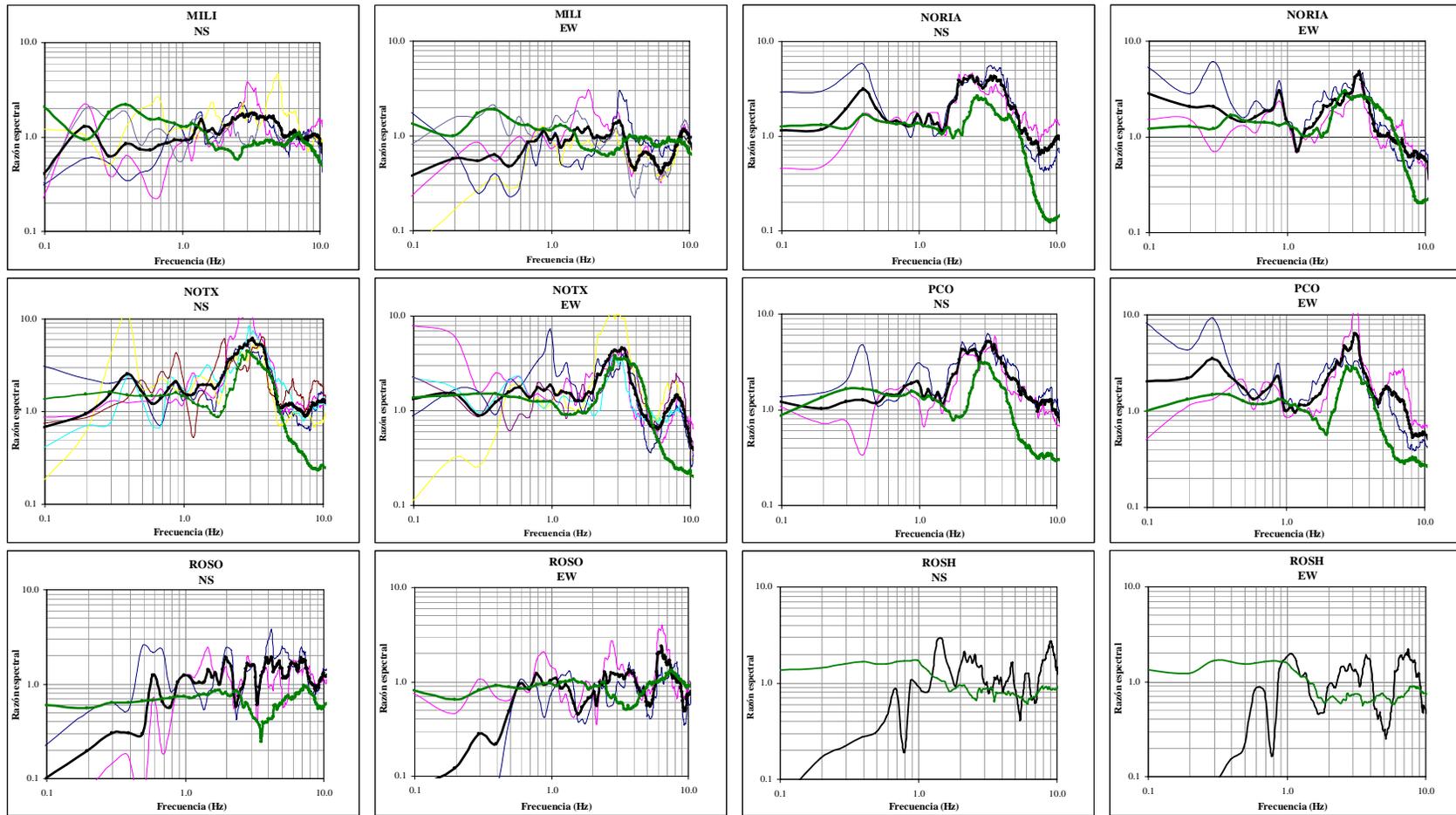


Figura 27. Funciones espectrales y comparación de las FTEP con sismos y microtremores en los puntos MILI, NORIA, NOTX, PCO, ROSO Y ROSH. Línea delgada, FTEP con la técnica SSR; línea gruesa negra, FTEP con la técnica SSR y línea clara gruesa FTEP con microtremores. (Lermo et. al., 1991).

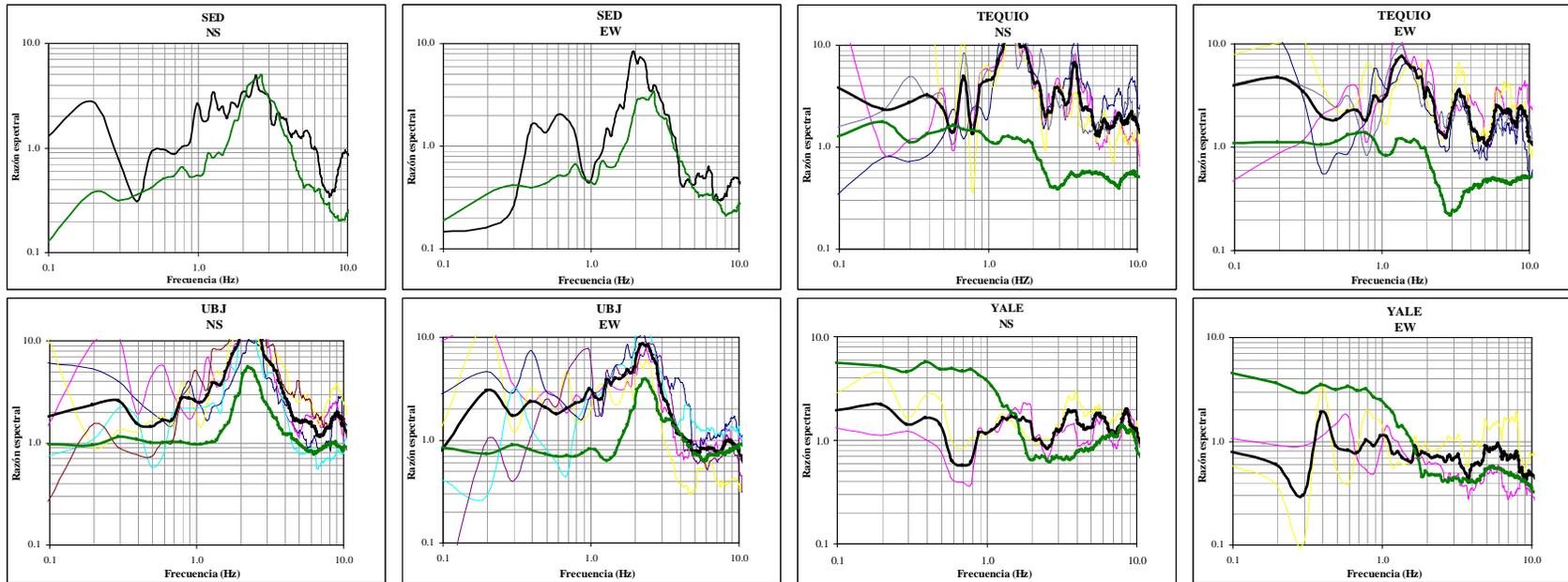


Figura 28. Funciones espectrales y comparación de las FTEP con sismos y microtremores. Línea delgada, FTE con la técnica SSR; línea gruesa negra, FTEP con la técnica SSR y línea clara gruesa FTEP con microtremores. (Lermo et. al., 1991).

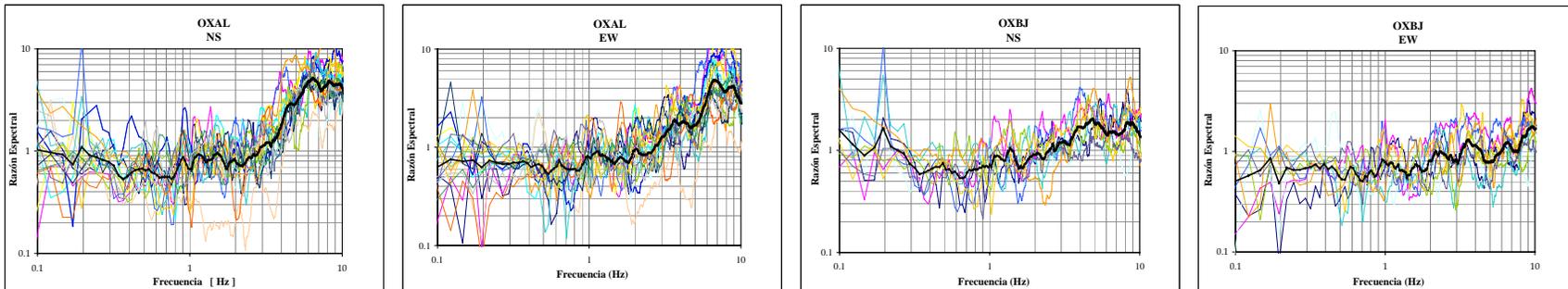


Figura 29. Funciones espectrales de las estaciones OXAL, OXBJ de la red fija. Línea delgada, FTE con la técnica SSR; línea gruesa negra, FTEP con la técnica SSR.

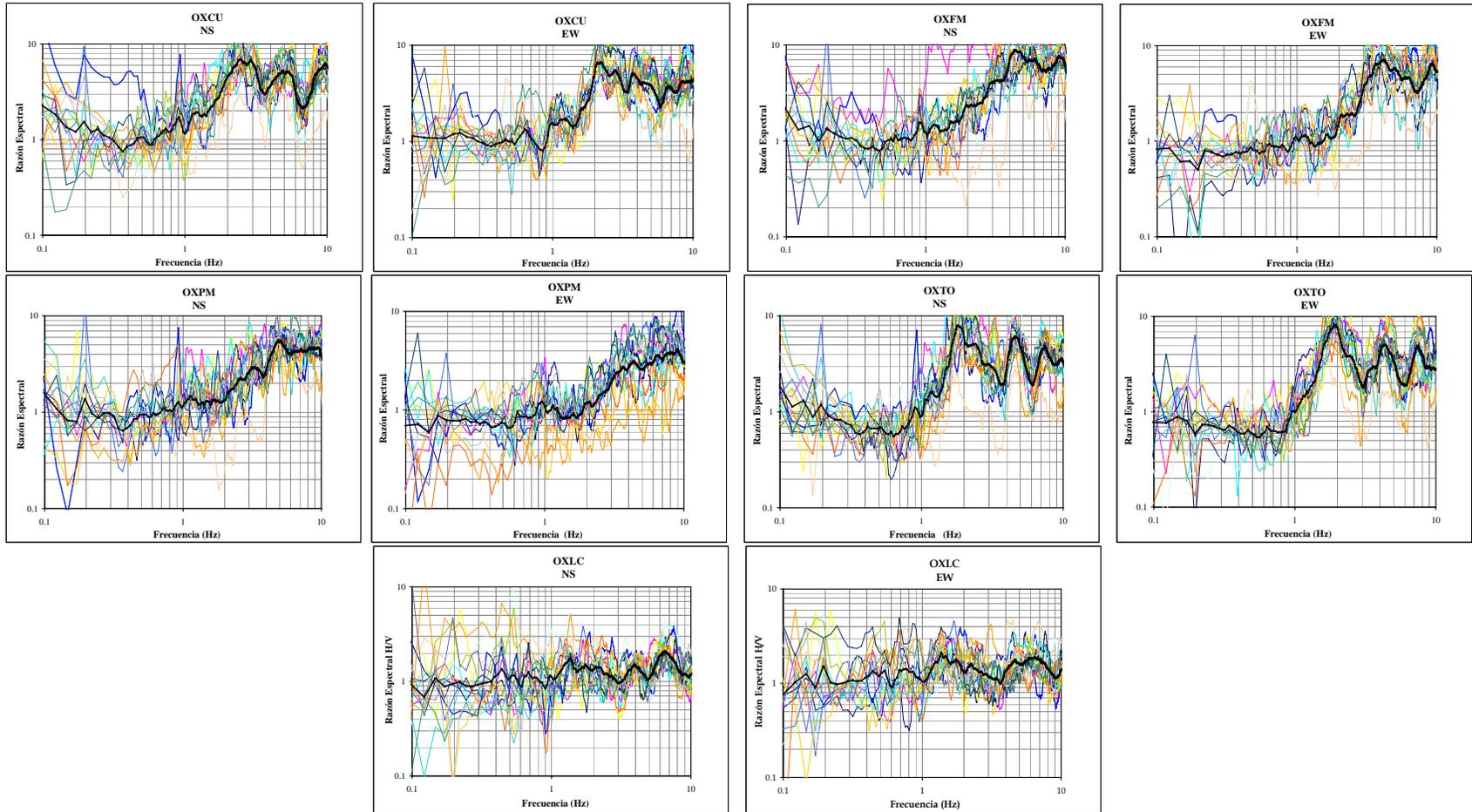


Figura 30. Funciones espectrales de las estaciones OXCU, OXFM, OXPM, OXTO Y OXLC de la red fija. Línea delgada, FTE con la técnica SSR; línea gruesa negra, FTEP con la técnica SSR.

