

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Definición del Problema

El Salvador se encuentra en una región de alta actividad sísmica, generada principalmente por el proceso de subducción de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe. Como consecuencia de la interacción de las placas, se tiene una cadena de volcanes activos y actividad sísmica local. Por lo tanto, El Salvador enfrenta altas tasas de sismicidad, tanto en la zona de subducción como al interior de la placa del Caribe, en las denominadas fallas locales o geológicas.

La república de El Salvador sufre un terremoto destructivo aproximadamente cada diez años y la ciudad de San Salvador es probablemente la ciudad en América más frecuentemente dañada por los sismos [López et al., 2004]: fue gravemente afectada el 3 de mayo de 1965 (Ms 6.0) y el 10 de octubre de 1986 (mb 5.4). El terremoto de 1965 dejó unos 120 muertos, mientras que la de 1986, a pesar de ser de menor magnitud, se tradujo en 1.500 muertos y más de 100.000 personas afectadas [Bommer et al., 2005]. En la Tabla 1.1 se presenta un resumen de los sismos más destructores que han afectado al país en el último siglo.

La correcta evaluación de la amenaza depende del nivel de conocimiento de las características de la región de análisis: la sismicidad del área de influencia, la atenuación sísmica regional y el efecto local del suelo en el emplazamiento. El efecto de sitio en el país esta principalmente influenciado por la presencia de materiales blandos o sedimentos no consolidados (composición y espesor de los estratos situados sobre la base rocosa), y puede tener gran influencia en las características de amplitud y frecuencia del movimiento y por tanto, en sus efectos sobre las estructuras.

Tanto los planes de desarrollo y ordenamiento territorial, como las normativas y reglamentos de diseño sismo-resistente y estudios de riesgo sísmico, deben considerar la influencia de las condiciones locales de suelo en el daño potencial sísmico para diferentes edificaciones, permitiendo seleccionar el mejor lugar para una estructura específica (o el mejor tipo de estructura para un sitio específico), factores de sitio que definan formas adecuadas de los espectros de diseño, etc.

El presente documento expone el estado de avance en el estudio de Respuesta de Sitio que actualmente está siendo desarrollado por El Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), a través de la Dirección General del Observatorio Ambiental, en el marco del “Programa Nacional de Reducción de Riesgos” (PNRR), Componente 1: “Atlas Dinámico de Riesgo”.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

Tabla 1.1: Sismos Destruidores en El Salvador en el último Siglo
[<http://www.snet.gob.sv/ver/sismologia/registro/estadisticas>]

Fecha	Ubicación	Magnitud	MMI máx.	Epicentro	Comentarios
19/07/1912	13.87° N 89.57° O	Ms=5.9	---	---	Violento temblor causa daños en Armenia, Izalco y Santa Ana.
08/06/1917	13.70° N 89.50° O	Ms=6.5	---	---	Erupción del Boquerón. Sismo causa destrucción en Armenia y graves daños en Ateos, Sacacoyo y San Julián. Un segundo sismo causa daños en San Salvador, Apopa, Nejapa, Quezaltepeque, Opico y Santa Tecla.
08/06/1917	13.75° N 89.27° O	Ms=6.4	---	---	
20/12/1936	13.717° N 88.933° O	Ms=6.1	---	San Vicente	Destrucción de San Vicente. Entre 100 a 200 muertos.
06/05/1951	13.52° N 88.40° O	Ms=6.2	---	Jucuapa y Chinameca	Murieron más de 400 personas
07/05/1951	13.48° N 88.45° O	5.8	---	Jucuapa y Chinameca	---
12/04/1961	13.20° N 88.90° O	5.95	VI en San Salvador	Océano Pacífico	Daños menores en San Salvador y el sur de El Salvador
03/05/1965	13.70° N 89.17° O	Ms=6.0	VII en San Salvador	San Salvador	125 muertos, 400 heridos y 4000 casas destruidas
19/06/1982	13.30° N 89.30° O	7.0 6.0	VII en San Salvador	Océano Pacífico	8 personas murieron, 96 resultaron heridas y un promedio de 5000 damnificadas
10/10/1986	13.67° N 89.19° O	mb=5.4	VIII-IX en San Salvador	San Salvador	1,500 muertos, 10,000 heridos, unas 60,000 viviendas destruidas o dañadas.
13/01/2001	12.83° N 88.79° O	Mw=7.6	VII en San Salvador	Zona de Subducción	Se reportan 944 fallecidos, 1155 edificios públicos dañados, 108,261 viviendas destruidas, 19 hospitales dañados, 405 iglesias dañadas, 445 derrumbes
13/02/2001	13.64° N 88.94° O	Mw=6.6	VI en San Salvador	Zona de San Vicente	Se reportan 315 fallecidos, 82 edificios públicos dañados, 41302 viviendas destruidas, 5 hospitales dañados, 73 iglesias dañadas, 71 derrumbes

1.2 Descripción del Área de Estudio

El Salvador es el país más pequeño de América Central con solo 21.041 km² de extensión territorial. Cuenta con una población de aproximadamente 5.7 millones de habitantes (DIGESTYC, 2008), lo cual resulta en una densidad promedio de 273 habitantes por km², la más alta de la región.

El Área Metropolitana de San Salvador (AMSS) es el principal núcleo urbano del país; con un total de aproximadamente 2 millones de habitantes, representa más del 30% de la población total del país. El AMSS está formado por 14 municipios pertenecientes a los departamentos de La Libertad y San Salvador: Antiguo Cuscatlán, Nueva San Salvador (departamento de La Libertad), Nejapa, Apopa, Ayutuxtepeque, Cuscatancingo, Ciudad Delgado, Tonacatepeque, San Martín, Ilopango, Soyapango, Mejicanos, San Marcos y San Salvador (departamento de San Salvador) [Figura 1.1].

Apodada el “Valle de las Hamacas” por su alta actividad sísmica, la ciudad se encuentra ubicada en una planicie rodeada por pequeños volcanes, 683 metros sobre el nivel del mar.

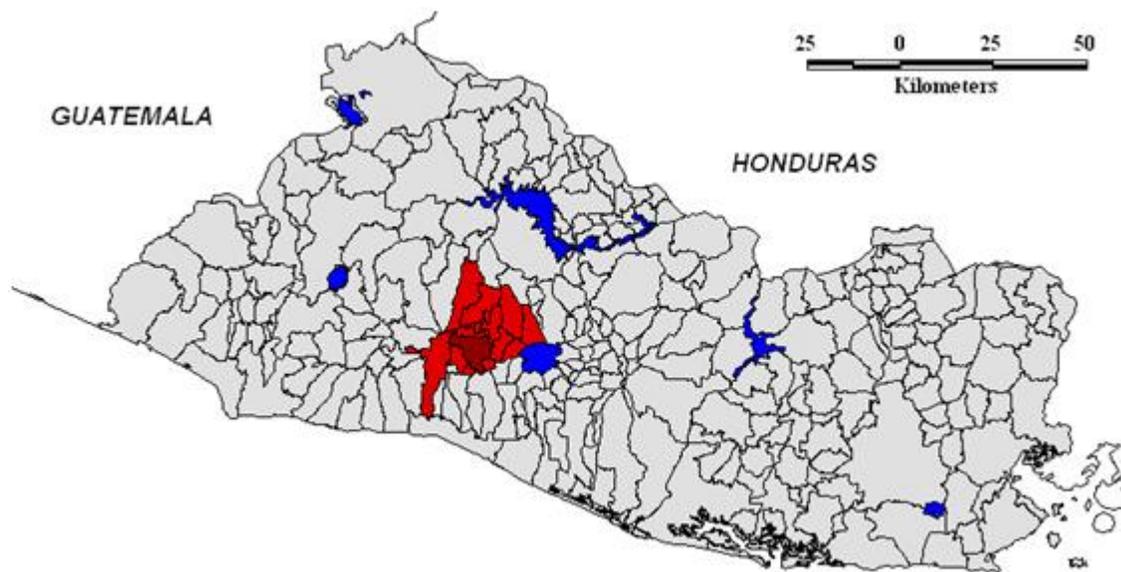


Figura 1.1: Ubicación Geográfica del AMSS [Kattan, 2010]

1.3 Geología del Sitio

El AMSS está situado entre las estructuras volcánicas del Volcán de San Salvador al oeste y la Caldera de Ilopango al este, los cerros de Mariona al norte y al sur por el bloque estructural de la Cordillera del Bálsamo, el cráter freatomagmático del Plan de la Laguna y el volcán monogénico del cerro San Jacinto.

La estructura del graben Central [Figura 1.2a] juega un papel muy importante en la geología del AMSS, puesto que esa depresión o graben se ha formado concomitantemente con el surgimiento de la cadena volcánica y ha sido rellenada por los productos de esos volcanes [Hernández, 2007]

La estructura geológica elevada del borde sur del graben Central está compuesta por las formaciones volcánicas más antiguas de esta zona, donde la formación Bálsamo del Terciario es la más antigua y está formada por una serie de lavas andesitas basálticas con intercalaciones de tobas de caída e ignimbritas intermedias. La formación Bálsamo subyacente a la formación Cuscatlán y está constituida por importantes ignimbritas ácidas y lavas básicas intercaladas. La formación San Salvador, está representada por las tefras del volcán San Salvador, calderas de Ilopango y Coatepeque y el cráter de Plan de la Laguna [Hernández, 2007].

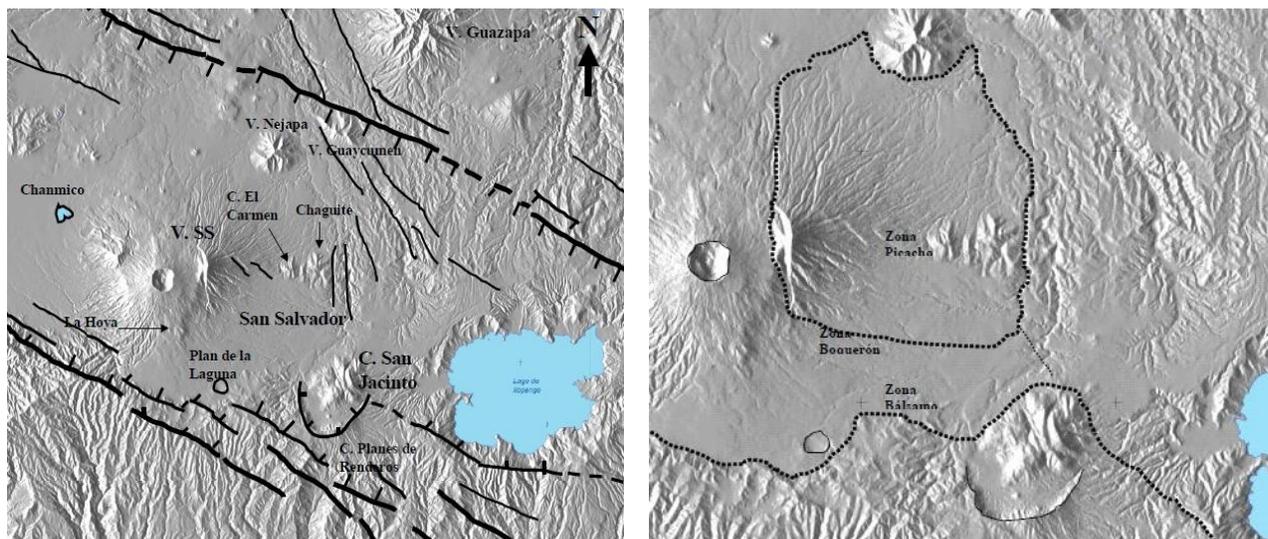


Figura 1.2: a) Estructura principal del graben Central (izquierda) y b) límites de Zonas Geológicas (derecha) [Hernández, 2007]

A raíz de la presencia del graben Central, de las estructuras volcánicas establecidas dentro de ese graben y del colapso calderico del Volcán San Salvador, se pueden distinguir tres zonas geológicas: Picacho (en la parte norte de la Ciudad de San Salvador), Boquerón (en la parte central de la Ciudad de San Salvador) y Bálsamo (en la parte sur de la Ciudad de San Salvador) [Figura 1.2b]. Cada una de ellas presenta en toda su extensión un perfil geológico.

Las zonas geológicas se detallan en la sección 1.3.2. Las formaciones geológicas que las componen se describen a continuación (nomenclatura a partir de la Figura 1.3)

1.3.1 Formaciones Geológicas

a) Formación El Bálsamo.

Es la formación más antigua de edad pliocénica en el área de estudio, presenta poca exposición por estar cubierta por los depósitos volcánicos más jóvenes procedentes de las estructuras volcánicas principales. Está compuesta por pequeños conos volcánicos básicos a intermedios (Mb).

La formación bálsamo está conformada por las siguientes erupciones: (i) **coladas lávicas básicas Lv** que afloran en el borde sur del graben central; (ii) **aglomerados A** (pequeños afloramientos de aglomerados volcánicos presentes en la cordillera del Bálsamo, entre el cráter Plan de la Laguna y el domo San Jacinto); y (iii) **conos básicos Mb**, conocidos como Cerros de Mariona, que corresponden a otros centros eruptivos y cuyas lavas están bastantes fracturadas, diaclasadas y meteorizadas, reflejando una actividad tectónica pasada bastante activa y la fuerte actividad de los procesos exógenos. Sobre los conos básicos yace una cobertura piroclástica constituida las tobas color café (depósitos de pómez de caída TB4, TB3 y TB2 del Ilopango, pómez dacítico G1 del V. San Salvador) y las cenizas TBJ de Ilopango.

b) Formación Cuscatlán.

La formación Cuscatlán del Plioceno-Pleistoceno Medio, comprende las unidades piroclásticas más antiguas de la caldera de Ilopango, compuestas por múltiples ignimbritas masivas, compactas, color rosado, beige y blanco y depósitos de caída compactos. Esta secuencia de composición ácida pertenece a las Tobas Inferiores (Ti) y en ese mismo grupo se incluyen los pequeños domos dacíticos (Ma) emplazados en la parte sur y central del área de estudio.

A esta formación la conforman las siguientes erupciones: (i) **domos dacíticos Ma**, cuya actividad volcánica está asociada a la actividad ignimbrítica de las Tobas Inferiores (Ti) en el Pleistoceno Medio; (ii) **domo y coladas ácidas del San Jacinto (J)**; (iii) **tobas inferiores Ti**, compuestas por ignimbritas y tobas que afloran ampliamente al norte y noroeste de Ilopango, se extienden hasta la ciudad de Cojutepeque al oriente y contornan las laderas del norte del Volcán de San Salvador (VSS) hasta alcanzar Apopa y Quezaltepeque; y (iv) las **tobas superiores Ts**, que refieren a los piroclastos ácidos compuestos por tres depósitos de pómez de caída que representan tres épocas eruptivas (TB4, TB3 y TB2). La capa de pómez TB4, es la más antigua y la de mayor volumen y es también la que tiene la mayor cobertura espacial. Entre el TB4 y el TB3 yace un depósito de pómez gris de composición dacítica (**G1**) del VSS cuyo espesor se adelgaza y desaparece hacia el Río Las Cañas; sobre TB2 yace una capa de depósito gris y desechos fluviales conocida como **G2** producida por una erupción del Volcán de San Salvador.

c) **Formación San Salvador.**

Esta formación está constituida principalmente por los productos efusivos y explosivos del volcán San Salvador y por la Caldera de Ilopango, ocurridos desde el Pleistoceno Superior hasta el Holoceno.

La formación San Salvador está conformada por las siguientes erupciones: (i) **Antiguo edificio volcánico P**, que corresponde a la porción del volcán de San Salvador después del colapso caldérico, conocido como Picacho; (ii) **Flujo de lavas y piroclastitas básicas L**, lavas básicas-intermedias posteriores a la formación del cráter del Boquerón que tienen amplia distribución en San Salvador (sobre TB2 y bajo TBJ); (iii) **Plan de la Laguna (C1)**, erupción prehistórica que comprende depósitos freatomagmáticos formados a partir de la salida por falla de una colada lávica básica, aparentemente asociada al macizo volcánico del San Salvador, que al entrar en contacto con el agua subterránea produjo una gran explosión con la salida de material fragmentado formando oleadas piroclásticas, lapilli escoriáceo y abundante presencia de lapilli acrecional en la fase final de la erupción; (iv) **Tierra Blanca Joven (TBJ)**, unidad compuesta por depósitos de caída y flujos piroclásticos de la última erupción explosiva de la caldera de Ilopango y que tienen amplia distribución en toda el área; (v) **Talpetate (T)**, depósito proviene del Boquerón y constituido por oleadas piroclásticas “surges” y escorias oscuras; y (vi) **Aluviones (Q)**, formados principalmente por la acumulación de los sedimentos (erosión de las cenizas de TBJ) en las riveras de los valles, en el interior de los cráteres de Boquerón, Plan de la Laguna y en Ilopango.

d) Lahares [Hernández, 2007]

Los Lahares no corresponden directamente a una erupción, pero si a un proceso exogeodinámico de la ladera del Picacho, y tiene importancia por sus espesores y área de ocurrencia. La ladera del Picacho desde el colapso del volcán San Salvador se encuentra en desequilibrio, y por medio de flujos de escombros (lahares) y procesos continuos de erosión, trata de restablecerlo. Este tipo de depósitos se han encontrado bajo TBJ y están compuestos por bloques lávicos de hasta 1.5 m de largo, inmersos en una matriz de limos y arenas con gravas y arcillas.

1.3.2 Estratigrafía de Depósitos Volcánicos

El Estudio de la estratigrafía busca establecer el orden de los eventos, es decir, ordenar en forma relativa los productos de las distintas erupciones. En la Figura 1.4 muestra el esquema de distribución espacio-temporal de los distintos materiales volcánicos en el AMSS, indicando la fuente de emisión

1.3.3 Estratigrafía y Sectores Geológicos

Como se ha mencionado, las zonas geológicas (Picacho, Boquerón y Bálsamo) tienen gran influencia en el comportamiento geológico, y presentando un perfil geológico similar en toda su extensión [Figura 1.5]. En este apartado se describen las características principales de los distintos sectores geológicos.

a) Zona Geológica Picacho:

La zona geológica Picacho está comprendida por la porción norte remanente del viejo edificio del volcán San Salvador [Figura 1.2b]. Está formado por diferentes capas de Tierra Blanca (TBJ, TB2 y TB4) y por una capa de G1. Los valles profundos en “V” característicos de esta zona, son indicadores de lahares que se desprendieron de esa ladera y de manera recurrente se acumularon al pie de la misma. Los ríos Urbina y Tomayate ubicados al oriente de esta ladera se comportaron como barreras de las lavas que surgieron del antiguo edificio del San Salvador y la zona del Picacho sirve a su vez de barrera para las lavas del cráter Boquerón [Hernández, 2007]

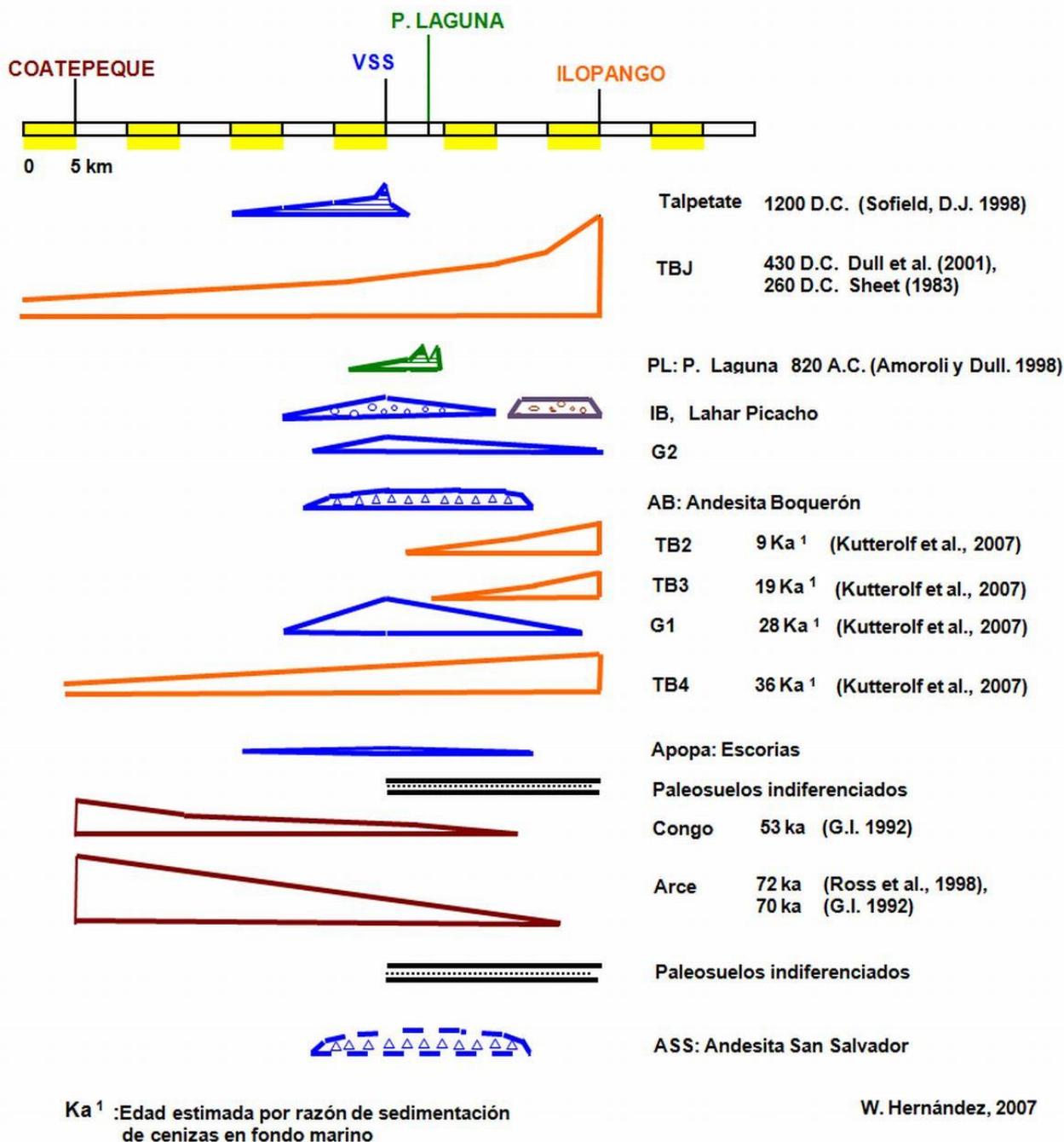


Figura 1.4. Distribución espacio-temporal de los distintos materiales volcánicos en el AMSS [Hernández, 2007]

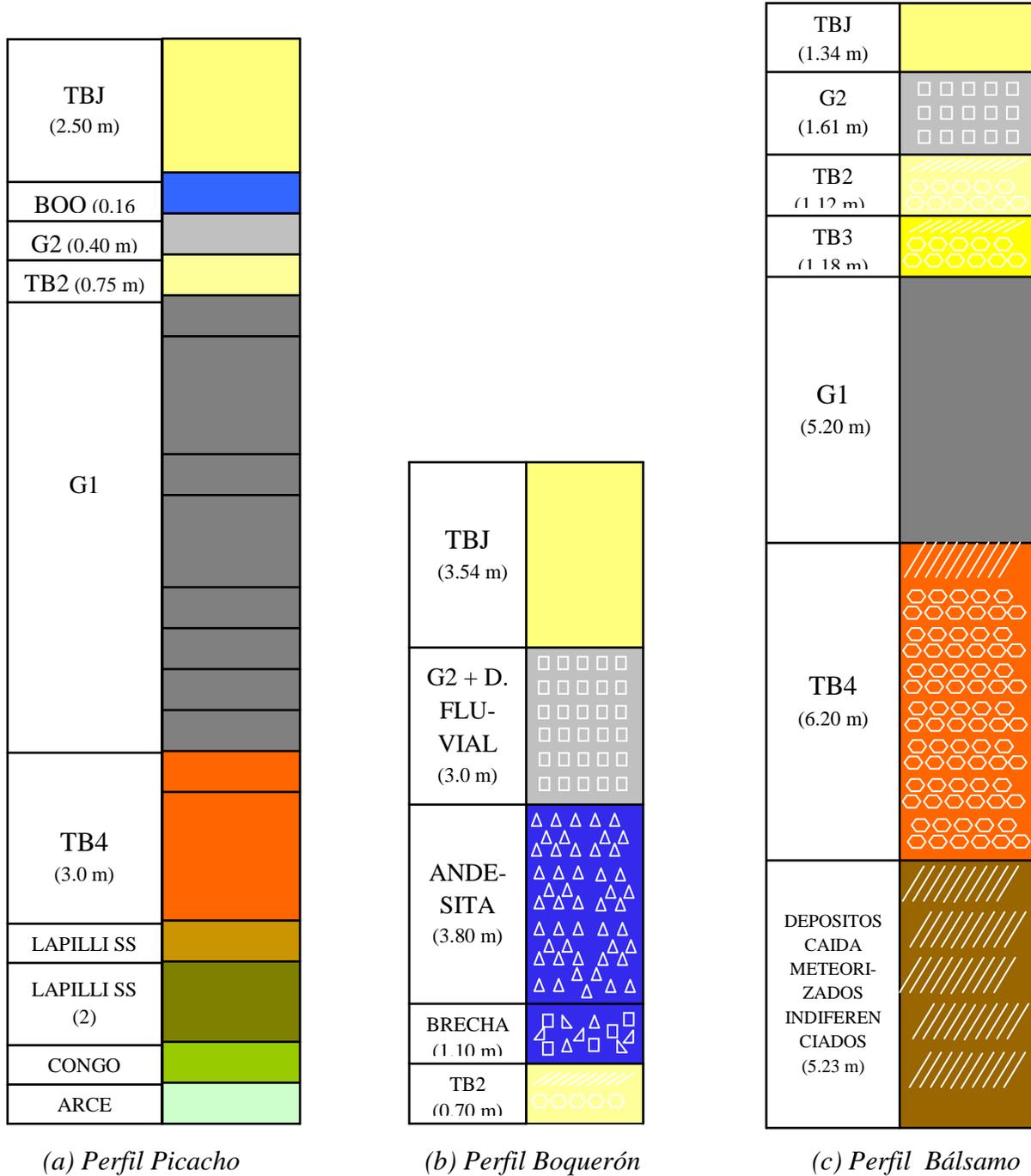


Figura 1.5: Perfiles de las Zonas Geológicas [Hernández, 2007b]

b) La Zona Geológica Boquerón

La Zona Geológica Boquerón corresponde al bloque central, topográficamente más deprimida, entre la ladera del Picacho y la del Bálsamo [Figura 1.2b], canalizando las coladas lávicas y flujos piroclásticos del Boquerón y también del antiguo edificio San Salvador [Hernández, 2007]. El perfil geológico está formado por diferentes capas de Tierra Blanca (TBJ y TB2), por una capa de G2 producida por una erupción del Volcán de San Salvador, una capa de Andecitas y otra capa de Brecha. El sector comprendido entre Santa Tecla y las colonias San Benito-Escalón-Flor Blanca, por estar muy cercano al cráter Boquerón, cuentan con muchos flujos de lavas de las distintas erupciones del Boquerón. [Hernández, 2007].

c) La Zona Geológica Bálsamo

La Zona Geológica Bálsamo está ubicada en la parte sur y topográficamente más elevada del AMSS que comprende la cordillera del mismo nombre [Figura 1.2b]. Las coladas lávicas presentes en esta zona pertenecen a otros eventos mucho más antiguos que a la misma formación del complejo volcánico San Salvador [Hernández, 2007]. Este sector presenta un perfil formado por diferentes capas de Tierra Blanca (TBJ, TB2, TB3 y TB4), una capa de G1 y una capa de G2, ambas producidas por erupciones del Volcán de San Salvador y una capa de Suelos Meteorizados Poligenéticos.

1.4 Efecto de las Condiciones Locales en el Movimiento Fuerte

Cuando la predicción del movimiento fuerte se realiza sobre la base de los parámetros de la fuente y el trayecto, el movimiento queda caracterizado en roca o suelo duro. Sin embargo, pocas veces se tienen tales condiciones, por lo que resulta necesario incluir la influencia de los efectos locales como factor integrante del movimiento. El factor sitio generalmente se define en función de la geología superficial del lugar y puede llegar a dominar la amenaza sísmica debido a los efectos de amplificación de la radiación sobre la base rocosa.

