RIESGOS URBANOS
(3)

Este libro contiene los materiales más relevantes del tercer curso sobre Riesgos Urbanos "USO DEL SUELO Y RIESGO SÍSMICO", realizado en San Salvador del 6 al 13 de abril de 2005, que organizaron el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) y el Departamento de Organización del Espacio (DOE).

Contando con el apoyo financiero y técnico del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

© DOE-UCA

Edición: Alicia Tenze - Lizeth Rodriguez

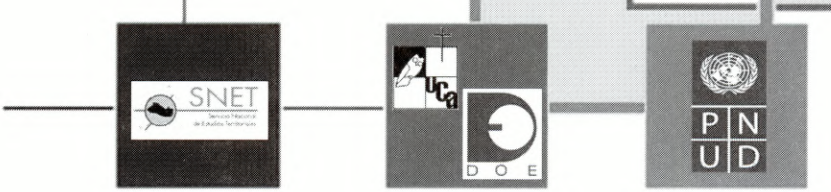
Portada: Lizeth Rodriguez

riesgos urbanos

WALTER SALAZAR - VICTOR SARDIÑA - KAZUOH SEO

Departamento de Organización del Espacio-/ UCA

Alicia Tenze – Lizeth Rodriguez
editoras



Índice

Presentación 7

Prologo 9

Hacia una micro-zonificación sísmica para San Salvador y otras ciudades en El Salvador 13

Walter Salazar

1. Introducción 13
2. Fenómeno de amplificación sísmica. 14
3. Estudios de Micro-zonificación para el Área Metropolitana de San Salvador. 16
4. Trabajo futuro y gestión técnico-política de la micro-zonificación sísmica. 19
5. Referencias Bibliográficas 23

La zonificación sísmica, el problema de escala, y la clasificación de las condiciones de sitio utilizando patrones de amplificación espectral para cocientes H/V de micro-temblores 25

Víctor Sardiña

1. Introducción 25
2. Importancia de los Efectos de sitio en Ingeniería Sísmica 30
3. La Zonificación y la Micro-zonificación Sísmica como una Tarea de Mapeo 33
4. Repercusión Práctica del Problema de Escala 35
5. Cómo fijar una Escala de Mapeo y su Importancia para la Mitigación de Desastres. 38
6. Panorámica general de los Métodos de Zonificación Sísmica 44
7. Resultados obtenidos de la aplicación de algunos Métodos de Zonificación Sísmica 48
8. Método para la Clasificación de las Condiciones de Sitio utilizando Patrones de Amplificación Espectral para Cocientes H/VM de Micro-temblores 53
9. Referencias Bibliográficas 58

Lo que debemos aprender a través de experiencias pasadas en los desastres por terremotos y otros desastres naturales 59

Kazuoh Seo

1. Confusión y orden en la sociedad durante los desastres por terremotos – desde el terremoto de Kanto de 1923 hasta el terremoto de Kobe de 1995, y....? 59

1.1 Introducción 59
1.2 La experiencia del terremoto de Kanto de 1923. 61
1.3 La experiencia del terremoto de Fukui de 1948 62
1.4 La experiencia del terremoto de Niigata de 1964 63
1.5 Observaciones en base a estas experiencias 63
1.6 La experiencia del terremoto de Kobe de 1995 64
1.7 El terremoto de Niigata de 2004. 66
1.8 El terremoto de Fukuoka-oki de 2005. 66
1.9 Comentarios adicionales en base a las experiencias de terremotos recientes. 67

2. Ingeniería estructural y aspectos de micro-zonificación sísmica relacionados con terremotos devastadores en el mundo. 69
2.1 Introducción 69
2.2 El terremoto de Michoacán, México de 1985 69
2.3 Los terremotos de Loma Prieta de 1989 y Northridge de 1994 en California 71
2.4 El terremoto de Chi-Chi en Taiwán de 12.5 El terremoto de Kocaeli en Turquía de 1999. 72
2.5 El terremoto de Kocaeli en Turquía de 1999. 72
2.6 Ejemplo de un edificio con estructura vulnerable 73
2.7 Actividades de investigación sobre Ingeniería Sísmica en Armenia 74
2.8 Los terremotos de El Salvador en 2001 74

3. Aspectos de ingeniería concernientes a la mitigación del desastre por terremoto 76
3.1 Una revisión de cómo preparar movimientos del terreno para sitios específicos 76
3.2 Lecciones aprendidas sobre movimientos sísmicos observados y exploraciones sísmicas. 78
3.2 Movimientos de largo período recientemente observados en sitios de sedimentos. 80
3.3 Prospectos (Alternativas/Perspectivas) para la predicción del movimiento fuerte del terreno. 81

Autores 83

Presentación

EL SIGUIENTE libro es el tercero de una serie iniciada por el Departamento de Organización del Espacio (DOE) de la UCA en 2004, con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), sobre el tema de los riesgos urbanos. En él se recogen los trabajos de tres profesores del curso profesional que bajo ese nombre organizó el DOE en 2005 y que abordó el tema del riesgo sísmico.

Por su tema, el libro tiene una obvia relevancia para El Salvador y otros países que como el nuestro se encuentran en una zona de gran actividad tectónica. Por ello hay un énfasis especial en los subsiguientes artículos por apuntar hacia la necesidad de mayor rigor científico y tecnológico para estudiar el riesgo sísmico a través de estudios de microzonificación, en los que la UCA ya está comprometida. De igual forma se comenta como esta base científica se ha ido construyendo paulatinamente, en otros países de condiciones similares a las salvadoreñas, por la amenaza constante de terremotos, que han permitido a científicos, diseñadores e ingenieros, construir un saber hacer a través de una búsqueda constante.

Por lo tanto el lector encontrará una base técnica importante para comprender este tipo de riesgos y propuestas de posibles técnicas que como sociedad debemos retomar para poder gestionar efectivamente el riesgo sísmico. Esperamos entonces con esta publicación contribuir a que el tema sea parte de una agenda nacional de investigación y sentar con ello las bases para promover un cada vez más riguroso estudio de nuestras particulares condiciones geológicas y sísmicas. Quedará esto como un reto más para instituciones del Estado, universidades y profesionales vinculados al diseño y construcción de edificaciones e infraestructura.

Finalmente, además de los objetivos académicos, científicos y de difusión que este libro persigue, hemos considerado igualmente apropiado dedicarlo a la memoria del padre Jon de Cortina, profesor del curso que dio origen a esta publicación, catedrático de la UCA e incansable promotor de múltiples y desafiantes causas, entre las que destaca el estudio de los fenómenos sísmicos en El Salvador.

Carlos E. Ferrufino
Jefe del Departamento de
Organización del Espacio /UCA

Prologo

EL III CURSO de Riesgos Urbanos en el año 2005 fue una iniciativa del Arq. Mario Lungo (Q.D.D.G), como la continuación de otros dos Cursos previos en el área de Riesgos que han tenido un gran éxito en la comunidad salvadoreña, a través del apoyo económico de las Naciones Unidas. En Diciembre de 2004 el Arq. Mario Lungo solicitó que mi persona organizara este III Curso enfocado a la Microzonificación e Ingeniería Sísmica en El Salvador, con el apoyo del Departamento de Organización del Espacio y el Departamento de Mecánica Estructural de la "Universidad Centroamericana José Simeón Cañas" (UCA). Fue así como se emprendió la tarea de organizarlo.

El punto más crítico de la organización consistía en quien podía recapitular la Ingeniería Sísmica en El Salvador, tanto técnicamente como socialmente, e iniciar el curso con una charla magistral de nuestra realidad ingenieril salvadoreña. La tarea fue encomendada al Dr. Jon de Cortina, S.J. (Q.D.D.G) a quien dedicamos con honor este libro.

Hablar del Dr. Cortina puede resumirse en dos palabras: humildad y entrega tanto en el ámbito social como en el ámbito técnico científico. Es ya muy bien conocida su labor de Pro-Búsqueda ayudando a padres de familia a encontrar a sus hijos desaparecidos durante el conflicto armado, y el pragmatismo de acompañar y escuchar a la gente en las distintas comunidades que tuvo a su cargo en San Salvador y Chalatenango, especialmente en Guarjila; por lo que la revista Vértice de la UCA lo llama "el Cura de las Comunidades". El solía decir: "Lo más importante es acompañar a la gente. Nunca podremos hablar si no estamos con ellos. Y una vez con ellos nuestro trabajo tiene que ser dar esperanza, aliento". Cuando lo recuerdo, pienso en el ejemplo que todos los ingenieros de El Salvador debemos seguir, ya que el siempre se entregaba en un cien por ciento en todo ámbito en el que decidía trabajar. El Padre Cortina, como le llamábamos aquí en la UCA, fue el fundador de la carrera de Ingeniería Civil en la Universidad, con la particularidad de que los ingenieros que se formasen en ella, fueran los que más supieran en el país de Ingeniería Sísmica y Estructural. Durante años, los profesionales graduados de la UCA se han caracterizado por el conocimiento en esta área de estudio, lo que nos distingue grandemente del resto de profesionales. Obviamente, por ser un país en donde ocurren terremotos destructores frecuentemente, el estudio de estas áreas del conocimiento se hace vital para mitigar el riesgo sísmico en la región. Su visión de formar profesionales especializados en el área sísmica, es algo que sigue en pie y que sigue dando frutos a corto y largo plazo.

En el año de 1975, el Padre Cortina organizó el Seminario de Ingeniería Sísmica que se llevó a cabo en la UCA. Este seminario ha sido el más importante que ha habido hasta las fechas en América Latina, concurriendo a dicho seminario científicos de Europa y Estados Unidos, incluso Profesores reconocidos del Japón, poniendo de manifiesto el estado del arte en la investigación y la docencia. Este seminario fue el punto de partida para alcanzar el objetivo de la formación de profesionales capacitados en esta área. Desde esas fechas, con gran entusiasmo y entrega apoyó la instalación de una red digital acelerográfica para medir movimientos fuertes de terremotos en El Salvador, que hasta ahora cuenta con más de 500 registros, que representan a la fecha una base de datos de primera calidad a nivel Latinoamericano. Así mismo, apoyó la publicación del Catalogo Sísmico para El Salvador 1898-2001, un trabajo de una década, el cual fue impreso bajo la responsabilidad de la UCA. Tanto los Registros Acelerográficos de movimiento fuerte como el Catálogo Sísmico, constituyen la base primaria de la futura ingeniería sísmica del país, como bien lo había pensado y planificado.

Aunque conocí al Padre Cortina en el año 1991, y trabaje con el en varias actividades de la UCA, fue hasta el año 2003 que tuve la oportunidad de conocer al Padre Cortina muy de cerca. Mi persona vino en ese año a El Salvador desde el Japón. El motivo de mi visita era proporcionar una capacitación a profesionales salvadoreños en el procesamiento de señales digitales de terremotos. Debido a un accidente en mí rodilla, en lugar de permanecer quince días en el país, mi estadía se prolongo tres meses. Recuerdo muy bien las palabras del Padre: "Ya que estarás tres meses por aquí, quisiera aprender de ti lo más que pueda, por favor reunámonos todos los días tres horas diarias para estudiar en detalle la Ingeniería Sísmica". Y así fue, durante tres meses y tres horas diarias el Padre Jon sin faltar llegó a mi casa; la verdad es que fue un gran reto porque me lo estaba diciendo mi antiguo profesor y un científico reconocido a nivel internacional, con reconocimientos en la Comisión Atómica del Canadá y la NASA, debido a su brillante tesis Doctoral sobre conexiones empernadas en acero estructural, la cual fue galardonada como la mejor tesis de España en el año de su culminación. En esos tres meses de continuo estudio, aprendí de El una de sus más relevantes características: la humildad. A pesar de tener muchísima más experiencia y conocimiento que yo, El se sentaba a escuchar palabra por palabra de lo que solía explicarle. La verdad es que terminé aprendiendo de El, ya que en todas las ocasiones sus preguntas eran de un gran nivel. En esos cortos tres meses la entrega del Padre Jon fue evidente hacia los temas científicos, no dejando nada a medias, así como se entregó a fundar la carrera de Ingeniería Civil, apoyar a todo el personal del Departamento de Mecánica Estructural de la UCA para realizar los estudios de Postgrado, y a fomentar la investigación mediante proyectos con instituciones extranjeras. La visión que el tenía sobre la Ingeniería Sísmica era muy clara: "El estudio del movimiento fuerte originado por terremotos, la respuesta de

los suelos y las estructuras en el dominio de la frecuencia es la clave para el futuro de los ingenieros civiles en El Salvador". Fue así como El empezó a escribir sobre las series de Fourier, y dejó en borrador gran parte de la Transformada de Fourier, que era parte de su famosa cátedra de Análisis Dinámico de Estructuras en la UCA. Lo que puedo decir de estos escritos es que el Padre Cortina ha logrado explicar todos los conceptos desde el "número natural" y no como en otros libros dogmáticos que enfocan el tema comercialmente. Estos escritos serán utilizados por todas las generaciones en los Postgrados de Ingeniería Sísmica que la UCA ofrecerá en años venideros. También ha dejado escritos de Análisis Estructural Avanzado y Dinámica de Estructuras.