Tabla 1. Sismos débiles y fuertes registrados en la red acelerográfica de Oaxaca

			Estaciones	OAXM	OXLC	OXPM	OXBJ	OXAL	OXCUC	OXTOT
			Latitud	17.084	17.065	17.061	17.067	17.061	17.049	17.078
			Longitud	96.716	96.703	96.717	96.744	96.725	96.713	96.744
			Tipo de suelo	Aluvial	Roca	Arcilla	Arcilla	Arcilla	Arcilla	Aluvial
Sismos			Eventos							
Tipo	Fecha	MS								
Sismos fuertes	07/06/2002	5.6	1	1	1	1	1	1	1	1
	27/08/2002	4.9	1	1	1	1	1	1	1	1
	13/01/2004	5.1	1	1	1		1	1	1	1
	13/01/2004	5.5	1	1	1		1	1	1	1
	17/01/2004	4.7	1	1	1		1	1	1	1
	18/02/2004	4.3	1	1	1		1	1	1	1
	19/01/2006	4.2	1	1		1	1	1	1	1
	08/06/2006	4.2	1	1	1		1	1	1	1
	19/08/2006	5.5	1	1	1	1	1	1	1	1
	08/11/2006	5.1	1	1	1	1	1	1	1	1
	14/02/2007	4.6		1		1	1	1	1	1
	15/03/2007	5.1	1	1		1	1	1	1	1
	04/05/2007	4.8	1	1	1	1	1	1	1	1
	02/06/2007	4.5	1	1	1		1	1	1	1
	06/07/2007	6.2		1	1	1	1	1	1	1
	20/08/2007	4.5	1	1	1		1	1	1	1
	15/09/2007	5.0	1	1	1		1	1	1	1
	01/10/2007	4.7	1	1	1		1	1	1	1

ANEXO C
CIUDAD DE ACAPULCO

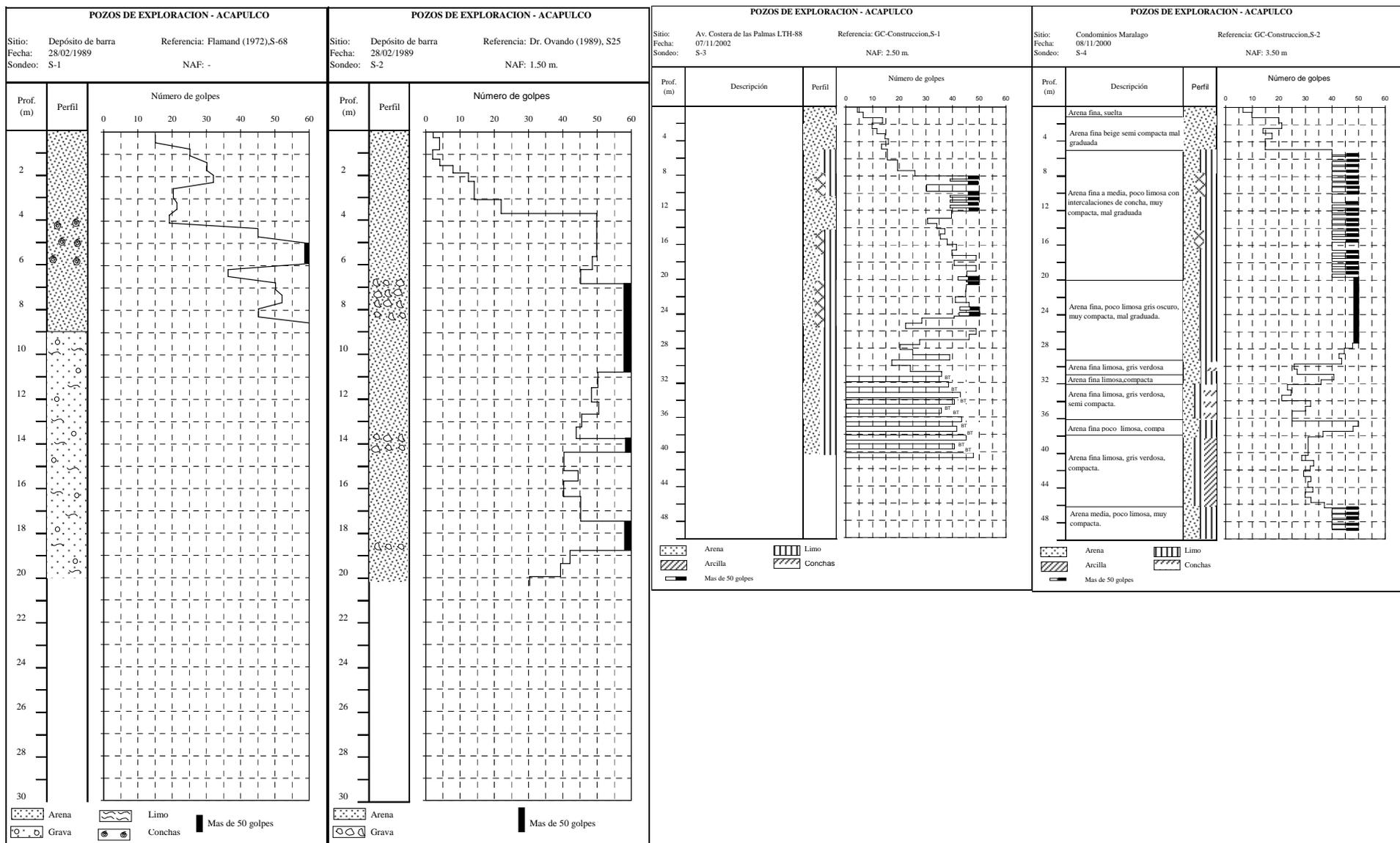


Figura 31. Sondeos S-1, S-2, S-3 y S-4 de penetración estándar recopilados en Acapulco.

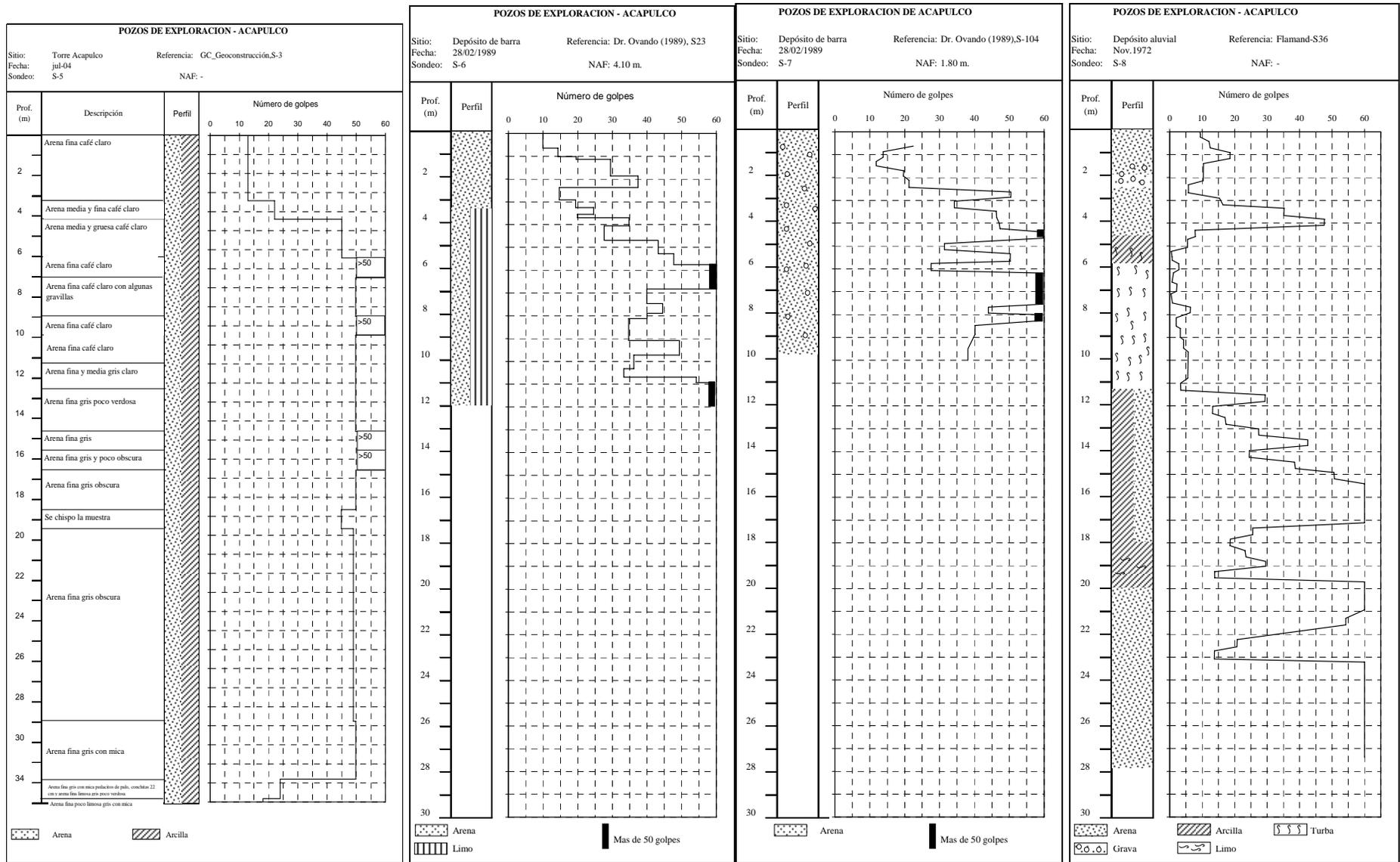


Figura 32. Sondeos S-5, S-6, S-7 y S-8 de penetración estándar recopilados en Acapulco.