1.4.1 Amplificación de Ondas por Efectos de Sitio

De acuerdo con las leyes de atenuación, la intensidad del movimiento disminuye con la distancia epicentral, sin embargo, el movimiento sísmico puede variar mucho de un lugar a otro según las características geológicas [Figura 1.6], aunque la distancia al epicentro no varíe considerablemente. A este fenómeno se le conoce como “efecto de sitio”

El efecto de sitio en el AMSS está principalmente influenciado por la presencia de materiales blandos o sedimentos no consolidados (composición y espesor de los estratos situados sobre la base rocosa), y puede tener gran influencia en las características de amplitud y periodo del movimiento.

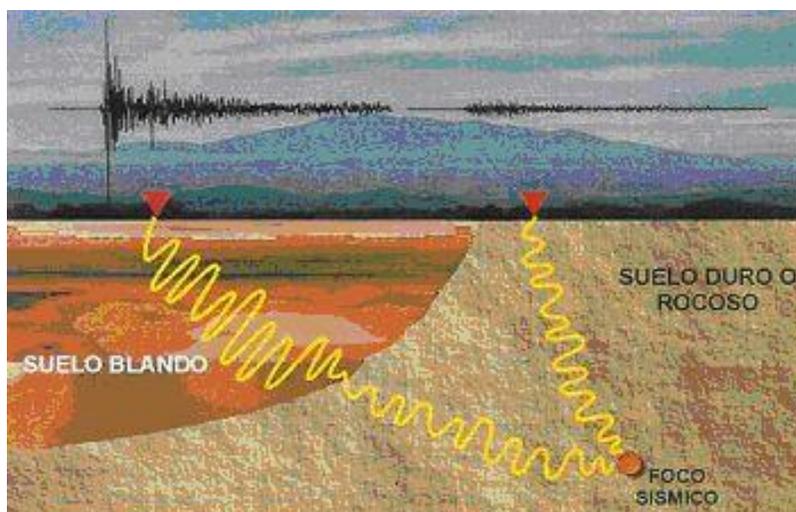


Figura 1.6. Recorrido Típico desde la Fuente, Medio y Efectos de Sitio [SNET1]

Los efectos de amplificación del movimiento en el suelo están determinados principalmente por dos mecanismos: la amplificación geométrica y la amplificación dinámica, la primera relacionada con el fenómeno de impedancia y la segunda a los efectos de resonancia.

El fenómeno de impedancia puede ser determinado con base en la relación de densidades y velocidades de propagación de onda de la roca (b) con respecto al suelo (s). Para sedimentos, el contraste de impedancias se expresa como [Bommer, 1996: pp. 198]:

$$I_c = \frac{\rho_b v_b}{\rho_s v_s} \quad \text{con} \quad v_b > v_s \quad [\text{Ec. 1.1}]$$

Cuando las ondas sísmicas pasan de la roca al suelo la velocidad de propagación es menor y el tren de ondas decelera, pero para mantener el flujo de energía, se incrementa la amplitud de las ondas sísmicas. El suelo, sin embargo, absorbe más energía que la roca y tiende a amortiguar el movimiento, fenómeno conocido como atenuación anelástica. La amplificación del movimiento que resulta depende del balance entre estos dos factores, que dependen del espesor de la capa de suelo y el contraste entre la velocidad de propagación de ondas en roca y en suelo.

El efecto de resonancia resulta de la multireflexión de las ondas dentro de las capas de suelo: la onda se refleja en la superficie y se propaga hacia abajo hasta que rebota en la roca, y se dirige nuevamente hacia la superficie. El fenómeno se repite y las ondas quedan atrapadas dentro de la capa de suelo, aumentando la amplitud de las ondas y prolongando la duración del movimiento. Este efecto es máximo el período de las ondas sísmicas coincide con el período de vibración de la capa de suelo, en tanto que el período natural del suelo llega a ser dominante en el movimiento.

El período fundamental del suelo depende tanto de la velocidad de ondas de corte característica del depósito como de su espesor. Asumiendo que el suelo consiste de n capas horizontales, con un espesor H_i (en m) y una velocidad de ondas de corte V_i (en m/s), sobre un estrato firme, el período fundamental puede ser estimado mediante la ecuación [Ingvarsson y Johansson, 1996]:

$$T = 4 \sum_1^n \frac{H_i}{V_s} \quad [\text{Ec. 1.2}]$$

1.4.2 Comportamiento Sísmico de los suelos en el AMSS

Debido a la ubicación geográfica del AMSS entre el volcán San Salvador y la caldera de Ilopango, los productos de ambos centros eruptivos se encuentran intercalados en la mayor parte de la región. Las tefras TBJ se adelgazan ladera arriba del volcán San Salvador pero hacia el oriente de la capital (Soyanpango y Ilopango), alcanzan espesores de alrededor de 60 m [Figura 1.7] donde cubren otras tefras de la caldera de Ilopango (Tobas Superiores) y en conjunto superaran los 100 m de espesor [Hernández, 2007].



Figura 1.7: Depósitos de la TBJ a) Río Las Cañas, Ilopango (izquierda), b) Cárcava en la estación de la Cruz Roja, Centro de Gobierno, San Salvador.

Estos depósitos de Tierra Blanca Joven (TBJ) y Tobas Superiores (TB2, TB3 y TB4) son, en general, poco consolidados. El Consorzio Salvador E. ITALEKNA-ITALCONSULT, 1988 determinó velocidades de ondas de corte entre 158-230 m/s para TBJ y 191-411 m/s para Tobas Superiores. Los depósitos más antiguos del Ilopango (Tobas Inferiores) que subyacen a esta secuencia, son ligeramente más consolidados. Sin embargo, debido a que el contraste de impedancia entre estos depósitos no es muy marcado (Sección 1.4.2), la respuesta al paso de una onda sísmica es similar [Hernández, 2007].

El Consorzio Salvador E. ITALEKNA-ITALCONSULT, 1988, definió como “Unidad A” a los depósitos de TBJ, Tobas Superiores y Tobas Inferiores, con $150 \leq V_s \leq 450$ m/s y $300 \leq V_p \leq 1000$ m/s, como “Unidad B” a las lavas, con $V_s \approx 2000$ m/s y $2600 \leq V_p \leq 3200$ m/s.

El paso de las ondas sísmicas de una unidad a la otra, con un alto contraste de impedancia, resulta en una amplificación de las ondas, en un rango de frecuencia correspondiente al período natural del suelo y por tanto al espesor del estrato no consolidado. En el Área Metropolitana de San Salvador, los espesores de sedimentos no consolidados son muy variables y amplificaciones importantes ocurren en un amplio rango de períodos de interés ingenieril.

El nivel de daño máximo probable ocurrirá cuando el período natural de vibración de la edificación coincida con el período natural del suelo que la sostiene. La figura 1.8 ilustra ejemplos típicos de espectros de respuesta, dependiendo de la distancia epicentral y el tipo de suelo, y el tipo de edificación afectado.

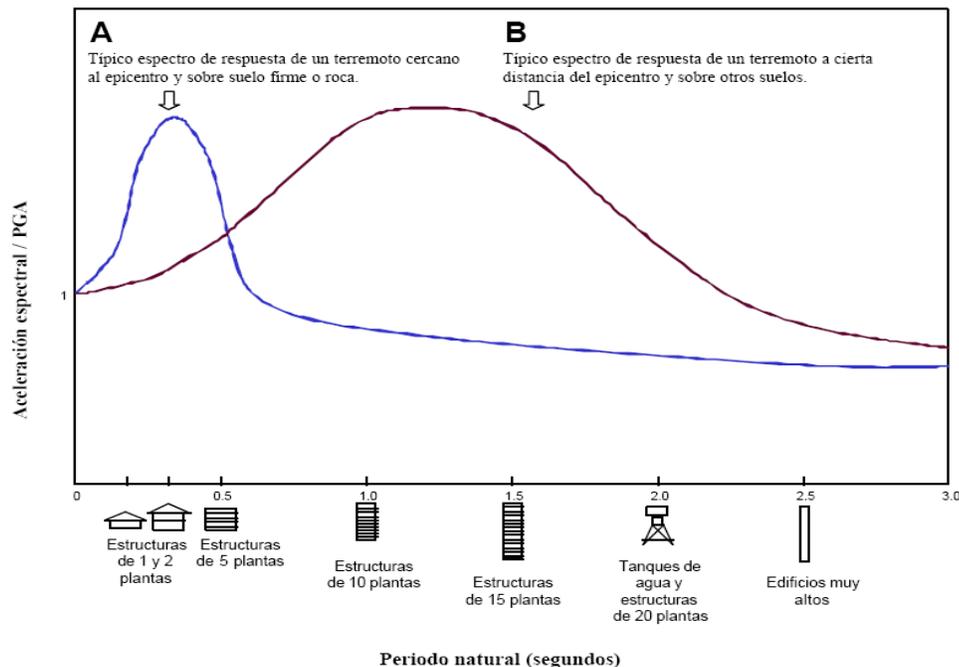
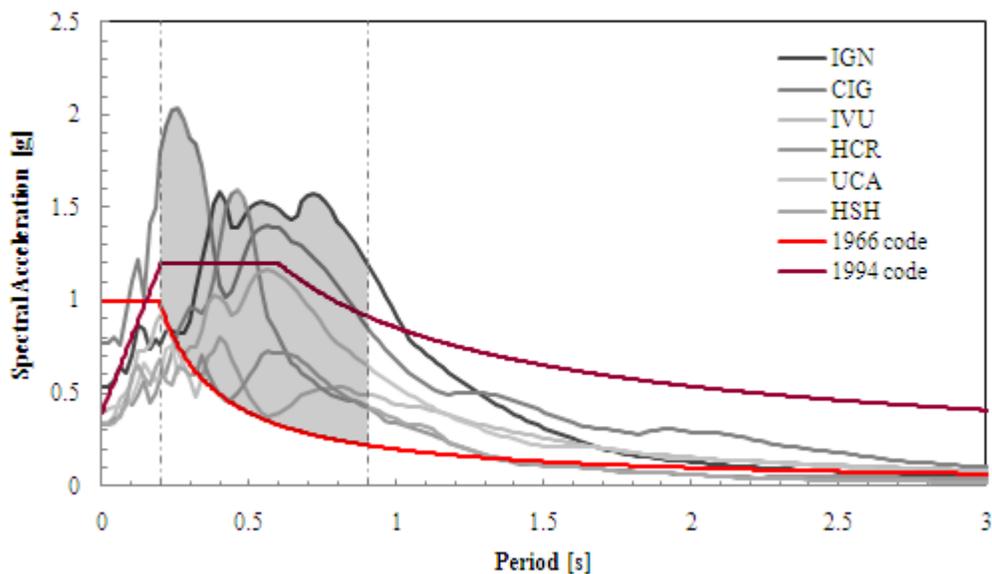
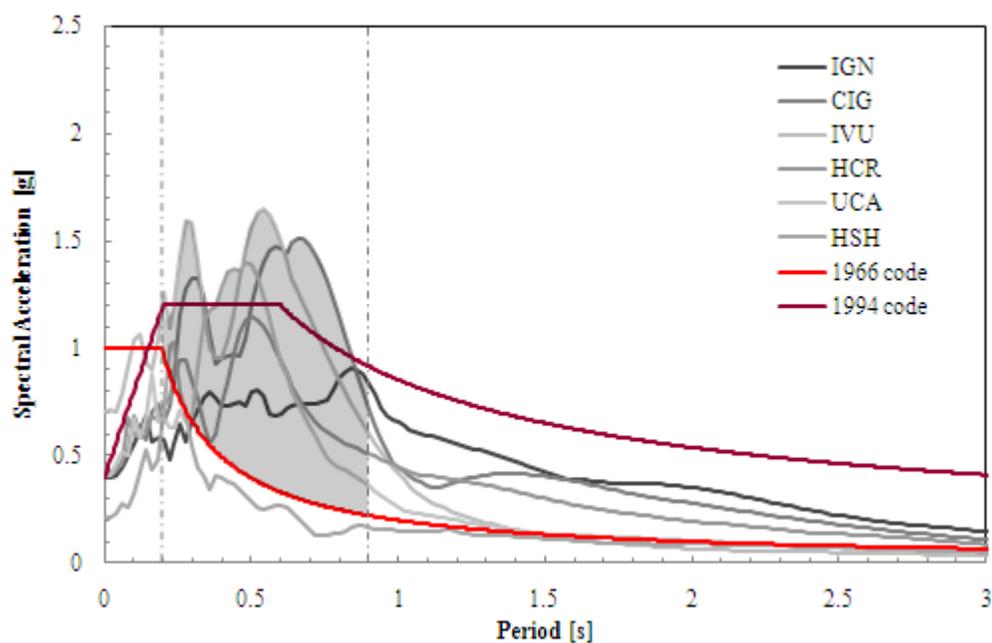


Figura 1.8: Ejemplos típicos de espectros de respuesta, junto con el tipo de edificios que pueden verse más afectados según Coburn et al., 1992 [Benito y Cabañas, 2000]

Evidencia de ello ocurrió en el país durante el sismo del 10 de Octubre de 1986. El código sísmico utilizado al momento (1966) no correspondía a las condiciones geológicas de la región, mostrando únicamente un espectro de respuesta para roca. Daños importantes ocurrieron en las construcciones de mediana altura (entre 3 y 8 niveles), en correspondencia al período predominante de los suelos del AMSS [Figura 1.9]



a) Dirección Este-Oeste



b) Dirección Norte-Sur

Figura 1.9: Espectros de Respuesta Elásticos de los códigos de 1966 y 1994, comparados con el Espectro de Respuesta del sismo de Octubre 10, 1986 (5% amortiguamiento) [Kattan, 2010]



Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

A pesar de los intentos que se han sido realizados para reducir el nivel de riesgo sísmico, existe poco conocimiento a detalle del comportamiento real de los suelos en el AMSS. Si bien el código sísmico actual utiliza factores de suelo para la determinación de las fuerzas de diseño, estos han sido establecidos sin justificación. La presente investigación pretende cuantificar el efecto de sitio en el Área Metropolitana de San Salvador, definiendo frecuencias de vibración predominantes y posibles valores de amplificación.

2 ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

Son numerosos los estudios que se han realizado para determinar los efectos de sitio en Área Metropolitana de San Salvador, sin embargo, existen discrepancias considerables en los resultados obtenidos. Así mismo, muy pocos de ellos alcanzan un producto final que pueda ser realmente utilizable en estudios de amenaza sísmica. A continuación se describen los estudios más relevantes realizados en la región

- **Shmidt-Thomé, 1975:** *“The geology in the San Salvador area (El Salvador, Central America): a basis for city development and planning”*

Primer trabajo de zonificación sísmica para el AMSS en el cual se identifican las formaciones geológicas y fallas, espesor de tierra blanca y distribución de las corrientes de lava y de roca dura en la región. El estudio hace énfasis en la importancia de la correlación entre el espesor de la tierra blanca y la intensidad del movimiento sísmico y sobre las consecuencias del material mal compactado en zonas de relleno debido al desarrollo urbano.

Información más relevante: Mapa de Iso-espesores de Tierra Blanca en parte del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)

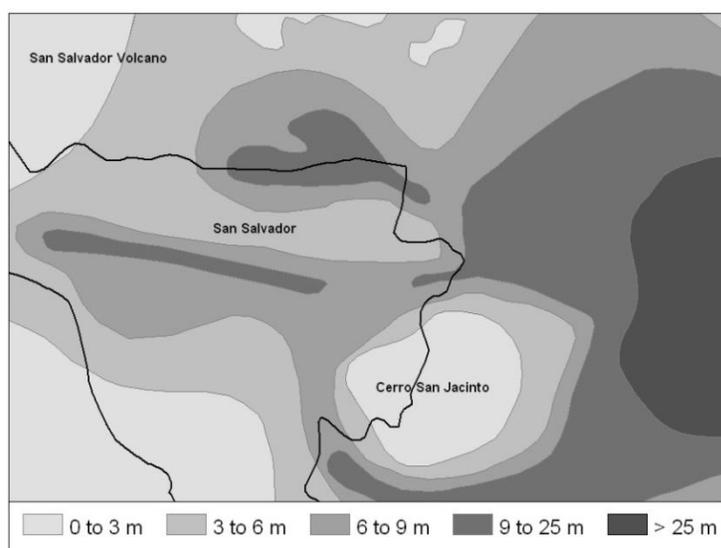


Figura 2.1: Espesor de tierra blanca según Shmidt-Thomé [Modificada de Bommer et. al., 1998]

▪ **Martínez, 1979: “Microzonificación sísmica del área metropolitana de San Salvador”**

Se toma en cuenta un concepto preliminar de la geología del subsuelo, los sistemas de fallas y la variación de los valores de aceleración del terreno en relación al tipo de suelo. Los resultados indican una relación directa en el incremento de aceleración con los espesores de tierra blanca y las tobas color café y a la profundidad de roca para terremotos de campo lejano.

Información más relevante: Factores de incremento de aceleración del terreno según espesores de tierra blanca para el Área Metropolitana de San Salvador

Tabla 2.1: Factores de incremento de aceleración del terreno según espesores de tierra blanca según Martínez, 1979 [Bommer et. al., 1998]

Espesor de tierra blanca (m)	Observaciones	Factor de Incremento
0 – 3	Roca en la base	1.00
3 – 6	Roca en la base	1.25
6 – 9	Roca en la base	1.50
9 – 25	Roca en la base	1.75
0 – 9	Roca a profundidad desconocida	2.25
9 – 25	Roca a profundidad desconocida	2.50
> 25	Roca a profundidad desconocida	5.00

▪ **Sánchez y Mojica, 1984: “Estudio de espectros de respuesta para el Área Metropolitana de San Salvador como Base para una Microzonificación Sísmica”.**

Se comprobó la influencia de las condiciones locales de suelo en el comportamiento estructural. Valores de aceleración espectral del orden de 1.6 a 2.25 veces más grandes en zonas con mayor profundidad a la roca (estructuras típicas de período igual a 1 seg.).

▪ **Linares, 1985: “Microzonificación Sísmica del Área Metropolitana de San Salvador, basada en la Observación de Microtemblores, Espectros de Respuesta y Registros de Sismoscopios”.**

Se demuestra la influencia de la geología local en la aceleración del terreno, presentando factores de amplificación del suelo que varían según el espesor de la tierra blanca.

Información más relevante: Factores de amplificación entre 1.0 y 3.0, en intervalos de 0.5, mostrados en un mapa de microzonas con intervalos de períodos definido.

Tabla 2.2: Intervalos de períodos utilizados para las microzonas y factores de amplificación según Linares, 1985 [Bommer et. al., 1998]

Zona	Período T (s)	Factor de Amplificación
I	$T < 0.20$	1.0
II	$0.20 T < 0.40$	1.5
III	$0.40 T < 0.60$	2.0
IV	$0.60 T < 0.80$	2.5
V	$0.80 T < 1.00$	3.0
VI	$T > 1.00$	> 3.0

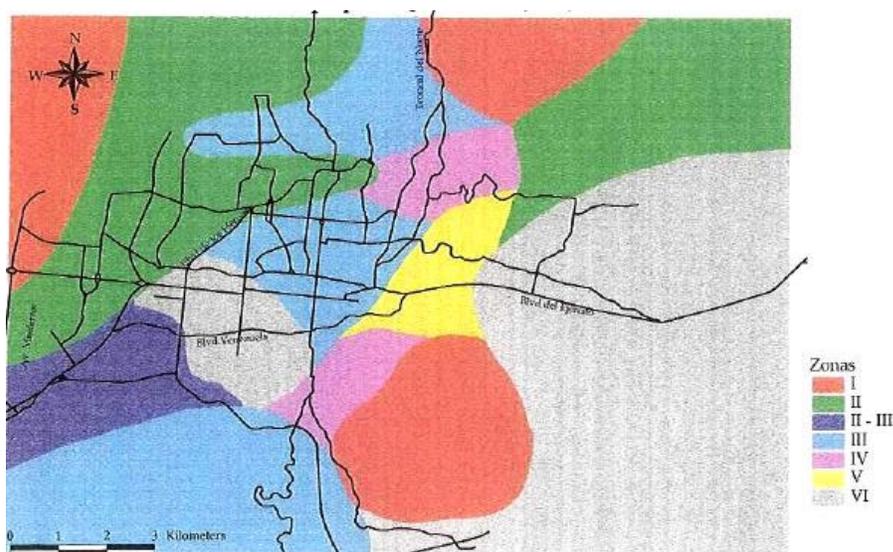


Figura 2.2: Microzonificación sísmica propuesta por Linares (1985) [Bommer et al. 1998]

- **Consorzio Salvador E. ITALTEKNA-ITALCONSULT, 1988: “Evaluación de Peligro Sísmicos en el área del Distrito A3 (San Salvador) y el Distrito 7 (Apopa), PARTE 4: Estudio de la Respuesta Sísmica Local y Elaboración de Mapa de Microzonificación Sísmica”**

Se elaboraron mapas de microzonificación sísmica en parte del AMSS basados en el análisis de la respuesta sísmica y los registros de movimiento fuerte del sismo del 10 de Octubre de 1986.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

Se tomo en cuenta la sismicidad histórica y presente de la región, se elaboraron modelos del subsuelo utilizando datos geológicos y geotécnicos existentes y se determinaron las propiedades dinámicas de los suelos volcánicos mediante pruebas tanto in situ como de laboratorio.

Se coleccionaron y ordenaron cerca de 600 perforaciones para determinar espesores de tierra blanca y tobas color café, mostrando cambios significativos con respecto al mapa presentado por Schmit-Thomé (1975). Se destaca la importancia de los espesores cumulativos de lava, información que constituye el parámetro de entrada geológico más importante para este trabajo de microzonificación, distinguiendo dos zonas caracterizadas por dichos espesores.

Se realizaron numerosas pruebas de penetración estándar (SPT) para evaluar las propiedades mecánicas de los suelos, 6 pruebas “down-hole” en diferentes sitios del AMSS para determinar la velocidad de propagación de las ondas en los primeros 30 m, así como pruebas de laboratorio con la columna resonante para determinar el módulo dinámico de rigidez al corte y el coeficiente de amortiguamiento interno con respecto a la amplitud del esfuerzo de corte cíclico.

Se presenta un mapa de propuesta de microzonificación sísmica, proponiendo espectros elásticos de diseño para cada microzona, tomando como parámetros de entrada los acelerogramas del terremoto del 10 de octubre de 1986, ajustados a una forma espectral estándar.

Información más relevante:

Mapa geológico

Mapa de Ubicación de Pozos y Sondeos e información correspondiente.

Estratigrafía esquemática de Pozos Profundos. Diagrama Litológico Tridimensional

Mapa de la "Tierra Blanca Joven" y de Zonas de Rellenos

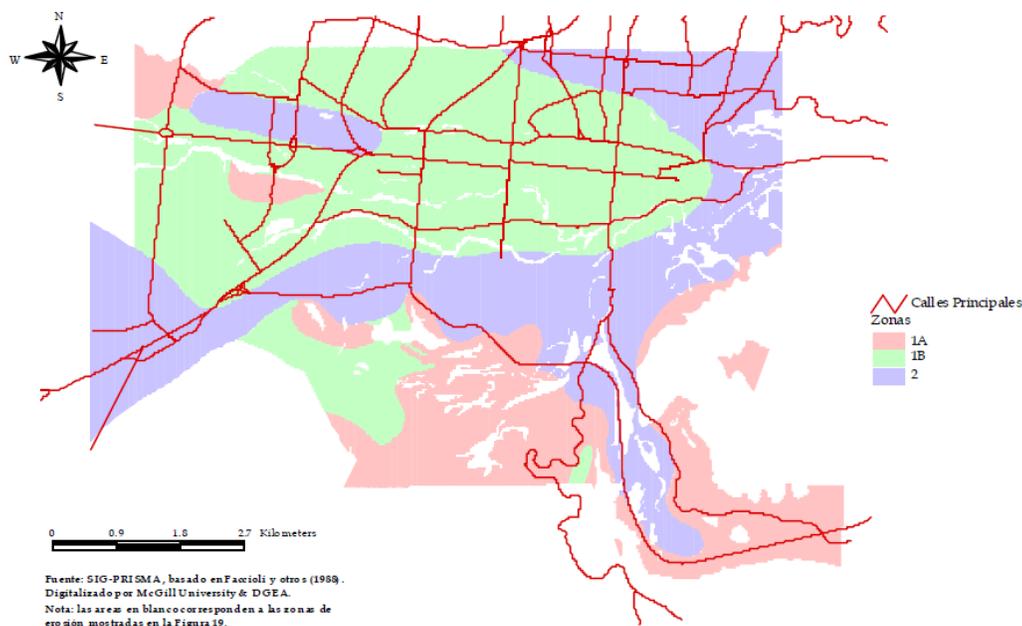
Mapa de Espesores de la Unidad "A" Superficial (Terrenos Piroclásticos más Recientes)

Mapa de los Espesores Cumulativos de la Unidad "B" (Lavas) Dentro de los Primeros 100 m

Perfiles de Velocidades de Ondas P y S en 6 Puntos del AMSS (pruebas down-hole).

Propiedades dinámicas de los suelos del AMSS (unidad A: TBJ y Tobas superiores e Inferiores): definición de relaciones de variación del modulo de corte G y del coeficiente de amortiguamiento interno ζ , en función de la deformación por corte γ (utilización del SHAKE).

Mapa Propuesto de Microzonificación Sísmica DS A3.



Zona 1: espesores cumulativos de lava menores de 35 m en los primeros 100 m: 1A: flujos de lava expuestos o en los primeros 5 m abajo de la superficie / 1B: flujos a profundidades entre 5 y 35 m.
Zona 2: espesores cumulativos de lava mayores de 65 m en los primeros 100 m.

Figura 2.3: Microzonificación Sísmica propuesta por Faccioli y otros [Bommer et al. 1998]

- **Aguilar, 1990: “Microzonificación en base a criterios geotécnicos, estimación de las propiedades dinámicas y análisis de respuesta local de los suelos del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)”**

Microzonificación del AMSS basada en el mapeo de las características geológicas y geotécnicas, estableciendo las propiedades mecánicas de los suelos a través de una base de datos de pruebas de penetración estándar (SPT) y las propiedades dinámicas, correlacionando el número de golpes N de estas pruebas con los ensayos de refracción sísmica, y combinando estos resultados con los espesores de tierra blanca y profundidad del estrato rocoso presentados por Schmith-Thomé (1975).

Información más relevante: Períodos fundamentales del suelo para seis zonas

Tabla 2.3: Zonificación Geotécnica según Aguilar, 1990 [Bommer et. al., 1998]

Zona	Profundidad a la Roca (m)	Período (s)
I	4.0	0.095
II	9.5	0.206
III	30.0	0.436
IV	35.0	0.620
V	65.0	0.890
VI	> 65.0	> 0.890

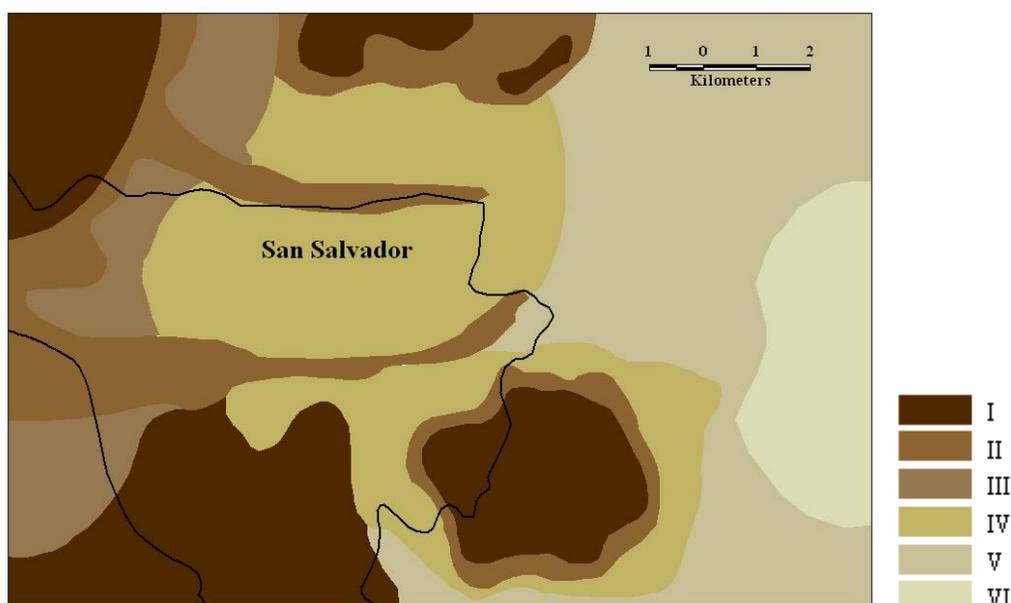


Figura 2.4: Microzonificación sísmica para el AMSS propuesta por Aguilar (1990) [Kattan, 2010]

▪ **Ingvarsson y Johansson, 1996: “Amplification of Earthquake Induced Ground Motions”**

Se utilizaron registros de microtemblores, analizados por el método de Nakamura (H/V), con el objetivo de determinar las frecuencias fundamentales y los efectos de amplificación del subsuelo en el Área Metropolitana de San Salvador. Los resultados de los microtemblores se compararon con análisis realizados a las señales del terremoto de 10 de octubre de 1986. Invarsson y Johansson obtuvieron grandes diferencias en los períodos fundamentales para microtemblores y movimiento fuerte.