El sueño del Dr. Jon Cortina, era realizar estudios de Micro Zonificación Sísmica en San Salvador y otras ciudades importantes en el país. Aunque El no está ahora para verlo, pero puedo decir claramente que estos estudios ya son una realidad gracias a todo el esfuerzo y entrega que El nos dio, para el beneficio de todo El Salvador. Ahora se cuenta con instrumentación especializada que dará lugar a que estos estudios de Ingeniería Sísmica en El Salvador tengan un carácter relevante, y más aún, que sean utilizados por los actuales y futuros ingenieros salvadoreños, y así poder mitigar el efecto dañino de los sismos en nuestro país.

Walter Salazar
Coordinador de la
Carrera de Ingeniería Civil /UCA.

Hacia una micro-zonificación sísmica para San Salvador y otras ciudades en El Salvador

Walter Salazar

1. Introducción

EL CONCEPTO de micro-zonificación sísmica en El Salvador no es nada nuevo. Desde la década de los ochenta, se han hecho muchos intentos de proponer una micro-zonificación para San Salvador, desde estudios nacionales con carácter académico hasta propuestas concretas de amenaza sísmica por parte de consultoras extranjeras. La micro-zonificación sísmica es un mapa que refleja los distintos niveles de amenaza que desencadena el movimiento fuerte del terreno durante un terremoto. Esta amenaza puede ser la amplificación del movimiento sísmico que ocurre por la presencia de sedimentos por encima del estrato rocoso, o bien, el potencial de deslizamientos de tierra. Por tanto, por cada amenaza presente, debe realizarse un mapa de micro-zonificación. En este artículo, se hace énfasis en la amplificación del movimiento sísmico como detonante principal del colapso de las edificaciones. En primer lugar, se presentan conceptos fundamentales sobre el fenómeno de la amplificación y la resonancia. En segundo lugar, se citan los estudios más relevantes sobre la amplificación del movimiento sísmico en el área de San Salvador y las cargas sísmicas asociadas para el diseño de estructuras. En tercer lugar se ponen de manifiesto los trabajos de investigación pendientes de realizar para concluir una micro-zonificación adecuada a las necesidades y los recursos económicos para la práctica del diseño sismorresistente en nuestro país. Finalmente, se concluye con aspectos sobre la gestión técnico-política de una futura micro-zonificación sísmica para San Salvador y ciudades importantes en nuestro país.

2. Fenómeno de amplificación sísmica.

Todo movimiento sísmico sobre la superficie terrestre es el producto de tres factores: a) La fuente sísmica, b) el trayecto y c) el efecto de sitio (Figura 1).
La fuente sísmica esta asociada con la ruptura de una falla geológica, en donde se generan esfuerzos de corte en un volumen de roca liberándose una gran cantidad de energía en formas de ondas elásticas. Estas ondas viajan a través de la corteza terrestre, ocurriendo en su trayecto la atenuación, debido a la geometría de propagación y la absorción intrínseca de energía del material que atraviesan las ondas. Por tanto, el nivel de sacudida es mayor cerca de la fuente, que a una distancia considerable de ésta (por ejemplo 30kms). Estas ondas sísmicas llegan a un lecho rocoso que bien se encuentra sobre la superficie terrestre, o bien por debajo de un paquete de sedimentos; en este último caso las ondas sísmicas pasan instantáneamente de este lecho rocoso a los sedimentos, generándose un efecto de sitio conocido como fenómeno de amplificación. Este fenómeno ocurre primariamente por la diferencia de densidad entre la roca y el sedimento inmediato por encima de ella, y secundariamente, por el espesor del suelo medido desde el estrato rocoso hasta la superficie libre. Por tantó, el movimiento sísmico será mucho mayor sobre la superficie libre que sobre la roca (Figura 1).

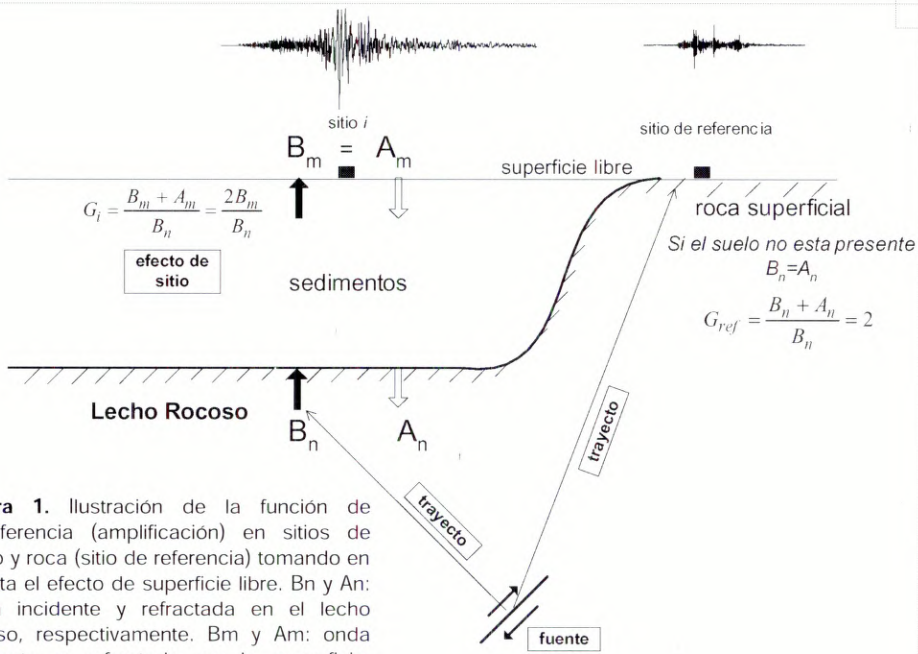


Figura 1. Ilustración de la función de transferencia (amplificación) en sitios de suelo y roca (sitio de referencia) tomando en cuenta el efecto de superficie libre. Bn y An: onda incidente y refractada en el lecho rocoso, respectivamente. Bm y Am: onda incidente y refractada en la superficie, respectivamente.

Un punto esencial es qué se entiende por "roca" o "lecho rocoso". Por lo general, en ingeniería se utiliza la velocidad de propagación de ondas de corte VS como un parámetro para definirla. En San Salvador, el estudio de Faccioli et al. (1989) sugiere una velocidad VS de 2,100 m/s.

En varias partes del mundo la presencia de los sedimentos ha estado asociada con el nivel de daño en las edificaciones. Por ejemplo, el estudio de Salazar y Seo (2003) muestra la distribución de daños para los terremotos destructores del 13 de Enero y el 13 de Febrero de 2001, sugiriendo que los mayores daños ocurrieron en la zona de sedimentos más jóvenes a lo largo de El Salvador (Figura 2). Por tanto, el nivel de daños esta íntimamente relacionado con la amplificación para una región en particular. Es de esperarse que las edificaciones construidas sobre roca sufran menores daños que las construidas sobre estratos de suelo con espesores considerables, si ambos sitios se encontraran a una distancia similar de la fuente sísmica.

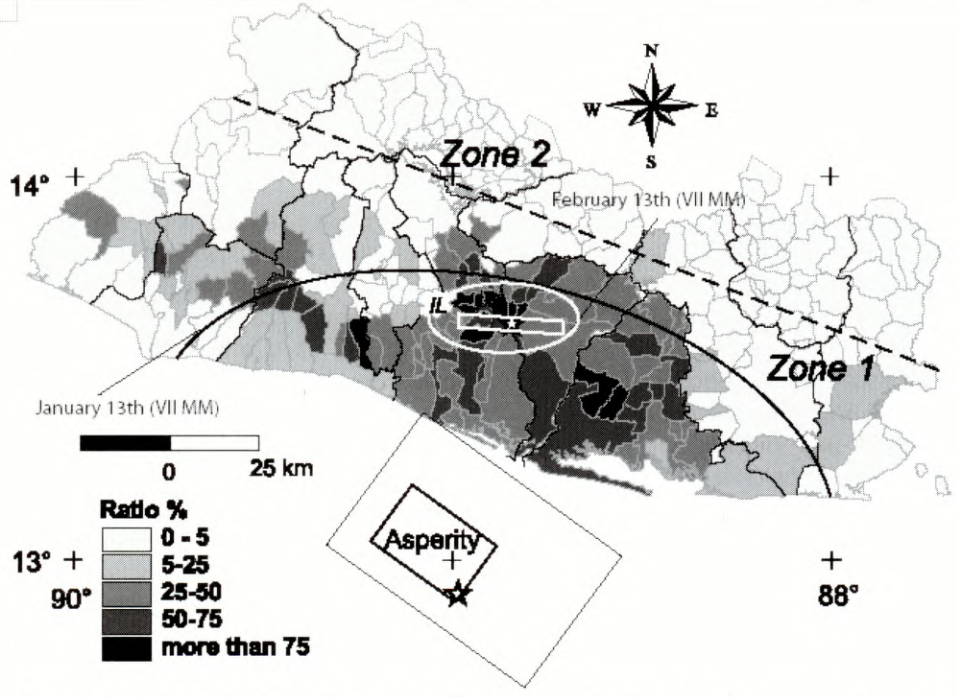


Figura 2. Razón de daños (casas colapsadas/total de casas) causadas por los eventos del 13 de Enero y 13 de Febrero de 2001. Base de datos del DIGESTYC (2001). Los soluciones de los epicentros y los mapas de isosistas de intensidad VII MM basados en CIG (2001). Las proyecciones de las rupturas de la falla en la superficie tomadas de JSCE (2001). La Zona 1 es considerada con mayor peligrosidad sísmica que la Zona 2 en el código sísmico de El Salvador. *IL: Lago de Ilopango.*

El período fundamental de vibración TS (en s) de una capa de suelo con espesor H y velocidad de ondas de corte VS, puede definirse como TS=4H/VS. El período TE (en s) de un edificio de marcos de concreto armado de n pisos puede calcularse inicialmente como TE=0.1n. Si se produce un terremoto y el edificio está situado por encima de una capa de sedimentos con período TS, y éste coincide con el período de vibración del edificio TE, se da el fenómeno de la resonancia, esto significa que, el edificio sufriría grandes desplazamientos que pueden hacer colapsar la estructura. Si por ejemplo, el espesor de la Tierra Blanca en una zona de San Salvador se estima de 30m, con una velocidad de ondas de corte de 240m/s, entonces el período de vibración TS de esa capa de suelo sería de 0.5s. La pregunta inmediata a responder sería qué tipo de edificaciones experimentarían el fenómeno de la resonancia si se construyeran en esta localización. Utilizando la fórmula para calcular el período TE, el número de pisos de un edificio con período de 0.5s es de cinco. Por lo tanto, sería recomendable construir edificaciones con una altura menor, o con una altura mucho mayor a los 5 pisos para evitar el colapso de las estructuras en esta zona ante una sacudida fuerte.

3. Estudios de Micro-zonificación para el Área Metropolitana de San Salvador.

El primer estudio de micro-zonificación en términos de amplificación puede adjudicarse a la Misión Geológica Alemana (Schmidt-Thomé, 1975). Este estudio fue realizado para proporcionar lineamientos de planificación urbana en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS). El mapa de micro-zonificación proporciona los distintos espesores de Tierra Blanca en el AMSS. Ya que la Tierra Blanca fue depositada por el Lago de Ilopango hace miles de años (Aguilar, 2003), la zona Este del AMSS posee espesores mayores de 90m de este sedimento, donde se esperaría una amplificación considerable. Al Oeste de San Salvador puede encontrarse roca en la superficie.