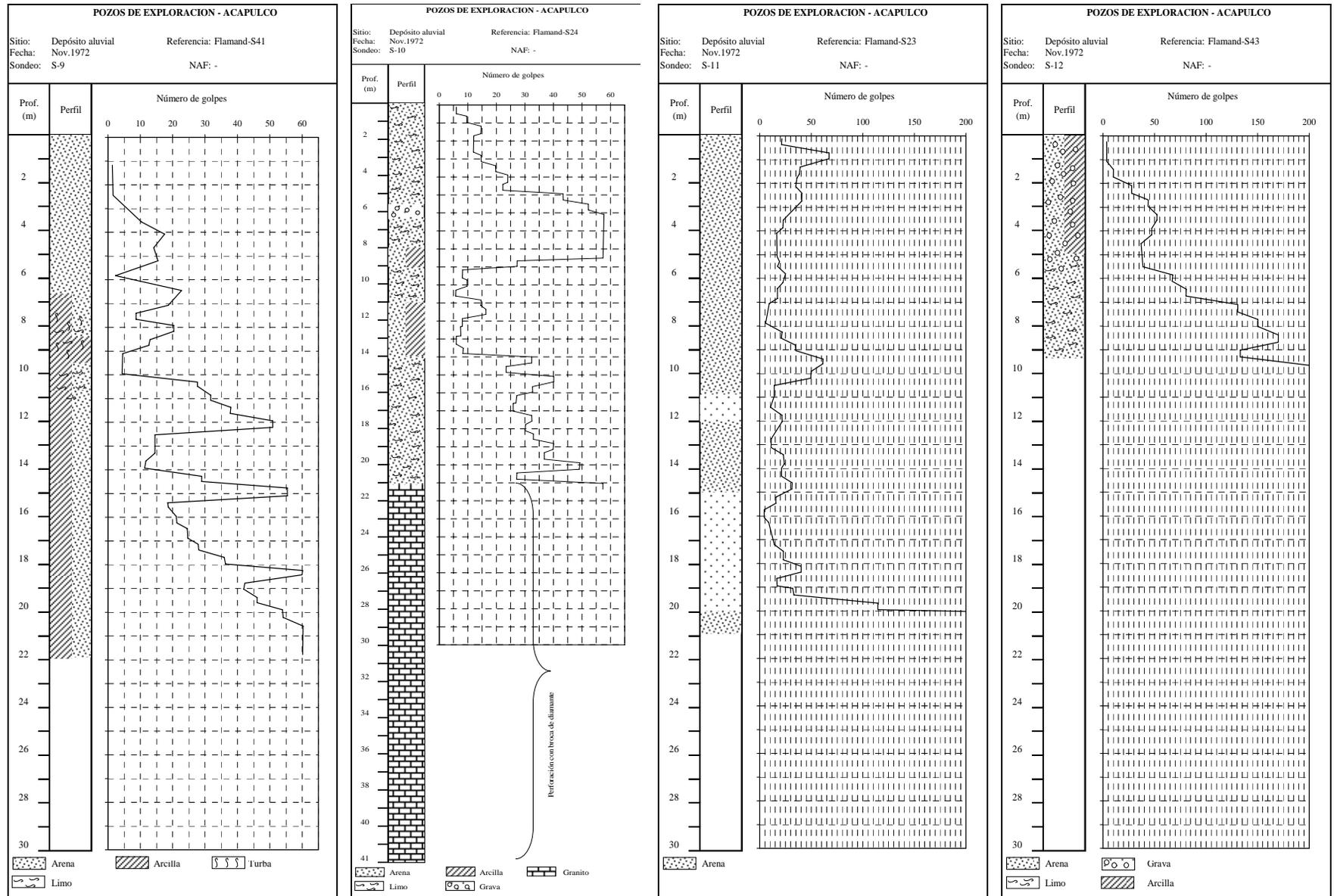


Figura 33. Sondeos S-9, S-10, S-11 y S-12 de penetración estándar recopilados en Acapulco.

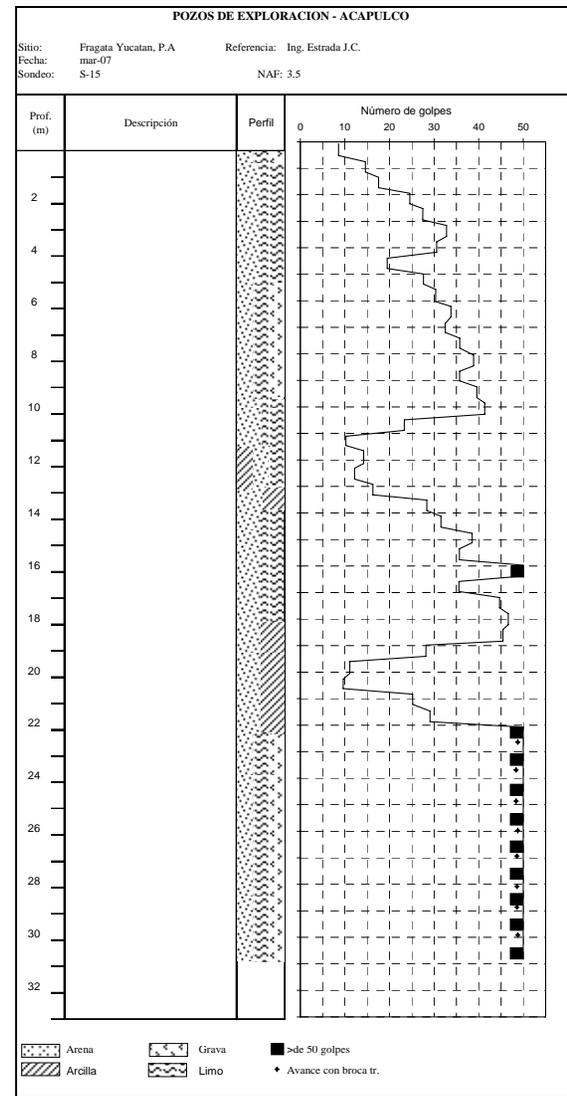
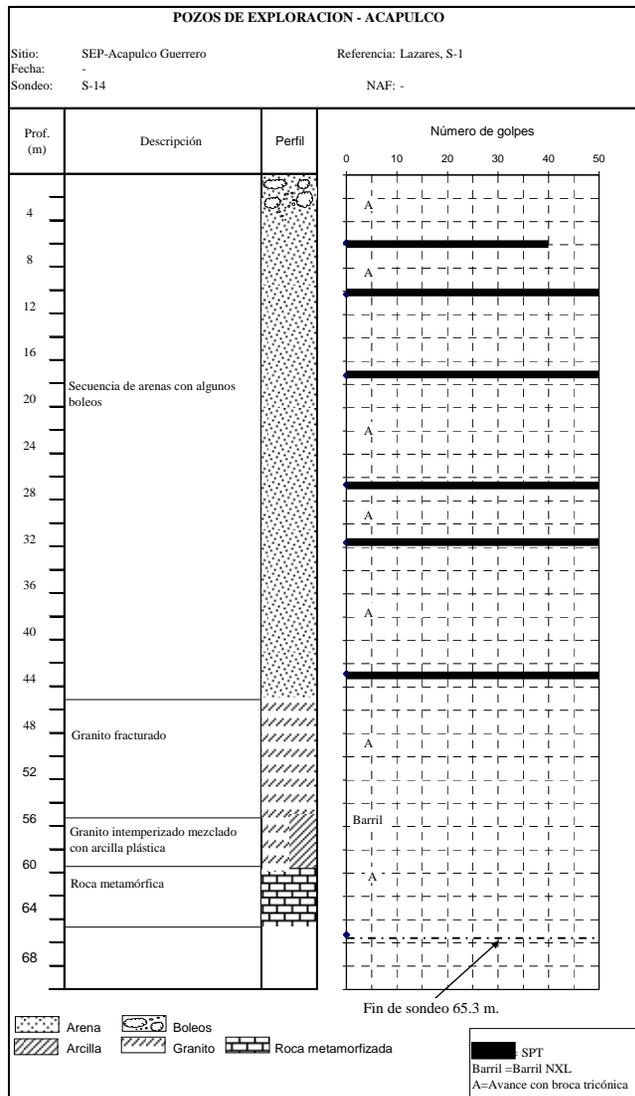
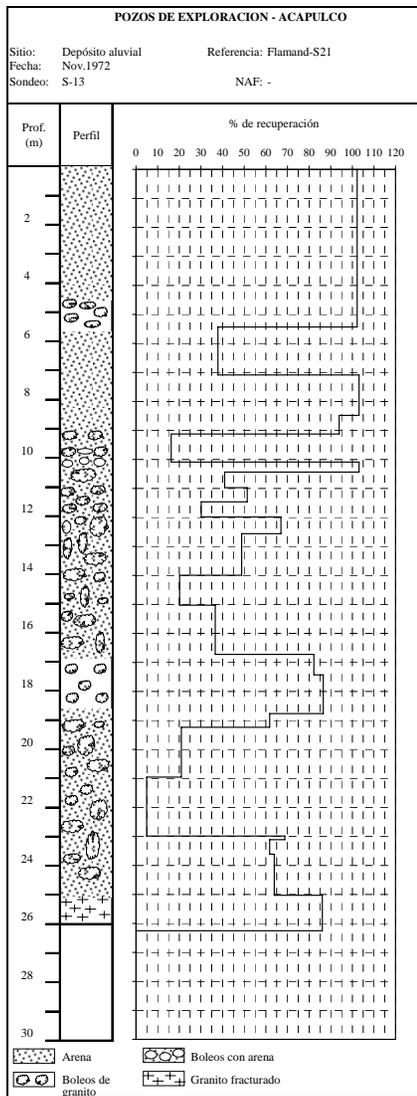


Figura 34. Sondeos S-13, S-14 y S-15 de penetración estándar recopilados en Acapulco.

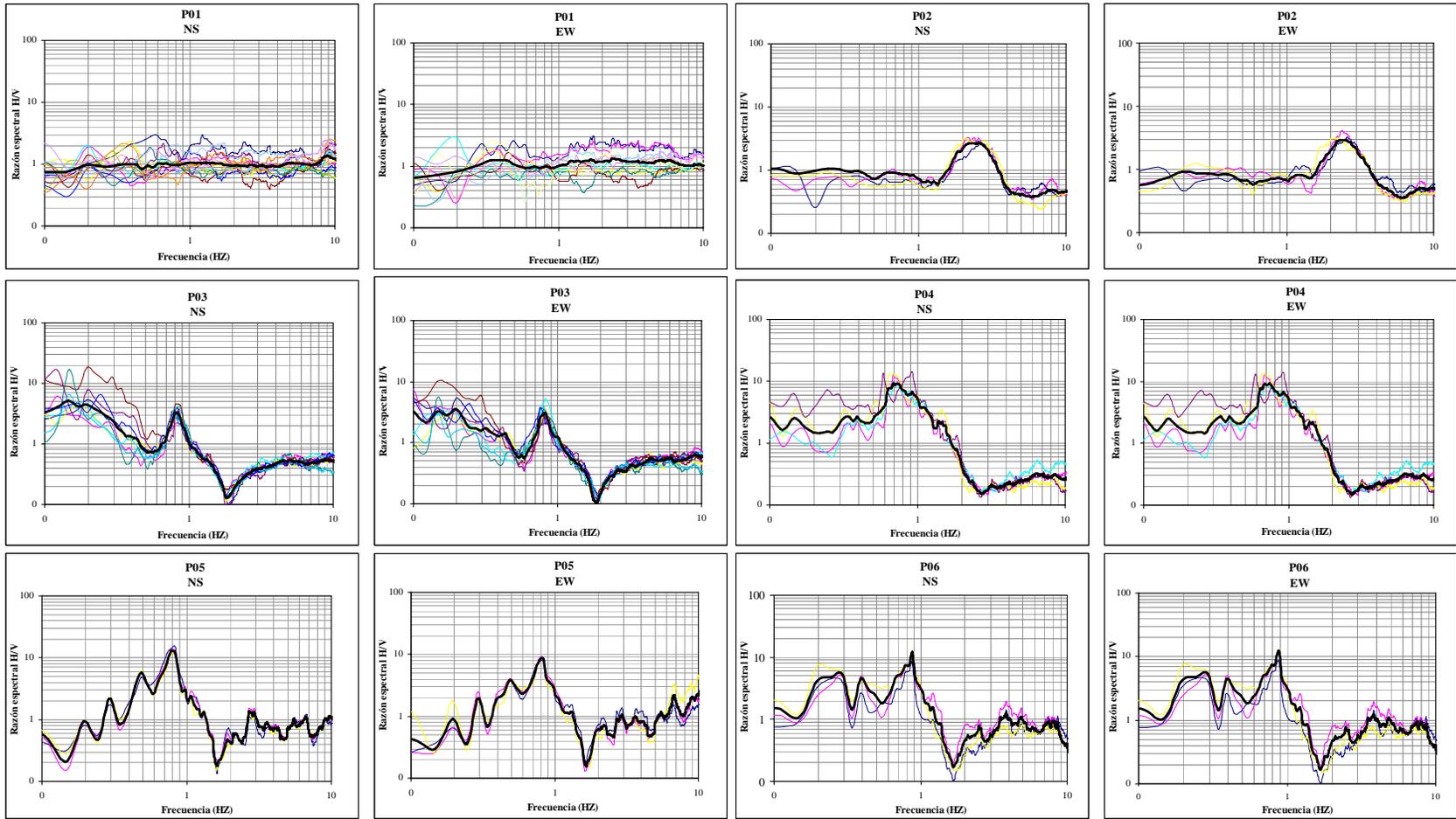


Figura 35. Funciones de transferencia empírica con la técnica HVNR. Líneas delgadas, FTE; líneas gruesas, FTEP. (Puntos del 01 al 06)