Información más relevante: Períodos fundamentales del suelo y posibles valores de amplificación.

Tabla 2.4 Resultados del Sismo de Octubre 10, 1986 [Ingvarsson y Johansson, 1996]

Estación	T (N-S) [s]	T (E-W) [s]
CIG	0.59	0.56
HCR	0.67	0.53
HSH	1.11	1.11
UCA	0.67	0.67
IVU	0.56	0.56
IGN	0.67	1.0

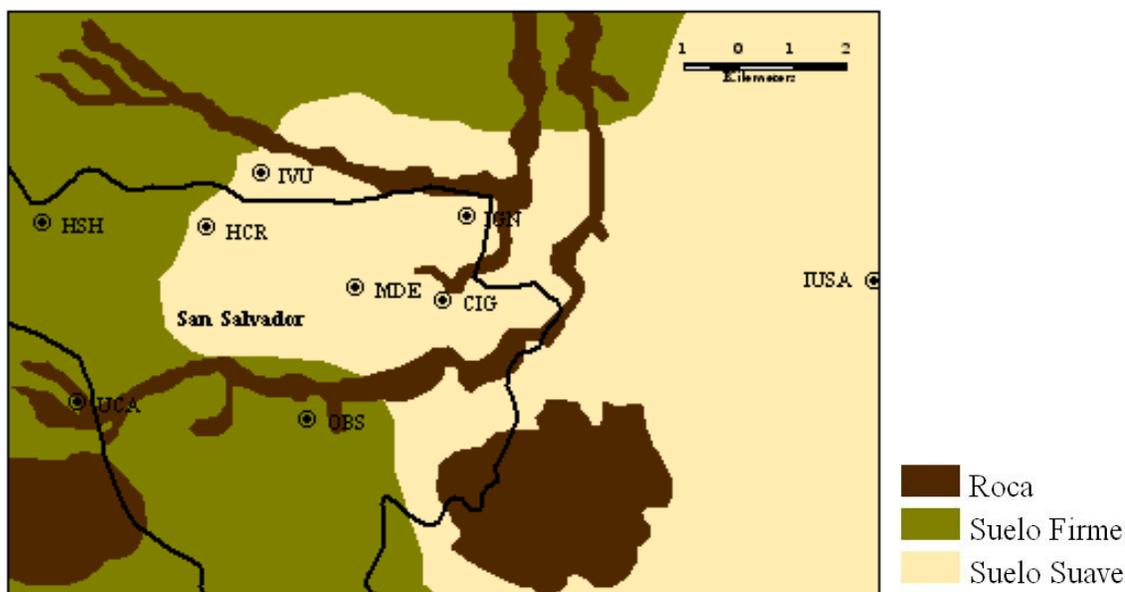


Figura 2.5: Microzonificación sísmica propuesta por Invarsson y Johansson, 1985 [Kattan, 2010]

▪ **Bommer et al., 1998: “Riesgo Sísmico en la Región Metropolitana de San Salvador”.**

Se presenta un marco global en términos de sismicidad de El Salvador y el impacto de los terremotos en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS).

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

En este artículo se establece una clara concentración de actividad sísmica en buena parte del Área Metropolitana de San Salvador y se demuestra que la amenaza asociada con los sismos en esta zona aumenta debido a las características topográficas y geológicas, particularmente debido al efecto amplificador de las cenizas volcánicas, sobre la cual reside la mayor parte de la ciudad. Se presenta además un resumen de los estudios de microzonificación sísmica y geotécnica realizados hasta ese año.

- **Atakan et al., 2004: “Local Site Effects on Microtremors, Weak and Strong Ground Motion in San Salvador, El Salvador”**

La respuesta de sitio se estimó utilizando datos de microtemblores, movimiento moderado y movimiento fuerte. El método de la razón espectral fue utilizado en sitios donde se tenían estaciones acelerográficas permanentes para el sismo del 10 de Octubre de 1986. Los resultados de los microtemblores fueron comparados con datos recolectados de sismos de subducción en dichas estaciones, así como con los datos del sismo de Octubre de 1986.

Información más relevante: Amplificaciones espectrales en distintos puntos del AMSS. Comparación entre microtemblores, movimiento fuerte y movimiento moderado

Tabla 2.5: Amplificaciones Espectrales [Atakan et al., 2004]

Estación	Microtemblor			Movimiento Moderado			Movimiento Fuerte		
	N-S	E-W	Mean	N-S	E-W	Mean	N-S	E-W	Mean
CIG	10.4	7.8	9.1	4.9	4.0	4.5	4.1	3.1	3.6
IGN	11.1	10.1	10.6	7.3	6.3	6.8	6.1	2.9	4.5
UCA	6.0	--	--	4.6	--	--	3.3	3.4	3.4
HCR	5.5	6.2	5.9	7.0	3.5	5.2	5.2	1.4	3.3

- **Schmidt, 2005: Mitigación de Georriesgos en Centroamérica: Amenaza sísmica relativa del Área Metropolitana de San Salvador (AMSS)**

En este trabajo se identificaron los factores relevantes a la amenaza sísmica como: la aceleración del terreno, la amplificación del terreno, la licuefacción, la amplificación topográfica y el efecto por rellenos artificiales, expresando los factores mencionados en forma relativa.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

Las unidades litológicas del Mapa Geológico de El Salvador (BGR, 1978) fueron reclasificadas en cuestión por el efecto de la amplificación del terreno. La litología fue dividida en 3 grupos de susceptibilidad por amplificación del terreno: Valor 3 = susceptibilidad alta (Material poco o no consolidado. Depósitos sedimentarios del cuaternario como depósitos coluviales, fluviales y fluvio-lacustres; depósitos volcánicos epiclásticos retrabajados); Valor 2 = susceptibilidad media (Productos volcánicos blandos / suaves como piroclástitas (cenizas, tobas,...), epiclástitas y unidades efusivas ácidas – básicas como también edificios volcánicos); y Valor 1 = susceptibilidad baja (rocas duras y fuertemente compactadas o soldadas como los flujos de lavas básicas hasta ácidas)

Información más relevante: Mapa raster de amplificación del terreno, Mapa de amenaza sísmica relativa

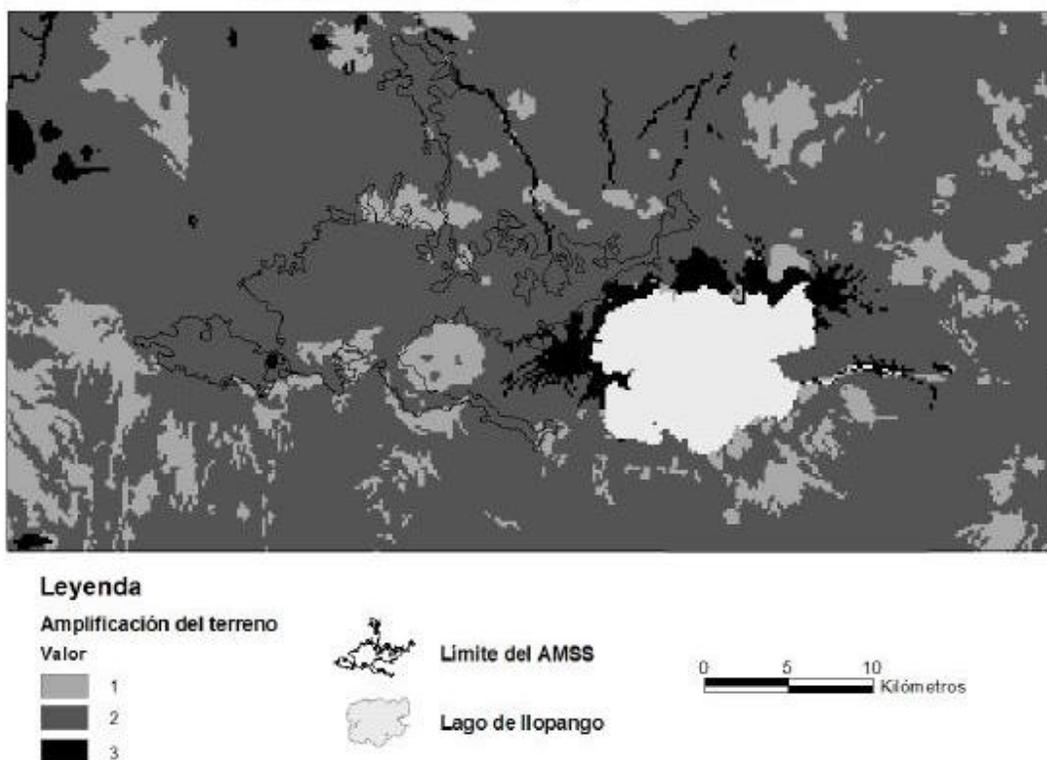


Figura 2.7: Mapa Raster de Amplificación del Terreno [Schmidt, 2005]

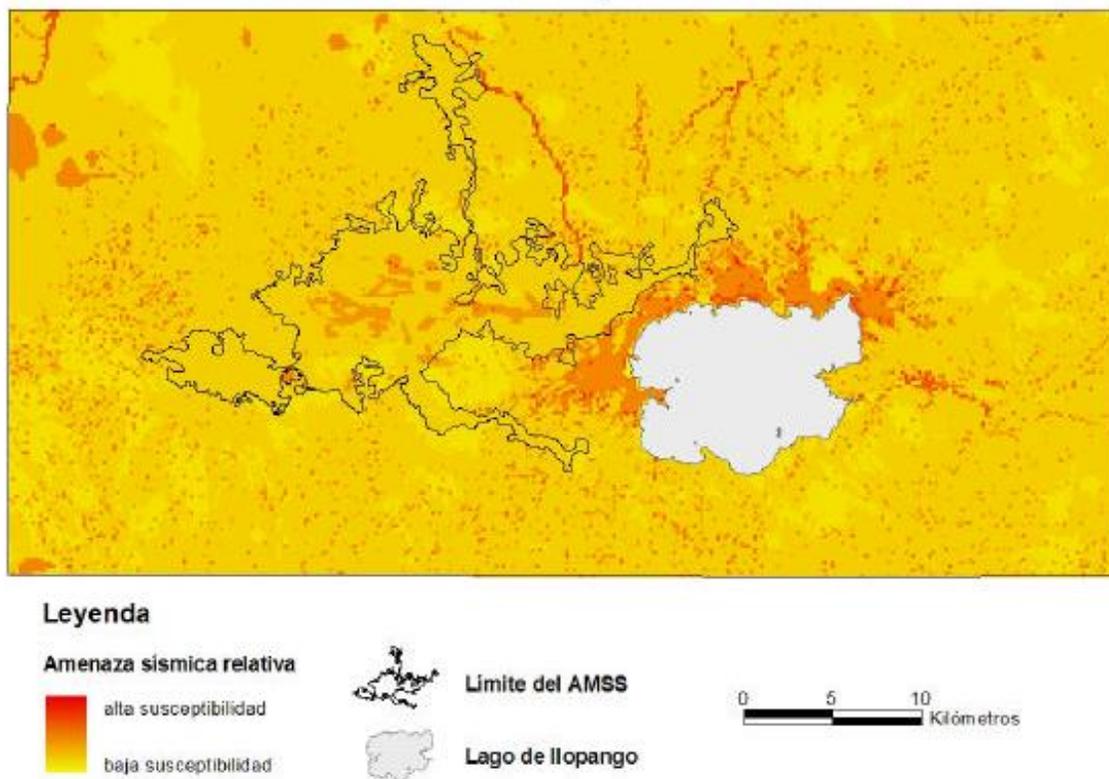


Figura 2.8: Mapa de Amenaza Sísmica Relativa [Schmidt, 2005]

- Salazar et al., 2007: “*Hybrid Inversion Technique for the Evaluation of Source, Path, and Site Effects Employing S-Wave Spectra for Subduction and Upper-Crustal Earthquakes in El Salvador*”

Se propone una técnica de Análisis de Inversión Híbrida (HIA) para la estimación de la fuente, trayectoria y efectos de sitio en 23 estaciones acelerográficas en El Salvador. La aplicación de la técnica HIA reveló funciones de transferencia del subsuelo caracterizadas por amplificaciones dos veces mayores que aquellas derivadas de la aplicación de la técnica de razones espectrales.

Información más relevante: Amplificación espectral en sitios donde se encuentran ubicadas estaciones acelerográficas (red de la UCA y el SNET)

Tabla 2.6: Periodos Pico y Amplificaciones obtenidas en Estaciones Acelerográficas en San Salvador aplicando la Técnica de Inversión Híbrida [Salazar et al., 2007]

Estación	Periodo (seg.)	Amplificación	Espesor de Tierra Blanca
OB	0.28	10.6	3–6
RS	0.28	9.5	3–6
UCA	0.32	9.9	0–3
VS	0.45	11.9	3–6
ESJO	0.47	7.1	3–6
CI	0.85	11.5	6–9
AI	1.14	13.1	25
DB	2.05	7.4	6–9
CSBR	2.05	7.4	25

▪ **Reyes y Sorto, 2007: “Evaluación de microsismos en la ciudad de Santa Tecla”**

Se analizaron registros de microtemblores con la técnica de Nakamura para obtener los períodos predominantes del suelo en la ciudad de Santa Tecla. Se realizaron comparaciones con los registros de movimiento fuerte obtenidos en el Hospital San Rafael.

Información más relevante: Períodos fundamentales en distintos puntos de Santa Tecla

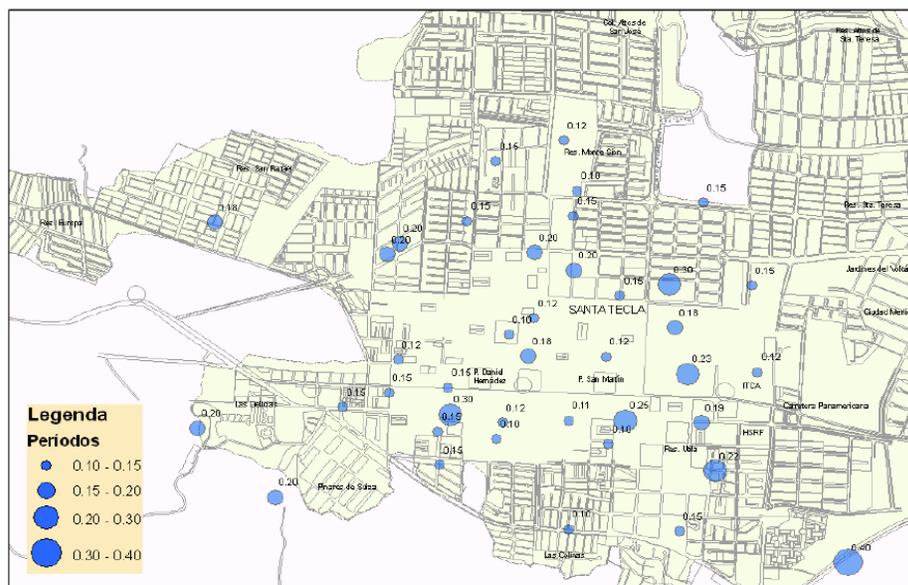


Figura 2.9: Períodos Fundamentales de Vibración del Suelo en la Ciudad de Santa Tecla [Reyes y Sorto, 2007]

■ **Galdámez y Kattan, 2007: “Estudio de Respuesta de Capas Superficiales de Suelo en el Área Metropolitana de San Salvador”**

Estudio de los efectos de la geología superficial en el movimiento sísmico fuerte (efectos de sitio) utilizando registros de movimiento fuerte y datos de movimiento débil (microtemblores) en diferentes puntos del Área Metropolitana de San Salvador.

Se evaluaron diversas metodologías para conocer la respuesta de sitio comúnmente utilizadas en estudios de microzonificación (relación espectral con respecto a un sitio de referencia H_s/H_r , relación espectral sedimento a basamento rocoso H_s/H_b , relación espectral de las componentes horizontal a vertical H/V) y su aplicabilidad para las condiciones geológicas particulares de la región. Se realizaron análisis comparativos de registros de microtemblores y registros de movimiento fuerte en sitios de condiciones geológicas conocidas (pozos a cielo abierto del SNET)

Información más relevante: Períodos de vibración predominantes y posibles valores de amplificación en cada lugar según diferentes metodologías.

Tabla 2.7: Períodos Fundamentales y Espesores de Tierra Blanca [Galdamez y Kattan, 2007]

Estación	H (m) / Geología base	T H/V (seg)	A H/V	T H _s /H _r (seg)	A H _s /H _r	T H _s /H _b (seg)	A H _s /H _b
CPR	H = 12.5 / Roca ing. en la base. Colada de lava.	0.21	2.60	0.19	6.10	0.19	4.59
SEM	H = 15.5 / Boleos y roca basáltica en la base	0.41	3.17	0.23	4.00	0.14	3.60
VDU	H = 23 / Estrato firme en la base.	0.40	3.48	0.42	4.00	0.35	6.53
CENREN	H = 30 / Roca a prof. desconocida	0.40	3.00	---		0.47	5.84

▪ **Burgos et al., 2007: “Primera Fase De La Microzonificación Sísmica en Las Principales Ciudades De El Salvador”**

Estudio de datos de microtemblores utilizando la Técnica de Nakamura (H/V) en puntos donde se encuentran ubicadas las estaciones acelerográficas en el Área Metropolitana de san Salvador (AMSS), así como puntos estratégicos de geología conocida. Asimismo, se efectuaron mediciones de arreglos con el fin de conocer los perfiles de velocidades de ondas de corte en cada sitio (SPAC). Comparación con resultados obtenidos para movimiento fuerte mediante el método de Inversión Híbrida (Salazar, 2004) y el método de la Relación Espectral Hs/Hr (Borcherdt, 1970)

Información más relevante: Períodos de vibración predominantes en sitios donde se encuentran ubicadas las estaciones acelerográficas [Tabla A.9]. Comparación de perfiles de velocidad obtenidos con arreglos sísmicos de microtrepidación e información obtenida de los pozos a cielo abierto.

Tabla 2.8. Períodos predominantes en cada estación [Burgos et al., 2007]

Sitio	Código	Periodo (seg.)	Espesor de Tierra Blanca (m)
Hospital San Rafael	HSRF		N/A
CENREN	CENREN	0.35	6-9
Casa Presidencial	CPR	0.2, 0.35	3-6
Externado San Jose	ESJO	0.12, 0.40	3-6
Seminario San Jose de La Montaña	SEM	0.35	3-6
Parque Saburo Hirao	SJAC	0.15, 0.28, 0.40	3-6
Parqueo Hotel Radisson	HRPS	0.2	3-6
Secretaria Nacional de Estudios Territoriales	SNET	0.4	6-9
Universidad Centroamericana Jose Simeon Cañas	UCA	0.20, 0.30	3-6
Centro de Investigaciones Geotecnicas	CIG	0.13, 0.80	3-6
Viveros de DUA	VDU	0.38	3-6
Hogar del Niño	HDN	0.3	6-9
Santa Tecla (Iglesia Concepcion)	ST	0.10, 0.40	n/a

- **NORSAR y OPAMSS, 2008:** *“Earthquake Risk Reduction in Guatemala, El Salvador, and Nicaragua with regional cooperation to Honduras, Costa Rica, and Panama. Task 6: Microzonation in San Salvador”*

Determinación de frecuencias predominantes, velocidades de onda y espesores de tierra blanca en 10 zonas del Área Metropolitana de San Salvador, analizando registros de microtemblores mediante la Técnica de Nakamura (H/V) y correlaciones a partir de la metodología propuesta por Lang et al. (2006) y Bray y Rodriguez Marek (1997)

Información más relevante: Valores de frecuencias de vibración predominantes, velocidades de onda, profundidades aproximadas y tipo de suelo en 10 zonas del AMSS

3 ESTUDIO DE RESPUESTA DE SITIO EN EL AMSS

3.1 Metodologías Utilizadas para el Estudio de Respuesta de Sitio

Los métodos existentes para la evaluación de respuesta de sitio se pueden dividir en dos grupos: (i) métodos analíticos, los cuales realizan un análisis numérico de amplificación, con base en los parámetros físicos del suelo (espesores y velocidades de onda de los estratos) y (ii) métodos empíricos, que se basan en registros de datos sísmicos en el sitio de interés, de tal manera que se puedan determinar amplificaciones relativas y períodos dominantes de vibración.

Los métodos analíticos requieren una descripción detallada de las capas del suelo que conforman el estrato y de las fuentes que generan los sismos, las cuales en algunos casos pueden ser muy complejas, dificultando su interpretación y la construcción de un modelo matemático realista. Los métodos empíricos no requieren una descripción detallada de los distintos estratos, pero si una gran cantidad de registros o información sísmica.

Entre los métodos empíricos se distinguen el método de la razón espectral con respecto a un sitio de referencia (método de Borchardt) y el método de la razón espectral H/V (técnica de Nakamura).

Para fines de estudio de respuesta de sitio en el AMSS, se propone utilizar tanto el método analítico lineal equivalente (software SHAKE2000) como los métodos empíricos (Borchardt y Nakamura para movimiento fuerte), que permitan la validación de resultados y calibración de los modelos.

3.1.1 Método Analítico

El método se basa en los conocimientos existentes de los parámetros físicos y propiedades dinámicas de los suelos: los espesores de las capas de suelos no consolidados, velocidades de ondas de corte, módulo de cortante y amortiguamiento (como función de la deformación por corte).

Existen programas de cómputo para el cálculo de la respuesta de sitio, tales como SHAKE2000, que utilizan el método de propagación unidimensional de las ondas sísmicas. El modelo físico incorporado en el software se muestra en la Figura 3.1; la base (estrato N) representa un semiespacio elástico (roca). Cada uno de los estratos, considerados homogéneos e isotrópicos, son caracterizados por el espesor h , la densidad ρ , el módulo de cortante G , y el coeficiente de amortiguamiento ζ .

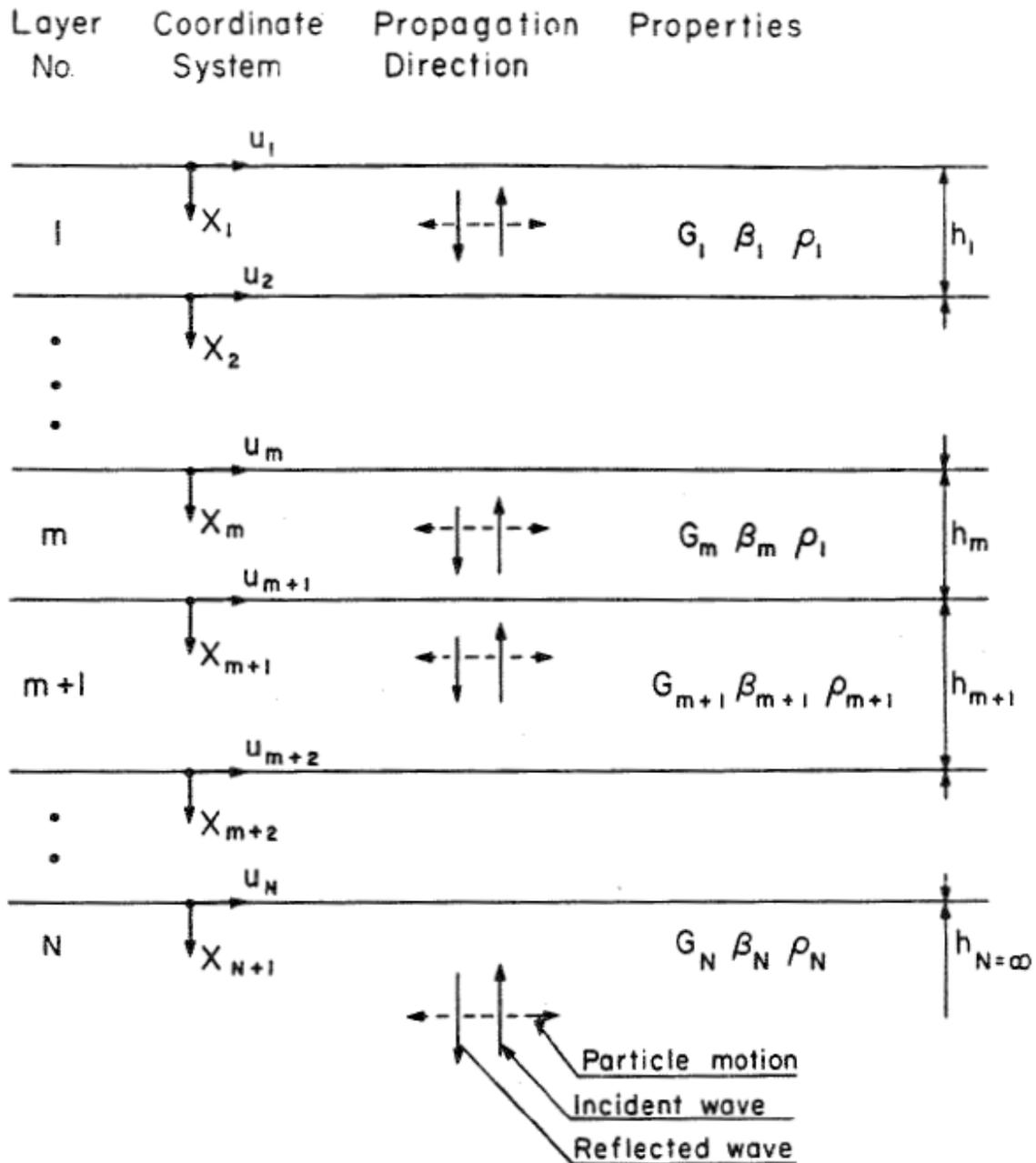


Figura 3.1: Modelo Unidimensional [Schnabel et al., 1972]

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

La propagación vertical de las ondas sísmicas en el sistema mostrado en la Figura 3.1, debe satisfacer la siguiente ecuación de onda:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \eta \frac{\partial^3 u}{\partial x^2 \partial t}, \quad \eta = \frac{2G\zeta}{\omega} \quad [\text{Ec. 3.1}]$$

Los siguientes supuestos implicados en el análisis realizado con SHAKE:

- El sistema se extiende infinitamente en la dirección horizontal.
- Cada capa en el sistema queda completamente definida por el valor de módulo de corte, el coeficiente de amortiguamiento crítico, densidad y espesor. Estos valores son independientes de la frecuencia,
- Las respuestas en el sistema son causados por la propagación de ondas de corte hacia arriba desde la roca subyacente.
- Las ondas de corte se expresan como valores de aceleración espaciados intervalos de tiempo constantes. La repetición cíclica del historial de aceleración está implícito en la solución.
- La dependencia de la del módulo de corte y el amortiguamiento se considera mediante el procedimiento lineal equivalente, basado en el cálculo de una deformación unitaria efectiva promedio para cada capa.