El segundo estudio de micro-zonificación fue realizado por la Misión Geológica Italiana (Faccioli et al., 1989) a raíz del terremoto destructor del 10 de Octubre de 1986 en San Salvador. Este estudio pone de manifiesto la existencia de lava intercalada (VS=2100 m/s) entre la Tierra Blanca (VS=250 m/s) y las Tobas (VS=500 m/s). Salazar y Seo (2002) sugieren que esta intercalación de estos materiales rígidos y flexibles (Figura 3) genera que el segundo modo de vibración sea el modo predominante en la función de amplificación, o en otras ocasiones, todos los modos tengan el mismo nivel de amplificación. Esto induce a que las estructuras de mediano período (entre 0.3 y 0.7s) tengan mayor demanda sísmica y por ende puedan colapsar durante una sacudida fuerte (Salazar, 2003a).

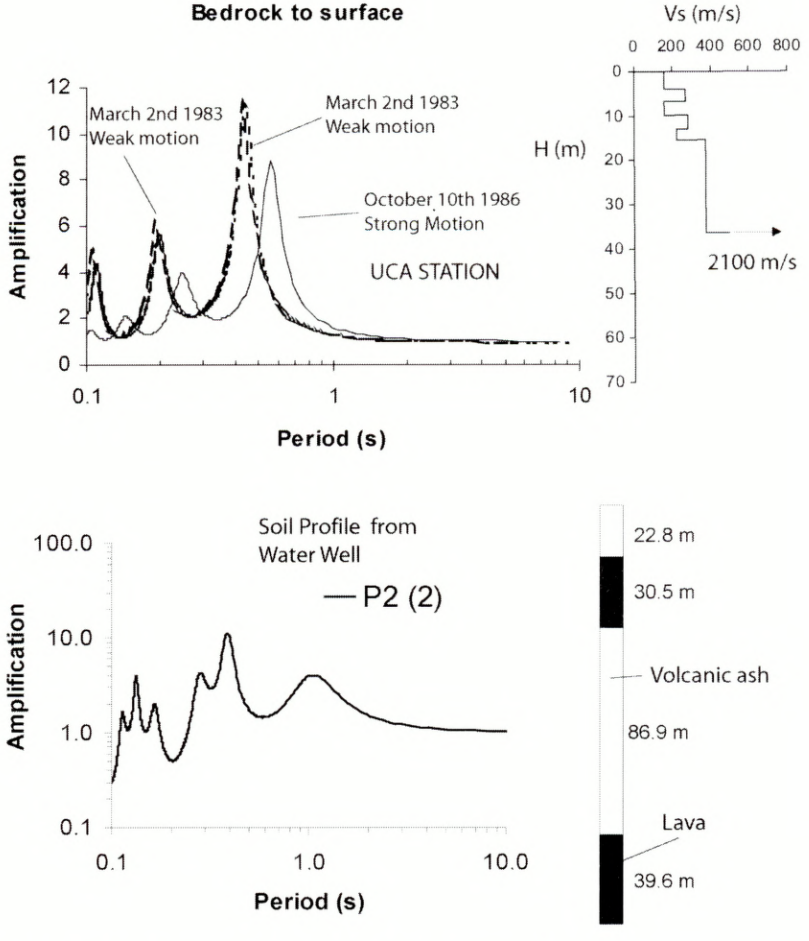


Figura 3. Factores de amplificación utilizado un modelo 1D de propagación de ondas SH. Arriba: Estación UCA en San Salvador considerando el efecto no -lineal en el comportamiento del suelo utilizando datos de "down-hole". Abajo: perfil de suelo con más de 100 m de profundidad. Los datos del suelo son tomados del estudios de Faccioli et al. (1989). La estación UCA está localizada en la Zona 1B y el perfil de suelo P2 esta localizado en la Zona 2 de la Figura 4.

El mapa que presenta el estudio Italiano es dividido en tres zonas de acuerdo al espesor acumulado de lava que se encuentra en los primeros 100m de profundidad (Figura 4). Estas zonas fueron propuestas en base a perfiles de suelo obtenidos de pozos de agua realizados por la Asociación Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA), pruebas Standard Penetración Test (SPT), pruebas

down-hole para proporcionar las características dinámicas del suelo (velocidad de ondas de corte y amortiguamiento) y registros acelerográficos del terremoto del 10 de Octubre de 1986. También se utilizó la distribución de daños en edificaciones producidas por este sismo. Una característica de este estudio es que presenta por cada zona presente un espectro de respuesta a ser utilizado para el diseño de estructuras en San Salvador. Desgraciadamente, este estudio no ha sido tomado en cuenta para la demanda sísmica en los códigos de diseño en nuestro país.

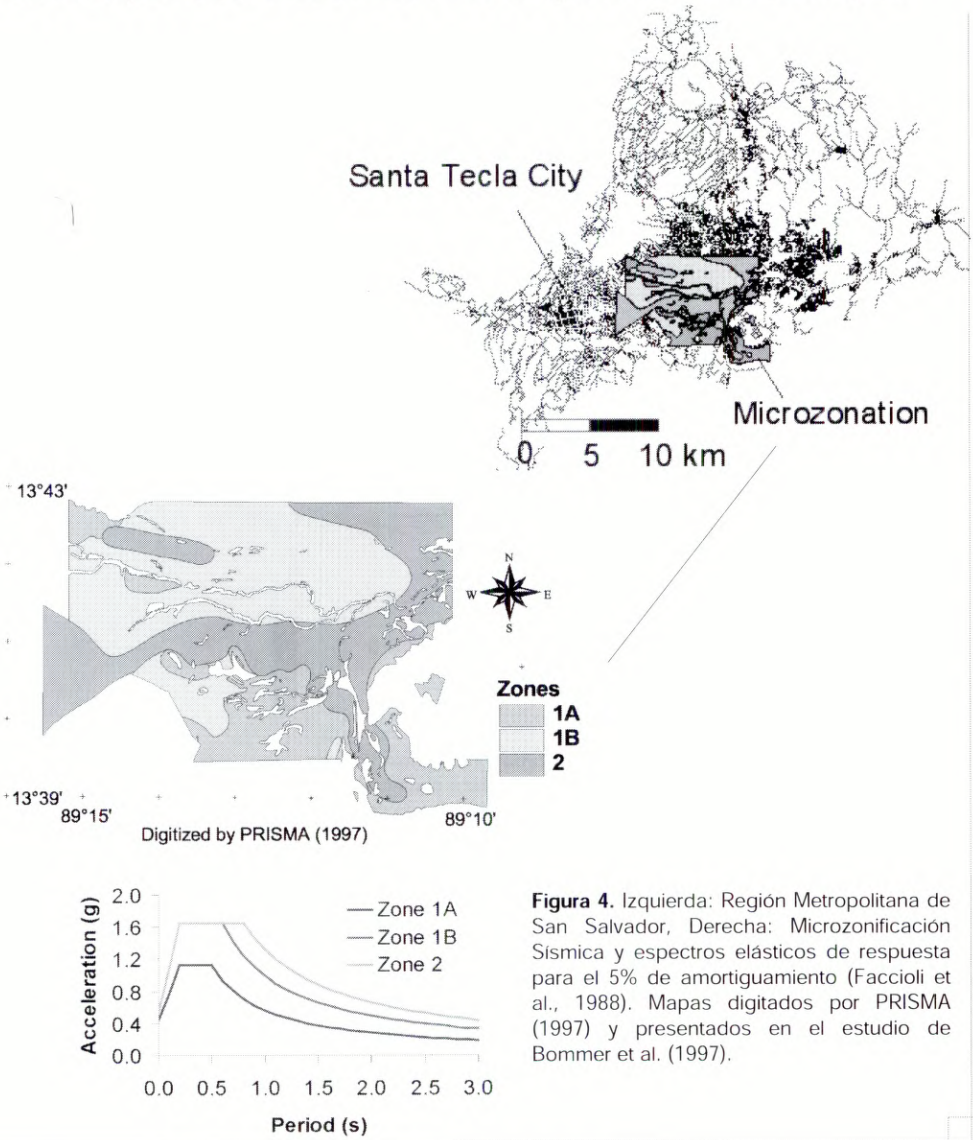


Figura 4. Izquierda: Región Metropolitana de San Salvador, Derecha: Microzonificación Sísmica y espectros elásticos de respuesta para el 5% de amortiguamiento (Faccioli et al., 1988). Mapas digitados por PRISMA (1997) y presentados en el estudio de Bommer et al. (1997).

4. Trabajo futuro y gestión técnico-política de la micro-zonificación sísmica.

Puede asegurarse que la elaboración de una microzonificación para la nueva y extendida Región Metropolitana de San Salvador (RMSS), es un trabajo que debe realizarse con carácter urgente, debido a las condiciones de actividad sísmica de nuestro país. Se proponen los siguientes pasos de investigación fundamentales para iniciar la micro-zonificación sísmica en San Salvador y otras ciudades importantes en El Salvador:

a) Ordenamiento de los registros acelerográficos de las instituciones gubernamentales y privadas. La Universidad Centroamericana José Simeón Cañas (UCA), El Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET), y Geotérmica Salvadoreña (LAGEO), mantienen redes de instrumentos para registro de movimientos fuertes. Se debe realizar un esfuerzo por generar y divulgar anualmente una base de datos actualizada de los registros acelerográficos obtenidos. Estos registros representan la materia prima para obtener efectos de sitio (amplificación) para cada sitio en donde se encuentran instalados los instrumentos.

b) Realización de mediciones de micro-trepidación. Se ha gestionado un proyecto de cooperación entre la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), la UCA, el SNET y el Instituto Tecnológico de Tokio para adquirir equipo para medir micro-trepidaciones[1]. El objetivo primordial de la primera fase de este proyecto es realizar las mediciones de micro-trepidación en las estaciones acelerográficas citadas en el literal (a). De esta manera se estudiará si hay una relación entre los terremotos y las micro-trepidaciones. Si existe esta relación, se debe extrapolar el efecto de sitio a lugares circundantes de las estaciones acelerográficas midiendo la micro-trepidación en lugares de interés.

c) Realización de pruebas *down-hole* para conocer las características dinámicas de los suelos (velocidad de ondas de corte y amortiguamiento), pruebas *SPT*, compilación de pozos de agua de ANDA que revelen la estratigrafía al menos a 100m de profundidad. Esta información corroboraría las funciones de amplificación obtenidas a través de los registros acelerográficos y las micro-trepidaciones.

---

[1] Micro-trepidación: micro movimiento en un punto determinado producido por el tráfico, maquinaria, actividad humana, etc. Se pretende estudiar el efecto de sitio (amplificación) mediante el estudio espectral de las señales obtenidas utilizando las tres componentes de movimiento, dos horizontales perpendiculares entre sí y una vertical.

d) Realización de mediciones de arreglos de micro-trepidación vertical. Estas pruebas se realizarán en el mismo marco del proyecto citado en (b). El objetivo de la micro-trepidación vertical es obtener la velocidad de ondas de corte a varios kilómetros de profundidad por un método de inversión, y así obtener las funciones de amplificación en sitios de interés.

e) Pruebas de refracción sísmica: estas pruebas se realizarán durante el mismo proyecto citado en (b). El objetivo de estos experimentos es obtener un perfil del suelo en detalle a pocos metros de profundidad. Esto complementa los perfiles de suelo obtenidos en (d).

f) Estudios de peligrosidad sísmica tomando en cuenta los efectos de sitio. Una vez conocido el efecto de sitio a través de los datos y métodos citados en los literales anteriores, es posible obtener espectros de diseño para sitios específicos, teniendo una evaluación de la sismicidad a través de un catálogo sísmico (Salazar, 2003b) y ecuaciones de atenuación para el movimiento fuerte a nivel de roca para terremotos de subducción y cadena volcánica (Salazar, 2004).

g) Recopilación de la distribución de daños debido a un sismo fuerte. Este es un aspecto sumamente importante, ya que dicha distribución se utiliza para validar una micro-zonificación cuando ocurre un terremoto destructor. Se esperaría que los mayores daños ocurran en la zona de mayor amplificación mostrada en el mapa.