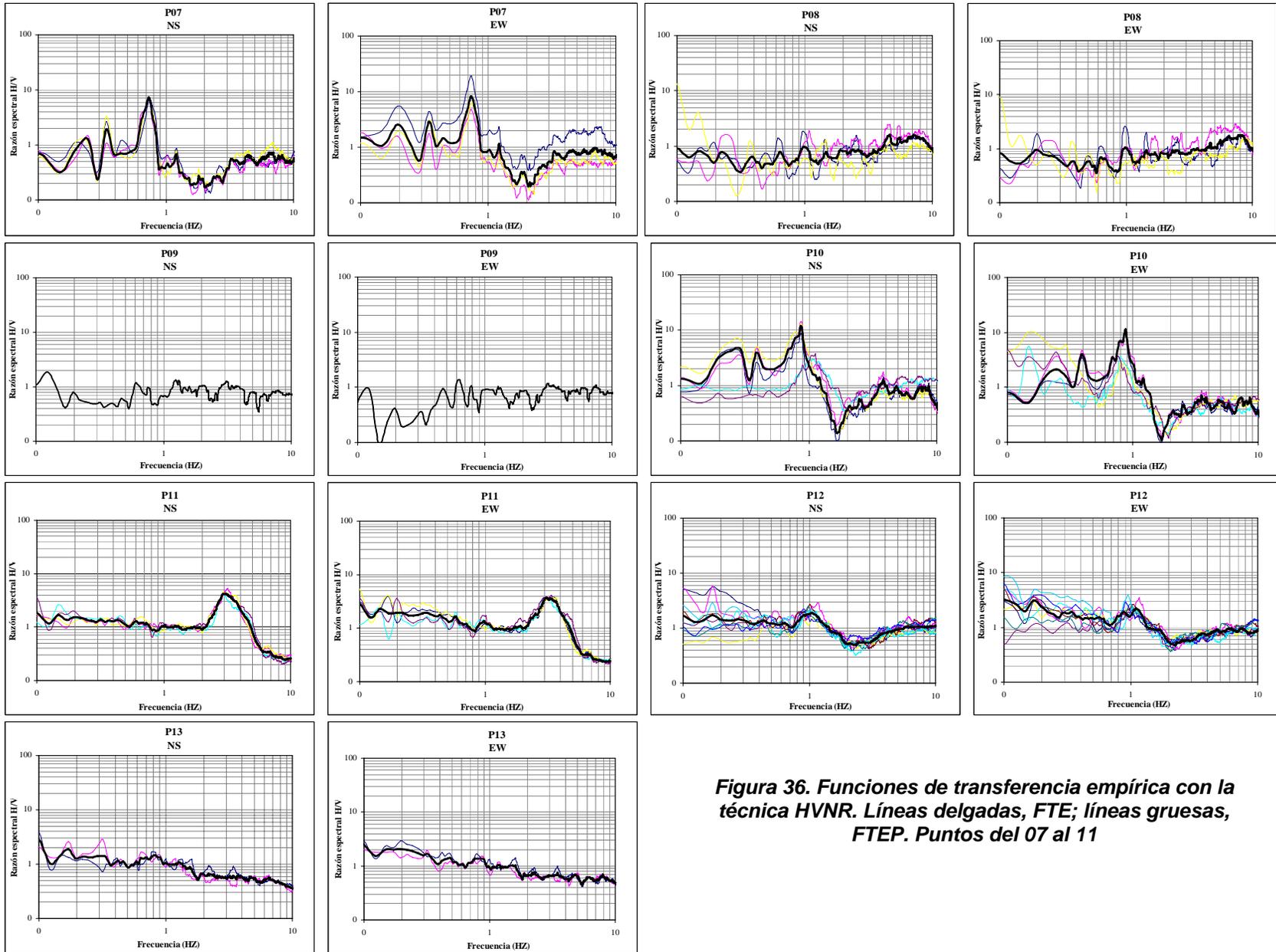


Figura 36. Funciones de transferencia empírica con la técnica HVNR. Líneas delgadas, FTE; líneas gruesas, FTEP. Puntos del 07 al 11

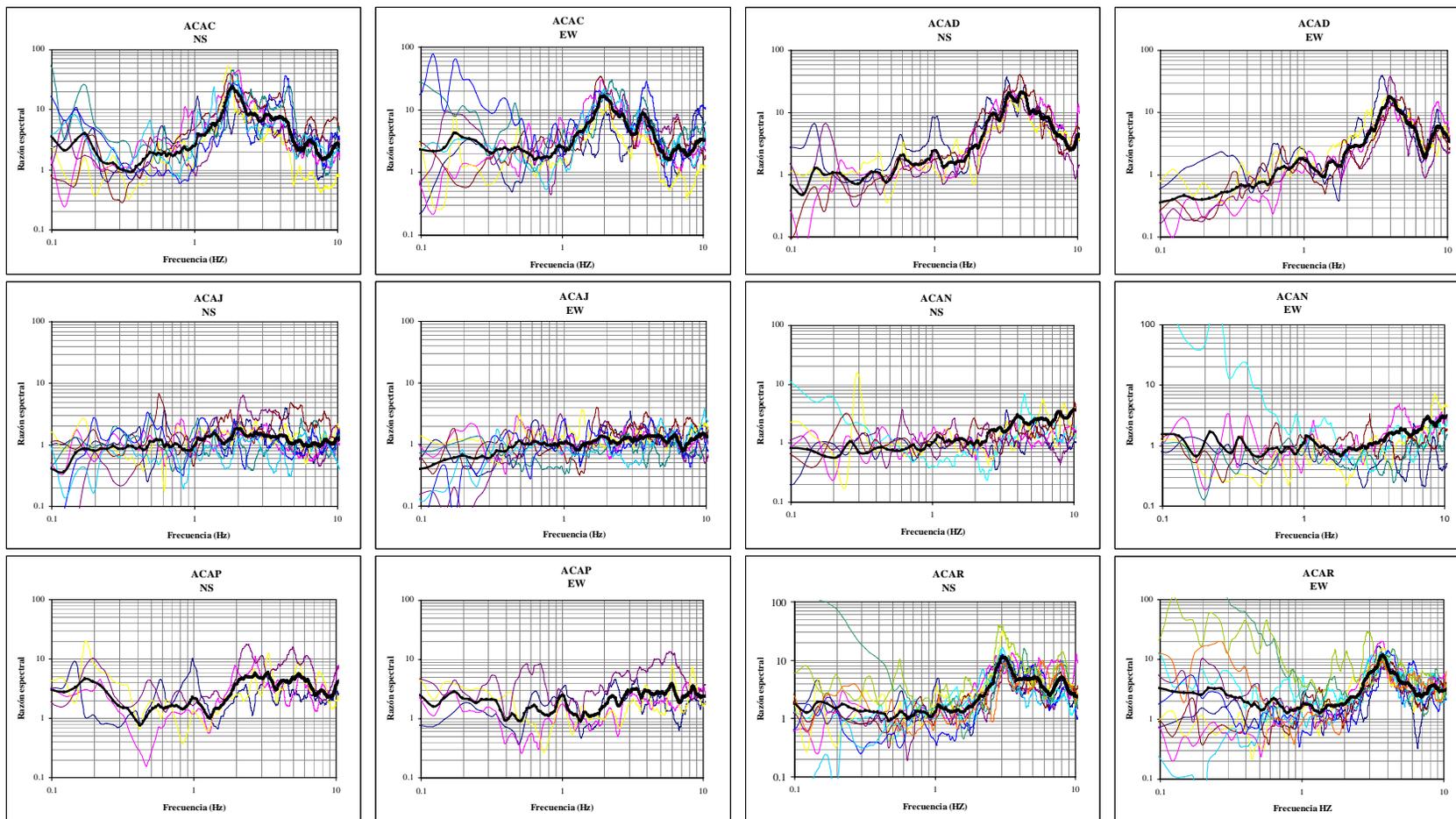


Figura 37. Funciones de transferencia empírica de las estaciones de la red de Acapulco con la técnica estándar. Líneas delgadas, FTE; Línea gruesa negra, FTEP para temblores fuertes y débiles.

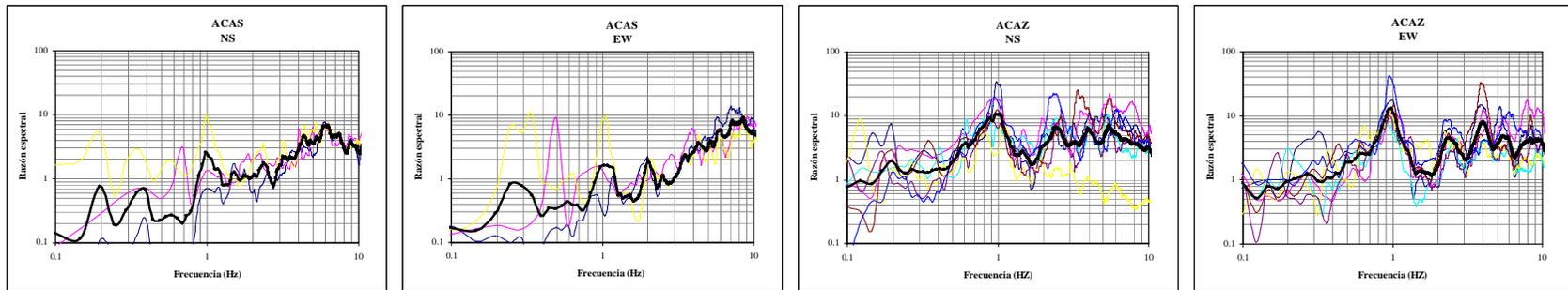


Figura 38. Funciones de transferencia empírica de las estaciones de la red de Acapulco con la técnica estándar. Líneas delgadas, FTE; Línea gruesa negra, FTEP para temblores fuertes y débiles.

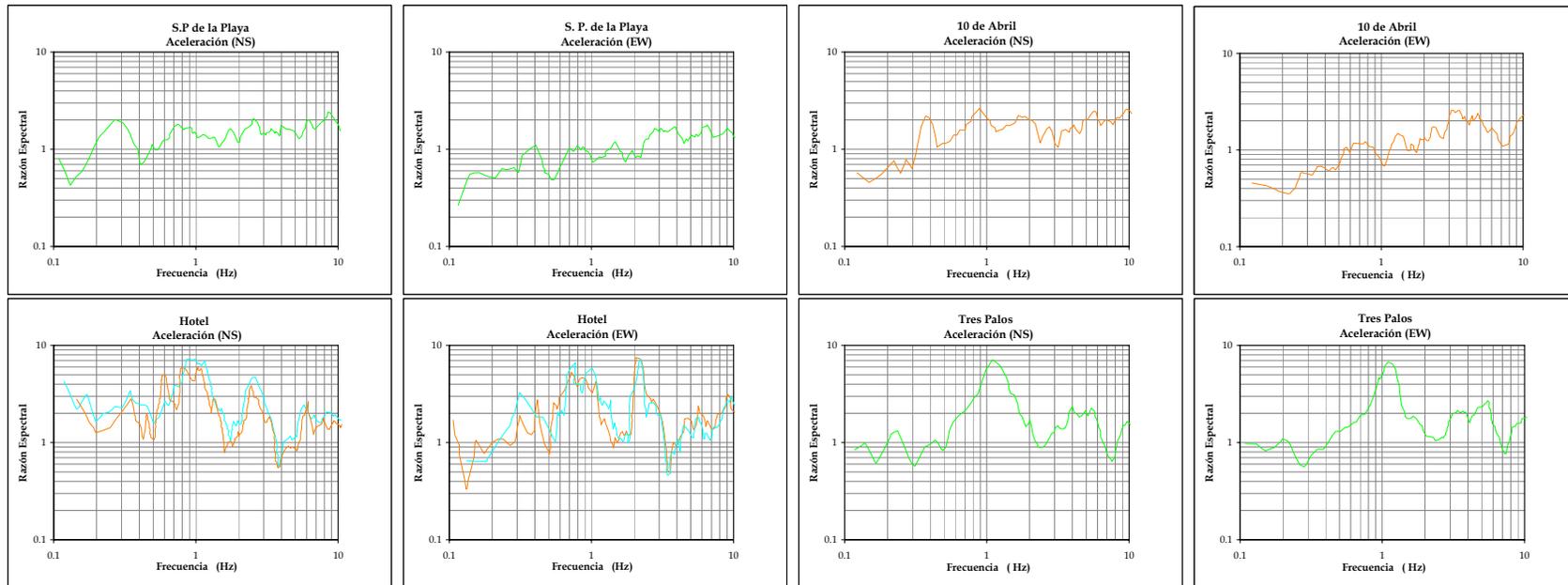


Figura 39. FTEP para las estaciones de la red sísmográfica temporal (F. Chávez, 1994)