El procedimiento iterativo lineal equivalente para tomar en cuenta la no-linealidad del suelo requiere la definición del módulo de cizalla G y del coeficiente de amortiguamiento crítico ζ , en función del deformación unitaria por corte γ , relación que puede ser determinada experimentalmente y se expresa como:

$$G = G_0 f_1(\gamma) \quad y \quad \zeta = f_2(\gamma) \quad [\text{Ec. 3.2}]$$

El Consorzio Salvador E. ITALTEKNA-ITALCONSULT, definió estas relaciones para dos grupos de materiales: el primero, denominado “Grupo A” constituido por suelo no cementante y representativo de la TBJ, y el segundo, denominado “Grupo B” constituido por material cementado y representativo de las Tobas Superiores [Figura 3.2]

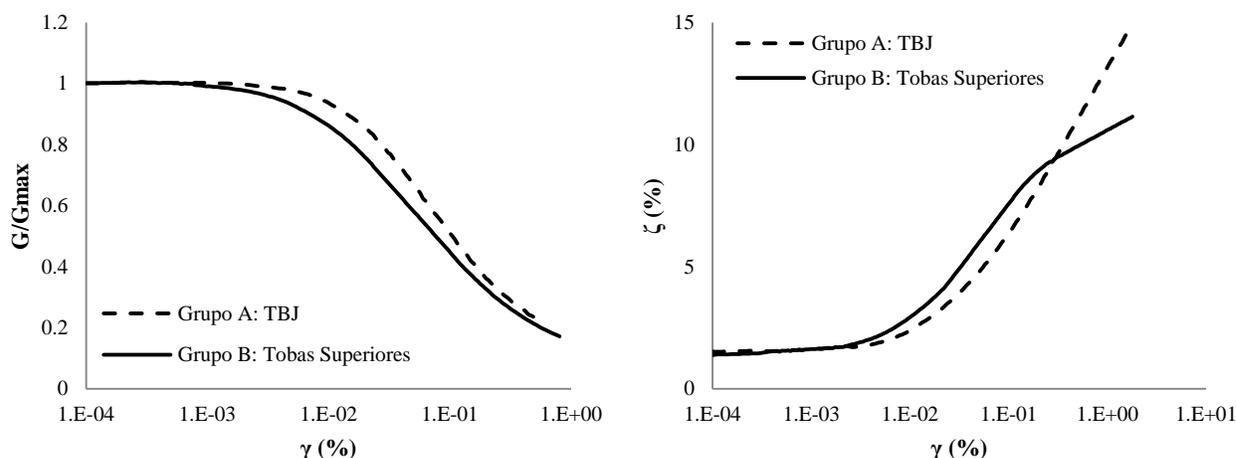


Figura 3.2: a) Módulo de cizalla G y b) coeficiente de amortiguamiento crítico ζ , en función de la deformación unitaria por corte γ [Consorzio Salvador E. ITALTEKNA-ITALCONSULT, 1988]

Asimismo, mediante la realización de pruebas “Down-Hole” se determinaron velocidades de ondas típicas para las distintas unidades: “Unidad A” (TBJ, Tobas Superiores y Tobas Inferiores), $150 \leq V_s \leq 450$ m/s y $300 \leq V_p \leq 1000$ m/s, y “Unidad B” (lavas) $V_s \approx 2000$ m/s y $2600 \leq V_p \leq 3200$ m/s. Estos datos, junto con la información geológica/geotécnica recopilada especialmente de perforaciones profundas, serán utilizados para el cálculo unidimensional de la respuesta sísmica.

3.1.2 Métodos Empíricos

3.1.2.1 Método de Borchardt

El método de la razón espectral con respecto a un sitio de referencia, fue introducido por R. D. Borchardt en 1970, sobre la base de un estudio realizado en San Francisco, California. El método mide la relación del valor absoluto de la transformada de Fourier obtenida para un sitio ubicado sobre sedimentos no consolidados, con respecto al valor obtenido simultáneamente para un sitio cercano de base rocosa, de tal manera que los efectos de la fuente y el trayecto de las ondas se puedan suponer idénticos y ser eliminados de la ecuación [Galdamez y Kattan, 2007].

En general, la señal de salida de un instrumento (acelerógrafo) $a(t)$ puede caracterizarse mediante la función de generación $i(t)$, afectada por la función de transferencia del trayecto $h_p(t)$, la función de transferencia de la geología superficial $h_g(t)$ y la función de transferencia del instrumento $h_r(t)$

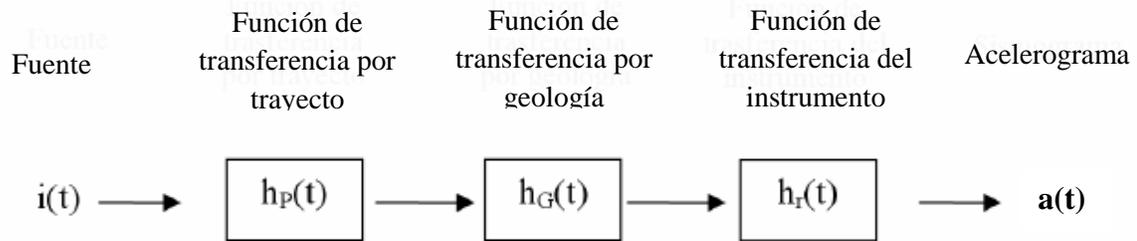


Figura 3.3: Función de Transferencia de la Medición [modificada de Borchardt, 1970]

Transformando la función de la Figura 3.4 al dominio de la frecuencia, podemos escribir la señal de salida en términos de las FDT y la función de generación.

$$A(f) = I(f)H_p(f)H_g(f)H_r(f) \quad [\text{Ec. 3.3}]$$

Utilizando como referencia un sitio sobre base rocosa, y siendo aspectos comunes la fuente, el trayecto y los instrumentos de registro, la respuesta característica de la geología local puede obtenerse según la ecuación 3.4

$$\frac{A_s(f)}{A_b(f)} = \frac{H_{gs}(f)}{H_{gb}(f)} \quad [\text{Ec. 3.4}]$$

Donde $A_s(f)$ y $A_b(f)$ son las señales en el suelo y en la roca respectivamente, y $H_{gs}(f)$ y $H_{gb}(f)$ representan la geología en suelo y roca respectivamente.

La validez del método está condicionada entonces a (i) que los efectos de la fuente y los instrumentos utilizados sean comunes para ambos sitios, (ii) que la distancia que separa a ambos sitios sea pequeña con respecto a la distancia entre los mismos y el epicentro para que los efectos del trayecto de las ondas a través de la corteza puedan considerarse iguales, y finalmente, (iii) que el efecto local en el sitio de referencia sobre la base rocosa sea despreciable.

En la realidad no es común encontrarse con afloramientos rocosos en las cercanías de los depósitos de suelo, por lo que el efecto del trayecto puede afectar los registros, por lo que la metodología no es recomendable para sismos locales.

Como sitios de referencia se ha propuesto utilizar las estaciones ubicadas en Hotel Crowne Plaza (CRWN) (antes Hotel Sheraton / Hotel Radisson Plaza), la estación ubicada en el fondo del pozo de Casa Presidencial (CPRF) (antes Ministerio de Relaciones Exteriores), así como la estación de Panchimalco de la red de la Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, a fin de realizar un análisis comparativo entre ellas.

Además, se tienen registros en el fondo y superficie de los pozos a cielo abierto ubicados en Casa Presidencial (CPR), Seminario San José de la Montaña (SEM), Viveros de Dua (VDU) y Centro de Recursos Naturales (CENREN), los cuales, de cumplirse las condiciones adecuadas, podrán ser utilizados para estimar la función de transferencia evaluando directamente la relación de los espectros obtenidos en la superficie y el basamento rocoso.

3.1.2.2 Técnica de Nakamura

El método de la razón espectral sedimento a basamento rocoso depende de la existencia de un sitio de referencia adecuado, es decir, un sitio con una respuesta propia despreciable. El hecho que en la realidad no es común encontrar un sitio tal en las cercanías de los sitios de interés (a una distancia que permita considerar los efectos del trayecto despreciables), ha llevado al desarrollo de metodologías alternativas que no requieren la definición de un sitio de referencia. Una de las metodologías más comúnmente utilizadas para estudios de respuesta de sitio en la actualidad se conoce como técnica de Nakamura (Nakamura, 1989), o método espectral H/V.

En 1989 Nakamura introdujo una metodología basada en la relación espectral entre la componente horizontal (H) y vertical (V) del movimiento, en el dominio frecuencial, como un estimador de la respuesta de sitio. Supone que la razón H/V corresponde a la función de transferencia de los niveles superficiales sometidos a movimientos horizontales.

La función de transferencia de las capas superficiales queda definida como [Nakamura, 1989]:

$$S_T = S_{HS}/S_{HB} \quad [\text{Ec. 3.5}]$$

Donde S_{HS} y S_{HB} corresponden al espectro de amplitud de Fourier en la superficie S y la base B del nivel del suelo respectivamente. Nakamura considera que la componente S_{HB} no se ve afectada por las ondas superficiales. El efecto de las ondas Rayleigh debe incluirse en el espectro vertical del microtemblor en la superficie, pero no en el sub-estrato duro, asumiendo que la componente vertical no se amplifica.

Define entonces E_S que considera el efecto de las ondas superficiales en la componente vertical del microtemblor. De modo que si no hay ondas Rayleigh $E_S = 1$, el cual será más grande, si el efecto de las ondas Rayleigh se incrementa. [Nakamura, 1989]:

$$E_S = S_{VS}/S_{VB} \quad [\text{Ec. 3.6}]$$

Asumiendo entonces que el efecto de las ondas Rayleigh es igual para las componentes horizontal y vertical, se define una nueva función de transferencia S_{TT} , más confiable, tras la eliminación del efecto de las ondas Rayleigh.

Definiendo,

$$S_{TT} = S_T/E_S = R_S/R_B \quad [\text{Ec. 3.7}]$$

Donde

$$R_S = S_{HS}/S_{VS} \quad [\text{Ec. 3.8}]$$

$$R_B = S_{HB}/S_{VB} \quad [\text{Ec. 3.9}]$$

R_S y R_B fueron obtenidos al dividir los espectros horizontales entre los verticales en superficie y basamento. R_B es aproximadamente 1 para un amplio rango de frecuencias en sitios donde existe un sub-estrato firme, y la propagación es aproximadamente igual en todas las direcciones.

Entonces

$$S_{TT} \cong R_S \quad [\text{Ec. 3.10}]$$

Lo que significa que la función de transferencia de capas superficiales puede ser estimada solamente con los registros en superficie. R_B debe estar libre del efecto de ondas Rayleigh y tener características únicas del sitio (una estimación más confiable de la relación S_{TT} se determinará al multiplicarla por $1/R_B$ como término de compensación si existe información relativa al sitio).

La técnica de la razón espectral H/V originalmente planteada por Nakamura para analizar las ondas Rayleigh en los registros de microtemblores, ha sido ampliamente aplicada para estimar funciones de transferencia empíricas utilizando la parte intensa de las ondas S de los registros de movimiento fuerte [ver Lermo y Chavez-García, 1993]

3.1.3 Estudio de Espectros de Respuesta Normalizados (Sa/PGA)

Debido a las diferencias encontradas utilizando distintos sitios como referencia para el análisis por el método de Borchardt, ha surgido la necesidad de estudiar el comportamiento tanto de los de los sitios investigados como de los sitios de referencia. Los espectros de respuesta normalizados (Sa/PGA), permiten estudiar la forma espectral típica para los distintos sitios, lo cual permite inferir de una manera aproximada, el período predominante (T_0) y/o rango de períodos donde se dan las máximas amplificaciones.

3.2 Información Existente

3.2.1 Información Geológica

Actualmente se cuenta con datos de perforaciones profundas, pruebas dinámicas in-situ y análisis de afloramientos (columnas estratigráficas), según se muestra en la Figura 3.4 y la Tabla 3.1.

Siguiendo la clasificación geológica propuesta por ITALTEKNA-ITALCONSULT en el estudio de Microzonificación realizado en el AMSS (1988), y considerando que debido a que el contraste de impedancia entre los depósitos no es muy marcado (Sección 1.4.3), la respuesta al paso de una onda sísmica es similar, se procedió a determinar espesores de las distintas unidades, se ha procesado la información tomando en cuenta tanto la información litológica y como la estratigrafía de la zona.

La Figura 3.5 muestra la información procesada en las cercanías de las estaciones consideradas como sitios de referencia: Hotel Crowne Plaza, Panchimalco y Casa Presidencial – Fondo del Pozo

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

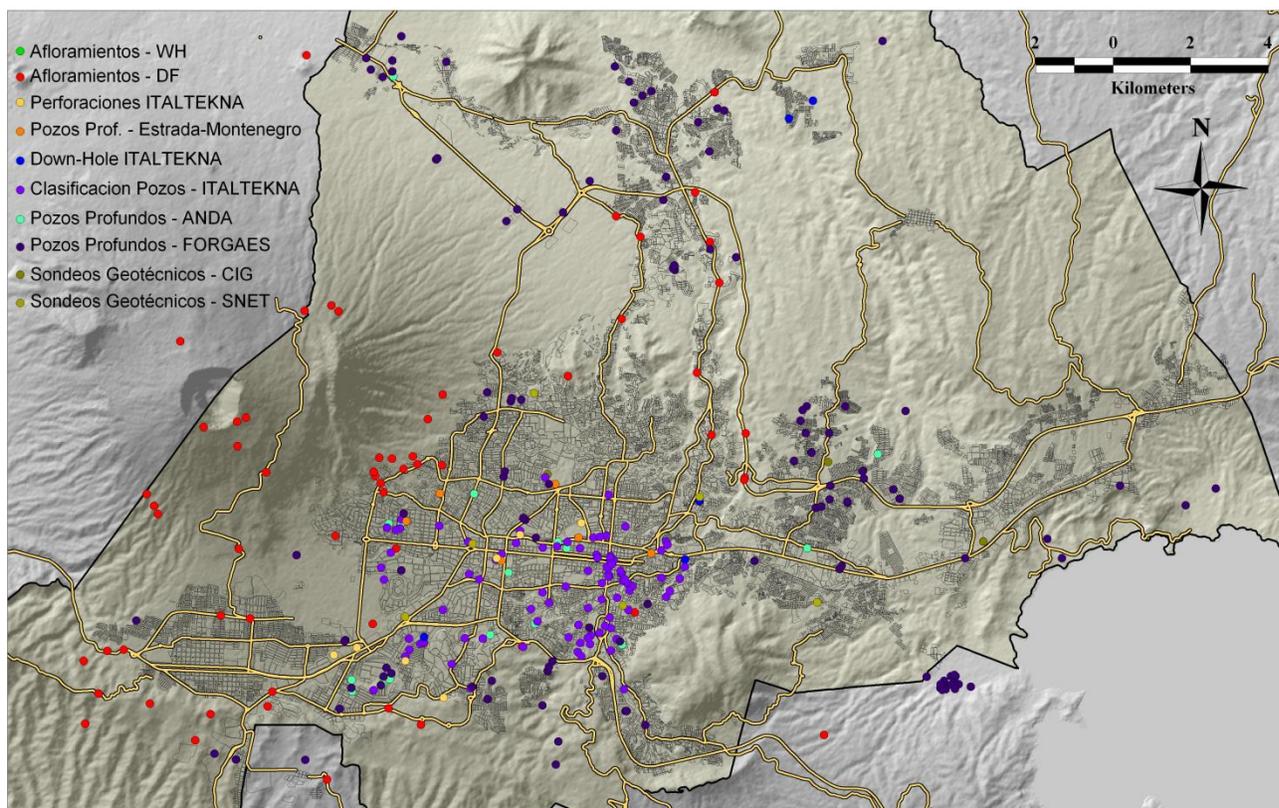


Figura 3.4: Puntos con Información Geológica en el AMSS

Tabla 3.1: Información Geológica Existente para estudio de Respuesta de Sitio

Lugar / Nombre	Información	Responsable
Pozos a Cielo Abierto Instrumentados	Clasificación de suelos + SPT + Resistividad	DGOA (antes SNET /CIG)
Perforaciones Profundas de ANDA	Litología	ANDA
Recopilación de Perforaciones Profundas	Clasificación de Suelos + SPT	Consorzio Salvador E. Italtekná-Italconsult, 1988
Recopilación de Perforaciones Profundas	Litología	FORGAES (SIHI)
Perforaciones Profundas de ANDA y estudios geotécnicos.	Clasificación en Unidad "A" y "B"	Consorzio Salvador E. Italtekná-Italconsult, 1988
Recopilación de Perforaciones Profundas "Estrada y Montenegro"	Clasificación en Unidad "A" y "B"	Consorzio Salvador E. Italtekná-Italconsult, 1988
Perforaciones para Estudio del Subsuelo del Área Metropolitana	Clasificación de Suelos + SPT	CIG, 1993
Pruebas Down-Hole	Velocidades de onda para los 30m superficiales (Vs30)	Consorzio Salvador E. Italtekná-Italconsult, 1988
Estudio de Vulcanismo y Geología del AMSS - Afloramientos	Columnas (Estratigrafía)	Dolors Ferres (UNAM) y Walter Hernández (SNET)

Kilómetro 5½ Carretera a Santa Tecla y Calle Las Mercedes, Edificio ISTA, frente a Círculo Militar y contiguo a Parque de Pelota, San Salvador, El Salvador, Centro América.

Tel.: 2132-9540 Fax: (503) 2132-9429

www.snet.gob.sv

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

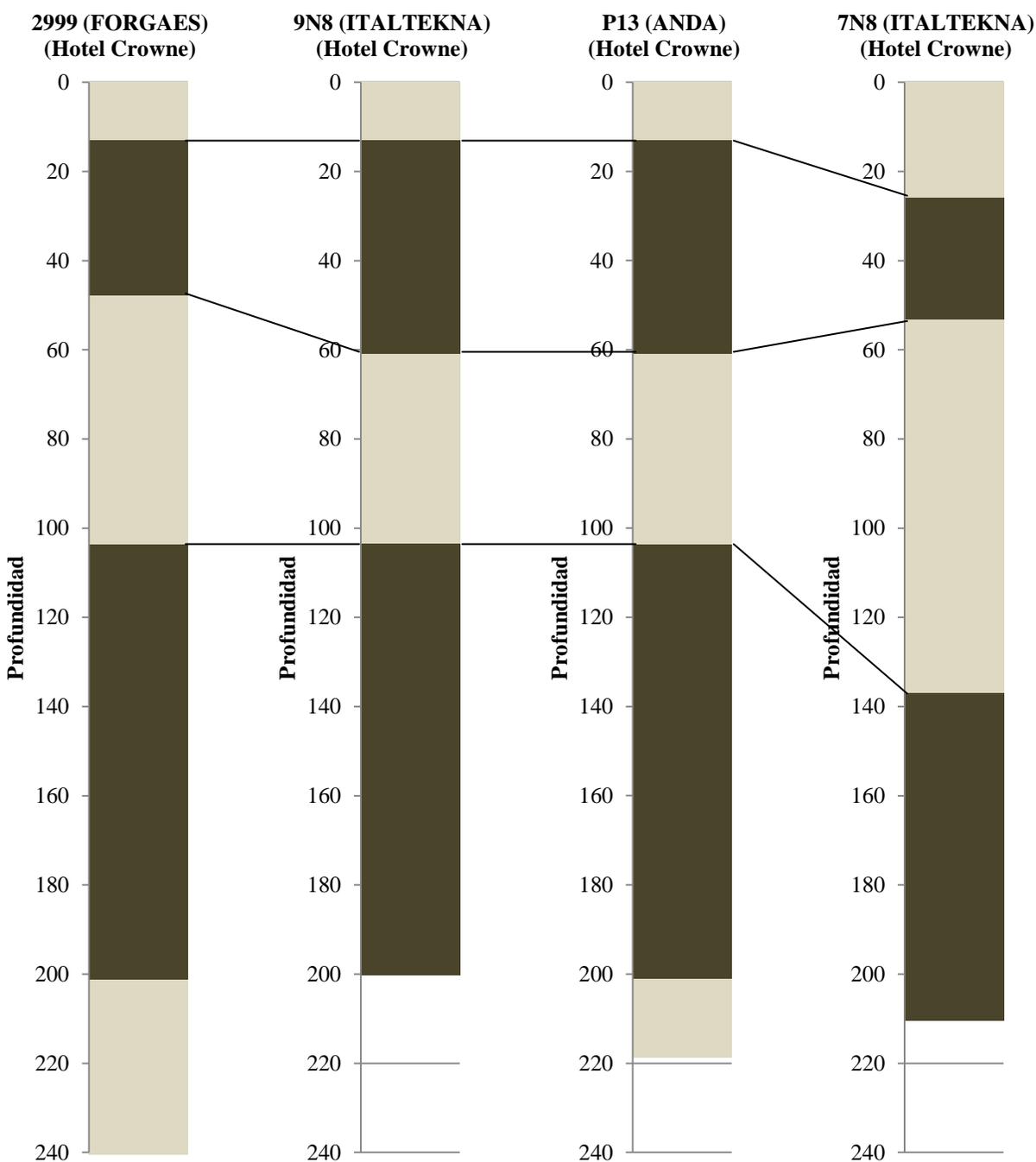


Figura 3.5a: Información Geológica Procesada en las cercanías de Hotel Crowne Plaza

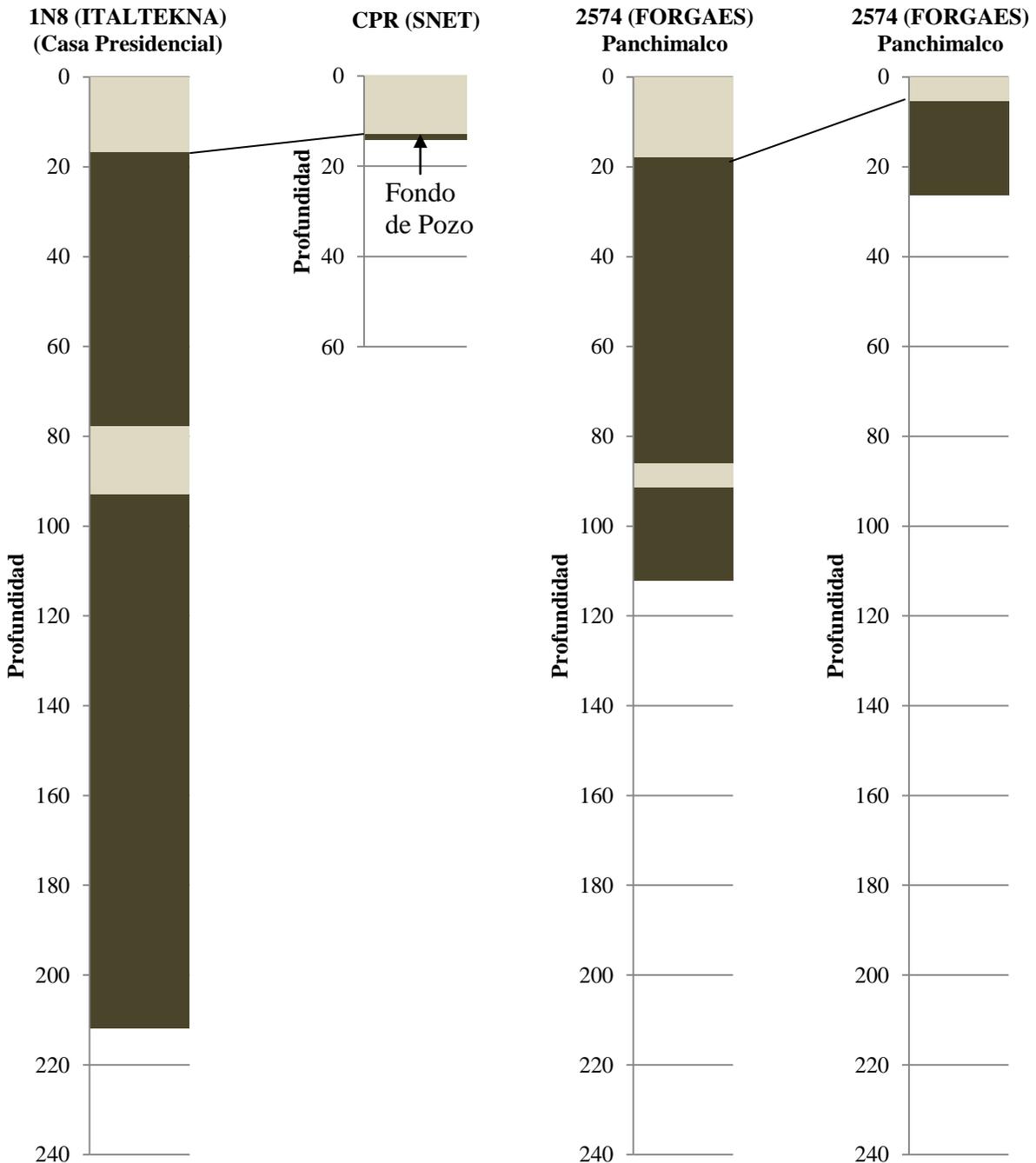


Figura 3.5: Información Geológica Procesada en Casa Presidencial (izquierda) y Panchimalco (derecha)

3.2.2 Información Sísmica

Se cuenta con una base de registros de movimiento fuerte desde 1966 hasta la fecha, de la red de monitoreo del SNET, incluyendo registros de los sismos de 1982, 1986 y 2001 (distribución de estaciones se muestra en la Figura 3.6). Se cuenta también con registros acelerográficos de la red de la UCA, desde 1997 hasta 2005, de las estaciones ubicadas dentro del AMSS, así como de la estación de Panchimalco (sitio de referencia). Los registros serán utilizados como datos de entrada, tanto para el método empírico como para el método analítico.

Se tienen además registros en los pozos a cielo abierto instrumentados (acelerógrafos en fondo y superficie), en las estaciones de Casa Presidencial (CPRS/CPRF), Seminario San José de la Montaña (SEMS7SEMF), Viveros de Dua (VS/VF) y Centro de Recursos Naturales (CS/CF); los cuales pueden ser utilizados para la determinación directa de la función de transferencia del subsuelo mediante métodos empíricos y calibración de resultados utilizando el método analítico.