El gran reto es utilizar las micro-trepidaciones como sustituto del movimiento sísmico. Idealmente, para micro-zonificar San Salvador, se tendrían que instalar acelerógrafos por cada kilómetro cuadrado, así como también obtener las características dinámicas del suelo por debajo del instrumento o en otros lugares. Ya que esto es económicamente imposible, debe iniciarse una investigación que permita utilizar las micro-trepidaciones como una herramienta para pronosticar el futuro movimiento del terreno durante un evento sísmico.
Posterior a la investigación es de vital importancia, asegurar que estos estudios tengan una incidencia en el futuro código sísmico de El Salvador. Actualmente, no existe micro-zonificación en las normativas sismorresistentes de nuestro país, ni mucho menos la demanda sísmica que estaría asociada a cada zona, a pesar de que el estudio de la Misión Italiana fue realizado con este propósito. El problema esencial radica en cómo realizar una gestión técnico-política para que estas futuras micro-zonificaciones sean incluidas en las reglamentaciones para el diseño sismorresistente. Automáticamente, un estudio de esta índole cambiaría el precio de la tierra y los inmuebles, afectando y beneficiando a muchos. Las primeras preguntas de un ciudadano serían: ¿En qué zona me encuentro viviendo o

trabajando? ¿Qué sucede si dicho mapa de micro-zonificación señala que mi familia vive en la zona de mayor amplificación en San Salvador? ¿Qué sucede con el valor de la casa que he comprado durante todos estos años? ¿Qué medidas tomarán las aseguradoras al saber que ellos cubren un seguro en la zona de mayor amenaza en la ciudad? ¿Que haría Ud. si la micro-zonificación sísmica revela que su edificio de 5 niveles no es capaz de resistir la demanda impuesta por un futuro terremoto debido al fenómeno de la resonancia?

Estas preguntas ponen de manifiesto que la tarea de mitigar el riesgo sísmico es multidisciplinaria. Tanto profesionales, ingenieros, arquitectos, científicos, economistas, como políticos, urbanizadores, empresas de seguros, etc., deben aportar sus conocimientos a la tarea de minimizar las consecuencias de un futuro terremoto en las ciudades importantes de El Salvador. Pero además de las preguntas antes citadas, existe otra que preocupa mucho más a los involucrados en esta tarea: ¿Por qué es necesaria una micro-zonificación en San Salvador si ya existen construcciones? Idealmente, un estudio de esta envergadura debe realizarse en una zona donde se vaya a construir y que sea parte esencial de la planificación urbana y del uso de suelo. A mi criterio, esta micro-zonificación señalaría qué edificaciones habría que reforzar para generar una capacidad estructural adecuada para resistir la demanda impuesta definida por la amplificación sísmica.

Otro punto importante es la vigilancia del código sísmico. ¿Qué institución vela por el cumplimiento de las normas de diseño sismorresistente en El Salvador? Una micro-zonificación debe estar plasmada en el futuro código sísmico, pero debe asegurarse que la demanda estructural por cada zona sea utilizada y respetada. De no ser así, este vacío crearía el incumplimiento indefinido de las normativas de construcción antisísmica, poniendo en peligro a la población, o en su defecto, generando costos innecesarios. Además, se induce a más desorden en el ámbito de la consultoría estructural en el país, ya que cada quién evaluaría las cargas de diseño arbitrariamente, muchas veces utilizando cargas sísmicas provenientes de códigos extranjeros. En el código sísmico salvadoreño actual, la evaluación de las cargas sísmicas (espectro de diseño) depende de la velocidad promedio de las ondas de corte (V_S) en los primeros 30m de profundidad, pero, ¿Qué empresa o que proyecto tiene en su presupuesto obtener las características dinámicas de los suelos hasta estas profundidades? Los estudios de suelo en el país se limitan a pruebas SPT para recomendar remoción o estabilización de suelos para efectos de diseño de cimentaciones, pero no para evaluar cargas sísmicas de diseño para toda la edificación, las cuales dependen de todo el espesor de suelo presente en el sitio de interés.

Por otro lado, el rol de las universidades en El Salvador es primordial para el desarrollo y formación de jóvenes expertos en el área de Ingeniería Sísmica. Actualmente la Universidad Centroamericana UCA, ofrece materias de carácter obligatorio y optativas técnicas de Ingeniería Sísmica, Ingeniería Estructural y Sismología que van de la mano con las investigaciones actuales en el Laboratorio de Estructuras Grandes (LEG) situado en el Campo Universitario, y el futuro proyecto de micro-zonificación que se realizará con instituciones gubernamentales y el gobierno de Japón.

5. Referencias Bibliográficas

Aguilar, C. (2003) Formulación del plan de desarrollo territorial de la subregión de La Libertad. Estudio Geológico León Sol Arquitectos Consultores, S.A. de C.V.

Bommer., J., W. Salazar & R. Samayoa (1997) Riesgo sísmico en la Región Metropolitana de San Salvador. Report prepared for USAID, PRISMA (Programa Salvadoreño de Investigación sobre el Medio Ambiente), San Salvador, 128 pp.

CIG (2001) Centro de Investigaciones Geotécnicas, Ministerio de Obras Públicas, El Salvador. http://www.snet.gob.sv/

DIGESTYC (2001) Censo de Viviendas afectadas por la actividad sísmica del 2001. Dirección General de Estadísticas y Censos, El Salvador. Ministerio de Economía.

Faccioli, E., C. Battistella, P. Alemani & Tibaldi (1988) Seismic microzoning investigations in the Metropolitan area of San Salvador, following the destructive earthquake of October 10, 1986. Proceedings, Int. Seminar on Earthquake Engineering, Universitat Innsbruck, Austria, 28-65.

JSCE (2001) The 13 January 2001 off the coast of El Salvador earthquake. Investigation of damage to civil engineering structures, buildings and dwellings. Japan Society of Civil Engineers.

PRISMA (1997) Perfil ambiental de la Región Metropolitana de San Salvador. Sponsored by USAID, San Salvador, El Salvador. Programa Salvadoreño de Investigación sobre Desarrollo y Medio Ambiente.

Salazar, W. & K. Seo (2002) Spectral amplification characteristics in San Salvador City (El Salvador) for upper-crustal and subduction earthquakes. The 11th Japan Earthquake Engineering Symposium (JAEE) P065, pp. 329-334.

Salazar, W. (2003a) Seismology and Earthquake Engineering in El Salvador. IASPEI Handbook of Earthquakes and Engineering Seismology. National Reports, Volume B, Chapter 79.19, 33 pp.. Ed. William Lee, H. Kanamori P. Jennings and K. Kissingler.

Salazar, W. (2003b) Seismic catalogue for El Salvador 1898-2001. UCA Editores, Colección Estructuras y Procesos, Serie Mayor Vol. 21 ISBN 99923-34-44-4.

Salazar, W. & K. Seo (2003) Earthquake disasters of 13 January and 13 February 2001, El Salvador. Seismological Research Letters, Vol.74, No. 4., pp.420-439.

Salazar, W. (2004) Evaluation of source, path and site effects on earthquake ground motions using an inversion technique for subduction and upper-crustal earthquakes in El Salvador, Central America. Doctoral Thesis. Tokyo Institute of Technology, Japan.

Schmidt-Thomé, M. (1975) The geology in the San Salvador area (El Salvador, Central America): a basis for city development and planning. Geologisches Jarbuch, 13, pp. 207-228.

Agradecimientos

El autor agradece al Doctor Jon de Cortina (Q.D.D.G.) por haber fundado la carrera de Ingeniería Civil en la UCA y dar apoyo a muchas personas para continuar los estudios en el campo de la Ingeniería Sísmica. A través de él fue posible formular proyectos de investigación que han permitido que el personal de la UCA haya sido capacitado en este campo. Así mismo agradezco al Arq. Mario Lungo (Q.D.D.G) por haberme apoyado en mis estudios de Postgrado, conjuntamente con el Doctor Jon de Cortina. Así mismo se agradece la visita y el tiempo invertido por el Dr. Kazuoh Seo del Instituto Tecnológico de Tokio y el Dr. Víctor Sardiña del Centro de Alerta de Tsunamis en Hawai; gracias por su excelente colaboración con sus ponencias y escritos para este III Curso de Riesgos Urbanos. Finalmente agradezco al Arq. Ricardo Ramos y al Arq. Herbert Granillo del Depto. de Organización del Espacio de la UCA por su trabajo en equipo para coordinar este valioso curso.

La zonificación sísmica, el problema de escala, y la clasificación de las condiciones de sitio utilizando patrones de amplificación espectral para cocientes H/V de micro-temblores

Víctor Sardiña

1. Introducción

EN EL curso de las últimas décadas, se ha incrementado dramáticamente la construcción de estructuras con una marcada tendencia a comportarse de forma extremadamente compleja durante la ocurrencia de eventos sísmicos. Rascacielos, puentes gigantes de arquitectura variada, complejos químicos, refinerías de petróleo y plantas electro-nucleares son ejemplos de dichas estructuras, las cuales comparten dos importantes características: a) una significativa importancia económico-social y b) la seria amenaza a la sociedad que constituye la posibilidad de su colapso debido a un terremoto. La complejidad estructural inherente a estas estructuras, combinada con su aparente vulnerabilidad sísmica, constituye un creciente reto para la especialidad encargada de minimizar los desastres causados por terremotos, o sea, la ingeniería sísmica. El riesgo sísmico derivado de la ocurrencia de terremotos se asocia a la intensidad del movimiento oscilatorio del terreno, los deslizamientos de tierra, y la licuación y el asentamiento diferencial de los suelos no consolidados; tres fenómenos por lo general causantes de la mayor parte de los daños. En las condiciones actuales, los ingenieros sísmicos deberán esforzarse más que nunca a la hora de concebir métodos cuya aplicación conduzca a una reducción efectiva tanto de los daños estructurales, como de las pérdidas económicas y de vidas humanas.

En países frecuentemente afectados por la ocurrencia de terremotos como Japón y EE.UU., se destina una gran cantidad recursos y esfuerzos a la reducción de la vulnerabilidad sísmica. Para proteger tanto las estructuras como la población, los códigos de construcción deben incluir los resultados de la evaluación del riesgo sísmico en forma de regulaciones cuya aplicación garantice la reducción de la vulnerabilidad sísmica. En países con una alta incidencia de terremotos los códigos de construcción aseguran el acatamiento de éste requisito imponiendo la ejecución combinada de investigaciones de ingeniería sísmica detallada y la ejecución de diseños antisísmicos apropiados como una parte integral e ineludible de los planes de urbanización. Aunque especialidades estrechamente relacionadas, los ingenieros sísmicos proporcionan estimaciones de la intensidad de las vibraciones o carga sísmica a los especialistas en diseño antisísmico, quienes las utilizan posteriormente para calcular la respuesta de las estructuras y mejorar su diseño.

La estimación de la respuesta dinámica de las estructuras, aunque es un proceso extremadamente complejo, ha alcanzado un gran nivel de precisión gracias a la posibilidad de implementar avanzadas técnicas de modelaje en las modernas computadoras. Sin embargo, la estimación de la intensidad de las oscilaciones del terreno o carga sísmica inicial aún carece de un nivel de precisión similar, debido a que la complejidad inherente a un terremoto se deriva de la combinación de un amplio rango de condiciones que influencian la intensidad e irregularidad del movimiento oscilatorio del terreno en un punto dado. En la Figura 1 ilustramos esquemáticamente los factores que influencian el carácter y la composición espectral de las oscilaciones sísmicas una vez incluidos en las siguientes tres categorías:

I) Efectos de la fuente: Relacionados con la sismicidad de la región, que a su vez determina factores como el mecanismo y energía focal del terremoto, así como la composición espectral y la direccionalidad de las ondas sísmicas.

II) Efectos de la trayectoria: Relacionados con la atenuación de la intensidad del movimiento oscilatorio del terreno, a su vez influenciada por factores como la distancia desde el epicentro y la profundidad del foco, la composición y estructura de la corteza terrestre atravesada por las ondas sísmicas, y el grado de disipación de la energía debido a procesos inelásticos.

III) Efectos de sitio: Comprende las significativas amplificaciones y deamplificaciones del movimiento oscilatorio del terreno apreciables cuando las ondas sísmicas atraviesan depósitos sedimentarios.

Si miramos en retrospectiva, podemos encontrar ejemplos de terremotos pasados cuyo estudio contribuyó a adquirir más conocimiento acerca de su naturaleza, y a

una mejor comprensión del mecanismo generador de los desastres a ellos asociados, lo cual a su vez trajo aparejado importantes modificaciones a los códigos de construcción y diseño antisísmico existentes. El estudio de estos terremotos, conjuntamente con el análisis de los desastres por ellos causados ha revelado que la distribución de la magnitud de los daños a las estructuras se correlaciona muy bien con una localizada distribución de la intensidad de las oscilaciones del terreno. Varios investigadores también han señalado a los efectos de sitio como el principal factor causante de severos daños a las estructuras asentadas sobre sedimentos no consolidados durante la ocurrencia de eventos como los siguientes: Niigata (Japón, 1964), Friuli (Italia, 1979), Michoacán (México, 1985), Loma Prieta (EE.UU., 1989), Northridge (EE.UU., 1994), y Hyogo-ken Nanbu (Japón, 1995), etc. Estas conclusiones se basan en evidencia que corrobora los siguientes hechos: a) la existencia de significativas variaciones de la intensidad de las oscilaciones del terreno incluso dentro de áreas relativamente pequeñas, y b) una relación muy estrecha entre la distribución de estas variaciones, el daño estructural, y las condiciones geológicas locales.