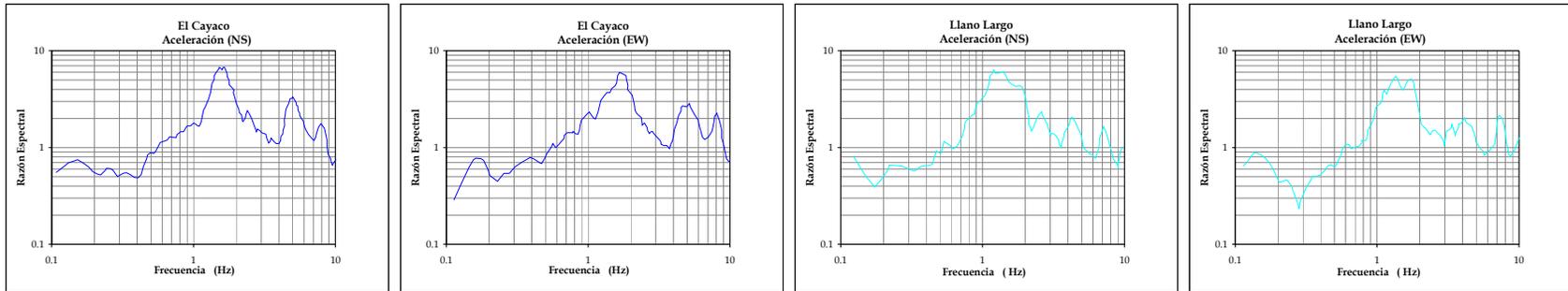


Figura 40. FTEP para las estaciones de la red sísmográfica temporal (F. Chávez, 1994)

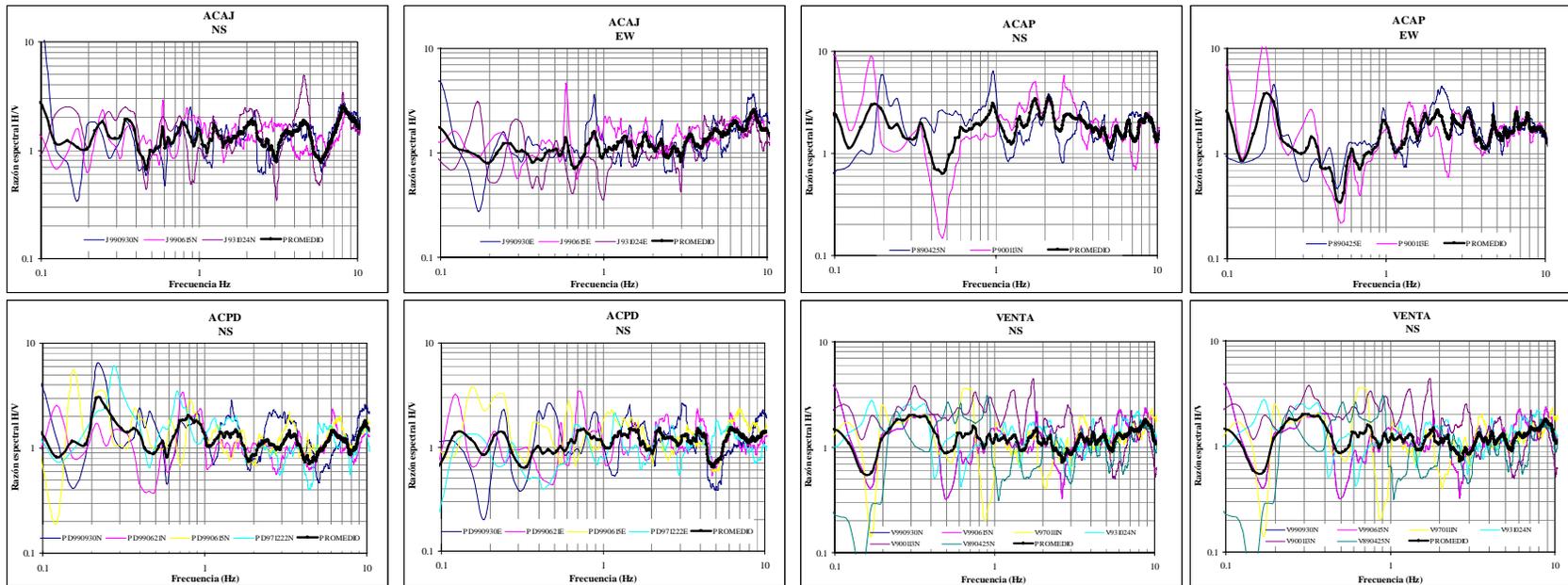


Figura 41. Funciones de transferencia con el método de Nakamura de las estaciones ubicadas en terreno firme. Líneas delgadas FTE; línea gruesa negra, promedio de las FTE.

Tabla 2. Sismos débiles y fuertes registrados en la red acelerográfica de Acapulco

			Estaciones	ACAC	ACAD	ACAJ	ACAN	ACAP	ACAR	ACAS	ACAZ	ACPD	VNTA
			Latitud	16.848	16.867	16.8731	16.866	16.836	16.899	16.858	16.787	16.867	16.923
			Longitud	99.851	99.88	99.8769	99.863	99.914	99.827	99.894	99.789	99.880	99.816
			Tipo de suelo	Arena-limo-arcilla	Limo arenoso	Roca	Granito alterado	Roca granítica	Aluvial	Aluvial	Depósito barra	Diana Pozo-Roca	Roca
Sismos			Eventos										
Tipo	Fecha	MS											
Sismos fuertes	25/04/1989	6.9	1	1				1	1	1	1		1
	02/05/1989	4.9	1	1					1		1		1
	13/01/1990	5.0		1		1	1	1		1			1
	24/10/1993	6.6		1	1	1		1		1			1
	11/01/1997	6.9	1	1					1		1	1	1
	22/12/1997	5.0	1	1								1	
	15/06/1999	6.5		1	1				1		1	1	1
	21/06/1999	5.8		1					1			1	
	30/09/1999	7.5	1	1	1				1		1	1	1
Sismos			Eventos										
Tipo	Fecha	Mc											
Sismos débiles	27/10/1999	4.20	1	1	1						1	1	1
	09/08/1998	4.50	1	1	1				1		1	1	1
	12/07/1998	4.80	1	1	1				1		1	1	1
	11/07/1997	4.50	1	1				1		1	1	1	1
	22/03/1997	4.60	1	1		1		1		1	1	1	1
	03/09/1996	4.90	1	1	1			1		1			1
	13/03/1996	5.10	1	1				1		1	1	1	1
	15/05/1995	4.60	1	1	1	1		1		1	1	1	1
	15/05/1992	4.46	1	1	1	1		1		1		1	1
	28/05/1991	4.90	1	1	1			1	1		1		1
	25/03/1991	4.70	1	1				1	1		1		1
	10/07/1990	4.80	1	1				1		1			1
	11/06/1990	4.30		1				1		1			1
	11/05/1990	5.30	1	1				1	1		1		1
	04/04/1990	5.00	1	1				1	1		1		1
	21/03/1990	4.00	1	1				1	1		1		1
	06/03/1990	4.40	1	1					1		1		1
	09/11/1989	5.10		1		1	1	1		1	1		1
	17/08/1989	4.80	1	1				1		1	1		1
	24/04/1989	4.10	1	1				1	1		1		1
19/09/1985	7.50						1		1			1	
21/09/1985	8.10						1		1			1	

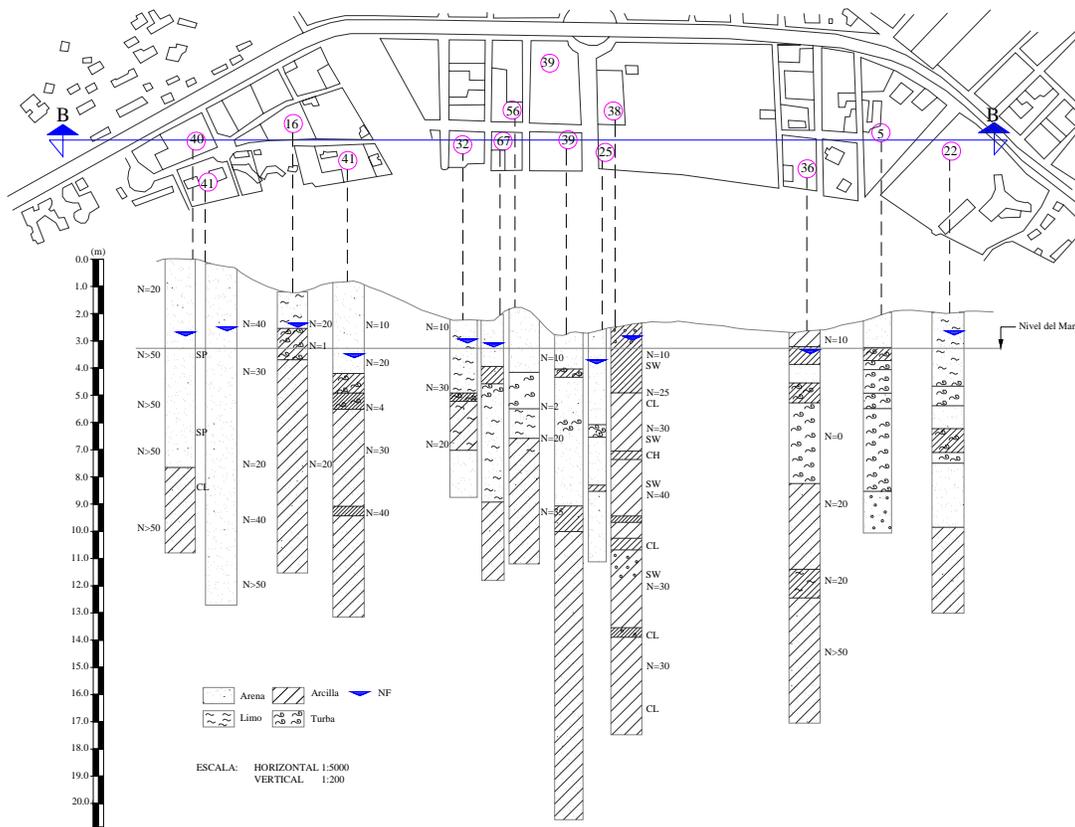
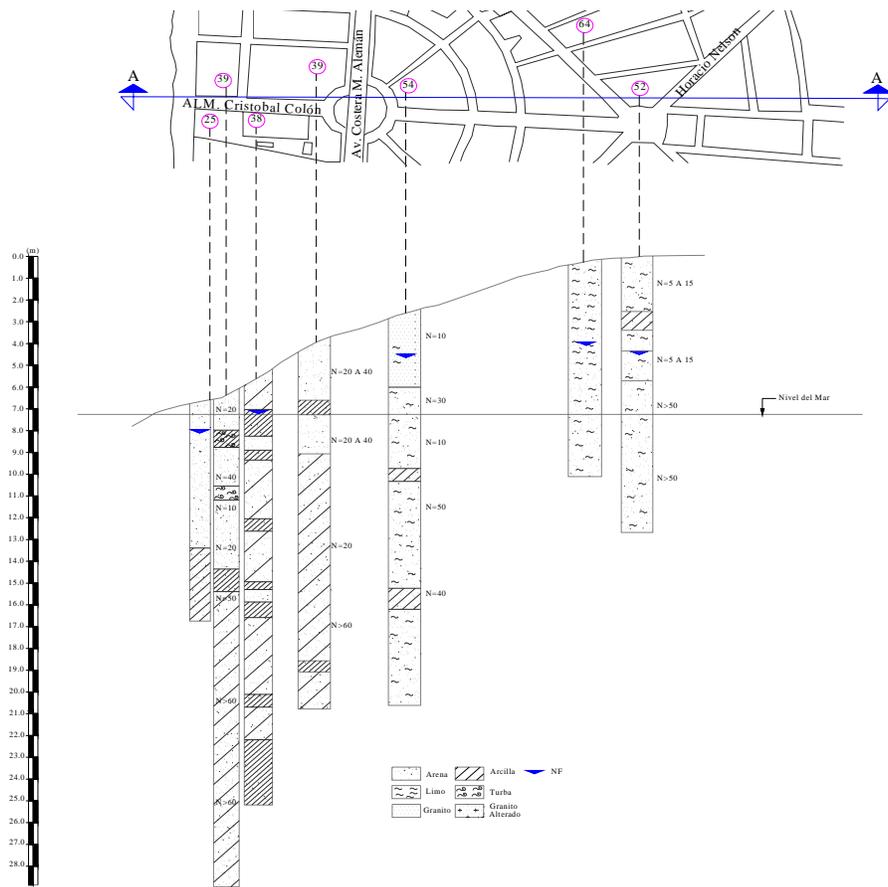