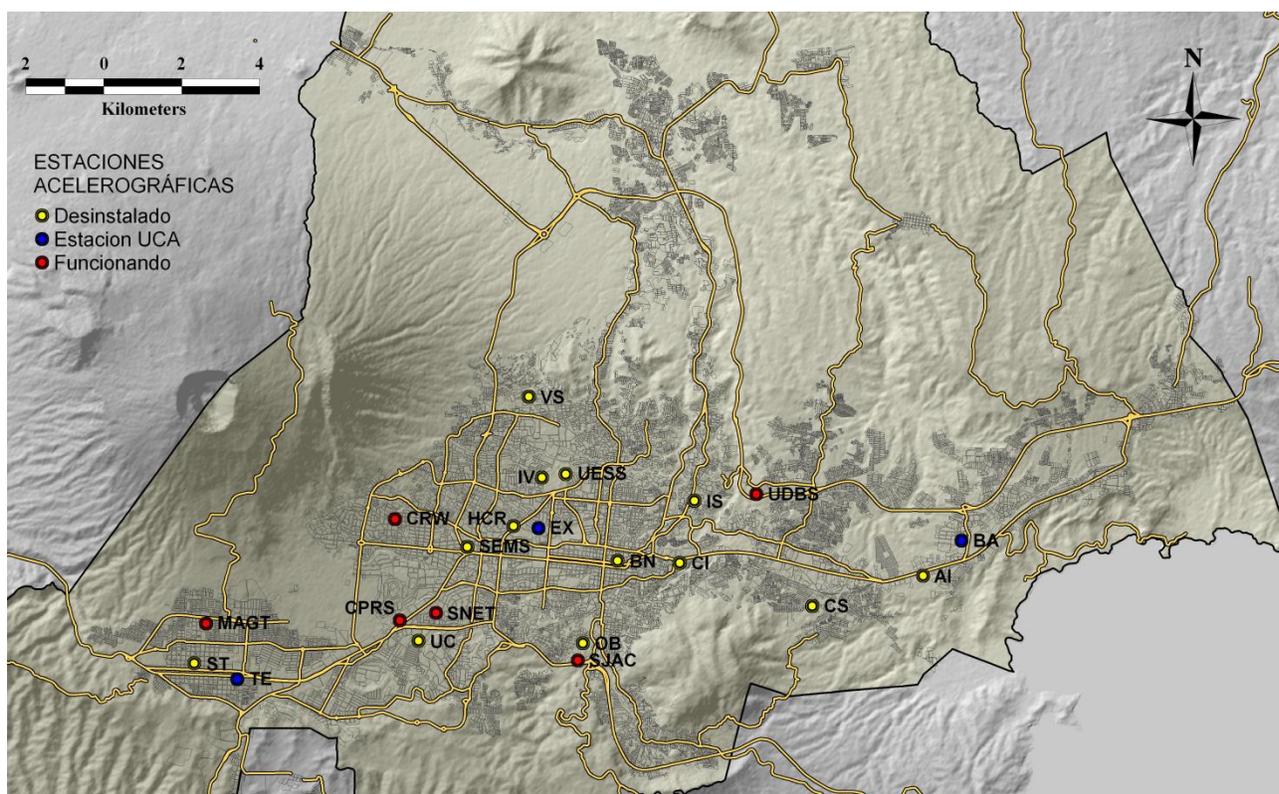


Figura 3.6: Estaciones Acelerográficas en el AMSS

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

Tabla 3.2: Estaciones Acelerográficas

Estación	Código	Dueño	Latitud	Longitud	Instr.	Estado*
Aeropuerto Ilopango	AI	SNET	13.695677	-89.115183	AR-240	D
Biblioteca Nacional	BN	SNET	13.699224	-89.188170	AR-240	D
Centro de Inv. Geotécnicas	CI	SNET	13.698714	-89.173270	SMA-1	D
Casa Presidencial (Pozo, 13 m)	CPRS/F	SNET	13.685030	-89.240170	SMA-1	F
Hotel Crowne Plaza	CRW	SNET	13.709170	-89.241300	SMA-1	F
CENREN (Pozo, 30 m)	CS/F	SNET	13.688444	-89.141669	SMA-1	D
Ciudadela Don Bosco	DB	SNET	13.715171	-89.154999	SMA-1	D
Hotel Camino Real	HCR	SNET	13.707563	-89.212964	SMA-1	D
Instituto Geográfico Nacional (Pozo, 19 m)	IS/F	SNET	13.713609	-89.169785	SMA-1	D
Instituto de Vivienda Urbana	IV	SNET	13.719140	-89.206196	SMA-1	D
Ministerio de Agricultura y Ganadería (Santa Tecla)	MAGT	SNET	13.684249	-89.286446	ETNA	F
Ministerio de Educación	MDE	SNET	13.699224	-89.188170	SMA-1	D
Observatorio	OB	SNET	13.679555	-89.196425	SMA-1	D
Seminario San José (Pozo, 12 m)	SEMF	SNET	13.702530	-89.224050	SMA-1	D
Parque Saburo Iraho	SJAC	SNET	13.675423	-89.197629	SMA-1	F
Servicio Nacional de Estudios Territoriales	SNET	SNET	13.686833	-89.231500	ETNA	F
Santa Tecla	ST	SNET	13.674762	-89.289255	SMA-1	D
Universidad Centroamericana	UC	SNET	13.680165	-89.235708	SMA-1	D
Universidad Don Bosco	UDBS	SNET	13.715171	-89.154999	ETNA	F
Universidad de El Salvador (SS)	UESS	SNET	13.719964	-89.200539	ETNA	D
Viveros de DUA (Pozo, 23 m)	VS/F	SNET	13.738417	-89.209358	SMA-1	D
San Bartolo	BA	UCA	13.704	-89.106	SSA-2	--
Externado	EX	UCA	13.707	-89.207	SSA-2	--
Hospital San Rafael	TE	UCA	13.614	-89.179	SSA-2	--
Panchimalco	PA	UCA	13.671	-89.279	SSA-2	--

* D = desinstalado / F = Funcionando

3.3 Procesamiento y Resultados

3.3.1 Método de Borchardt

Como se ha mencionado, el método exige que los eventos sean registrados simultáneamente por el sitio de análisis y un sitio rocoso que pueda considerarse como sitio de referencia, y que la distancia entre los sitios sea despreciable en relación a la distancia hipocentral. Tomando en cuenta estos criterios, se seleccionaron de la base de datos los eventos a evaluar [Tabla 3.3] (resultados de los sismos superficiales aplicables únicamente para los pozos instrumentados). Las estaciones que registraron estos eventos se muestran en Tabla 3.4 y un resumen de resultados obtenidos se presenta en la Tabla 3.5. Las razones espectrales para cada una de las estaciones analizadas se muestran en el Anexo A.

Debido al alto contenido de ruido de bajas frecuencias en los acelerogramas (especialmente SMA-retrofit), se ha considerado un rango de validez para períodos de hasta 2s, lo cual implica que posibles amplificaciones de largo período (espesores considerables de sedimentos y/o efecto de intercalación de sedimentos) no han sido consideradas.

Con motivo de evaluar posibles no-linealidades en el comportamiento sísmico de los suelos, se ha distinguido entre sismos de moderada amplitud ($PGA < 100 \text{cm/s}^2$) y sismos de amplitud considerable como el del 13.01.2001 ($PGA > 300 \text{cm/s}^2$)

3.3.2 Técnica de Nakamura para Movimiento Fuerte

En un principio, la metodología es aplicada a las estaciones de pozos a cielo abierto (registros en la superficie y fondo de los pozos), a fin de poder estudiar los efectos de las capas superficiales en la componente vertical del movimiento, los efectos de la geología profunda en la respuesta obtenida (comparación de razones H/V en superficie y fondo), y, finalmente, comparar los resultados con aquellos obtenidos mediante otras metodología (Hs/Hr).

Los resultados obtenidos, así como la comparación de resultados con el método de la razón espectral sedimento a basamento rocoso, se presentan en el Anexo B.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

Tabla 3.3: Sismos Procesados por el Método de Borchardt

No.	Año	Mes	Día	Hora	Sec.	R / L	Epicentro		Prof.	M _{max}
							Latitud	Longitud		
1	1986*	10	10	1749	0	L	13.667	-89.183	10	5.7
2	1997	12	22	10 3	45.1	R	13.742	-90.316	59	5.1
3	1999	6	6	7 8	5.8	R	13.897	-90.768	33	5.9
4	2001	1	13	1735	52.2	R	13.049	-88.66	60	7.8
5	2001*	2	13	1422	7.1	L	13.671	-88.938	10	6.6
6	2001*	2	17	2025	15.9	L	13.682	-89.251	6.4	5.1
7	2004	2	16	607	54.4	L	13.724	-89.228	9	3.7
8	2001	2	28	1850	13.7	R	12.918	-89.124	41.6	6
9	2001	3	16	1	19.5	R	12.822	-89.039	44.9	6
Modificación Red Acelerográfica Nacional										
10	2004	12	13	1523	41.6	R	13.243	-89.778	54.8	5.9
11	2005	3	10	1337	48.7	R	12.864	-88.621	46.2	5.7
12	2005	10	7	1742	59	R	12.856	-89.782	15	6.1
13	2005	11	18	315	49.2	R	13.281	-89.31	77.1	5.7
14	2006	8	22	2302	6.5	R	12.768	-88.34	50	5.6
15	2006	12	9	51	38.3	R	12.981	-89.609	26.9	5.5
16	2006	12	30	1742	24.2	R	13.684	-90.909	50	5.7
17	2007	1	19	143	30.8	R	13.036	-89.49	37.9	5.8
18	2007	6	13	1929	48.7	R	13.452	-90.937	11.1	6.7
19	2007	7	10	1647	54.3	L	13.746	-89.236	5.9	3.7
20	2008	4	15	303	4.8	R	13.621	-90.879	27.1	6.1
21	2008	11	15	2303	18	R	12.977	-89.059	51.8	5.7
22	2009	5	28	824	41.6	R	16.733	-86.22	10	7.3
23	2009	11	26	1908	10.1	R	13.351	-90.292	63	6.1
24	2010	1	18	1540	28.7	R	13.666	-90.573	49.2	6
25	2010	12	20	1721	26	R	12.949	-88.826	42.8	5.6

*Validez de la técnica cuestionable para sismos superficiales, excepto para eventos registrados en un mismo punto (pozos instrumentados)

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

Tabla 3.4: Sismos Procesados

Evento No.	ANALIZADOS															REFERENCIA									
	CI	HCR	IS	IV	DB	OB	UC	CS	ST	VF	VS	SF	SS	CPRS	CPRF	CRWN	EX	TE	BA	CPRF	PA	SF	VF	CF	
1	X	X	X	X			X									X									
2	X		X			X	X					X	X	X	X		X	X	X	X	X	X			
3								X																X	
4					X	X			X	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X		X		
5	X				X	X	X		X	X	X		X	X	X		X	X	X	X	X		X		
6											X												X		
7					X	X	X							X			X	X	X		X				
8						X	X							X			X		X		X				

Modificación Red Acelerográfica Nacional

Evento No.	ANALIZADOS													REFERENCIA					
	SF	SS	CPRS	CPRF	CRWN	MAGT	SJAC	SNET	UDBS	UESS	EX	TE	BA	CPRF	PA	SF	VF	CF	
9	X	X	X			X	X	X	X	X			X		X				
11	X	X	X			X	X	X	X	X			X	X	X				
12			X	X		X	X	X	X	X			X	X	X				
13			X	X		X	X	X	X	X				X	X				
14			X			X	X	X	X	X				X					
15			X			X		X	X	X				X					
16			X			X		X	X	X				X					
17			X			X		X	X	X				X					
18	X		X			X	X	X	X	X				X					
19			X					X						X					
20			X			X		X	X	X				X					
21			X			X	X	X	X					X					
22						X	X	X	X					X					
23			X			X	X	X	X					X					
24			X			X	X	X	X					X					
25			X		X	X	X	X	X					X					

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

Tabla 3.5: Resumen de Resultados Obtenidos por el Método de Borcherdt

Estación	Código	Amplitud Moderada ($a_{max} < 100 \text{ cm/s}^2$)						13.01.200 ($a_{max} > 300 \text{ cm/s}^2$)					
		Periodo (s)			Amplificación			Periodo (s)			Amplificación		
Centro de Inv. Geotécnicas	CI	0.21	0.73	1.46	3.7	2.7	4.4	ND			ND		
Casa Presidencial (Pozo, 13 m)	CPRS	0.2			3.9			0.30			6.1		
Hotel Crowne Plaza	CRW	0.18	1.02	2.28	7.0	2.4	2.0	ND			ND		
CENREN (Pozo, 30 m)*	CS	NC			NC			ND			ND		
Ciudadela Don Bosco	DB	Rango 0.13-2 (0.31)			4.66			Rango 0.13-2			3.33		
Instituto Geográfico Nacional (Pozo, 19 m)	IS/F	Rango 0.14-2 (0.47)			5.4			ND			ND		
Ministerio de Agricultura y Ganadería (Santa Tecla)	MAGT	0.23	1.14		2.6	5.2		ND			ND		
Observatorio	OB	Rango 0.13-2 (0.35)			5.47			Rango 0.13-2			7.61		
Seminario San José (Pozo, 12 m)	SEMS	0.23	0.48	>2	3.5	2.6	≈3	0.3	0.5		4.3	5.7	
Parque Saburo Iraho	SJAC	Rango 0.2-2 (0.35)			5.7			ND			ND		
Servicio Nacional de Estudios Territoriales	SNET	0.23			4.5			ND			ND		
Santa Tecla	ST	ND			ND			0.2			10		
Universidad Centroamericana	UC	0.31			8.0			ND			ND		
Universidad Don Bosco	UDBS	0.41			8.9			ND			ND		
Universidad de El Salvador (SS)	UESS	0.36			8.6			ND			ND		
Viveros de DUA (Pozo, 23 m)	VS	NC			NC			Rango 0.13-2			5.16		
San Bartolo	BA	1.86			8.12			2.05			3.4		
Externado	EX	Rango 0.13-2			4.1			Rango 0.15-2			3.5		
Hospital San Rafael	TE	0.17			8.55			NC			7.23		

ND: No hay datos

NC: Resultados no Concluyentes

*CENREN: solo se tienen resultado para un evento, calculado entre la superficie y el fondo del pozo

3.3.3 Estudio de Espectros de Respuesta Normalizados (Sa/PGA)

Considerando que esta metodología, por no depender de una estación de referencia, permite calcular la respuesta en un mayor número de sitios y para un mayor número de eventos - incluyendo eventos superficiales que históricamente más daño han causado en la ciudad, se procesaron para cada una de las estaciones, eventos regionales con $M \geq 5.5$ y eventos superficiales con $M \geq 3.0$, registrados en el período de 1966 hasta la fecha. Los eventos procesados se detallan en la Tabla 3.6.

Se realizaron comparaciones entre los espectros de respuesta normalizados, para las estaciones consideradas como sitios de referencia (CPRF y PA), los dados por la Norma Técnica para Diseño por Sismo para condiciones de roca (NTDS), y los espectros de amenaza uniforme (UHS) resultantes del proyecto RESISII para la ciudad de San Salvador, considerando que, desde un punto de vista práctico, serán estos los que deberán ser modificados para la determinación de espectros de diseño.

Para cada estación se obtuvieron, en la medida de lo posible, formas espectrales típicas y rangos de período de máxima amplificación (comparando contra los espectros de amenaza uniforme UHS del proyecto RESIS II), separando entre eventos regionales y locales, para tener una mejor del comportamiento de los suelos ante los distintos tipos de eventos. Los resultados del análisis se presentan la Tabla 3.7. Las figuras correspondientes se muestran en el Anexo C.

Tabla 3.6: Eventos Procesados – Espectros de Respuesta Normalizados

Año	Mes	Día	Hora	R/L	Latitud	Longitud	Prof.	Magnitud
1976	02	04	0901	R	15.2	-89.2	10	7.5 SUCA
1978	09	10	2324	R	14.252	-91.577	87	5.6 SUCA
1978	10	30	1823	R	13.843	-91.132	69	6 SUCA
1979	10	27	1435	R	13.794	-90.891	62	6.8 SUCA
1979	10	27	2143	R	13.753	-90.755	70	6.6 SUCA
1980	08	09	0545	R	15.931	-88.521	22	6.4 SUCA
1982	01	12	0548	L	13.155	-87.556	6	6 SUCA
1982	06	19	0621	R	13.3	-89.4	80	7.3 WHRV 7.3 SUCA 7 BPAS
1982	07	02	1159	R	13.012	-89.32	70	5.9 SUCA
1983	07	18	1252	R	12.688	-87.21	91	6.4 WHRV 6.1 SUCA 6 BPAS
1986	10	10	1749	L	13.667	-89.183	10	5.4 SUCA 5.7 WHRV
1986	10	15	2057	L	13.715	-89.181	5.8	2.4 CSAL 3.8 LSAL
1986	11	12	0858	L	13.68	-89.167	9.5	3.1 CSAL 3.1 LSAL
1987	01	15	1643	L	13.699	-89.197	8.2	2.4 CSAL 4 LSAL

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

Tabla 3.6: Eventos Procesados – Espectros de Respuesta Normalizados

Año	Mes	Día	Hora	R/L	Latitud	Longitud	Prof.	Magnitud					
1987	11	17	0340	R	12.489	-87.075	93	6.4	WHRV	6.1	SUCA	6.2	BPAS
1988	11	03	1447	R	13.868	-90.552	69	6.6	WHRV	6.4	SUCA		
1998	01	10	0820	R	14.374	-91.473	33	6.1	BPDE	6.2	SPDE		
1999	06	06	0708	R	13.897	-90.768	33	5.5	BPDE	5.9	SPDE		
1999	07	11	1414	R	15.782	-88.33	10	6	BPDE	6.6	SPDE		
2001	01	13	1735	R	13.049	-88.66	60			7.7	WHRV	7.8	SPDE
2001	02	13	1422	L	13.671	-88.938	10			6.6	WHRV	6.5	SPDE
2001	02	17	2025	L	13.682	-89.251	6.4	4.9	LSAL	5.1	WSAL		
2001	02	28	1850	R	12.918	-89.124	41.6	6	LSAL	6	WSAL		
2001	03	16	0001	R	12.822	-89.039	44.9	6	LSAL	5.9	WSAL		
2003	03	20	0135	L	13.72	-89.235	9.4	4.5	LSAL				
2003	08	25	0628	R	14	-91.401	50	6.1	LSAL	5.9	WSAL	6	BPDE
2003	10	10	0814	L	13.686	-89.254	4.7	2.8	CSAL	3	LSAL		
2003	12	02	0342	L	13.699	-89.05	9	3.4	CSAL	4	LSAL		
2004	02	16	0606	L	13.734	-89.231	7.4	3.1	CSAL	3.6	LSAL	4.5	BSAL
2004	02	16	0607	L	13.724	-89.228	9	3.3	CSAL	3.7	LSAL		
2004	02	16	1732	L	13.724	-89.226	9.6	3	CSAL	3.5	LSAL	4	BSAL
2004	02	18	1843	L	13.725	-89.243	8.7	3.1	CSAL	3.2	LSAL		
2004	02	18	1852	L	13.738	-89.238	8.5	2.5	CSAL	3.1	LSAL		
2004	02	20	1227	L	13.69	-89.222	7.1	1.8	CSAL	2.7	LSAL		
2004	04	01	1158	L	13.746	-89.224	7.7	3.1	CSAL	3	LSAL		
2004	04	04	0208	L	13.692	-89.057	8.7	2.9	CSAL	3.1	LSAL		
2004	05	03	0512	R	14.286	-91.019	99.1	5.3	CSAL	5.9	LSAL		
2004	06	10	0859	R	11.468	-88.063	35.4	5.2	CSAL	5.7	LSAL		
2004	10	09	2126	R	11.28	-86.285	27.9	7	LSAL	7	WSAL		
2004	11	20	2201	R	13.228	-90.559	30.9	6.1	LSAL				
2004	12	13	1523	R	13.243	-89.778	54.8	5.9	LSAL				
2005	03	10	1337	R	12.864	-88.621	46.2	5.7	LSAL				
2005	03	17	1337	R	15.13	-91.4	198					6.2	BPDE
2005	03	24	1944	L	13.714	-89.08	10.4	2.7	CSAL	3.7	LSAL		
2005	03	24	2004	L	13.709	-89.077	10.6	2.8	CSAL	3.6	LSAL		
2005	04	12	0240	R	13.899	-91.522	36.5	5.6	CSAL	5.7	LSAL		
2005	05	04	0755	L	13.871	-89.747	10	5	LSAL				
2005	07	02	0217	R	11.193	-86.767	33.4	6.2	LSAL	6.7	WSAL		
2005	10	07	1742	R	12.856	-89.782	15	6.1	LSAL				
2005	11	18	0315	R	13.281	-89.31	77.1	5.7	LSAL				
2005	12	16	1024	R	12.015	-89.669	50	5	CSAL	5.6	LSAL		
2006	01	22	1610	R	13.687	-91.148	50	5.6	LSAL				

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

Tabla 3.6: Eventos Procesados – Espectros de Respuesta Normalizados

Año	Mes	Día	Hora	R/L	Latitud	Longitud	Prof.	Magnitud			
2006	04	24	2110	R	12.642	-88.247	50	5.5	LSAL		
2006	08	22	2302	R	12.768	-88.34	50	5.6	LSAL		
2006	12	03	2052	R	14.045	-91.512	15.1	5.7	CSAL	6.1	LSAL
2006	12	09	0051	R	12.981	-89.609	26.9	5.5	LSAL		
2006	12	30	1742	R	13.684	-90.909	50	5.7	LSAL		
2007	01	19	0143	R	13.036	-89.49	37.9	5.8	LSAL	5.6	WSAL 5.2 BPDE
2007	03	09	2102	R	13.156	-87.502	227	5.7	LSAL		5.5 WHRV
2007	06	08	1332	R	13.84	-90.77	47.8	5.8	LSAL		5.8 WHRV
2007	06	08	1508	R	13.64	-90.8	38	5.3	LSAL		5.5 WHRV
2007	06	13	1929	R	13.452	-90.937	11.1	6.2	LSAL		6.7 WHRV
2007	07	02	1835	L	13.91	-89.685	4.1	4.9	LSAL	5.1	WSAL 5.1 BPDE
2007	07	10	1647	L	13.746	-89.236	5.9	3.7	LSAL		
2007	07	12	1444	R	12.866	-88.624	42.3	5.3	LSAL	5.6	WSAL 4.8 BPDE
2007	07	23	2230	R	14.38	-90.95	113	5.4	LSAL		5.5 WHRV
2007	11	14	1735	R	13.558	-90.767	15.4	5.6	LSAL		
2007	11	16	0956	L	13.672	-89.058	5.9	3.5	LSAL		
2008	01	05	0156	R	13.995	-91.057	38.5	5.5	LSAL		
2008	02	05	2110	L	13.757	-89.342	5.3	3.5	LSAL		
2008	04	15	0303	R	13.621	-90.879	27.1	6	LSAL	6.1	WSAL
2008	05	26	0033	L	13.783	-89.421	7	4.7	LSAL		
2008	05	26	0626	L	13.795	-89.441	13.7	3.7	LSAL	3.5	CSAL
2008	05	27	0057	L	13.795	-89.432	11.1	3.5	LSAL		
2008	08	07	2341	R	12.504	-87.752	35.6	5.5	LSAL		
2008	10	16	1941	R	14.373	-92.576	29	6.8	WSAL		
2008	11	15	2303	R	12.977	-89.059	51.8	5.7	LSAL		
2009	03	09	0601	R	13.449	-90.709	15	5.5	LSAL		
2009	05	03	1621	R	14.58	-91.14	127	5.8	LSAL		
2009	05	22	1349	L	13.649	-89.075	5.1	3.6	LSAL		
2009	05	28	0824	R	16.733	-86.22	10	7.3	LSAL	7.3	WSAL 7.3 BPDE
2009	05	29	1111	L	13.677	-89.177	5.1	3.4	LSAL	2.7	CSAL
2009	11	26	1908	R	13.351	-90.292	63	6	LSAL	6.1	WSAL
2010	01	18	1540	R	13.666	-90.573	49.2	5.8	LSAL	6	WSAL
2010	01	26	0227	L	13.74	-89.205	5.6	3.4	LSAL	2.9	CSAL
2010	03	24	1708	R	13.991	-91.605	30	5.1	LSAL		
2010	04	18	1330	R	14.51	-91.99	63	5.6	WPDE		
2010	12	20	1721	R	12.949	-88.826	42.8	5.5	LSAL	5.4	WSAL 5.6 BPDE

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

Tabla 3.7: Resultados (Períodos Predominantes) del análisis de Espectros de Respuesta Normalizados

Estación	Código	Eventos Regionales (cm/s ²)*		Eventos Locales (cm/s ² **	
		PGA<100	PGA>100	Magnitud1	Magnitud 2
Aeropuerto Ilopango	AI	1.2	ND	ND	
San Bartolo (UCA)	BA	0.95	1.05	1.05 (M6.6)	
Biblioteca Nacional	BN	0.70	ND	ND	
Centro de Inv. Geotécnicas	CI	ND		0.18 (M<5.2)	0.66 (M>5.2)
Casa Presidencial (Fondo Pozo, 13 m)	CPRF	0.1, 0.42	0.1, 0.5	0.08 (M<4.7)	0.42 (M>4.7)
Casa Presidencial (Superficie)	CPRS	0.20	0.42	0.08 (M<4.7)	0.20 (M>4.7)
Hotel Crowne Plaza	CRWN	0.14	ND	0.24, 0.6 (M5.7)	
CENREN (Fondo Pozo, 30 m)	CF	0.48	ND	ND	
CENREN (Superficie)	CS	0.48	ND	ND	
Ciudadela Don Bosco	DB	0.34, 1.24	0.5, 1.05	0.14 (M5.1)	0.5, 1.1 (M6.6)
Externado San José (UCA)	EX	0.46	0.62, 1.0	0.52 (M6.6)	
Hotel Camino Real	HCR	ND		0.48 (M5.7)	
Instituto Geográfico Nacional	IS	ND		0.84 (M5.7)	
Instituto de Vivienda Urbana	IV	0.24	ND	0.70 (M5.7)	
Ministerio de Agricultura y Ganadería (Santa Tecla)	MAGT	0.2, 0.58, 1.0	ND	0.16 (M<4.7)	1.0 (M>4.7)
Observatorio Sismológico	OB	0.5	1.0	0.06 (M<5.2)	0.5 (M>5.2)
Panchimalco	PA	0.08	0.08	0.2 (M6.6)	
Seminario San José (Fondo Pozo, 12 m)	SF	0.5	ND	0.06 (M3.7)	
Seminario San José (Superficie)	SS	0.5	0.54, 1.12	0.08 (M3.7)	0.56 (M6.6)
Parque Saburo Iraho	SJAC	0.26, 0.6	ND	0.12 (M<4.7)	
Servicio Nacional de Estudios Territoriales	SNET	0.22, 0.42	ND	0.18 (M<4.7)	0.22, 0.4 (M>4.7)
Santa Tecla	ST	ND	0.32, 1.40	1.70 (M6.6)	
Hospital San Rafael (UCA)	TE	0.18	0.50, 1.42	0.18, 1.74 (M6.6)	
Universidad Centroamericana	UC	0.32	ND	0.28 (M<4.7)	0.7 (M>4.7)
Universidad Don Bosco	UDBS	0.40	ND	0.06 (M<4.7)	0.4 (M>4.7)
Universidad de El Salvador (SS)	UESS	0.36	ND	0.06 (M<4.7)	0.36 (M>4.7)
Viveros de DUA (Fondo Pozo, 23 m)	VF	ND	0.18, 1.18	0.14 (M5.1)	0.16, 0.5, 1.0 (M6.6)
Viveros de DUA (Superficie)	VS	ND	0.42, 1.08	0.32 (M5.1)	0.48 (M6.6)

ND: No hay datos

* Diferenciación de acuerdo a la amplitud de los eventos (rango) para estimar respuesta no-lineal

**Para eventos locales se distinguen rangos de magnitud debido a la dependencia observada de ésta con la forma espectral (posiblemente distancia hipocentral - ver Anexo C)

3.3.4 Método Analítico

Utilizando en Software SHAKE2000 para el análisis (método lineal equivalente), se calculó, para los sitios donde se tienen tanto datos sísmicos como información geológica/geotécnica, funciones de transferencia del subsuelo, utilizando las propiedades dinámicas y correlaciones empíricas dadas por el estudio realizado por el Consorzio Salvador E. Italtekná-Italconsult (1988).

Debido a diferencias encontradas entre los métodos (empíricos y analítico), especialmente en términos de amplificación, se realizó un análisis de sensibilidad de los modelos ante las distintas propiedades identificadas como las más influyentes en la respuesta. Los resultados del estudio realizado por el Consorzio Salvador E., Italtekná-Italconsult, aunque proveen información muy valiosa, fueron realizadas en puntos específicos de la ciudad, y se debe tener cuidado al utilizar estos datos en otros puntos.

La velocidad de onda del suelo y los espesores del estrato correspondiente influyen tanto en el período predominante como en el valor de amplificación, la velocidad de ondas en la roca (contraste de impedancias) tiene gran efecto en el valor de amplificación, y la variación del amortiguamiento (función de amortiguamiento) influye tanto en el valor de amplificación como en el comportamiento no lineal del suelo. Los resultados del análisis se muestran en el Anexo D.

3.4 Investigaciones Complementarias

3.4.1 Efecto de la intercalación de materiales en la Respuesta Sísmica

Debido a la ubicación geográfica del AMSS entre el volcán San Salvador y la caldera de Ilopango, los productos de ambos centros eruptivos se encuentran intercalados en la mayor parte de la región

El efecto amplificador de las cenizas volcánicas ha sido ampliamente discutido [Shmidt-Thomé, 1975; Faccioli et al., 1988; Ingvarsson y Johansson, 1996; Atakan et al., 2004; Salazar et al., 2007, etc.], sin embargo, a pesar de que muchos autores han atribuido resultados (ej. amplificación substancial en períodos largos) al posible efecto de intercalación de sedimentos no consolidados y lavas [Salazar et al., 2007], no se ha realizado hasta el momento un estudio detallado sobre la influencia que estas sucesiones irregulares de lava y material piroclástico puedan tener en la respuesta sísmica.

Este estudio pretende investigar la influencia de la intercalación de estos materiales en la respuesta sísmica de los suelos, mediante la realización de un análisis de sensibilidad para distintos espesores de sedimentos intercalados.

Metodología

El análisis se realizó para el perfil de suelo de la estación CPR (acelerógrafo en superficie y fondo del pozo de 13 m de profundidad). Las consideraciones y casos tomados para el análisis de detallan en las Tabla 3.8 y 3.9 y en la Figura 3.7. Como excitación se tomó un sismo (considerado en afloramiento rocoso) de amplitud moderada para evitar la influencia de otras variables en los resultados (evitar incurrir en el rango no-lineal).