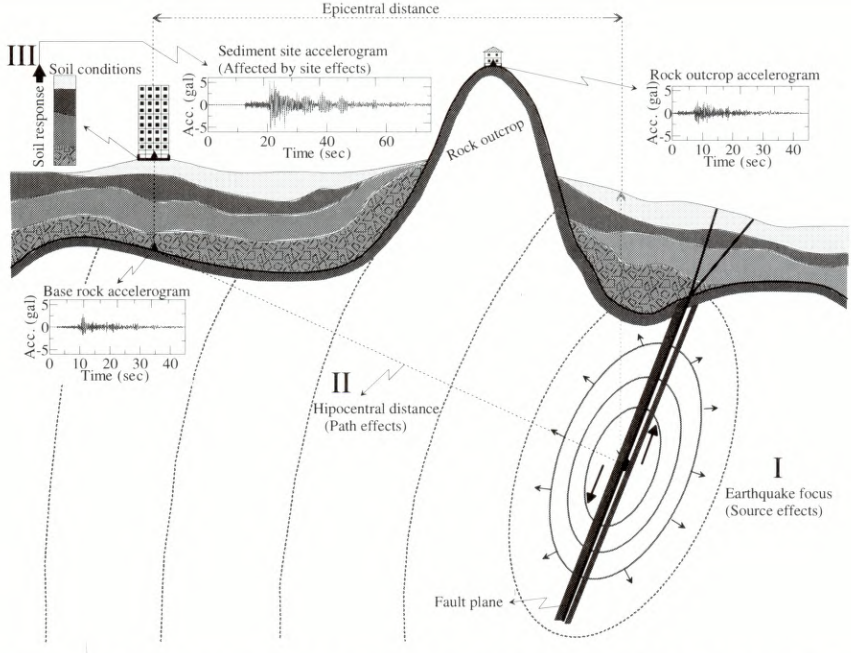


Figura 1. Factores que influencian el carácter y la composición espectral de las ondas sísmicas en su trayectoria hacia un punto dado.

En otras palabras, el examen de estos grandes eventos sísmicos ha revelado un alto grado de correlación entre la distribución espacial de los daños con aquella

correspondiente a factores geológicos, geomorfológicos, topográficos, tectónicos e hidrológicos. Consecuentemente, podemos afirmar que el estudio de terremotos caracterizados por grandes aceleraciones del terreno ha mejorado nuestra comprensión de los factores que controlan la distribución de los peligros sísmicos, lo cual ha traído aparejado una actualización y mejoramiento gradual de los códigos de construcción antisísmica. En la actualidad, la inmensa mayoría de los investigadores acepta que los daños causados por un terremoto resultan de la acción combinada de dos factores principales:

a) Un factor puramente dinámico asociado a la capacidad de las oscilaciones sísmicas de inducir cargas dinámicas adicionales en las estructuras.
b) Un factor geomecánico que induce la pérdida de la capacidad soportante de los suelos, y se manifiesta en forma de fenómenos como los deslizamientos de tierra, la licuación de suelos, y su asentamiento preferencial. Estos fenómenos pueden afectar toda una estructura ó grupo de ellas.

El estudio de numerosos eventos sísmicos ha revelado que la estructura geológica regional ejerce una gran influencia sobre la distribución del factor dinámico. Por ejemplo, el examen de la mayor parte de los mapas de isosistas revela que la orientación de las líneas de contorno coincide con la orientación predominante de las unidades geotectónicas principales. Además de esto, las isosistas correspondientes a terremotos fuertes por lo general se extienden de forma paralela a los sistemas montañosos asumiendo una forma elíptica. Como causante de esta orientación preferencial podemos mencionar que durante la ocurrencia de un terremoto los estratos de la corteza terrestre se desplazan a lo largo de un plano de falla que se extiende por varios kilómetros y podemos representar como una línea cuando lo proyectamos en superficie. Por consiguiente, nos parece más apropiado hablar de "la línea epicentral" de un terremoto fuerte y no de su epicentro. Como razones de la elipticidad acompañante podemos mencionar que en direcciones perpendiculares a la línea epicentral las pronunciadas discontinuidades del medio reflejan de vuelta parte de la energía proveniente del foco. Esto induce una atenuación más rápida de las intensidades cuando las ondas sísmicas se propagan en direcciones perpendiculares a las estructuras regionales. La composición litológica de las rocas, el nivel freático, el espesor de los sedimentos no consolidados, la pendiente del terreno, etc., influencian la distribución del grado de peligrosidad sísmica a través de su influencia tanto sobre el factor dinámico como el geomecánico.

La discusión anterior nos permite concluir que el mapeo de la distribución espacial de los efectos de la geología local constituye una viable alternativa a la hora de estimar la distribución más probable de la intensidad de las oscilaciones sísmicas del terreno. Como las oscilaciones del terreno aparecen íntimamente ligadas a la pérdida de la capacidad soportante de los suelos, la estimación de la distribución

espacial de los efectos de sitio se convierte en una tarea esencial a la hora de evaluar el riesgo sísmico derivado de fenómenos como la licuación de suelos y los deslizamientos de tierra. Suelos propensos a fallar debido al fenómeno de licuación, o a deslizarse a lo largo de una pendiente por lo general amplifican las oscilaciones sísmicas, y por tanto, una vez mapeado, podemos utilizar la distribución espacial del potencial para generar efectos de sitio como un indicador de la posibilidad de ocurrencia de estos fenómenos.

Para interiorizar la importancia de la estimación de las condiciones de sitio baste mencionar lo siguiente: a) Fungen como un criterio de gran consideración a la hora de tomar, acertadamente, importantes decisiones relacionadas con la planificación urbana y el uso de los suelos, y b) La planificación urbana y el diseño antisísmico constituyen los dos pilares fundamentales que sustentan la puesta en practica de un programa efectivo de mitigación de desastres sísmicos.

En el curso del análisis anterior definimos el término *efectos de sitio* (site effects), pero no los términos *condiciones geológicas locales* (soil conditions) y *respuesta del corte geológico* (soil response). De hecho, estos términos aparecen tan estrechamente vinculados que muchos investigadores los utilizan de forma intercambiable a la hora de expresar diferentes aspectos del mismo fenómeno. Sin embargo, el término *condiciones geológicas locales* hace referencia a las características geotécnicas del perfil geológico en un punto dado; el término *respuesta del corte geológico* comprende la respuesta dinámica de los estratos sedimentarios a la carga dinámica aplicada por las oscilaciones sísmicas del terreno, mientras que la utilización del término *efectos de sitio* nos transmite la idea de las amplificaciones y deamplificaciones de las oscilaciones sísmicas derivadas de la respuesta dinámica del corte geológico, y en menor grado de los efectos de la topografía local. Como los efectos de sitio se derivan directamente de la respuesta del corte geológico a una carga dinámica aplicada en condiciones geológicas locales específicas, algunos investigadores prefieren el término *respuesta del corte geológico* a la hora de referirse a los efectos de sitio. Nosotros aplicaremos estos tres términos en dependencia de cuan bien el contexto se ajuste a una de las definiciones anteriormente suministradas.

En la primera parte de la discusión que sigue tratamos la estimación de la magnitud y la distribución espacial de los efectos de sitio como una tarea de mapeo, y analizamos su estrecha e indisoluble vinculación con el problema de escala. Seguidamente discutimos algunos resultados obtenidos de la aplicación de métodos basados en el cálculo de cocientes espectrales de frecuente aplicación práctica en el mapeo de los efectos de sitio. Para concluir, presentamos un método de clasificación de las condiciones de sitio basado en la obtención de patrones de amplificación espectral para cocientes H/V de micro-temblores (micro-tremors).

2. Importancia de los Efectos de sitio en Ingeniería Sísmica

Para comprender la importancia de la estimación de la magnitud y distribución de los efectos de sitio, consideramos importante pasar revista a algunos aspectos dinámicos de una estructura asentada en sedimentos no consolidados. Comencemos considerando una estructura como la ilustrada en la Figura 2a. La linea de puntos refleja el hecho de que toda estructura oscila con un período de oscilación característico que, aunque influenciado por diferentes factores, depende en gran medida de la altura de la estructura en cuestión. Por ejemplo, estructuras rígidas de uno o dos pisos oscilan con periodos relativamente cortos (altas frecuencias), por lo general menores de 0.3 segundos, y por tanto, no nos damos cuenta de que en realidad oscilan.

Sin embargo, edificios altos oscilan a frecuencias mucho más bajas (períodos largos en el orden de los 10 o más segundos), y por tanto, si nos paramos encima de ellos nos parecerá que la estructura se balancea constantemente. La Figura 2b ilustra de forma simplificada las condiciones que conllevan a la falla de una estructura. En este caso, la carga horizontal aplicada en su base forzará la estructura más allá de su rango de oscilación dinámica, fuera de su centro de equilibrio, de esta forma causando su colapso.

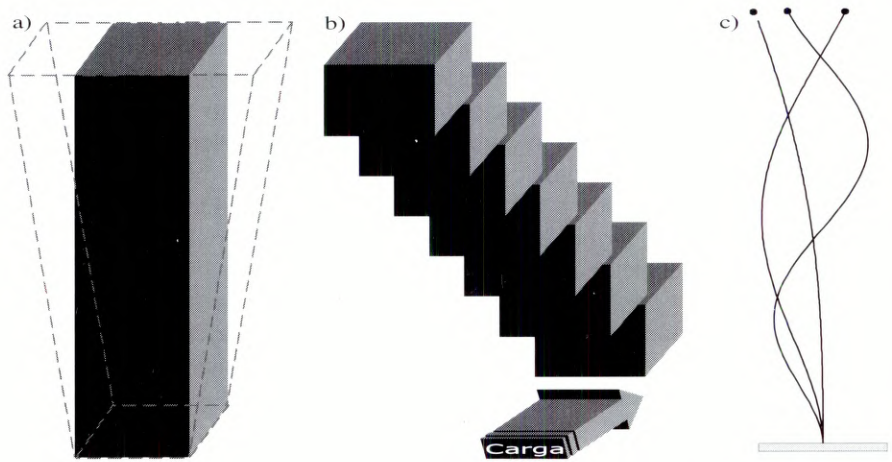


Figura 2. Dinámica y modos de oscilación de una estructura simple. 2a) Toda estructura oscila con una frecuencia característica, 2b) La aplicación de una carga en su base moverá la estructura fuera de su centro de equilibrio, 2c) Una estructura puede tener diferentes modos de oscilación.
Factores que influencian el carácter y la composición espectral de las ondas sísmicas en su trayectoria hacia un punto dado.