Figura 42. Cortes estratigráficos A-A', B-B'. (Flamand et. al., 1972)

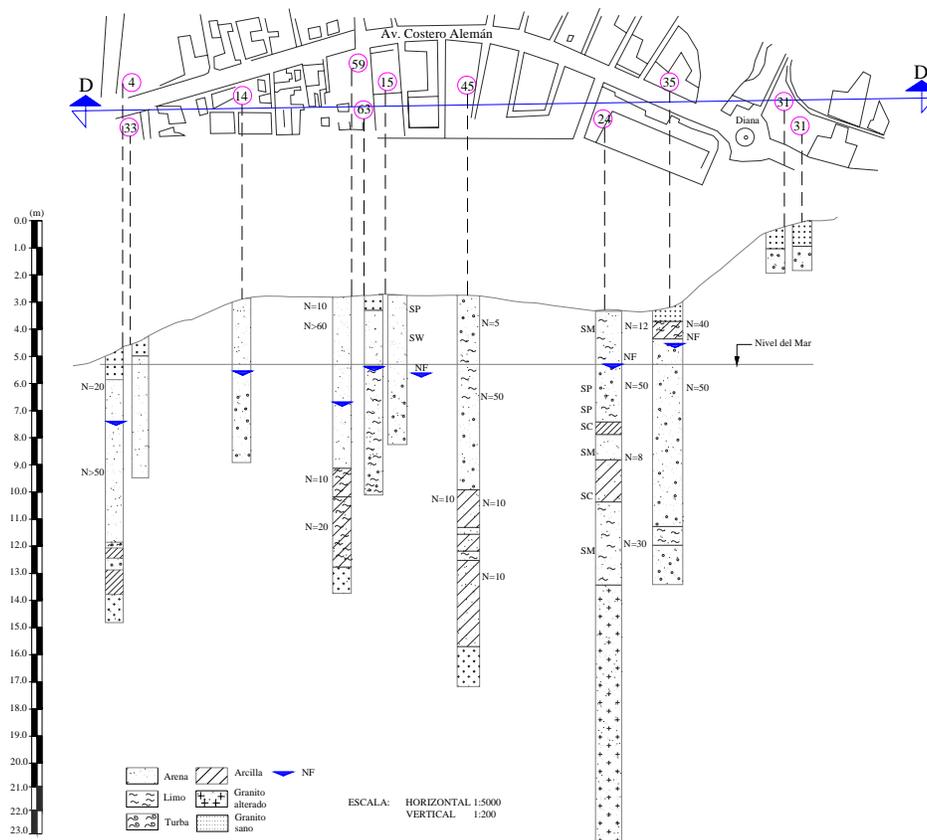
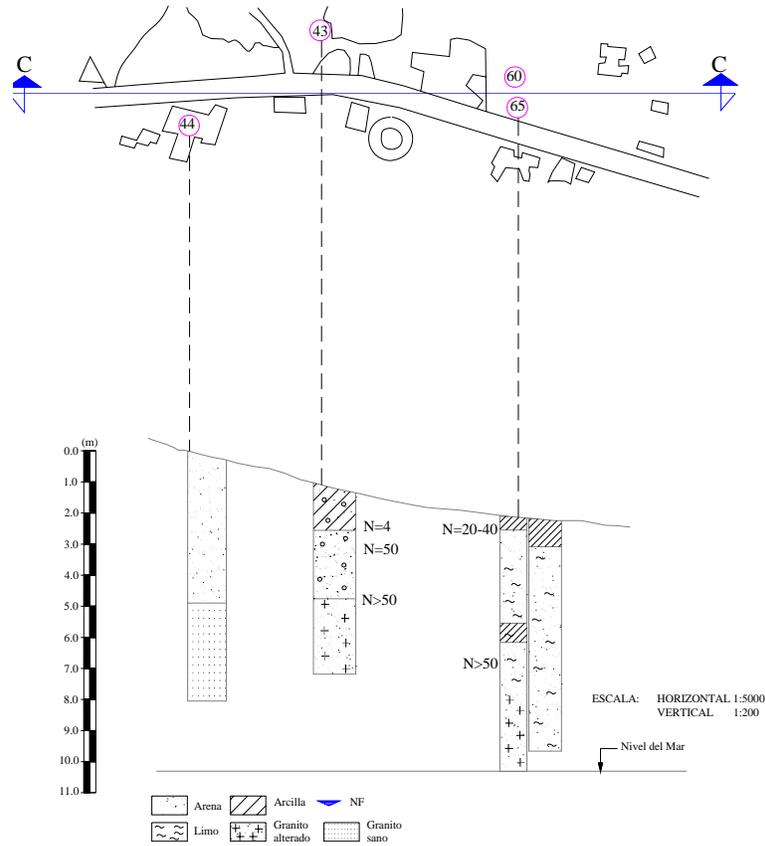


Figura 43. Cortes estratigráficos C-C' y D-D' (Flamand et. al., 1972)

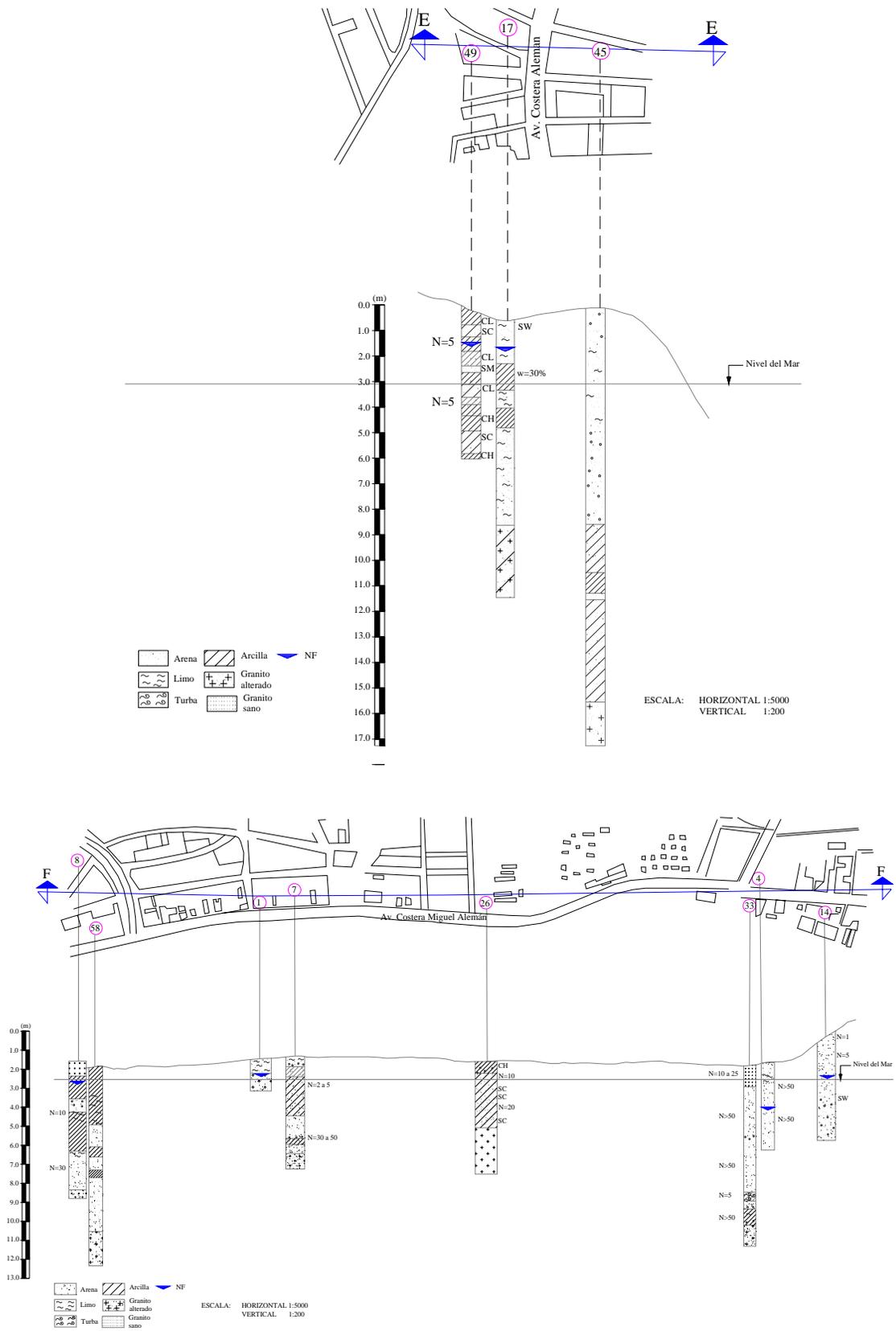


Figura 44. Cortes estratigráficos E-E' y F-F' (Flamand et. al., 1972)

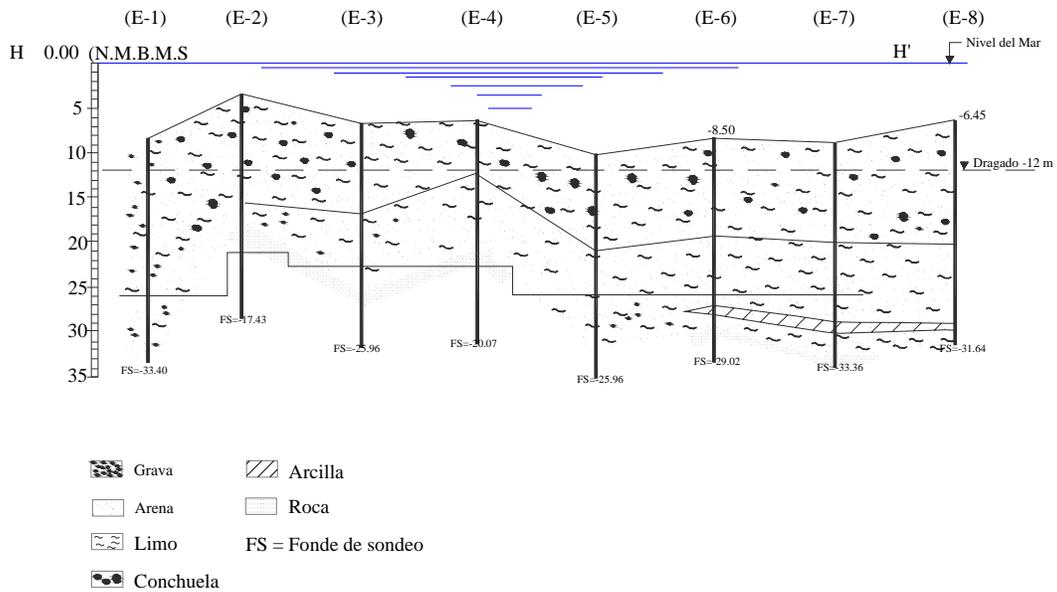
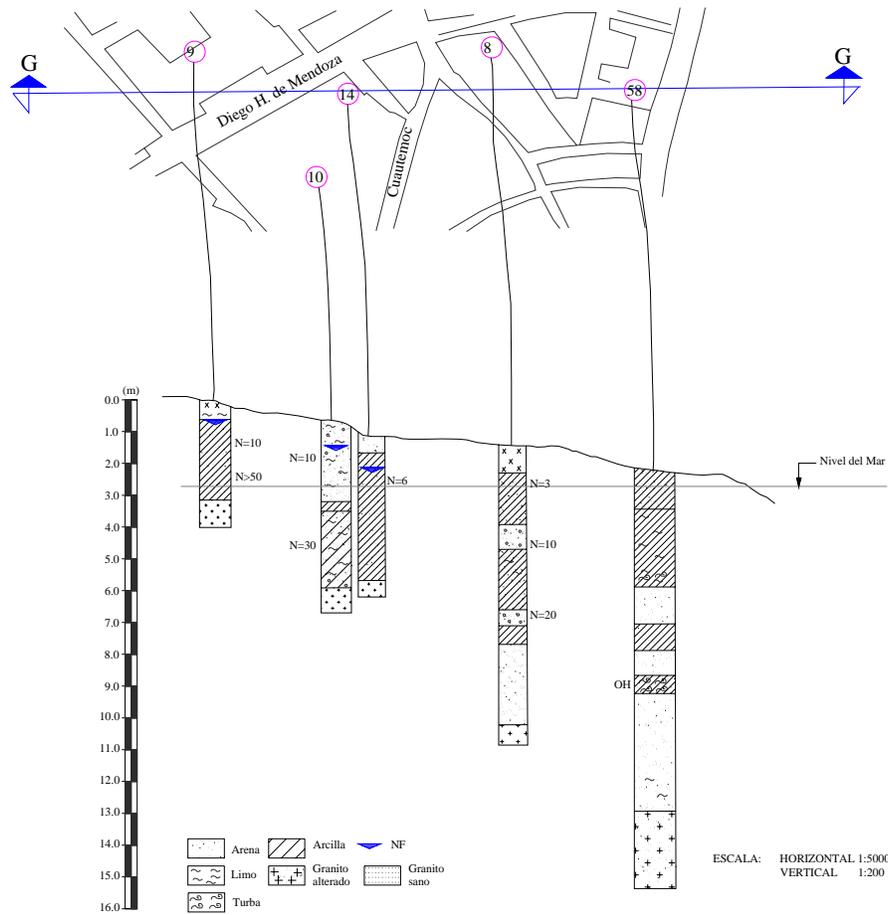