Tabla 3.8: Detalle de Casos para el análisis de Sensibilidad

Caso N°	Descripción
0	H1=13, H2=60, H3=15 - Aplicando el sismo en (2)
1	H1=13, H2=75, H3=00 - Aplicando el sismo en (4)
2	H1=13, H2=70, H3=05 - Aplicando el sismo en (4)
3	H1=13, H2=65, H3=10 - Aplicando el sismo en (4)
4	H1=13, H2=60, H3=15 - Aplicando el sismo en (4)
5	H1=13, H2=50, H3=25 - Aplicando el sismo en (4)
6	H1=13, H2=40, H3=35 - Aplicando el sismo en (4)
7	H1=13, H2=30, H3=45 - Aplicando el sismo en (4)
8	H1=13, H2=20, H3=55 - Aplicando el sismo en (4)
9	H1=13, H2=10, H3=65 - Aplicando el sismo en (4)
10	H1=13, H2=05, H3=70 - Aplicando el sismo en (4)
11	H1=13, H2=00, H3=75 - Aplicando el sismo en (4)

Un segundo análisis se realizó considerando una mayor profundidad de sedimentos superficiales ($H1 > 30$), con el fin de verificar la profundidad de influencia, es decir, verificar la influencia de sedimentos intercalados para profundidades de sedimentos superficiales superiores a los 30 m (profundidad normalmente considerada para los estudios de respuesta de sitio).

Tabla 3.9: Detalle de Casos para el análisis de Sensibilidad

Caso N°	Descripción
12	H1=30, H2=40, H3=15 - Aplicando el sismo en (4)
13	H1=50, H2=40, H3=15 - Aplicando el sismo en (4)
14	H1=30, H2=55, H3=00 - Aplicando el sismo en (4)
15	H1=50, H2=55, H3=00 - Aplicando el sismo en (4)

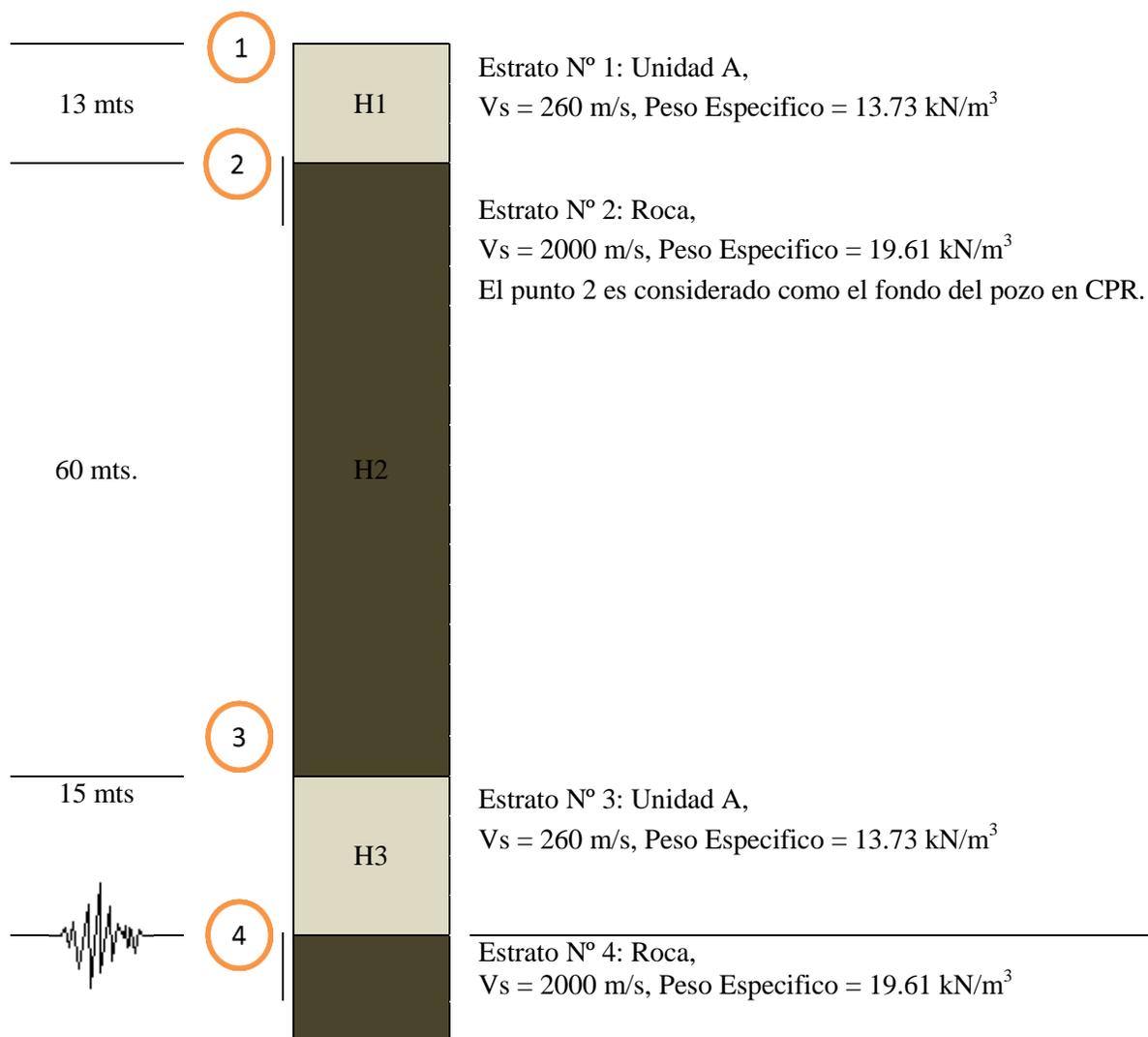


Figura 3.7: Perfil de Pozo de Casa Presidencial y Consideraciones Tomadas

Las figuras obtenidas del análisis se muestran en el Anexo E. Para facilitar la interpretación de los resultados, se presentan las funciones de amplificación con respecto a la superficie (influencia de todo el paquete), como también al fondo de la primera capa de sedimento (influencia del sedimento intercalado).

Los períodos y amplificaciones mostradas pretenden cuantificar la variabilidad de los resultados según los espesores de sedimentos y roca intercalados, y no deben tomarse como resultados finales de respuesta de sitio, debido a que los valores considerados en el análisis (velocidades de onda de sedimentos y roca, curvas de amortiguamiento, etc.) aún deben ser calibrados para representar las condiciones reales.

3.4.2 Comparación con Estudios Previos

Para validar los resultados obtenidos y contar con la mayor cantidad de datos posibles, se realizaron análisis comparativos con resultados de estudios previos ejecutados en el AMSS. Se realizaron comparaciones, tanto con resultados obtenidos a partir de datos sísmicos (Borcherdt, Nakamura para ondas S, HIA), como con los obtenidos a partir de medición de microtrepidaciones (técnica de Nakamura). Los resultados obtenidos se muestran en el Anexo F.

3.5 Análisis de resultados

3.5.1 Método de Borchardt

Al utilizar el fondo del pozo de Casa Presidencial (CPRF) como sitio de referencia, se observa en muchos casos amplificaciones correspondientes al período predominante de CPRF: en la gráfica de la razón espectral de CPRF con respecto a PA, se observa un pico negativo correspondiente a este período, el cual se debe, posiblemente, al efecto de interferencia destructiva de las ondas sísmicas [Steidl et al., 1996, Assimaki et al., 2008]. Al utilizar directamente CPRF como sitio de referencia, pueden estarse obteniendo picos falsos alrededor de los 0.2 s.

La respuesta de CPRF con respecto a PA muestra también amplificaciones en un rango de períodos de 0.2 a 0.6 s, lo cual puede verificarse en la forma del espectro de respuesta de esta estación (Anexo C). El movimiento en CPRF puede estar siendo afectado por la presencia de sedimentos a profundidades mayores, o bien por efectos de meteorización/fracturación de la roca. En los ensayos Down-Hole realizados por la misión Italiana en la estación cercana UC, se obtuvieron valores de velocidades de onda anormalmente bajos en la parte superior de la colada de lava ($V_s \approx 375$ m/s), los cuales se consideraron representativos de lavas escoriaseas o muy fracturadas [Consorzio Salvador E., Italtekná-Italconsult, 1988]. Esto explica las diferencias encontradas para los distintos sitios, según el sitio de referencia, en este rango de períodos.

En la estación de Seminario San José, es evidente la influencia de capas de sedimentos intercaladas a profundidades mayores en el comportamiento sísmico. La respuesta calculada entre la superficie y el fondo del pozo es muy distinta a la calculada utilizando CPRF o PA como sitios de referencia, observándose una serie de picos y un pico principal de largo período (>2 seg.), relacionados a la respuesta en el fondo. El resultado obtenido para la estación de CIG también sugiere la intervención de sedimentos intercalados, sin embargo, se tienen muy pocos datos para esta estación como para poder estudiar realmente el comportamiento del sitio.

En Viveros de DUA, se observa que los resultados de espectros entre la superficie y el fondo del pozo no reflejan el comportamiento sísmico del sitio; el comportamiento del suelo bajo el fondo del pozo tiene una clara influencia la respuesta. Para la estación CENREN se obtiene de la razón espectral entre la superficie y el pozo del sitio un período predominante (0.23s) menor al esperado, dado las condiciones de la geología en el emplazamiento. Estas observaciones divergen de la hipótesis usualmente considerada en estudios de sitio, la cual establece que son los 30 m superficiales los más influyentes en la respuesta.

Para las estaciones DB, IS, OB, SJAC y EX, no fue posible identificar un período predominante, amplificaciones se observan en un amplio rango de frecuencias (0.1-2 en la mayoría de los casos).

Las estaciones IS y CIG fueron consideradas dentro de la Zona 2 en el estudio realizado por la misión Italiana en 1988, es decir, zona caracterizada por espesores acumulados de lava inferiores a los 35 m dentro de los primeros 100 m de profundidad. El estudio asume que en esta zona el comportamiento sísmico es el sitios de suelo profundo (“deep soil sites”), con períodos de movimiento más largos que para la Zona 1, donde el comportamiento se consideró dictaminado por efectos de resonancia (modelo típico de respuesta de sedimentos poco consolidados sobre un lecho rocoso) [ver Faccioli et al., 1988]

3.5.2 Técnica de Nakamura

La metodología H/V asume que la componente vertical del movimiento no es amplificada por las capas superficiales de suelo, sin embargo, en los resultados del análisis realizado se observa que esta hipótesis no siempre se cumple: amplificaciones en la componente vertical se observan en un rango de períodos de interés ingenieril.

De igual forma, el método considera que R_B , obtenido al dividir los espectros horizontales entre los verticales en el basamento, es aproximadamente 1 para un amplio rango de frecuencias donde existe un sub-estrato firme y la propagación es aproximadamente igual en todas las direcciones, sin embargo, en todos los casos - incluyendo la estación de Casa Presidencial donde el fondo del pozo corresponde a la superficie de una colada de lava, podemos observar amplificaciones importantes en la relación H/V en el fondo de los pozos.

Diferencias importantes se observan también al comparar los resultados con aquellos obtenidos mediante el método de la razón espectral sedimento a basamento rocoso, excepto para un rango de períodos limitado donde los picos concuerdan con los períodos predominantes encontrados mediante el método de la razón espectral sedimento / basamento rocoso.

Según los resultados obtenidos, y de acuerdo a las hipótesis del método, la aplicabilidad de la técnica de Nakamura para movimiento fuerte en el AMSS es cuestionable. Aunque en algunos casos la metodología permite determinar períodos predominantes, las funciones de transferencias así obtenidas no son muy confiables y/o representativas.

3.5.3 Espectros de Respuesta Normalizados

Los espectros de respuesta normalizados permiten tener una mejor idea de la forma espectral típica en las distintas estaciones, y definir de una manera aproximada el período predominante o rango de períodos donde se dan las máximas amplificaciones. Además, al no depender de un sitio de referencia, permite estudiar el comportamiento ante distintos tipos de eventos (superficiales / subducción).

Analizando las estaciones consideradas como sitios de referencia, se puede observar que el período predominante para la estación de PA es muy bajo (menor a 0.1 seg), por lo que se considera que la respuesta propia del sitio no afecta los resultados obtenidos. Sin embargo, desde **un punto de vista práctico y considerando que serán los resultados del análisis de RESISII los que se tomarán en cuenta para el cálculo de la amenaza sísmica** (en roca), el considerar la estación PA como referencia pudiera ser muy conservador para períodos por encima de los 0.2 seg. Para CPRF se observan claramente deamplificaciones correspondientes a un período de 0.2seg (período predominante de CPRS), así como amplificaciones entre los 0.26-0.7 seg.

Los resultados obtenidos del análisis de espectros de respuesta normalizados se asemejan a los obtenidos por el método empírico sedimento a basamento rocoso, y por no estar influenciado por la respuesta propia de los sitios de referencia, hizo posible determinar de forma aproximada valores de período predominante para aquellas estaciones en las que del análisis de las razones espectrales se obtenía amplificaciones en un amplio rango de períodos (SJAC, DB, OB, IS).

La metodología ha permitido definir formas espectrales en un mayor número de estaciones y para un mayor número de eventos. Se han podido identificar posibles períodos predominantes en las estaciones que fueron des instrumentadas previo a la construcción de los pozos a cielo abierto y a la creación de la red acelerográfica de la UCA (no se tenían registros en estaciones que pudieran ser consideradas como estaciones de referencia para la aplicación del método de Borchardt). Entre estas estaciones se destacan AI (Aeropuerto de Ilopango) y BN (Biblioteca Nacional), muy importantes debido a su ubicación geográfica, situadas respectivamente en las cercanías del lago de Ilopango (donde se esperan los mayores espesores de sedimentos no consolidados) y en el centro histórico de la ciudad, donde se ubican gran parte de las edificaciones más vulnerables (edificaciones de mediana altura construidas antes de la implementación de las norma para diseño por sismo)

Para sismos superficiales se observa una dependencia de la respuesta con respecto a la magnitud del evento (posiblemente a la distancia hipocentral) y no solo a la aceleración pico en el sitio. *El problema para la predicción de movimiento fuerte en el AMSS no está limitado exclusivamente a la determinación de los efectos locales de amplificación de los sedimentos no consolidados; debido a que el área se encuentra dentro del campo cercano de las fuentes sísmicas (sismos superficiales), efectos del proceso de ruptura pueden afectar grandemente el movimiento en la superficie* [Faccioli et al., 1988]

El análisis directo entre los espectros de respuesta normalizados en los sitios de interés con respecto al espectro UHS del estudio RESISII, permite determinar funciones de amplificación relativas para el cálculo de la amenaza, bajo el entendido que los suelos del AMSS no son lo suficientemente rígidos para presentar amplificaciones importantes de tan corto período (PGA). Sin embargo, observaciones en los valores de PGA muestran amplificaciones asociadas a los efectos de sitio.

Asimismo, períodos predominantes pueden no ser claramente identificados, por lo que se deben tomar precauciones para la delimitación de zonas de isoperíodo y/o evaluación de efectos de resonancia. Esta limitante se pone en evidencia al estudiar el comportamiento no lineal (para el sismo del 13.01.2001 en la estación CPRS, variación que parece ser excesiva en comparación con la respuesta obtenida de la relación CPRS/CPRF (Figuras C.8 y A.2g).

3.5.4 Método analítico – Análisis de Sensibilidad

La velocidad de roca (2100 m/s) considerada por la misión italiana, ha sido, muy posiblemente, sobrevalorada. El Programa de Reducción de Amenazas Sísmicas (NEHRP por sus siglas en inglés), así como Bray y Rodriguez-Marek (1997), clasifican las rocas duras e intactas con velocidades de onda $V_s \geq 1500$ m/s ($T \leq 0.1$ s), rocas (firmes a duras o poco meteorizadas) con $760 \leq V_s \leq 1500$ m/s ($T \leq 0.2$ seg), y a las rocas blandas (o meteorizadas) o suelos firmes con $360 \leq V_s \leq 760$ m/s ($T \leq 0.4$ s).

Una reducción de los valores de velocidad de onda en roca para el análisis de respuesta de sitio en el AMSS es justificable, tomando en cuenta tanto las caracterizaciones internacionalmente aceptadas como los datos reales obtenidos (amplificaciones considerablemente mayores resultan del método analítico utilizando el valor de $V_s = 2100$ m/s para roca).

Las curvas de amortiguamiento (amortiguamiento crítico con respecto a la deformación por corte) también tienen gran influencia en los resultados. Estos fueron tomados de muestras específicas consideradas representativas, por lo que no reflejan las propiedades reales de los suelos en todos los puntos; se observa además, una desviación considerable en los resultados presentados. A falta de más información, y en la medida de lo posible, los parámetros serán calibrados a partir las funciones de transferencia empíricas, considerando el rango $M \pm \sigma$ de las curvas de amortiguamiento, teniendo presentes las limitaciones del análisis.

3.5.5 Sedimentos Intercalados

Del análisis realizado podemos diferenciar distintas formas de afectación de la intercalación de sedimentos y lavas en el movimiento sísmico en la superficie. La más evidente, y que ha sido ampliamente discutida, es las amplificaciones sustanciales que ocurren en períodos largos (en este caso 1.3 seg. aproximadamente).

Para espesores pequeños de sedimentos bajo coladas de lava considerables se da una reducción en la amplitud en períodos bajos y una reducción en la amplificación correspondiente al período predominante del sedimento superficial. A medida la relación espesor de sedimento intercalado a espesor de lava va aumentando, la amplificación de largo período aumenta mientras que la correspondiente al período principal del sedimento superficial disminuye, y una serie de picos secundarios se derivan del pico inicial. Finalmente, para espesores de sedimento considerables, se tienen amplificaciones para un amplio rango de períodos, siendo el predominante, aquel correspondiente al período del sedimento intercalado. El efecto ocurre aún para sedimentos superiores por encima de los 50m.

El efecto de sedimentos intercalados y su influencia en amplificaciones da largo período es un factor importante a considerar, puesto que puede llegar a tener una gran influencia en la amenaza y en la respuesta estructural de edificaciones de gran altura, que albergan un gran número de personas y cuya construcción aumenta cada día más.

3.5.6 Comparación con Estudios Previos

Los resultados obtenidos muestran buena relación con los obtenidos en estudios previos. Resultados obtenidos a partir de microtemblores (H/V) divergen considerablemente de los obtenidos utilizando datos sísmicos, aunque permiten en ciertos casos determinar el período predominante de los sitios.

4 DEFINICION DE ZONAS DE RESPUESTA SISMICA SIMILAR

4.1 Delimitación de Zonas de Isoperíodo

Tomando como base el mapa de Isoespesores de “Unidad A” presentado por el Consorzio Salvador E. Italtেকna-Italconsult para el DSA3, y tomando en cuenta la información geológica recopilada (sondeos geotécnicos, pozos de agua, etc.), el mapa geológico nacional (1: 100 000) y el mapa geológico de San Salvador (1:15 000) desarrollado por la Misión Geológica Alemana en 1987, así como la topografía de la región, se determinó de manera preliminar una malla de isoespesores de sedimentos superficiales (Figura 4.1)

Se siguió la clasificación propuesta por la misión italiana, considerando tanto la calidad de la información existente (información litológica) como la información relacionada (velocidades de onda, propiedades dinámicas).

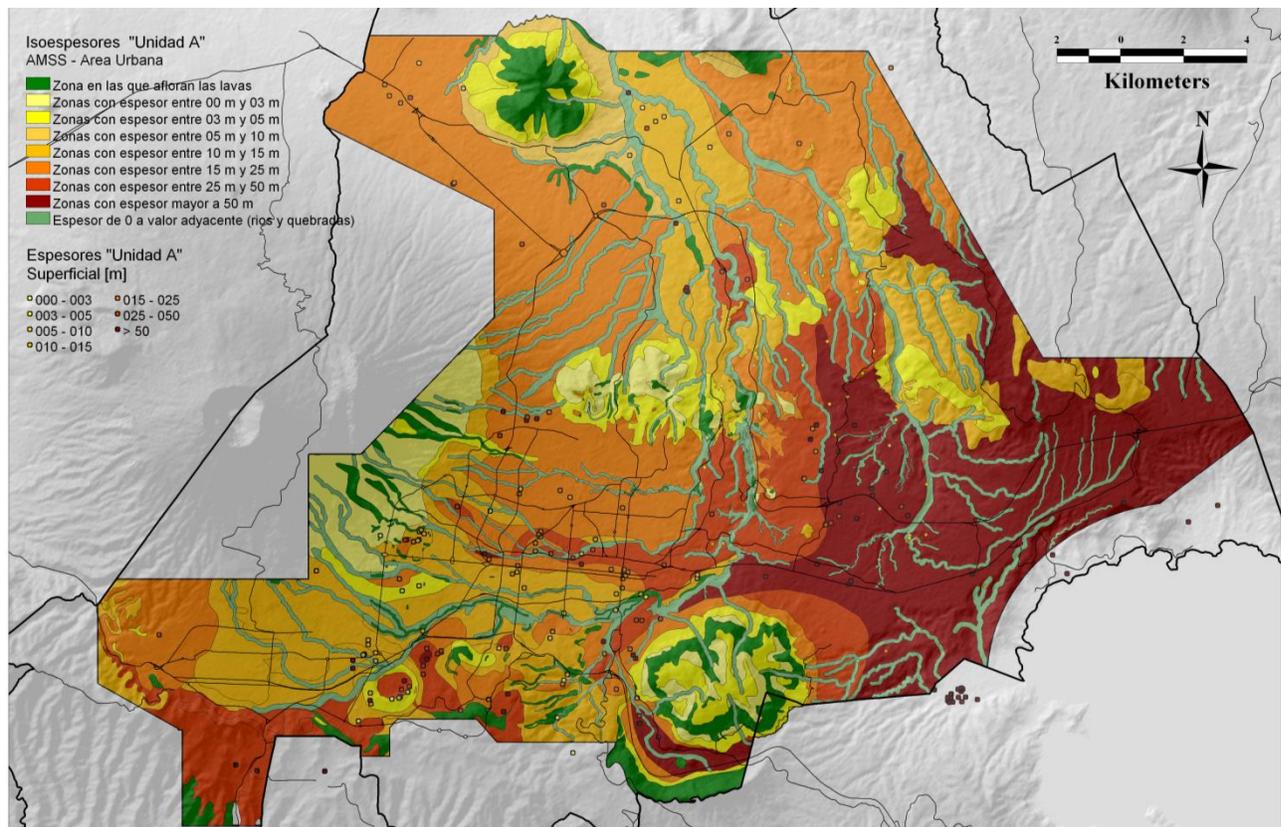


Figura 4.1: Mapa Preliminar de Isoespesores de “Unidad A” (superficiales)

Con la malla de isoespesores definida, se realizó una comparación de la respuesta sísmica de las estaciones que presentaban una geología superficial similar, realizando, en caso necesario, las modificaciones pertinentes. De esta forma, se definieron “Zonas de Isoperíodos” en base a los períodos predominantes obtenidos en las estaciones analizadas y a los límites mínimos y máximos de espesores de cada zona (de manera simplificada $T=4H/V_s$). Se ha estimado un traslape en los períodos predominantes de cada zona, considerando la variabilidad de la velocidad de onda de corte asociada a cada unidad y a la incerteza en los parámetros físicos de los suelos.

La Figura 4.2 muestra el mapa de zonas susceptibles a amplificación del terreno en base a los períodos predominantes asociados. Las zonas y rangos propuestos se compararon y validaron con períodos predominantes obtenidos de la medición de microtemblores (Reyes y Sorto, 2007, NORSAR y OPAMSS, 2008)

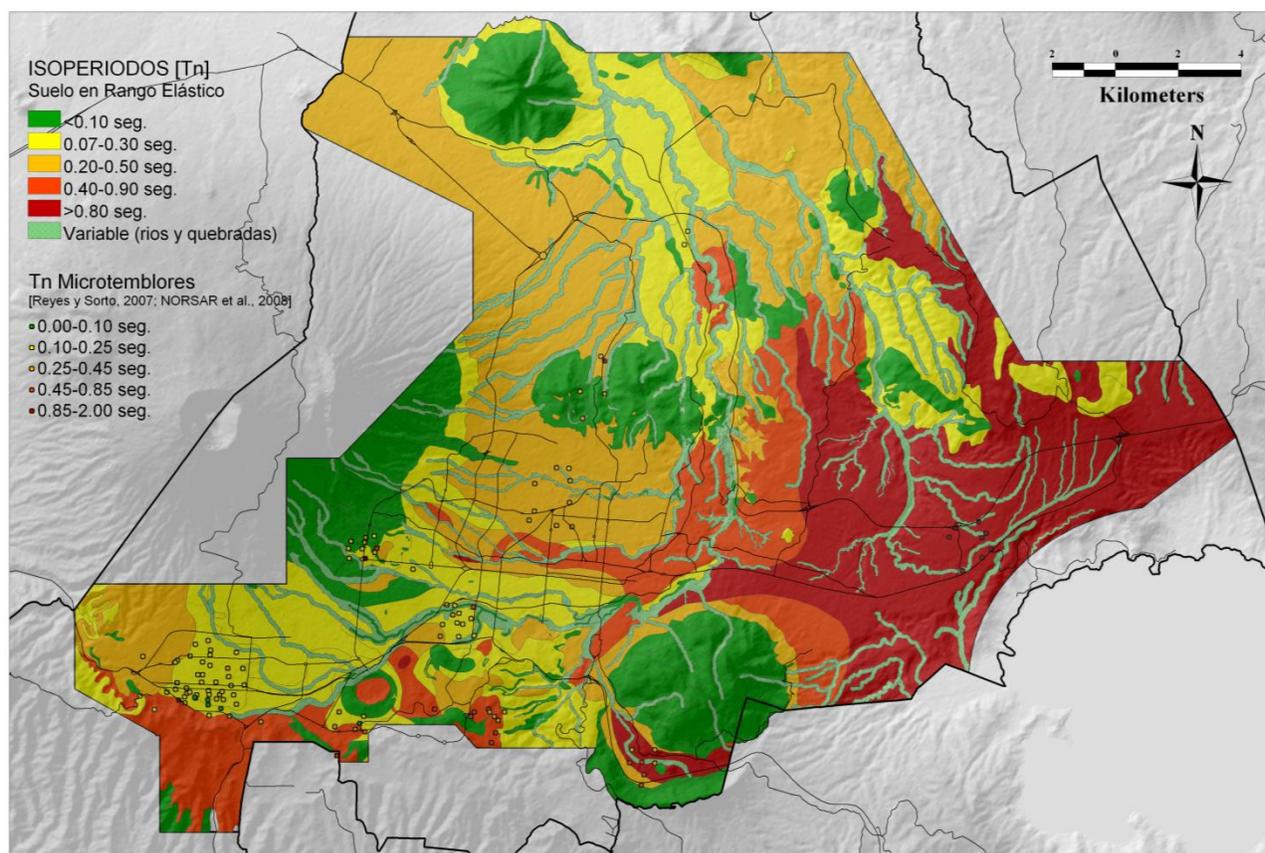


Figura 4.2: Mapa Preliminar de Zonas Susceptibles a Amplificación. Malla de Isoperíodos