Sin embargo, a la hora de considerar el comportamiento dinámico de una estructura debemos considerar las siguientes características:
a) Sistemas estructurales, incluso los más simples, pueden tener más de un período natural de oscilación, como se ilustra en la Figura 2c.
b) Aunque la carga dinámica asociada a oscilaciones sísmicas primarias posee ciertas características asociadas a sus altas frecuencias de oscilación, estas aceleraciones pueden sufrir modificaciones radicales al recibir la influencia de los efectos de sitio.
En este contexto, las condiciones geológicas locales y la correspondiente respuesta dinámica del corte geológico constituyen un factor determinante, pues a medida que las ondas sísmicas atraviesan sedimentos no consolidados las oscilaciones del terreno sufren importantes modificaciones que incluyen el incremento de su amplitud, y el reforzamiento selectivo de los períodos predominantes más largos. El fenómeno de resonancia hace su aparición cuando el período natural de oscilación de las estructuras coincide con aquel de los impulsos rítmicos producidos por las ondas sísmicas (carga dinámica). A partir de ése momento, cada impulso cíclico sucesivo incrementará la deformación de la estructura absorbiendo las fuerzas dinámicas. Aunque un caso más complicado cuando lo comparamos con el ejemplo ilustrado en la Figura 2b, la aplicación sostenida de estas fuerzas cíclicas provocará el desplazamiento de la estructura fuera de su rango dinámico, hacia un incremento de su deformación permanente. El movimiento ondulatorio del terreno inducido por terremotos puede también ocasionar la pérdida de la capacidad soportante de los suelos y de hecho provocar el colapso total de las estructuras.
En la Figura 1 ilustramos el caso típico de un área caracterizada por la presencia de sedimentos no consolidados, donde I, II, y III indican la localización aproximada de los efectos de la fuente, la trayectoria, y los efectos de sitio, respectivamente. Los tres registros acelerográficos representando las aceleraciones del terreno registradas en la roca de base, en superficie, y encima de un afloramiento rocoso corresponden a un terremoto real de magnitud $M_j = 4.4$ registrado en condiciones análogas a las representadas en la ilustración. Tanto el acelerograma registrado en la roca de base, como el registrado encima del afloramiento rocoso exhiben aceleraciones relativamente pequeñas cuando los comparamos con las aceleraciones registradas encima del paquete de estratos sedimentarios, dónde también podemos apreciar una duración mayor del registro (unos 15 segundos más largo). El análisis de estos registros prueba fehacientemente que las ondas sísmicas sufren importantes modificaciones al atravesar el paquete de sedimentos, a lo largo de su trayectoria desde la roca de base hasta la superficie. Esto nos permite afirmar que las condiciones geológicas locales generan una respuesta del corte geológico caracterizada por un registro acelerográfico visiblemente afectado por los efectos de sitio. De esta manera, la carga dinámica aplicada a la cimentación de una estructura resultará muy diferente de la que originalmente

arribó al basamento rocoso, y esto complica aún mucho más la denominada interacción suelo-estructura. Desde un punto de vista estructural, este fenómeno genera las más diversas situaciones, las cuales podemos generalizar en los siguientes dos grupos principales:

1) Estructuras asentadas sobre rocas y sedimentos consolidados: expuestas a la influencia de cargas dinámicas capaces de ocasionar serios daños a estructuras rígidas, y daños parciales a estructuras más elásticas. Por ejemplo, una estructura pequeña y rígida, similar a la representada en la Figura 1 sobre el afloramiento rocoso, puede responder negativamente a ondas sísmicas oscilando a altas frecuencias (períodos cortos), y sufrir daños de gran consideración. En tales casos, la tarea fundamental consiste en asegurarnos de no posicionar las estructuras sobre zonas de fallas activas, y en caso de vernos obligados a construir en su cercanía asegurarnos de que su diseño antisísmico se corresponda con la severidad de las aceleraciones sísmicas esperadas.
2) Estructuras asentadas sobre sedimentos no consolidados (suelos blandos): expuestas a la influencia de cargas dinámicas modificadas por los efectos de sitio, y a fenómenos inducidos por las oscilaciones sísmicas, como la licuación de suelos, los deslizamientos, y el asentamiento preferencial de los suelos. De acuerdo con lo anterior, edificios altos asentados sobre paquetes sedimentarios de gran espesor pueden sufrir daños severos. Esto sucede porque, como hemos visto, los efectos de sitio enfatizan las frecuencias de oscilación más bajas contenidas en las ondas sísmicas, lo cual incrementa la probabilidad de que estructuras altas entren en resonancia y colapsen, como de hecho sucedió durante la ocurrencia del tristemente célebre terremoto que azoló la Ciudad de México en 1985. En tales casos, el diseño antisísmico puede proteger las estructuras de las aceleraciones modificadas por los efectos de sitio, la licuación, y el asentamiento preferencial de los suelos. Sin embargo, debido a la envergadura y el carácter destructor de un deslizamiento de tierra, nuestra principal arma en estos casos consiste en simplemente no posicionar las estructuras en zonas propensas a deslizarse pendiente abajo, ó en sus proximidades.

Del análisis anterior podemos concluir lo siguiente:

a) La importancia de los efectos de sitio en ingeniería sísmica reside en la indeseable posibilidad de que los sistemas estructurales entren en resonancia con las ondas sísmicas.
b) Como los efectos de sitio tienen una influencia particularmente marcada en el contenido de frecuencias y la amplitud de las oscilaciones sísmicas, una adecuada consideración de este factor nos permitirá estimar la frecuencia, aceleración, y amplitud de las ondas sísmicas provenientes de un terremoto en un punto dado.

Los elementos discutidos ilustran claramente que sin una mejor comprensión de los efectos de sitio el diseño antisísmico no logrará minimizar los daños estructurales de forma efectiva, pues la introducción de inapropiadas cargas dinámicas iniciales reducen el proceso de estimación de la respuesta dinámica de las estructuras a un proceso sin sentido ni valor práctico. Esto implica que sin un mejor conocimiento de como los efectos de sitio amplifican y reducen las ondas sísmicas, así como de la distribución espacial de estas modificaciones, el diseño de estructuras que puedan sobrevivir eventos sísmicos se torna prácticamente imposible

3. La Zonificación y la Micro-zonificación Sísmica como una Tarea de Mapeo

En lo que sigue discutimos algunos temas generales relacionados con el problema de escala, y creemos oportuno señalar que el contenido refleja más bien nuestras propias reflexiones, conclusiones, y puntos de vista personales acerca de estas cuestiones en el contexto de la zonificación y micro-zonificación sísmica.

Comencemos recordando que en las geociencias la confección de mapas constituye la forma más común de representar los resultados finales de un estudio o investigación determinada, pues un mapa nos permite captar la distribución espacial y la variabilidad de diferentes parámetros de manera tanto eficiente como conveniente. Cuando lo consideramos como una tarea de mapeo, los estudios de micro-zonificación sísmica incluyen la compilación, procesamiento, y representación de la información describiendo la variabilidad espacial de un parámetro dado dentro de un área de interés. Esto lo podemos extrapolar a un amplio espectro de disciplinas, incluyendo la geología, la geofísica, la geomorfología y la topografía. Por ello, podemos decir que la estimación de la magnitud y la distribución más probable de los efectos de sitio dentro de un área dada, desde un punto de vista metodológico, no difiere demasiado de otros estudios.

En las geociencias, el mapeo de un parámetro se basa en la toma de muestras en un número de puntos que permita la estimación de su distribución espacial con un grado de incertidumbre aceptable a una escala de trabajo determinada. Consideramos importante mencionar que el término "*escala*" se usa para indicar la proporción entre dos dimensiones. En el caso particular de un mapa, su escala indica la relación entre las distancias en el mapa y las correspondientes distancias en el campo. Siguiendo esta idea, es fácil deducir que la escala de un mapa indica la cantidad de información contenida en el mismo, no solo su tamaño. Podemos visualizar esta cantidad de información como una red de puntos de medición cubriendo el área representada en el mapa, como se ilustra en la

Figura 3. Evidentemente, si no medimos en un número de puntos cada vez mayor, a los mapas resultantes les faltará información para reflejar con precisión la variabilidad espacial del parámetro mapeado cada vez que ampliemos en busca de más detalle. Para reducir esa incertidumbre de los mapas finales a niveles aceptables debemos medir en un número mayor de puntos (Figura 3). Si tomamos como referencia el mapa a escala 1:30,000 ilustrado en la Figura 3, se torna evidente que un solo punto de observación, como el representado en el mapa a escala 1:90,000 no proveerá una cantidad de información suficiente para delinear las zonas caracterizadas por diferentes valores del parámetro de interés y detectar posibles anomalías a esa escala.

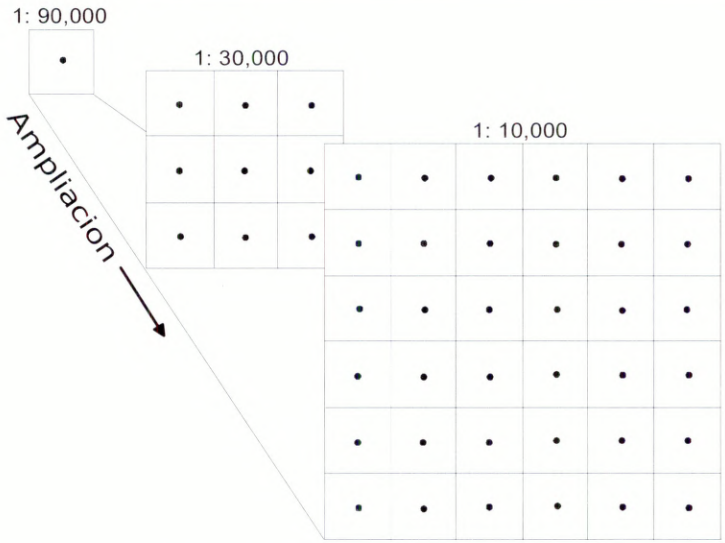


Figura 3. Mapas más detallados requieren una mayor cantidad de información, que podemos expresar como el número de puntos de observación. El ejemplo ilustrado comprende un área de 900x900 metros ampliada en dos pasos consecutivos. Evidentemente, podemos reducir la incertidumbre de mapas más detallados a niveles aceptables solo si medimos el parámetro considerado siguiendo una red de puntos de muestreo más densa, como se indica.

Esto también lo podemos aplicar directamente a los estudios de micro-zonificación sísmica, cuyas características nos permite clasificarlos como una tarea de mapeo. Consideramos importante aclarar que cuando utilizamos el término "*escala de trabajo*" o simplemente "*escala*", estamos implícitamente aceptando *el concepto de escala como representativo de la precisión con la cual debemos mapear, o proyectamos mapear las variaciones del fenómeno o parámetro estudiado dentro de un área de interés.*

4. Repercusión Práctica del Problema de Escala

Sin lugar a dudas, a la hora de estimar la magnitud y distribución de los efectos de sitio, el análisis de registros acelerográficos de las ondas sísmicas prevalece, pues registros instrumentales constituyen una representación directa de la causa de los daños que incorpora todos los factores que influencian la propagación de las oscilaciones del terreno (Figura 1). Sin embargo, la adquisición y acceso a registros instrumentales de las ondas sísmicas constituye más bien un privilegio fuera del alcance de todos los países bajo la amenaza de desastres sísmicos, en muchos casos debido a razones económicas. Como países que cuentan con una avanzada red sismográfica podemos mencionar a Japón, Estados Unidos, China, y Taiwan. Sin embargo, incluso las redes acelerográficas de estos países no proporcionan datos suficientes para llevar a cabo estudios de micro-zonificación sísmica que reflejen la distribución del potencial de los efectos de sitio para amplificar y deamplificar las oscilaciones sísmicas del terreno con el detalle requerido. Las limitaciones inherentes al uso de registros acelerográficos en trabajos de micro-zonificación tienen que ver con el hecho de que mapas más detallados requieren una mayor cantidad de información, expresada en la práctica por un creciente número de puntos de observación o medición a medida que nos movemos hacia mapas más detallados.

En la Figura 4 se indica el número de puntos de muestreo requerido para crear mapas a diferentes escalas a la hora de estudiar un área de 100 kilómetros cuadrados. Como se muestra en el gráfico, la relación entre la escala de un mapa y la cantidad de información, expresada como el número de puntos de muestreo requeridos sigue una ley logarítmica. Podemos clasificar un mapa como confiable solo si contiene una cantidad de información acorde con su escala, lo cual trataremos de ilustrar con un ejemplo más tangible.

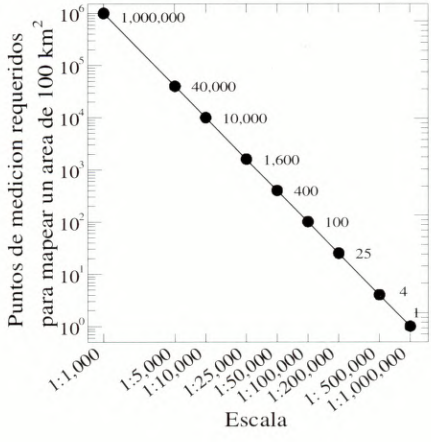


Figura 4. Relación entre la escala de un mapa y la cantidad de información contenida en el mismo, expresada en término del número de puntos de observación.