Figura 45. Cortes estratigráficos G-G' y H-H'. (Flamand et al., 1972)

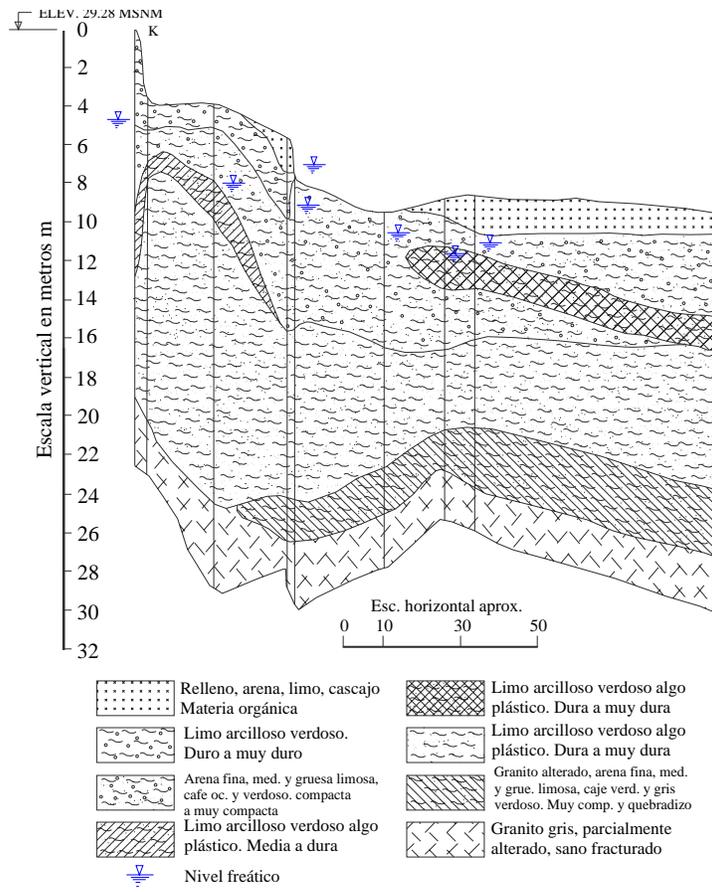
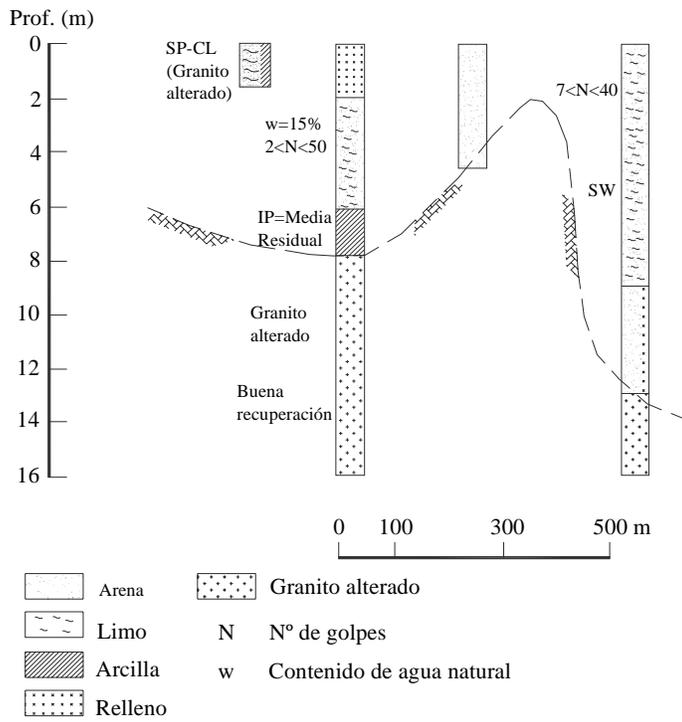


Figura 46. Cortes estratigráficos I-I' y K-K'. (Flamand et. al., 1972)

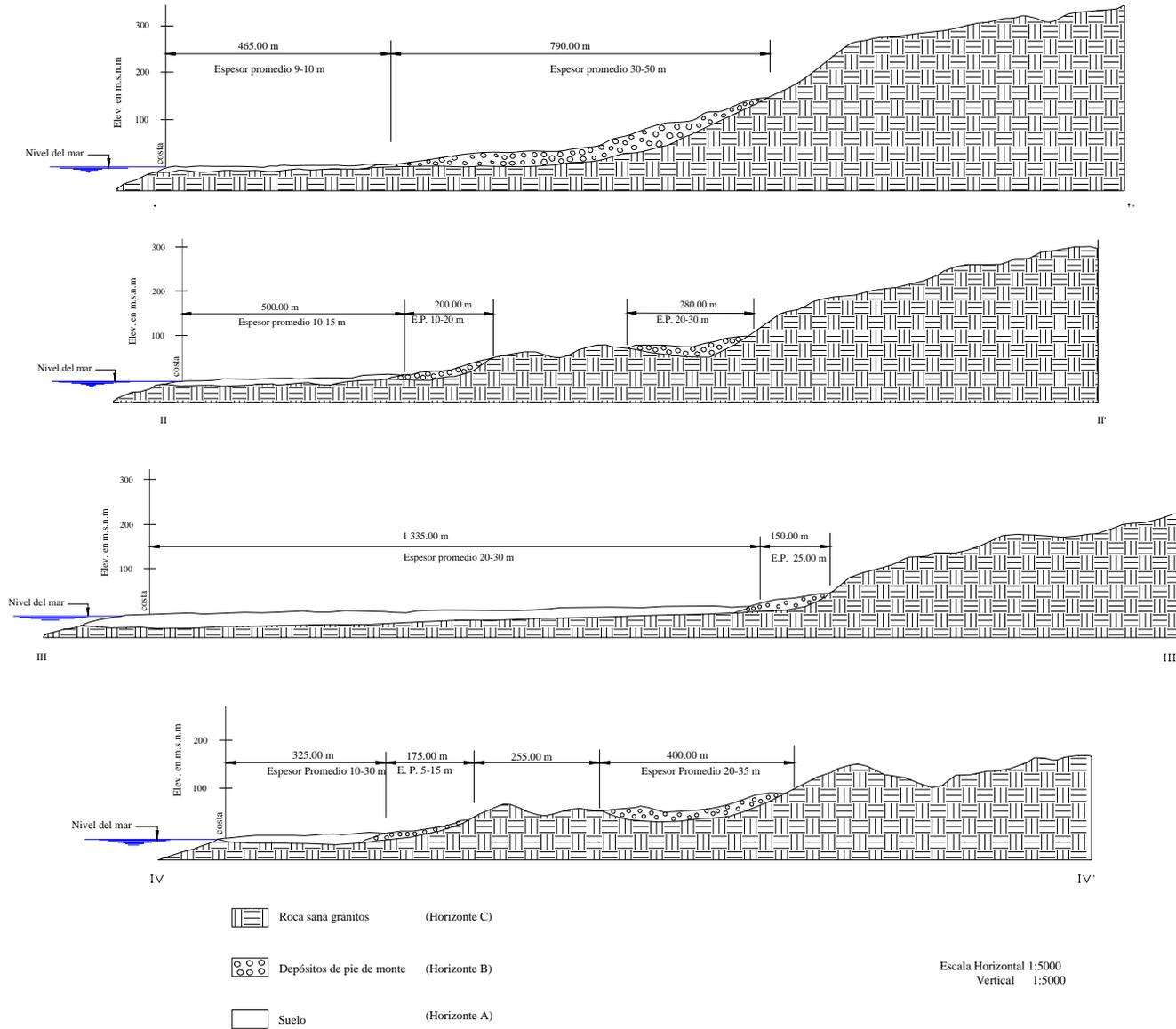


Figura 47. Secciones geológicas (Flamand et. al. 1972)

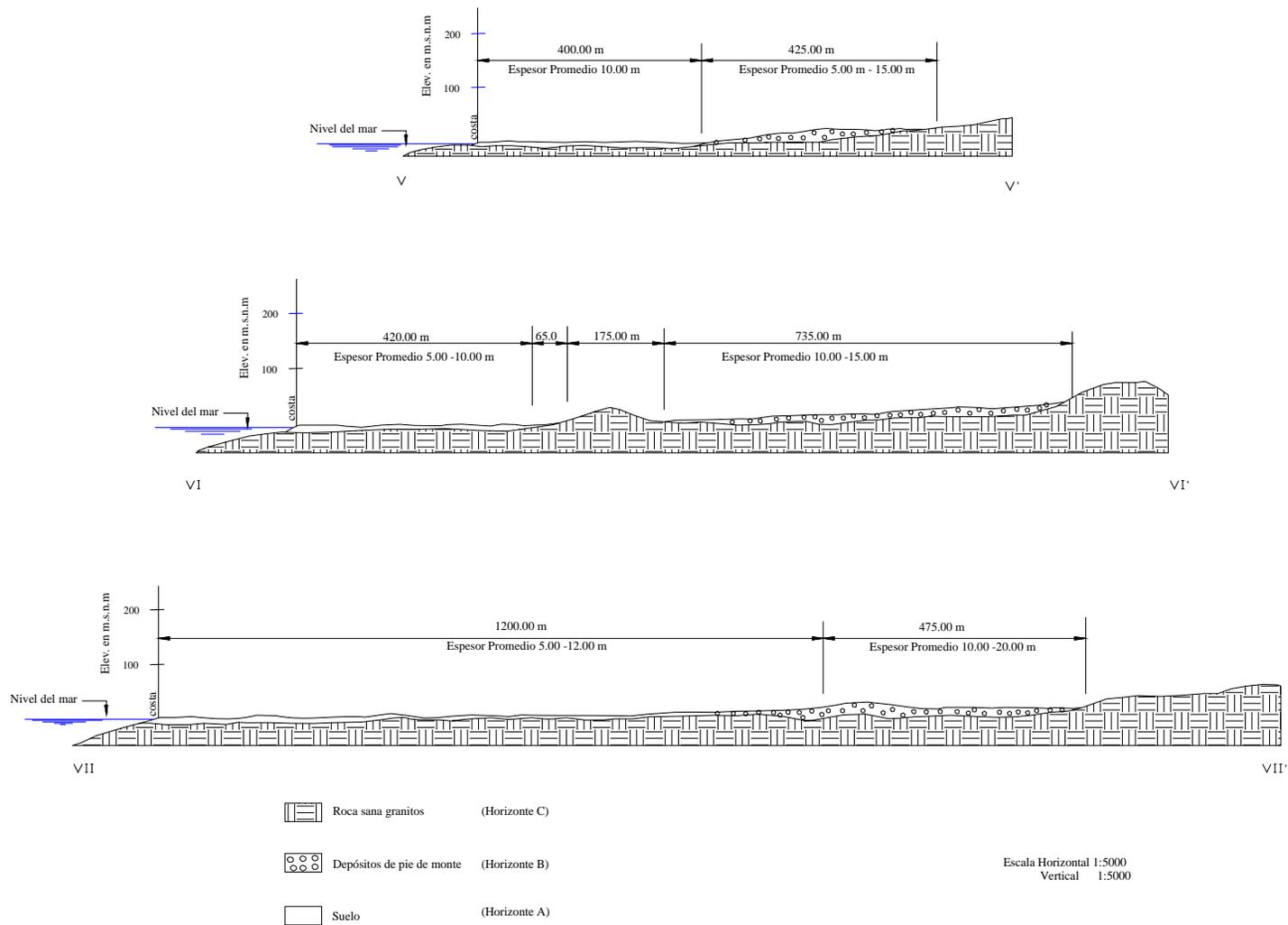


Figura 48. Secciones geológicas (Flamand et. al. 1972)