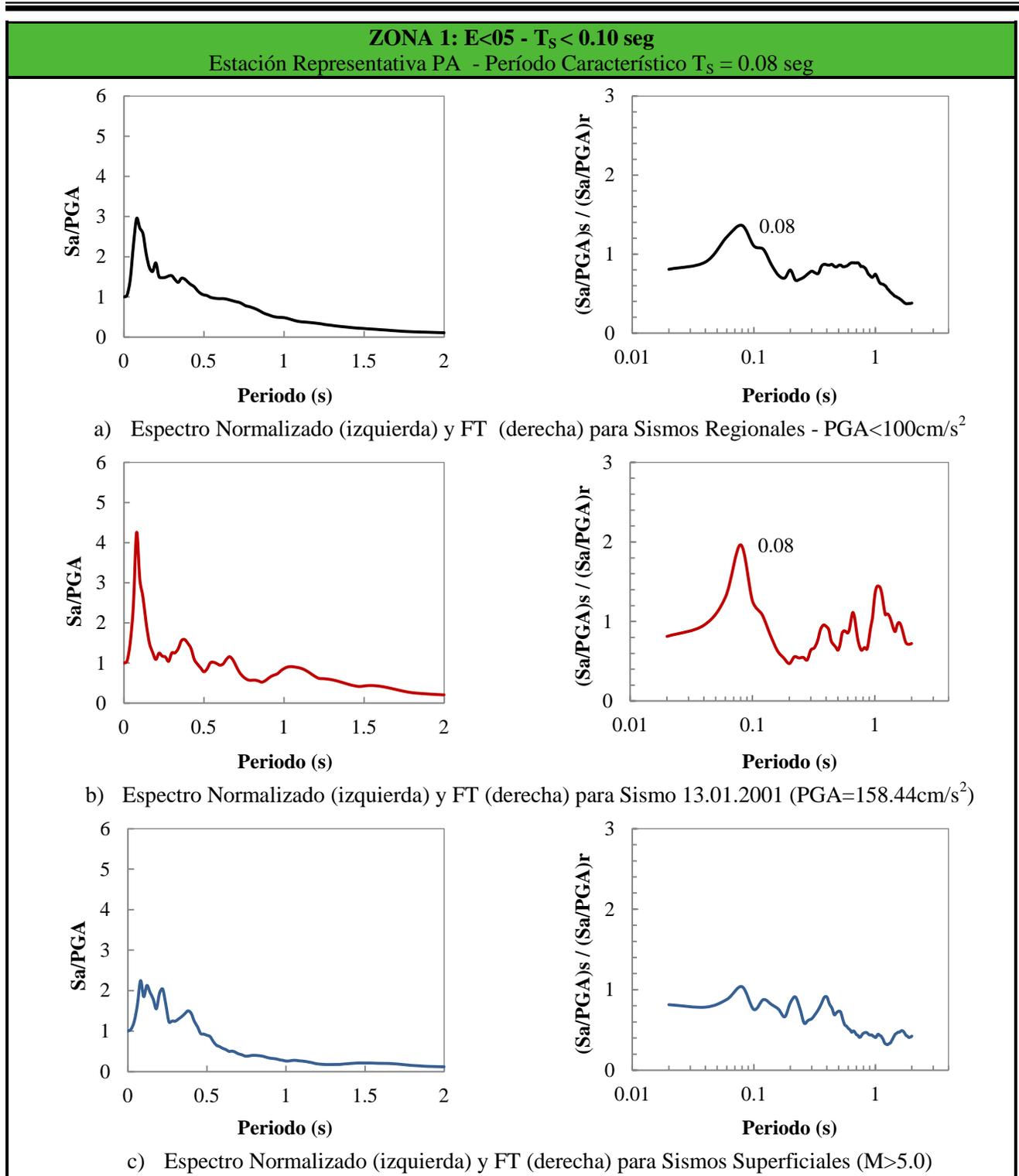


Figura 4.4: Espectros de Respuesta Normalizados ($\zeta=5\%$) y Funciones de Transferencia para la Zona 1

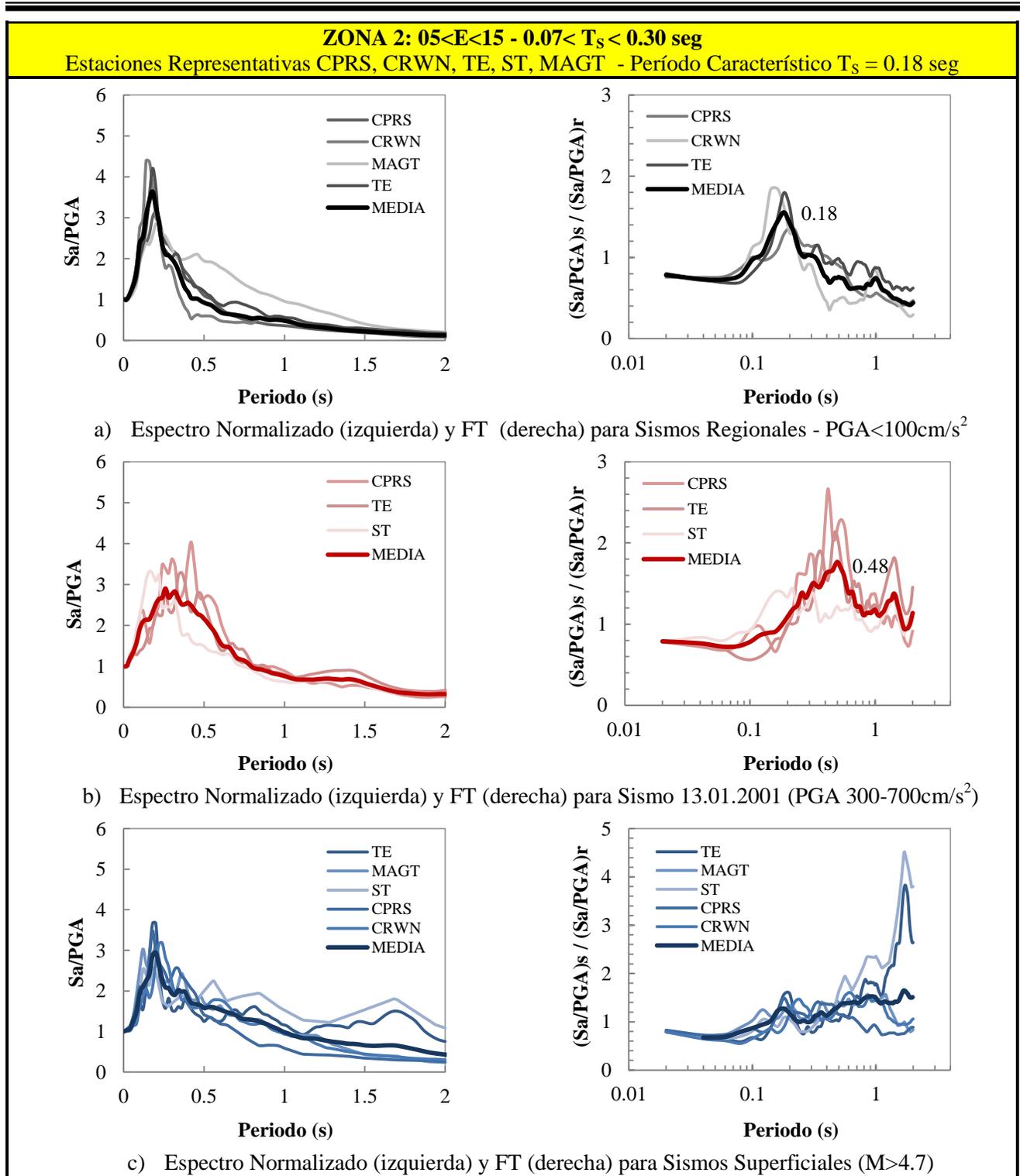


Figura 4.5: Espectros de Respuesta Normalizados ($\zeta=5\%$) y Funciones de Transferencia para la Zona 2

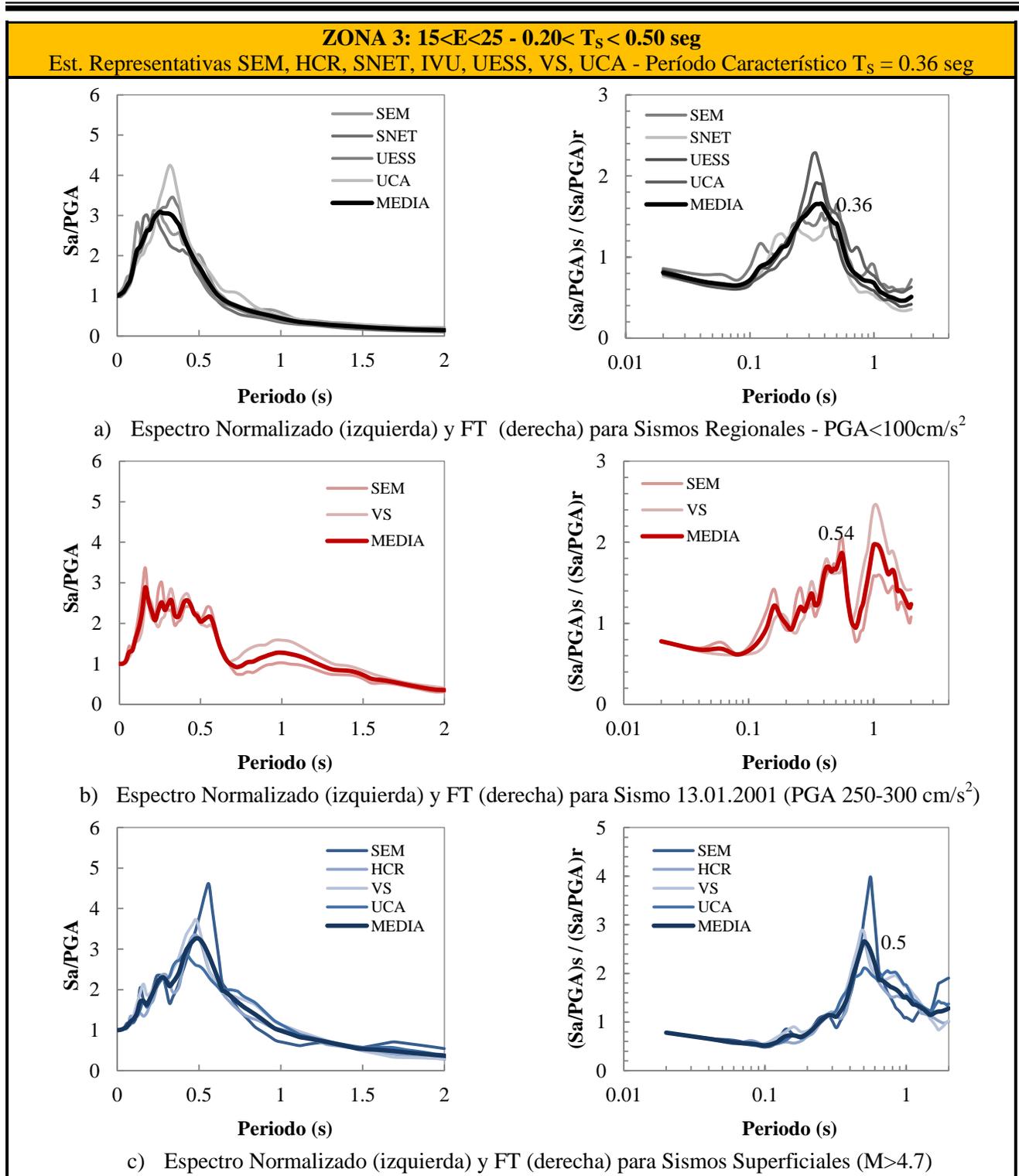
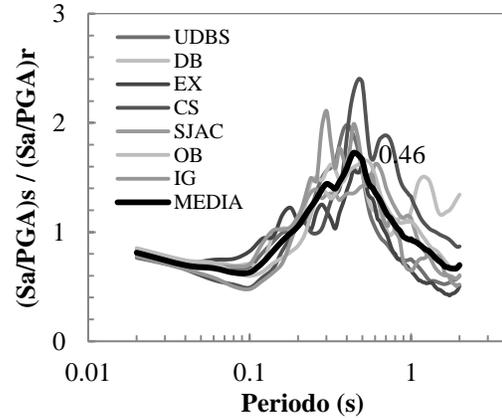
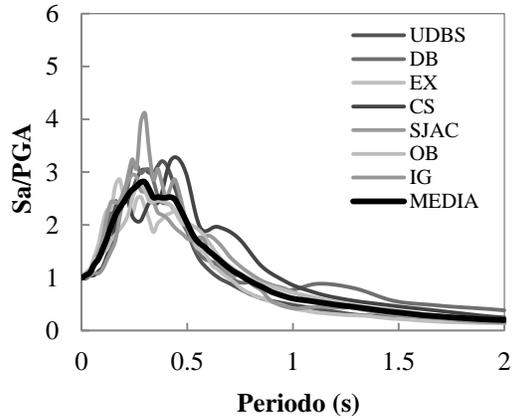
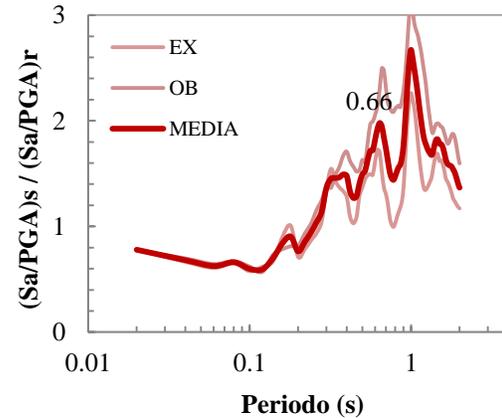
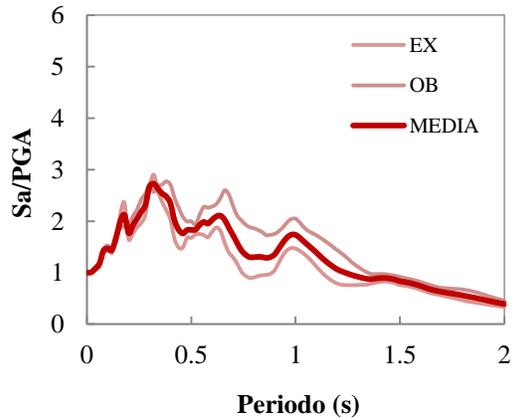


Figura 4.6: Espectros de Respuesta Normalizados ($\zeta=5\%$) y Funciones de Transferencia para la Zona 3

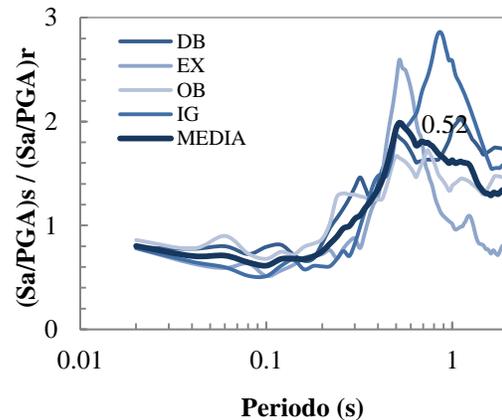
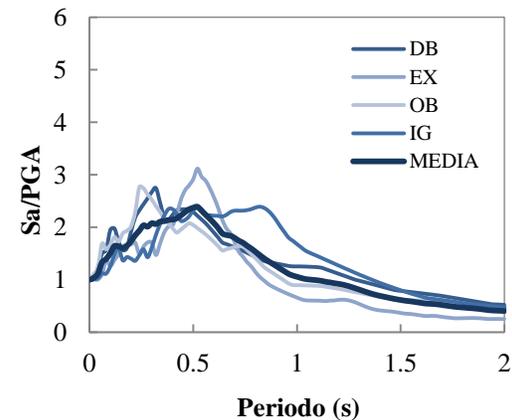
ZONA 4: $25 < E < 50 - 0.40 < T_s < 0.90$ seg
Estaciones Representativas UDBS, DB, EX, BN, SJAC, OB, IG, CS- Período Característico $T_s = 0.46$ seg



a) Espectro Normalizado (izquierda) y FT (derecha) para Sismos Regionales - $PGA < 100 \text{ cm/s}^2$



b) Espectro Normalizado (izquierda) y FT (derecha) para Sismo 13.01.2001 ($PGA 270-420 \text{ cm/s}^2$)



c) Espectro Normalizado (izquierda) y FT (derecha) para Sismos Superficiales ($M > 4.7$)

Figura 4.7: Espectros de Respuesta Normalizados ($\zeta=5\%$) y Funciones de Transferencia para la Zona 4

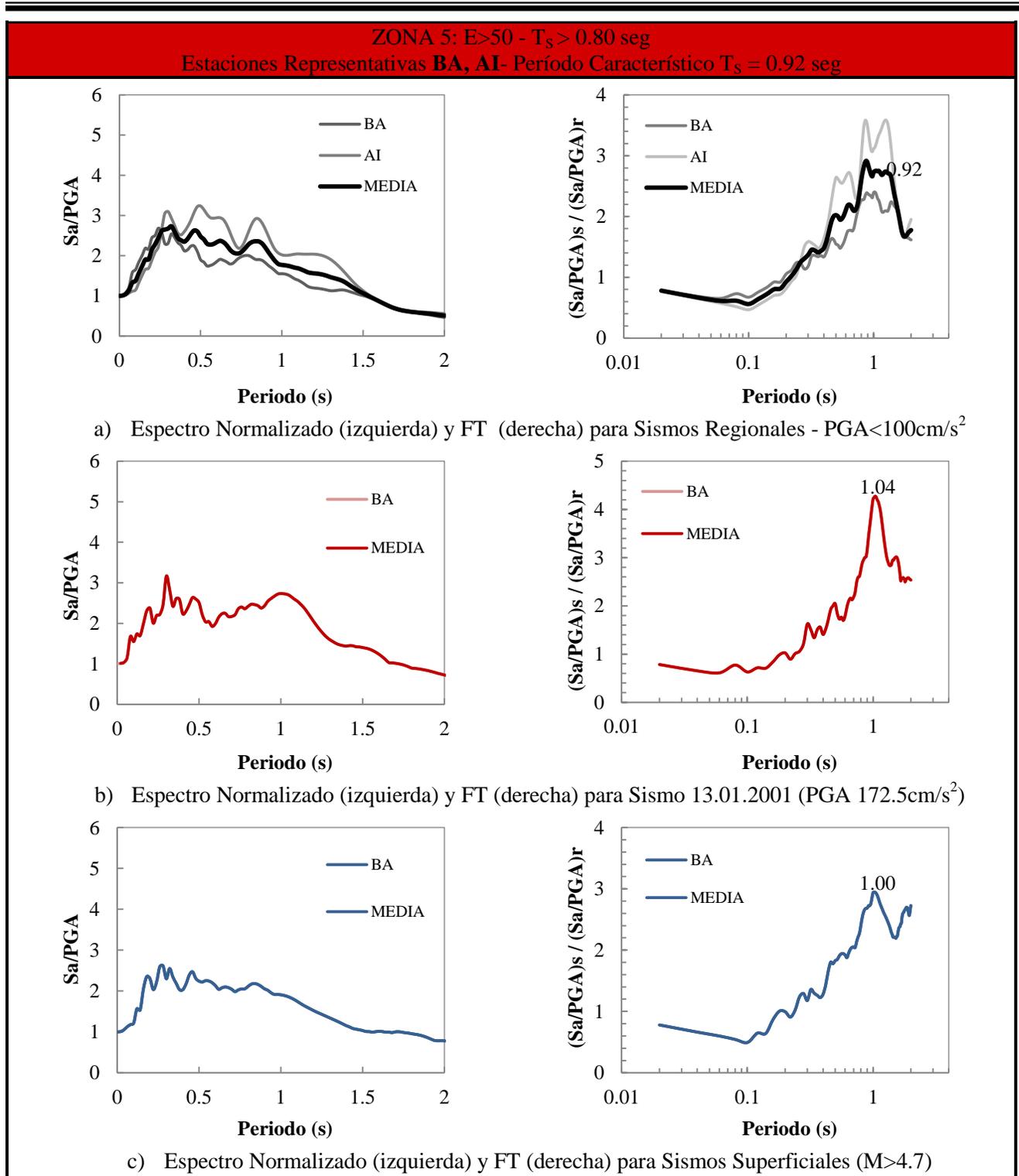


Figura 4.8: Espectros de Respuesta Normalizados ($\zeta=5\%$) y Funciones de Transferencia para la Zona 5

Los períodos predominantes obtenidos no corresponden necesariamente al período medio o máximo del rango; estos se han obtenido en base a la información existente, y no se descarta que otros períodos y/o amplificaciones pudieran obtenerse de tener más información. La Figura 4.9 presenta las Funciones de Transferencia *características* para cada una de las zonas considerando únicamente el comportamiento elástico del suelo y realizando de forma conservadora una corrección por amplificación de la aceleración pico (PGA).

El detalle del espesor de sedimentos superficial, rango de períodos asociado, período característico y correspondiente amplificación, así como una descripción del tipo de edificación que pudiera verse más afectada, se muestra en la Tabla 4.1. El análisis se ha realizado considerando únicamente el rango elástico del suelo y obviando la influencia de la geología profunda, y por tanto posibles amplificaciones de largo período que pudieran afectar estructuras mayor altura.

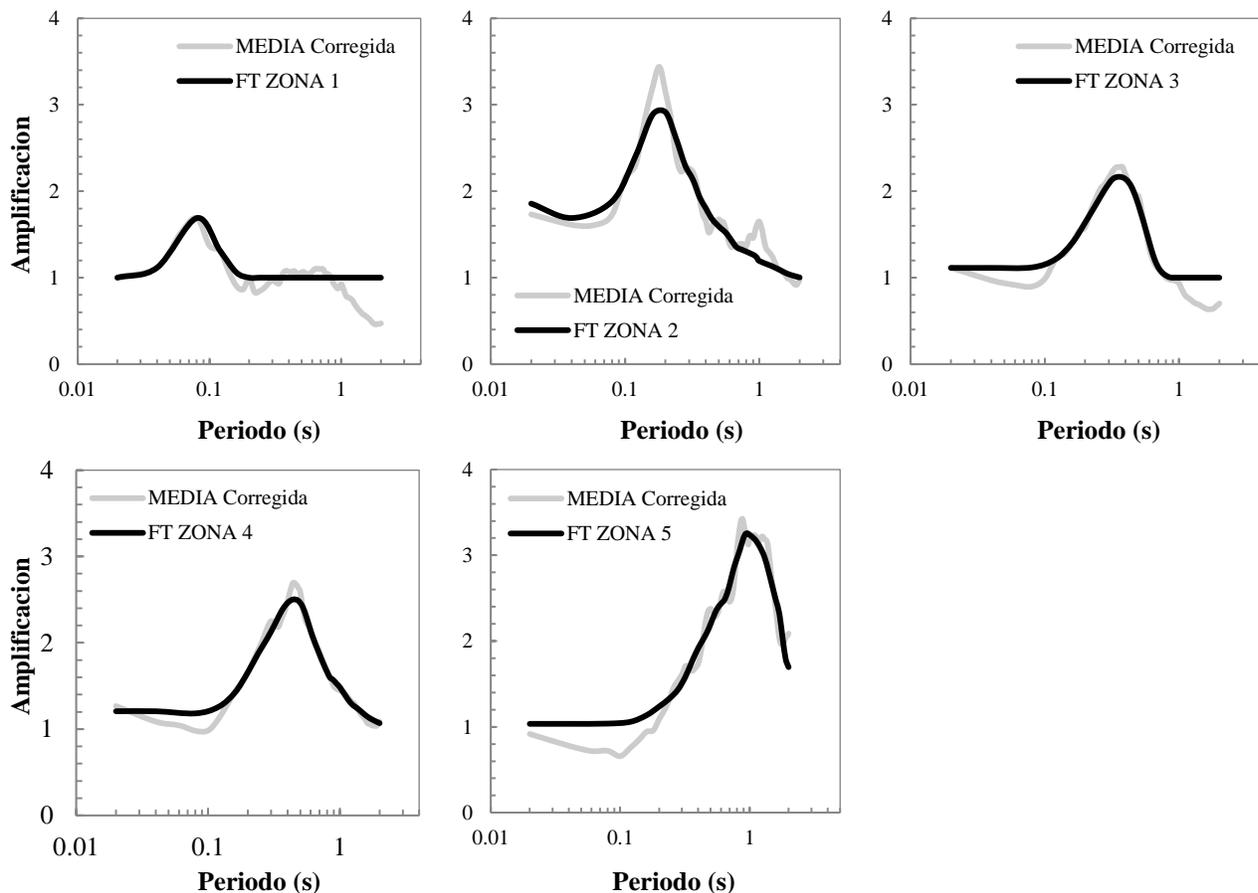


Figura 4.9: Funciones de Transferencia Corregidas por PGA y Suavizadas para el AMSS

Tabla 4.1: Espesores, Períodos y Edificaciones que pudieran verse más Afectadas

Zona	H máx. Unidad A	Rango de Períodos (s)	Período (s) Característico	Posible Amplificación	Edificaciones afectadas por Efectos de Resonancia ($T \approx 0.1n$)
1	5	< 0.10	0.08	1.7	Edificaciones de 1 Nivel
2	15	0.07-0.30	0.18	3.9	Edificaciones de 1 - 3 Niveles
3	25	0.20-0.50	0.36	2.2	Edificaciones de 2 - 5 niveles
4	50	0.40-0.90	0.46	2.5	Edificaciones de 4 - 9 niveles
5	>50	> 0.80	0.92	3.2	Edificaciones de más de 8 niveles

La Figura 4.10 muestra el mapa de susceptibilidad a amplificación en función del tipo de edificación que pudiera verse más afectada por efectos de resonancia (considerando únicamente el comportamiento elástico del suelo)

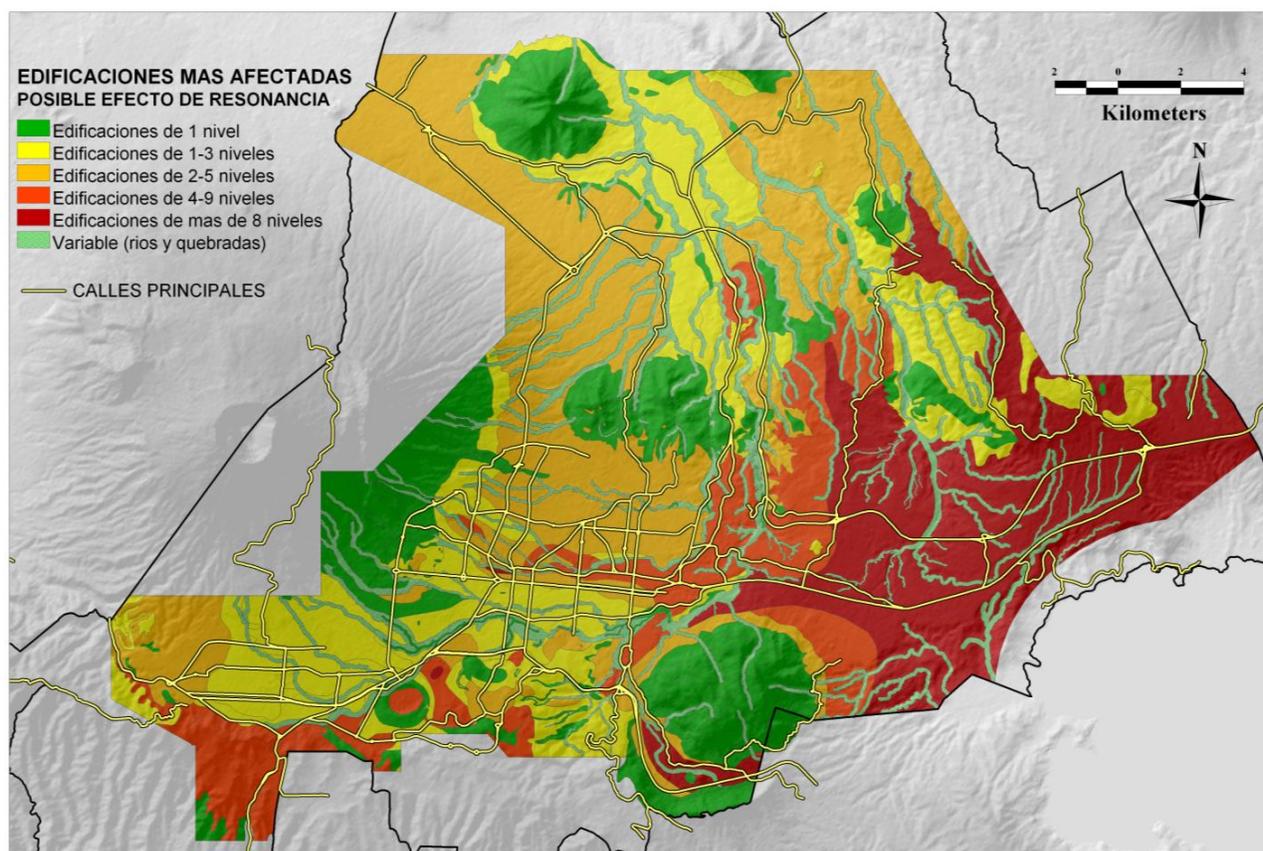


Figura 4.10: Mapa de Susceptibilidad a Amplificación en función del Tipo de Edificación que pudiera verse más Afectada por Efectos de Resonancia (suelo en rango elástico)

4.3 Relación al Daño Observado - Sismos del 13 de Enero y 13 de Febrero de 2001

La información de daños causados por los sismos del 2001 (proporcionada por Ing. Patricia de Hasbún - Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”) fue analizada y procesada con el fin de estudiar la relación entre los daños observados y las condiciones de suelo o efectos de sitio en el emplazamiento.