La Figura 5 muestra un mapa topográfico a escala 1:20,000, lo cual implica que un centímetro en el mapa equivale a 200 metros en el campo. Este mapa contiene una cantidad de información mínima, en este caso observaciones (o mediciones) de la elevación del terreno separadas no más de 200 metros[2]. Ahora supongamos que queremos ampliar este mapa a una escala 1:10, 000 (Figuras 5b y 5c). El mapa ilustrado en la Figura 5b constituye una mera copia ampliada del mapa original a escala 1:20,000, y por tanto, la cantidad de información contenida en el mismo no cambia. Sin embargo, el mapa ilustrado en la Figura 5c contiene el doble de los puntos de observación, lo cual permite una representación más detallada del relieve, y demuestra que, a esa escala, las isolíneas no siguen el patrón sugerido por el mapa mostrado en la Figura 5b. Para ilustrar más claramente la importancia de esta relación entre la escala y la cantidad de información requerida, las Figuras. 5e y 5f ilustran dos perfiles trazados a lo largo de la línea A-A'. El perfil mostrado en la Fig. 4e pasa por alto la rugosidad del relieve que, en contraste, aparece eficientemente capturada por el perfil correspondiente al mapa a su derecha (Figura 5e). De acuerdo al análisis anterior, el mapa a escala 1:10,000 debe resultar de la compilación de información siguiendo una red de puntos de observación separados no más de 100 metros, como la sugerida por las cruces en la Figura 5c.

Esto reafirma lo discutido anteriormente, y que podemos recapitular de la siguiente manera: La escala de un mapa no refleja meramente su tamaño, sino también la densidad de la red de muestreo utilizada para generarlo, o sea, la cantidad de información contenida en el mismo. Esto implícitamente restringe el tamaño de un mapa con vistas a hacerlo fidedigno, e implica que el "ampliar" mecánicamente un mapa a una escala más pequeña (mapa más grande) constituye un error craso, pues el mapa resultante de tal procedimiento no contendrá una cantidad de información que garantice la reducción de la incertidumbre asociada a la distribución espacial del parámetro originalmente mapeado.

Como regla general, los trabajos de zonificación sísmica se ejecutan en tres etapas de mapeo sucesivas que comienzan con escalas de trabajo regionales (1:1,000,000~1:100,000) y concluyen con escalas de trabajo detalladas, usualmente aplicadas en trabajos de micro-zonificación sísmica de zonas urbanas y áreas de desarrollo industrial (1:25,000~1:10,000). Pongamos el caso de un estudio de micro-zonificación sísmica, digamos a una escala 1:25,000, que nos proponemos llevar a cabo utilizando registros acelerográficos. Como hemos visto anteriormente, a esa escala, un estudio bien documentado deberá basarse en una

---

[2] En la práctica, salvo raras excepciones, nunca se puede medir siguiendo una red de puntos de muestreo separados por una distancia constante. Esto puede deberse a la existencia de zonas de difícil acceso ó al desarrollo urbano. Sin embargo, siempre se trata de cubrir el área estudiada de la forma más uniforme posible respetando la ley de escala. Posteriormente, la aplicación de técnicas d interpolación nos permiten reducir una red irregular a una regular con vistas a obtener mapas de isolíneas.

red de muestreo compuesta por puntos de observación separados no más de 250 metros en el campo, o sea, no más de un centímetro en el mapa. Siguiendo este escenario ideal, esto representa la instalación de estaciones acelerográficas separadas no más de 250 metros. A los gastos incurridos por concepto de adquisición e instalación de los acelerógrafos debemos adicionar también el costo de las perforaciones de pozos para aclarar la composición del corte geológico, al menos para parte de las estaciones, más el costo del mantenimiento de las estaciones una vez instaladas.

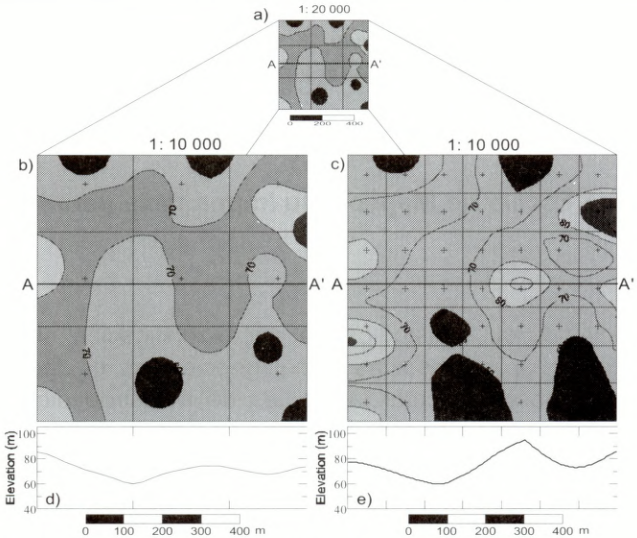


Figura 5. Un mapa debe contener una cantidad de información proporcional a su escala.

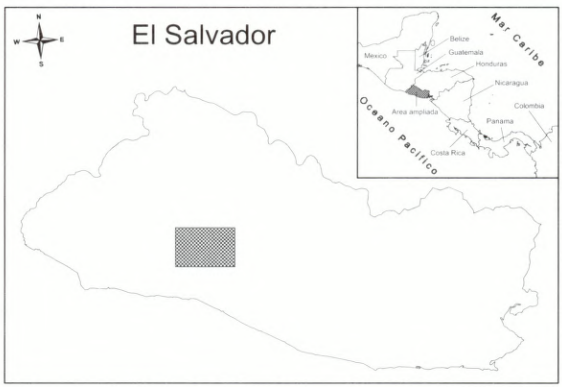


Figura 6. En el caso hipotético de llevar a cabo un estudio de microzonación sísmica a escala 1:25,000 para el área de San Salvador necesitaríamos nada menos que 10,000 puntos de medición.

La Figura 6 ilustra el caso hipotético de que se instale una red acelerográfica como la anteriormente descrita en la zona de San Salvador, El Salvador, en cuyo caso debe instalarse una red acelerográfica compuesta de nada menos que 10,000 estaciones.

Evidentemente, la variante de micro-zonificación sísmica basada en registros acelerográficos se enfrenta a un problema de escala sin solución práctica, al menos en términos financieros. En otras palabras, el costo de instalación y mantenimiento de una red acelerográfica como la descrita se torna imposible para cualquier nación. Esta realidad toma un matiz más dramático en países en vías de desarrollo, los cuáles, por lo general, cuentan con recursos muy limitados para tales estudios. La posibilidad de llevar a cabo estudios de micro-zonificación sísmica basados en datos puramente acelerográficos parece marchitarse una vez confrontada con el factor económico.

5. Cómo fijar una Escala de Mapeo y su Importancia para la Mitigación de Desastres

A la hora de llevar a cabo estudios de micro-zonificación sísmica debemos guiarnos por las reglas aplicables a las demás geociencias, es decir, debemos fijar nuestra escala de trabajo y acatar las reglas de muestreo dictadas por dicha escala. Sin embargo, ¿cómo fijar nuestra escala de trabajo en el caso particular de estudios de zonificación y micro-zonificación sísmica enfocados en el mapeo de los efectos de sitio? Como también ocurre en el caso de otras disciplinas, antes de comenzar debemos sintonizar nuestra escala de trabajo considerando la influencia de diversos factores. Para facilitar la comprensión de la discusión que sigue, hemos dividido los factores que consideramos más influyentes en dos grupos principales:

Factores Informacionales:

a) Nivel de conocimiento de la variabilidad inherente al fenómeno estudiado dentro del área bajo escrutinio.
b) Disponibilidad de información proveniente de otras geociencias, por lo general necesaria para emprender las investigaciones, incluyendo información geológica, geomorfológica, topográfica, sismológica, tectónica e hidrológica.

Factores Operacionales:

a) Objetivos del estudio de micro-zonificación sísmica.
b) Cantidad de tiempo y recursos necesarios o disponibles para llevar a cabo las investigaciones.

Evidentemente, a la hora de fijar nuestra escala de trabajo el gran número de posibles combinaciones de estos factores producirá a su vez un diverso espectro de situaciones. Como se mencionó anteriormente, los efectos de sitio presentan una marcada tendencia a variar incluso dentro de áreas relativamente pequeñas. A la hora de decidir nuestra escala de trabajo, podríamos basarnos en la distancia mínima que separa dos puntos que exhiben efectos de sitio marcadamente diferentes. Como los efectos de sitio comprenden la respuesta dinámica del corte geológico a la carga dinámica ejercida por las oscilaciones sísmicas, entonces podemos afirmar que la variabilidad del corte geológico a lo largo y ancho del área investigada dictará la variabilidad de los efectos de sitio. De aquí se desprende que la determinación de la distancia mínima que separa dos puntos que exhiben contrastantes efectos de sitio, aunque no exclusivamente, dependerá de nuestro conocimiento de la geología del subsuelo. Aunque el basar la determinación de una escala de trabajo óptima en la determinación de esta distancia mínima lo consideramos como una lógica alternativa, en la mayoría de los casos no podemos aplicarla debido a la carencia de mapas detallados de la estructura geológica profunda. Incluso mapas geológicos detallados, como por ejemplo mapas a escala 1:10,000, les falta el nivel de detalle necesario para poder caracterizar la estructura del subsuelo con la precisión necesaria. Por otra parte, perfiles geológicos, aunque informativos, por lo general se basan en la interpolación de las características del corte geológico entre pozos de perforación. Debido a ello, los contactos geológicos correspondientes a las unidades geológicas en profundidad se representan con una línea de puntos, sugiriendo la incertidumbre inherente al modelo geológico asumido.

Consideremos primero el caso de una larga lista de países que no cuentan con información tan detallada. En tales casos se vuelve imposible el fijar la escala de trabajo dependiendo del conocimiento a priori de la variabilidad de los efectos de sitio o la geología local. En ausencia de información detallada podremos fijar nuestra escala de trabajo solo después de compilar toda la información disponible proveniente de otras geociencias, incluyendo mapas geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, sismológicos, etc. Asumamos que este proceso indica que dependiendo de la información recopilada podemos producir un mapa de zonificación sísmica preliminar a escala 1:150,000. A partir de ese momento esa escala se convertirá en una referencia para trabajos futuros. Por tanto, el fijar una escala más detallada, digamos 1:100,000, implica que nos proponemos mejorar el nivel de conocimiento del fenómeno investigado con respecto a estudios anteriores. Sin embargo, en algunos casos podemos de hecho emprender el mapeo detallado de zonas con un riesgo sísmico particularmente grande aún en la ausencia de información de base. Estos casos incluyen áreas densamente pobladas que en el pasado han experimentado los efectos de eventos sísmicos devastadores. Sin embargo, consideramos oportuno señalar que incluso en esos casos dependeremos de la existencia de registros históricos que documentan

tanto la ocurrencia de terremotos como sus efectos en las áreas afectadas (información macro-sísmica).

Consideremos ahora el caso opuesto, o sea, aquel que comprende a países como Japón y EE.UU, donde los terremotos ocurren casi a diario, y se cuenta con todo un arsenal de información detallada. En tales casos, podríamos fusionar mapas describiendo la distribución espacial de los daños con mapas geológicos ó geomorfológicos, y tratar los mapas resultantes como representativos de la variabilidad espacial de los efectos de sitio. Asumamos que la aplicación de esta variante metodológica nos permitió fijar la distancia mínima entre dos puntos caracterizados por efectos de sitio contrastantes a 50 metros. Esto implica que para describir con precisión la variabilidad espacial de los efectos de sitio debemos trabajar a una escala 1:5,000. En la práctica, esto se traduce en tener que documentar los valores de los parámetros que caracterizan los efectos de sitio siguiendo una red de puntos de observación separados no más de 50 metros.

El aceptar una escala de mapeo a 1:5,000 no significa que terminan nuestros problemas, por el contrario, éstos solo comienzan, pues ahora deberemos lidiar con los denominados *factores operacionales*. Para ilustrar su influencia, consideremos el área de San Salvador y áreas aledañas como un bloque de 30km de largo por 20km de altura, o sea, un área de 600km^2 (Figura 6). Para cubrir esta área con una red de puntos de observación separados no más de 50 metros necesitaremos nada menos que 240,000 puntos de medición. Ahora consideremos el caso de que nos proponemos emprender un estudio de micro-zonificación sísmica de esta área cubriendo 20 puntos de muestreo, cinco días de la semana, y asumamos que no se pierde un día de trabajo, y nadie se enferma durante todo el proceso. Incluso si contamos con estas condiciones ideales, un simple cálculo aritmético nos muestra que necesitaríamos nada menos que 50 años dedicados solo a concluir las mediciones. Evidentemente, si no contamos con mapas de zonificación y micro-zonificación sísmica entonces no nos será posible minimizar las pérdidas económicas y de vidas humanas en caso de que un terremoto ocurra en los siguientes 50 años, mientras consumimos el tiempo tratando de completar nuestro estudio detallado a escala 1:5,000.