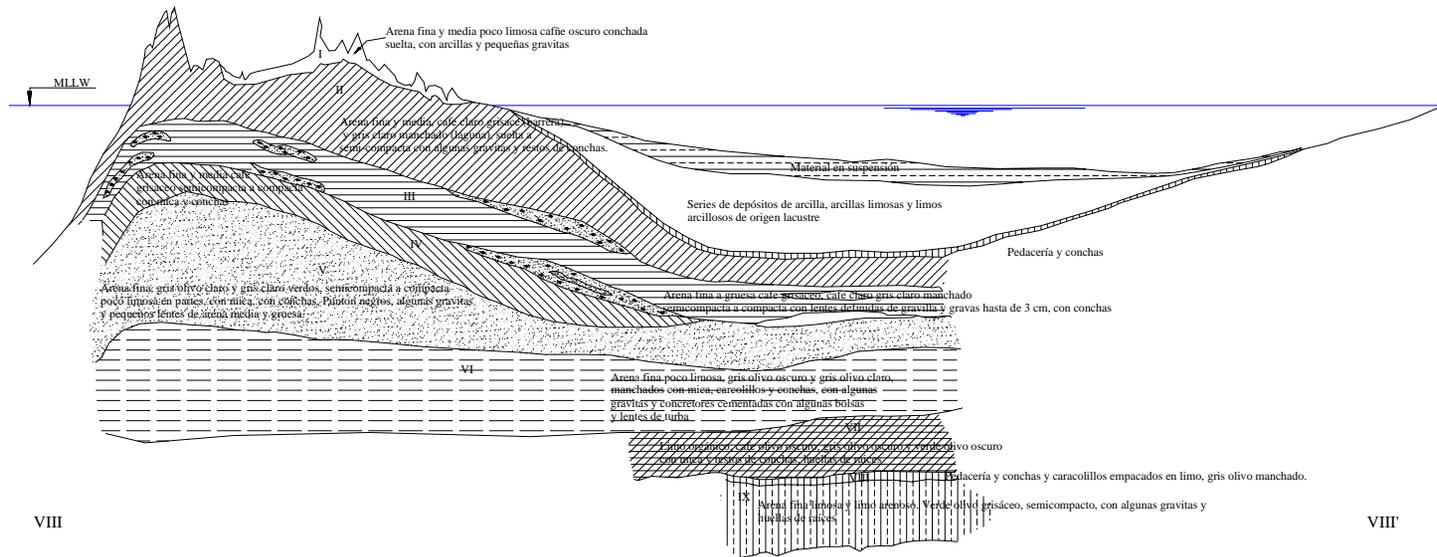


Figura 49. Secciones geológicas (Flamand et. al. 1972)

BIBLIOGRAFIA Y REFERENCIAS

- Alvaréz R. S., 2001, **Cuantificación del efecto local en el registro sísmico mediante la aplicación del método de elementos de contorno**, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- Arnal S., Betancourt M., 1991, **Normas Técnicas Complementarias**, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal Ilustrado y Comentado, pp. 661-672.
- Arnal S., Betancourt M., 1999, **Normas Técnicas Complementarias**, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal Ilustrado y Comentado, pp. 657-669.
- Avilés J. y Trueva V., 1991, **Criterios de caracterización de sitio con fines de microzonificación: Manuel de diseño por sismo de la CFE**, Memorias, IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Manzanillo, Colima.
- Bard P. Y., 1999, **Microtremor measurement: A tool for site effect estimation?**, The effects of surface geology on seismic motion, tomo3, pp.1251-1282.
- Bennefoy C. S., Cotton F., Bard P., 2006, **The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies, A literature review**, Elsevier, Earth-Science Reviews 79, pp 205-277.
- Bertling H., 1956, **Development of Aseismic Construction on Experience and Practice in Chile**, The World Conference on Earthquake engineering, Berkley, California, pp. 20.1-20.8.
- Borcherdt, R.D., 1994, **Estimates of site dependent response spectra for design (methodology and justification)**, Earthquake Spectra, 10, pp. 617-653.
- Boore D. M., 2004, **Estimating Vs (30) (or NEHRP site classes) from shallow velocity models (depths < 0 m)**. Bull. Seism. Soc. Amer., 94, pp.591-597.
- Comisión Federal de Electricidad 1993, **Diseño por Sismo**, Manual de Diseño de Obras Civiles, pp. 1.3.1-1.3.29.
- Cantos Figuerola José, 1974, **Tratado de Geofísica Aplicada**, Ed. LITOPRINT. Madrid, España. pp. 205-227.
- Dobry R. and Urzua A., 1976, **Simplified Procedures for Estimating The Fundamental Period of a Soil Profile**, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 66, pp.1293-1321.
- Dobry R., R. D. Borcherdt, C. B. Crouse, I. M. Idriss, W. B. Joyner, G. R. Martin, M. S. Power, E. E. Rinne and R. B. Seed, 2000, **New site coefficients and site classification system used in recent building seismic code provisions**, Earthquake Spectra, 16, pp. 41-67.

Esquivel R., 1976, **Veracruz, Ver.**, Información General acerca del subsuelo de 17 Ciudades de México, Memorias de la VIII reunión Nacional de Mecánica de suelos, Tomo II, pp. 245-256.

Flores E. H., Cinna L.A y Yussim G. S. (2004), **Estimación de velocidades de fase a partir del análisis de microtemblores con el método SPAC**, Geos, vol. 24, N°3 pp. 439-445.

Flores E. H., 2004, **Métodos alternos para la estimación del efecto de sitio mediante el uso de arreglos de microtemblores**, Tesis para obtener al grado de ingeniera geofísica, Universidad Autónoma de México.

Giraldo V., Alfaro A., Pujades L. G. y Canas J. A., 1999, **Estimación de efectos Locales con Movimientos Sísmicos y Microtemblores**, Monografías de Ingeniería Sísmica, 77, pp.

Hamburger O., 2003, **Building Code Provisions for Seismic Resistance**, Earthquake Engineering Handbook, pp. 11.1- 11.25.

Haskell N. A., 1962, **Crustal reflection of plane P and SV waves**, J. Phys. Earth., N°67, pp. 4751-4767.

Haskell N. A., 1962, **Radiation patterns of surface waves from point source in multi-layered medium**, Bulletin of Sismological Society of America , N°54, pp. 377-393.

León J. L., 1976, **Acapulco, Gro.**, Información General acerca del subsuelo de 17 Ciudades de México, Memorias de la VIII reunión Nacional de Mecánica de suelos, Tomo II, pp. 1-26.

León J. L., 1976, **Oaxaca, Oax.**, Información General acerca del subsuelo de 17 Ciudades de México, Memorias de la VIII reunión Nacional de Mecánica de suelos, Tomo II, pp. 157-181.

Lermo J. and Chávez-García F., 1993, **Site effect evaluation using spectral ratios with only one station**”, Bull. Seism. Soc. Am., 83, 1574 – 1594.

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

Lermo J. and Chávez-García F., 1994b, **Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtemblores records**, Soil. Dyn. & Earthq. Eng. 13, 413-423.

Lermo J., Torres G., Almanza P., Vargas A., Cruz J. y Hernández J.A., 1995, **Efectos de sitio en el Puerto de Veracruz, México, Microzonificación Sísmica Preliminar**, Memorias del XX congreso de la Academia Nacional de Ingeniería, A.C., pp.115-120, Veracruz, Ver., México.

Linares M. G., 2005, **Introducción y aplicación del método de sísmica de microtremores en áreas urbanas**, Tesis para obtener el grado de ingeniera geofísica, Universidad Simón Bolívar, Caracas-Venezuela.

Marshall L., 2003, **Geotechnical Design Consideration**, The Seismic Design Handbook, pp. 125-145.

Montecillo T. R., 1996, **Estimación empírica de efectos de sitio en el Distrito Federal**, Tesis para obtener el título de Ingeniero Geofísico, Universidad Nacional Autónoma de México.

Montalvo J.C., Quintanilla Y., Tamez M., Meneses L., Ramos M. and Masuch D., 2005, **Microzonation of the Linares, Northeast Mexico area, based on geology and shear-wave velocity measurements**, *Geofísica Internacional*, Vol. 44, Num. 4, pp. 331-340

Páez I., 2000, **“Características Geotécnicas y Criterios Básicos para el Diseño de Cimentaciones en la Zona Conurbada de Veracruz, Ver.”**, Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Villa Rica, Veracruz, Ver.

Ovando E., Jurado Ma. T., Mendez E., Camacho L., 1989, **Recopilacion y analisis de datos geotécnicos de Acapulco**, Gobierno del estado de Guerrero.

Rosales C. C., 2001, **Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelo del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia**, Tesis para obtener el grado de ingeniera civil, Universidad del Valle de Santiago de Cali-Colombia.

Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, 1977, **Diseño por Sismo**.

Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, 1985, **Normas Técnicas Complementarias por Sismo**, Normas Técnicas complementarias, pp 57-74.

Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, 2004, **Normas Técnicas Complementarias**.

Reglamento de Construcción para los municipios del estado de Guerrero, 1989, **Normas Técnicas Complementaria para diseño por sismo**.

Riquer G, F Williams, J Lermo, Torres G, R Leyva, 2003, **Microzonificación Sísmica de la Zona Conurbada Veracruz-Boca del Río**, Memorias del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica.

Rosenblueth E., 1956, **Aseismic Design in Mexico**, The World Conference on Earthquake engineering, Berkley, California, pp. 24.1-24.10.

Rosenblueth E., 1960, **Earthquake of 28 July 1957 in Mexico City**, The Second World Conference on Earthquake engineering, Tokyo, Kyoto, Vol. I, pp. 359-369.

Rosenblueth E., 1960, **Aseismic Provision for the Federal District, Mexico**, The Second World Conference on Earthquake engineering, Tokyo, Kyoto, Vol. III, pp. 2009-2026.

Roger Di Julio, 1989, **Static Lateral –Force procedures**, Earthquake Engineering Handbook, pp. 119- 139.

Rodriguez-Marek, A. Bray J.D. y Abrahamso N., 2001, **An Empirical Geotechnical Seismic Site Response Procedure**, Earthquake Spectra, Vol. 17, N°1.

Seed Bolton H., 1986, **Influencia de las condiciones locales de suelo en movimientos del terreno y en daños a edificios durante sismos**, Octava conferencia Nabor Carrillo, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 187 pp.

Secretaria de desarrollo urbano, comunicaciones y obras publica, 1998, **Reglamento de construcción y seguridad estructural para el estado de Oaxaca**”, pp. 53-57.

Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, 2004, **Normas Técnicas Complementarias**.

Propuesta de reglamento de construcciones para el estado de Veracruz, 1998, **Normas técnicas complementarias para diseño por sismo**.

Williams R. A., Wood S., Stephenson W. J., Odum J. K., Meremonte M.E., Street R. and Worley D. M., 2003, **Surface seismic refraction/reflection measurement determinations of potential site resonances and the areal uniformity of NEHRP site class D in Memphis, Tennessee**”. Earth. Spectra, 19, 159-189.

www.uv.mx/acelerografica