Se consideró para el análisis la estimación de indicadores de desempeño estructural, definiendo para ello dos Índices: (i) un “Índice de Resonancia” el cual se especificó a partir de la relación de los períodos de suelo estimados (rangos) y los períodos estructurales obtenidos de forma simplificada, y (ii) un “Índice de Forma Espectral” que se definió en relación a las formas espectrales asociadas a las micro-zonas por medio de las funciones de transferencia definidas, los períodos estructurales y los espectros de diseño de los códigos vigentes al momento de la construcción

a) “Índice de Resonancia”

$$I_R = 1 - \frac{ABS(T_N - T_S)}{MAX(T_N, T_S)} \quad \text{EC. 4.1}$$

Donde T_S es el período natural del suelo bajo la edificación (período más desfavorable dentro del rango definido) y T_N el período predominante de la estructura, determinado de forma simplificada $T_N = 0.1N$. Esta simplificación se debe a que la información de daños recopilada resultaba insuficiente en muchos casos para la asignación del coeficiente C_T relacionado al sistema estructural ($T_N = C_T \cdot h_N^{3/4}$), las implicaciones para los distintos sistemas se ilustran en la Figura 4.11.

El Índice de Resonancia será siempre menor o igual a 1 ($0 \leq I_R \leq 1$), siendo este el caso más desfavorable (período de la estructural coincide con el período natural del suelo).

La Figura 4.12 muestra el mapa preliminar de zonas susceptibles a amplificación del terreno y la relación al daño observado durante los sismos del 2001 (edificios con bandera naranja y roja) en términos del índice de resonancia. Se puede observar una clara correspondencia entre la respuesta de sitio y el nivel daño observado, validando de cierta forma el mapa propuesto.

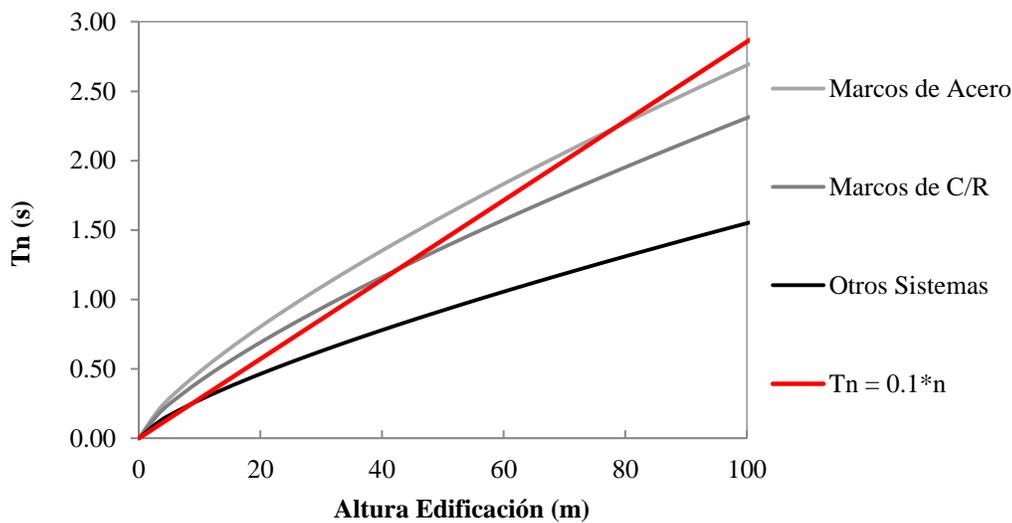


Figura 4.11. Períodos Predominantes según Sistema Estructural (altura típica de entrepiso 3.5m)

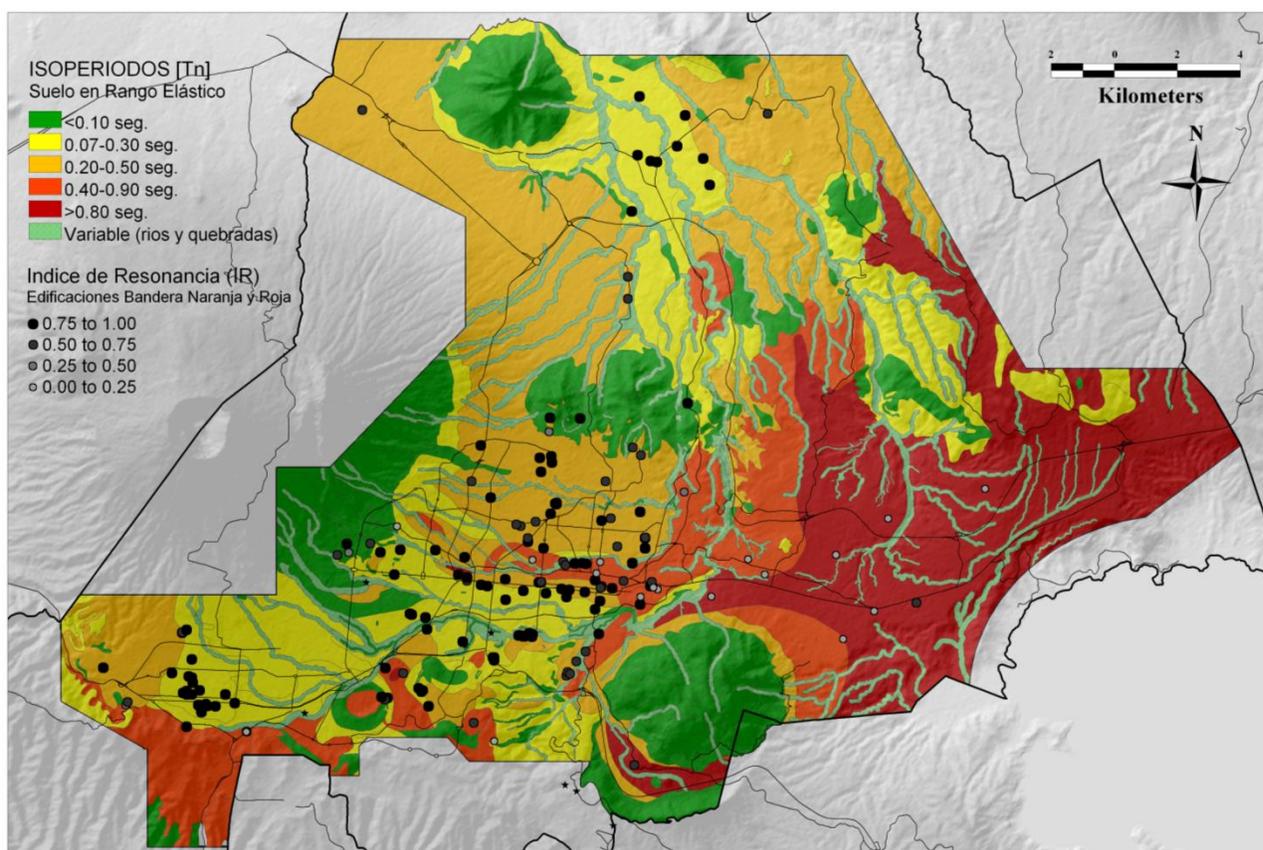


Figura 4.12: Mapa Preliminar de Zonas Susceptibles a Amplificación del Terreno y relación al Daño Observado durante los Sismos del 2001 (Bandera Naranja y Roja) – Índice de Resonancia.

b) “Índice de Forma Espectral”

El Índice de Forma Espectral considera la variación de la forma espectral según los códigos de diseño vigentes en el año de construcción de las distintas edificaciones, según la Tabla 4.2 y Figura 4.13. Se asume edificios posteriores a 1994 han sido diseñados de acuerdo a la Norma Técnica de Diseño por Sismo (NTDS) considerando un suelo tipo S3 ($T_0=0.6$).

Tabla 4.2: Cálculo de Índice de Forma Espectral

Previo a 1966 (No hay Código)		1966-1994 (Código de 1966)		Posterior a 1994 (Código de 1994 – Suelo S3)	
$T_N \leq T_S'$	$I_{FE} = 1$	$T_N \leq 0.2$	$I_{FE} = 0$	$T_N \leq 0.6$	$I_{FE} = 0$
$T_S' \leq T_N$	$I_{FE} = Y$	$0.2 < T_N \leq T_S'$	$I_{FE} = 1 - (0.2/T)$	$0.6 < T_N \leq T_S'$	$I_{FE} = 1 - (0.6/T)^{(3/4)}$
		$T_S' \leq T_N$	$I_{FE} = Y - (0.2/T)$	$T_S' \leq T_N$	$I_{FE} = Y - (0.6/T)^{(3/4)}$

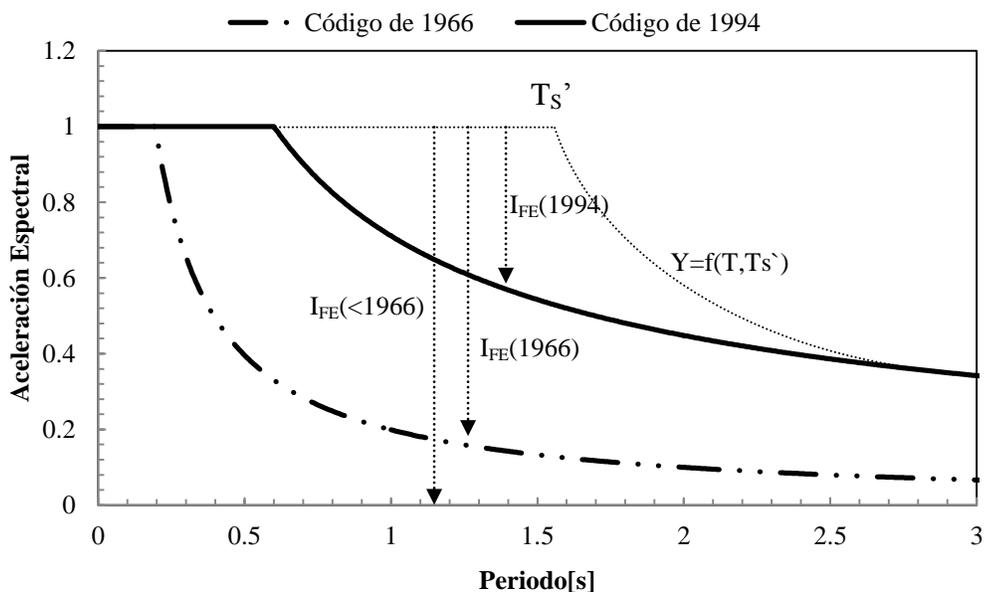


Figura 4.13. Ilustración para la Estimación del Índice de Forma Espectral

El Índice de Forma Espectral será siempre menor o igual a 1 ($0 \leq I_{FE} \leq 1$), siendo este el caso más desfavorable

El Índice de Forma Espectral podrá ser evaluado una vez se definan formas apropiadas de los espectros de diseño para cada una de las zonas, delimitando el ancho de la meseta (T_S') y el parámetro que regula la caída de la rama descendente del espectro (Y). Para ello debe evaluarse/estimarse debidamente el comportamiento no lineal de los suelos, así como períodos correspondientes a otros modos de vibrar, incluyendo la respuesta debido a la intercalación de sedimentos y lavas (efecto que hasta el momento no ha sido considerado).

4.4 Estudio de Espectros de Desplazamiento

Existen tres zonas características en los espectros de respuesta (Figura 4.14): **(i) Zona controlada por aceleraciones máximas**, la cual corresponde al segmento de corto período (estructuras relativamente rígidas), donde las aceleraciones máximas no presentan una reducción marcada respecto a las elásticas, **(ii) Zona controlada por velocidades máximas**, donde las aceleraciones espectrales son máximas (ancho de la meseta); y **(iii) Zona controlada por los desplazamientos**

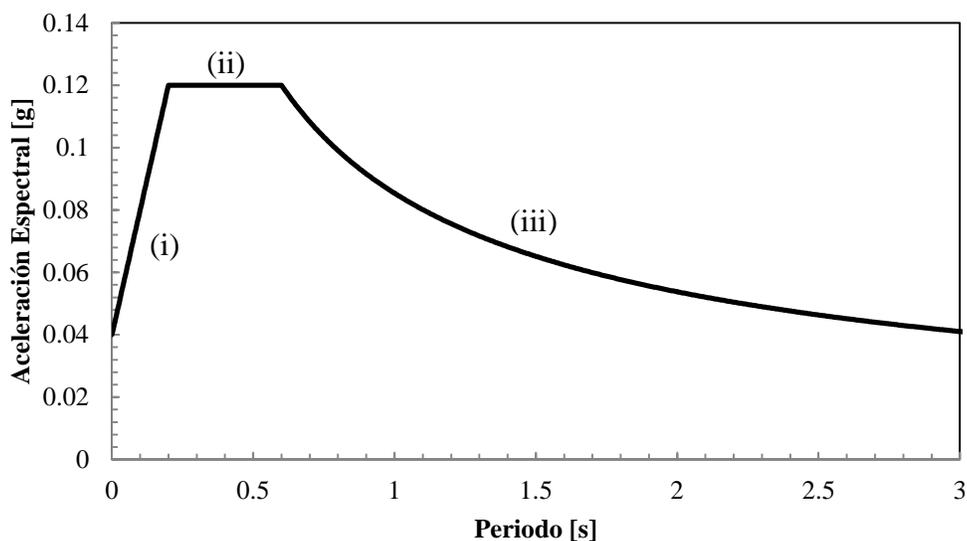


Figura 4.14. Zonas Características de los Espectros de Respuesta

Considerando que la respuesta de los suelos del AMSS no es unimodal, especialmente para sismos de amplitud considerable cuando las amplificaciones de largo período cobran mayor influencia (ver Figuras 4.5 y 4.6), se realizó un estudio de espectros de desplazamiento para los sismos más importantes ocurridos en el AMSS.



Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

Más que para estimar la frecuencia dominante, este estudio permite visualizar períodos predominantes y períodos correspondientes a otros modos de vibrar del suelo, a fin de no subestimar la demanda a estos períodos al establecer los parámetros que delimiten el ancho de la meseta y la caída de la rama descendente de los espectros de diseño (conversación con Leonardo Veras, Junio 2011)

Los espectros de desplazamiento relativo se presentan junto a los espectros de aceleración y velocidad, normalizados con respecto a su máximo valor, para facilitar la visualización (Anexo G)

CONCLUSIONES

De acuerdo con las leyes de atenuación, la intensidad del movimiento disminuye con la distancia epicentral, sin embargo, el movimiento sísmico puede variar mucho de un lugar a otro según las características geológicas, aunque la distancia al epicentro no varíe considerablemente, fenómeno conocido como “efecto de sitio”. El efecto de sitio en el AMSS está principalmente influenciado por la presencia de materiales blandos o sedimentos no consolidados (composición y espesor de los estratos situados sobre la base rocosa), y tiene gran influencia en las características de amplitud y periodo del movimiento.

El período predominante aumenta a medida aumenta el espesor de sedimentos poco consolidados. Para la geología particular del Área Metropolitana de San Salvador, se espera tener lo menores períodos en las cercanías del volcán de San Salvador, aumentando hasta alcanzar los máximos en las orillas del Lago de Ilopango, donde se alcanzan los mayores espesores de sedimentos (Unidad “A”).

Comúnmente se asume que los 30 m superficiales son los más influyentes en la determinación del efectos de sitio, sin embargo los resultados obtenidos (ej. período predominante en AI $\approx 1.4s$, diferencias entre las relaciones superficie/fondo de los pozos y superficie/afloramiento) divergen de esta hipótesis. En la actualidad, muchos códigos no toman en cuenta la profundidad de los depósitos de suelo y utilizan únicamente la velocidad de onda de corte de los 30m superiores (Vs_{30}) como el parámetro básico para la clasificación, sin embargo, pese a las múltiples ventajas que esta simplificación presenta en la práctica, obviar la importancia de la profundidad del sedimento puede llevar a deficiencias significativas [Rodríguez-Marek et al., 2000]

En las últimas décadas se han realizado una gran cantidad de estudios para determinar los efectos de sitio en Área Metropolitana de San Salvador pero existen discrepancias considerables en los resultados obtenidos y muy pocos de ellos alcanzan un producto final que pueda ser realmente utilizable en estudios de amenaza sísmica. Esto se debe, principalmente, a la complicada geología del AMSS, y, más específicamente, al poco conocimiento que se tiene sobre el efecto que pueda tener la intercalación de estratos de sedimentos no consolidados y estratos firmes (lavas) con un alto contraste de impedancias (posible atrapamiento e intensificación de las ondas sísmicas).

Los mapas de susceptibilidad a amplificación del terreno han sido desarrollados considerando la geología de la región y tomando en cuenta, en la medida de lo posible, la información de sondeos geotécnicos, perforaciones profundas, etc. No obstante, la información recopilada requiere mucha interpretación: el mapa presentado deberá ser revisado y actualizado a medida se tenga más y/o

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

mejor calidad de información (información de perforaciones profundas revisada por un especialista en geología). Los límites considerados (área urbana) obedecen a la disponibilidad de información (ubicación de sondeos, estaciones acelerográficas, etc.).

Se ha seguido la clasificación propuesta por el Consorzio Salvadoreño E. ITALTEKNA-ITALCONSULT, tomando en cuenta la calidad de la información existente (información litológica) como la información relacionada (velocidades de onda, propiedades dinámicas).

Para la mayor parte de los sitios ha sido posible obtener funciones de transferencia empíricas e identificar, de forma aproximada, períodos predominantes y posibles valores de amplificación. Sin embargo, las funciones de transferencia propuestas se limitan al rango elástico del suelo (sismos de amplitud moderada $PGA < 100 \text{ cm/s}^2$), y las correlaciones se han hecho únicamente sobre la base de la geología superficial (profundidad de sedimentos sobre la base rocosa), dejando fuera efectos de la intercalación de sedimentos y lavas así como efectos topográficos. Dentro de las limitaciones existentes, se observa una buena correlación entre la geología superficial y la respuesta sísmica en los sitios.

Tomando en cuenta los resultados de pruebas dinámicas realizadas para los suelos del AMSS (Figura 3.2), y considerando que son suelos con un índice de plasticidad muy bajo o nulo, es de esperarse que exista comportamiento inelástico para aceleraciones máximas dentro de los niveles esperados. El comportamiento no lineal del suelo durante el sismo del 13.01.2001 ($PGA \approx 300 \text{ cm/s}^2$) y sismos locales ($M > 4.7$) resulta evidente.

Al utilizar espectros de respuesta normalizados, períodos predominantes (o variación de períodos con PGA fuera del rango elástico) pueden no identificarse claramente, como evidenciado al estudiar el comportamiento fuera del rango elástico para la estación CPRS y demás estaciones de la Zona 2 (ver Figura 4.5 y Figura A.2g). Las funciones de transferencia relativas presentadas, más que un período o frecuencia dominante, reflejan una función de modificación al espectro de respuesta obtenido del estudio de amenaza sísmica a nivel nacional para condición de “Roca”, considerado como un espectro de línea base de efecto de sitio

Ante eventos sísmicos importantes (sismos regionales $PGA > 100 \text{ cm/s}^2$, sismos locales $M > 4.7$), amplificaciones de largo período cobran mayor influencia en la respuesta. El estudio de espectros de desplazamiento permite visualizar los períodos fundamentales - predominantes y correspondientes a otros modos de vibrar del suelo (i.e. relacionados al efecto de la intercalación de lavas y sedimentos), importantes al estudiar el comportamiento sísmico de estructuras de mayor altura y al proponer parámetros que delimiten el ancho de la meseta y la caída de la rama descendente de los

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

espectros de diseño. A este nivel de estudio se vuelve complicado el extrapolar los datos de períodos largos ya que estos corresponden, en muchos casos, a un sedimento intercalado, y la delimitación inicial de zonas se ha trabajado en función del sedimento superficial y registros de microtemblores

La cantidad de registros de amplitud considerable, es insuficiente para estudiar detalladamente el comportamiento del suelo fuera del rango elástico (variación de período y amplificación en función de la aceleración máxima, amplificaciones de largo período). La parametrización de los resultados para distintos niveles de aceleración deberá realizarse sobre la base de modelos analíticos.

Se ha tenido ciertas dificultades en el cálculo de la respuesta sísmica mediante el método analítico lineal equivalente (SHAKE); debido a la gran sensibilidad de la respuesta ante los distintos parámetros y la poca información con la que se cuenta. Los resultados del método empírico servirán para calibrar los modelos y tener un mejor control de los parámetros de entrada a la hora de aplicar el método en puntos en donde no existan registros de movimiento fuerte, permitiendo generalizar la metodología y obtener información en múltiples puntos del AMSS. Aún falta trabajar mucho en esta línea, principalmente en la caracterización geológica de la información de perforaciones profundas para poder asignar propiedades a los distintos estratos y calibrar los resultados.

Se trata de una primera aproximación para la estimación de respuesta de sitio, y debe ser considerada como tal; no pretende, bajo ningún punto de vista, reemplazar ni descartar estudios de detalle.

BIBLIOGRAFÍA

Atakan, K., Ciudad Real, M., Torres, R. [2004] “Local Site Effects on Microtremors, Weak and Strong Ground Motion in San Salvador, El Salvador”, in Rose, W.I, et al., eds., Natural Hazards in El Salvador, Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper 375, p. 321-337

Assimaki, D., Li, W., Steidl, J.H., y Tsuda K. [2008] Site Amplification and Attenuation via Downhole Array Seismogram Inversion: A Comparative Study of the 2003 Miyagi-Oki Aftershock Sequence, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 98, No. 1, pp. 301–330

Bommer, J. [1996] Sismología para Ingenieros. Papeles Técnicos UCA. Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, San Salvador, El Salvador.

Bommer, J., W. Salazar, R. Samayoa. [1998] Riesgo Sísmico en la Región Metropolitana de San Salvador. Programa Salvadoreño de Investigación sobre Desarrollo y Medio Ambiente (PRISMA).

Borchedt, D. [1970] Effects of local geology on ground motion near San Francisco Bay. Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 60, No.1

Bray, J. D., y A. Rodríguez-Marek [1997]. Geotechnical site categories, Proceedings of the First PEER PG&E Workshop on Seismic Reliability of Utility Lifelines, San Francisco/California, 1997

Burgos, E., Hernandez D., Ayala, R., Pullinger C. [2007]. Informe del proyecto: Primera fase de la microzonificación sísmica en las principales ciudades de El Salvador, San Salvador, El Salvador

Centro de Investigaciones Geotécnicas del Ministerio de Obras Públicas (CIG), Departamento de Mecánica de Suelos [1993], Construcción de Pozos para Mediciones Sísmicas en el Suelo dentro del Proyecto de elaboración del Reglamento de Diseño Sísmico de El Salvador.

Consorzio Salvador E. ITALTEKNA-ITALCONSULT [1988]: Valutazione della Pericolosità Sismica Nelle Aree del Distretto Sanitario A3 (San Salvador) e del Distretto 7 (Apopa), Parte 4^a: Studi di Risposta Sismica Locale ed Elaborazione delle Carte di Microzonazione Sísmica, Repubblica Italiana, Ministero Degli Affari Esteri, Direzione Generale per la Cooperazione allo Sviluppo, Programm di Reconstruzione, San Salvador, El Salvador.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

Consorcio Salvador e ITALTEKNA-ITALCONSULT Geotérmica Italiana [1988]. Estudio Vulcanológico, Repubblica Italiana, Ministerio Degli Affari Esteri, Direzione Generale per la Cooperazione allo Sviluppo, Programm di Reconstruzione, San Salvador, El Salvador.

Galdámez, C. y Kattan C. [2007], Estudio de Respuesta de Capas Superficiales de Suelo en el Área Metropolitana de San Salvador. Tesis para Optar al Grado en Ingeniero Civil, Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, San Salvador, El Salvador

Dirección General de Estadística y Censos (DIGESTYC) [2008] “VI Censo de Población y V de Vivienda”, Cifras Oficiales, Ministerio de Economía, San Salvador, El Salvador

Hernández, W. [2004] Características Geomecánicas y Vulcanológicas de las Tefras de Tierra Blanca Joven, Caldera de Ilopango El Salvador, Tesis de Maestría en Tecnologías Geológicas, Universidad Politécnica de Madrid.

Hernández, W. [2007], Aspectos Geológicos que Influyen en las Aguas Subterráneas y en la Respuesta Sísmica del Área Metropolitana De San Salvador, Revista de la Asociación Salvadoreña de Ingenieros y Arquitectos (ASIA), San Salvador, El Salvador.

Ingvarsson M. y Johansson J. [1996], Amplification of Earthquake Induced Ground Motions, San Salvador, El Salvador. Instituto Real de Tecnología, KTH, Estocolmo, Suecia.

Kattan Jokisch, C. [2010]. Re-Interpretation of Seismic Damage Scenarios: Risk Mapping for the case Study of San Salvador (El Salvador, 1986), Master Thesis, Bauhaus Universität Weimar & Earthquake Damage Analysis Center, Weimar, Alemania.

Lang, D.H. & J. Schwarz [2006] Instrumental subsoil classification of Californian strong motion sites based on single-station measurements. 8 U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco, United States, 2006

Linares, R. [1985] Microzonificación Sísmica de Área Metropolitana de San Salvador Basada en la Observación de Microtemblores, Espectros de Respuesta y Registros de Sismoscopios. Tesis para Optar al Grado de Ingeniero Civil, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, San Salvador, El Salvador.

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

Mojica, J.A. y Sanchez, E.I., [1984]. Estudio de Espectros de Respuesta para el Área Metropolitana de San Salvador como base para una Microzonificación Sísmica. Tesis para Optar al Grado de Ingeniero Civil, Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”, San Salvador, El Salvador.

Moreno, L. y A. Alfaro [2000] De los microsismos a los microtemblores, investigaciones en el instituto Geofísica, VIII Congreso Colombiano de Geotecnia 2000 – Sociedad Colombiana de Geotecnia, Colombia.

Nakamura Y. [1989] A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Surface using Microtremors on the Ground Surface. Vol. 30, No.1.

NORSAR [2008], Earthquake Risk Reduction in Guatemala, El Salvador, and Nicaragua with regional cooperation to Honduras, Costa Rica, and Panama, Task 6: : Microzonation in San Salvador, Norway.

Ordoñez, Gustavo [2008] “SHAKE2000, A Computer Program for the 1-D Analysis of Geotechnical Earthquake Engineering Problems”,

Reyes, J.C, Sorto, M.J. [2007] Evaluación de Microsismos en la Ciudad de Santa Tecla. Tesis para Optar al Grado de Ingeniero Civil, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, San Salvador, El Salvador.

Rodriguez-Marek, A., Bray, J., Abrahamson, N [2000], A Geotechnical Seismic Site Response Evaluation Procedure, New Zealand Society for Earthquake Engineering, Twelfth World Conference on Earthquake Engineering (12th WCEE), Auckland, New Zealand.

Rosales, C. [2001] Sobre el Comportamiento Sísmico de los Depósitos de Suelos del Área de Cañaveralejo, Cali, Colombia. Tesis presentadas para optar al título de Ingeniería Civil en la Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colombia.

Salazar W., Sardina V., De Cortina J. [2007], A Hybrid Inversion Technique for the Evaluation of Source, Path, and Site Effects Employing S-Wave Spectra for Subduction and Upper-Crustal Earthquakes in El Salvador

Schmidt, R. [2005], Reporte técnico de Amenaza sísmica relativa del Area Metropolitana de San Salvador (AMSS), Proyecto de Mitigación de Georiesgos en Centroamérica, Cooperación Técnica Alemana con Centroamérica, San Salvador, El Salvador

Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Dirección General del Observatorio Ambiental
Servicio Geológico Nacional

Schmidt-Thomé, M. [1975], “The geology in the San Salvador area (El Salvador, Central America): a basis for city development and planning”, *Geologisches Jahrbuch*, **13**, 207-228, Hannover, Alemania

Schnabel, Per B.; Lysmer, John; Seed, H. Bolton [1972] “SHAKE: a Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites”, *Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, California, Report No. EERC-72-12*, December 1972

Shearer, P.M., Orcutt, J.A. [1987], “Surface and Near-Surface Effects on Seismic Waves - Theory and Borehole Seismometer Results”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 77, No. 4, pp. 1168-1196

Steidl, J.H., Tumarkin, A.G., Archuleta, R.J. [1996], “What Is a Reference Site?” *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 86, No. 6, pp. 1733-1748, December 1996

SNET1 Parámetros Sísmicos: Otros factores que identifican un Terremoto, Documentos Técnicos, Fenómenos Geofísicos, <http://atlas.snet.gob.sv/atlas/?q=node/189>