Cincuenta años sin producir un mapa indicando la distribución más probable de los efectos de sitio, al menos a una escala relativamente pequeña, digamos un mapa a escala 1:100,000, no permitirá a las agencias gubernamentales asignar recursos y poner en práctica un plan de mitigación de desastres efectivo. En otras palabras, a la hora de emprender un estudio de micro-zonificación sísmica tenemos que considerar el tiempo y los recursos disponibles para llevarlos a cabo, así como también sus objetivos, lo cual ilustraremos valiéndonos de la Figura 7.

Idealmente, consideraremos que las agencias gubernamentales asignan los recursos destinados a la puesta en práctica de planes para la mitigación de desastres sísmicos a las diferentes zonas bajo su jurisdicción de forma tomando en cuenta estimaciones del riesgo sísmico que incluyen a todo el

territorio nacional y permiten comparar una región con otra. Esta comparación se torna posible solo si se cuenta con mapas de zonificación sísmica a escalas relativamente pequeñas, digamos mapas a escala 1:1000,000 ~1:500,000.
De forma similar, los gobiernos a nivel regional asignarán los recursos recibidos desde el órgano superior tomando en consideración el riesgo sísmico de cada una de sus áreas o zonas integrantes. En este caso, se necesitarán mapas de zonificación más detallados, pero que también permitan captar la situación general, digamos mapas a escalas 1:250,000~50,000. Sísmica que indican las variaciones del riesgo sísmico dentro de cada una de las áreas bajo su jurisdicción, digamos mapas a escala 1:50,000~1:10,000.

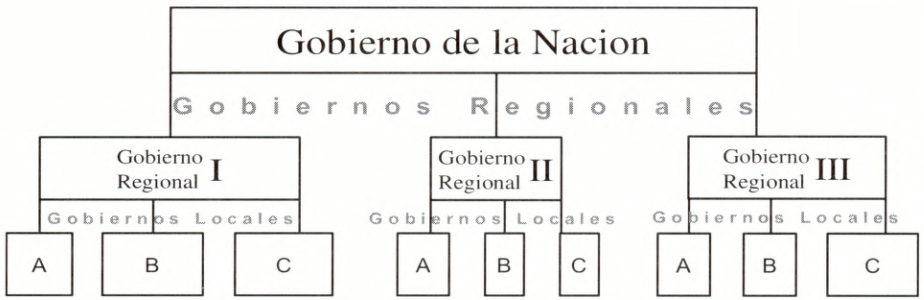


Figura 7. El flujo usualmente seguido por los recursos destinados a la mitigación de desastres. El tamaño de los rectángulos representa la cantidad de recursos asignados a cada una de las regiones designadas como I, II, y III, y a sus sub-regiones A, B, y C.

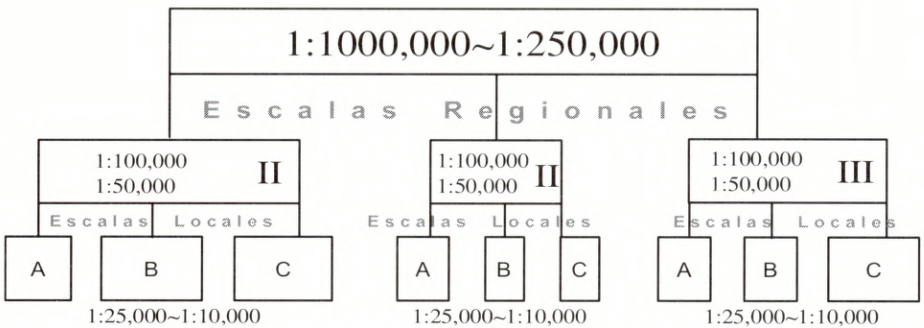


Figura 8. Relación aproximada entre las escalas de trabajo correspondientes a diferentes niveles de microzonación sísmica.

Si continuamos con el mismo análisis llegaremos a la conclusión de que los gobiernos locales necesitarán mapas aún más detallados, en este caso mapas de micro-zonificación. La Figura 8 ilustra la relación aproximada entre diferentes fases del hipotético proceso de mapeo descrito. Consideramos oportuno aclarar que los límites tanto superiores como inferiores de estas relaciones de escala pueden sufrir modificaciones en dependencia de la interrelación de los factores anteriormente discutidos.

Mapas de micro-zonificación detallada encuentran una aplicación más amplia y efectiva cuando se ponen en manos de aquellos que pueden resolver los problemas en la base, o sea, los gobiernos locales. Sin embargo, como regla general, éstos no cuentan con la autonomía suficiente para poner en práctica planes de mitigación de desastres dependiendo únicamente de sus limitados recursos. Como consecuencia directa, una efectiva puesta en práctica de estos planes dependerá en gran medida de la distribución de recursos por parte de las estructuras de gobierno superiores. Por un lado, si no contamos con resultados de al menos una zonificación sísmica preliminar que cubra todo el territorio, no podremos identificar las zonas cuyo riesgo sísmico justifica la ejecución de estudios más detallados. Así también por el otro lado, se nos presenta la paradoja de que aún cuando pudiéramos mapear el riesgo sísmico a escalas muy detalladas desde un inicio, los gobiernos locales no pueden implementar planes para la mitigación de desastres sin una adecuada asignación de los recursos necesarios para estos fines.

El análisis anterior demuestra que el empezar al revés, o sea, desde escalas muy detalladas hacia escalas más generales se torna ineficiente e impráctico, tanto desde el punto de vista de la mitigación de desastres como del punto de vista administrativo. Como consecuencia directa del análisis anterior podemos afirmar que el esquema de mapeo más natural y eficiente debe corresponderse con el ilustrado en la Figura 8. Sin embargo, intentemos movernos de abajo hacia arriba, en contra del flujo de mapeo sugerido en las Figuras 7 y 8, y consideremos que cada una de las tres regiones representadas tiene un área de 600 km^2, equivalente al área de San Salvador (Figura 6).

Para llevar a cabo un estudio de micro-zonificación sísmica a escala 1: 5,000 para un área tres veces mayor que el anteriormente considerado necesitaríamos tres veces más tiempo, o sea, nada menos que 150 años destinados solo a las mediciones! A pesar de su aparente irracionalidad a la luz del factor tiempo, asumamos que nuestros nietos logran concluir la compilación de toda la información, y ahora pretenden continuar con la confección de mapas regionales que nos permitan captar la situación general a escalas más pequeñas, digamos a 1:90,000 ó 1:270, 000. La Figura 9 ilustra claramente la imposibilidad de transferir toda la información contenida en un mapa a escala 1:5,000 a uno a escala 1:90,000 o 1:270,000. El proceso de síntesis de la información requerido para confeccionar estos mapas a partir de un mapa 1:5,000 eliminará la mayor parte de

los detalles eficientemente capturados por el proceso de muestreo original. Por ello consideramos el mapear indiscriminadamente a escalas detalladas desde un principio como un trabajo inútil, y un gigantesco despilfarro de recursos[3].

Además de lo anterior, el sentido común dicta que para distribuir los recursos disponibles para la mitigación de desastres de una manera eficiente debemos ir de escalas regionales a locales, pues esto garantiza la distribución de los mismos proporcionalmente al riesgo sísmico. Visto de esta manera, el flujo de recursos indicado en la Figura 7 sugiere la adopción de un esquema de mapeo similar al ilustrado en la Figura 10. En general, la ejecución de estudios detallados de micro-zonificación sísmica deberá llevarse a cabo sólo en los siguientes casos: a) si el alto riesgo sísmico del área así lo justifica, ó b) si la construcción o existencia de estructuras críticas como plantas electro-nucleares ó industrias químicas así lo requieran.

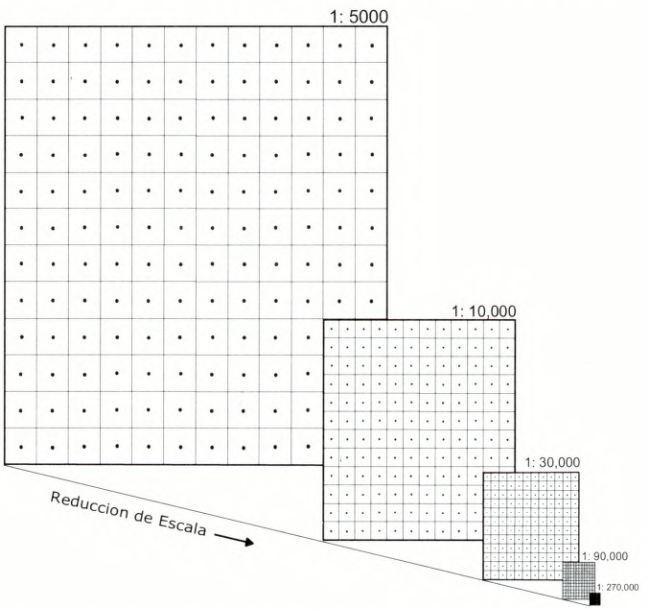


Figura 9. El fijar escalas de trabajo detalladas desde un principio se perfila como una tarea inútil y un despilfarro de recursos. Evidentemente, mapas a pequeñas (1:500,000~1:1,000,000) ó medianas (1:250,000~100,000) escalas no pueden representar la información proveniente de todos los puntos de observación. Esto se presenta como otro problema de escala bien conocido.

[3] Consideramos útil aclarar que en la práctica en el mapeo de un área se sigue una red de puntos de medición dos veces más densa que la sugerida por la escala de trabajo adoptada. Esto se hace en aras de garantizar la calidad de los mapas resultantes. De acuerdo con esto, la obtención de un mapa a escala 1: 5,000 requeriría puntos de observación separados no por 50, sino por no más de 25 metros, lo cual dobla en número de puntos de medición. Bajo las condiciones descritas necesitaríamos dedicar nada menos que 300 años al muestreo del área de 1,800 km2 descrita en el texto (600 + 600 + 600).

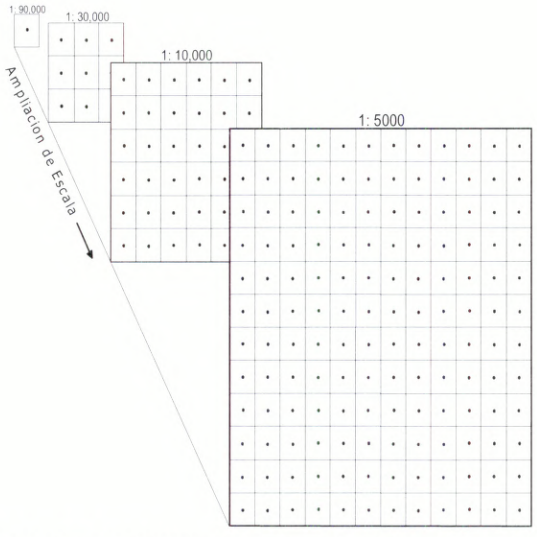


Figura 10. Estudios de zonificación y micro-zonificación sísmica deben proceder desde escalas generales a escalas detalladas, como se indica.

El esquema de mapeo sugerido en la Figura 10 revertirá en un enorme ahorro de recursos, sobre todo cuando lo comparamos con el ilustrado en la Figura 9. En ciertos casos, el ignorar alguno de estos niveles de mapeo sucesivo no afectará significativamente la identificación de zonas que requieren estudios más detallados, o el cumplimiento de los objetivos de las investigaciones. Sin embargo, creemos útil puntualizar que esta posibilidad descansa en la disponibilidad de información recopilada a lo largo de los años. Es decir, la posibilidad de compilar la mayor parte de la información disponible, incluyendo mapas geológicos y geomorfológicos, siguió un esquema como el ilustrado en la Figura 10, o sea, de escalas más generales a escalas más detalladas.

6. Panorámica general de los Métodos de Zonificación Sísmica

Como mencionamos anteriormente, los estudios de zonificación sísmica se desarrollan siguiendo tres etapas progresivas de mapeo, moviéndonos hacia estimaciones más detalladas de la distribución espacial del fenómeno estudiado.

Nivel I: Zonificación Sísmica Mínima ó General: Estudios a grandes escalas (1:1,000,000~ 1:100,000) que tienen como objetivo el mapeo de una región extensa, y comprenden la compilación de información geológica, geomorfológica, geotectónica, topográfica, y sismológica describiendo el área de interés. En el caso de zonas caracterizadas por un alto grado de actividad sísmica, la exploración sismológica comprende la compilación de los catálogos de terremotos registrados instrumentalmente, mientras que en el caso de zonas de actividad sísmica baja la búsqueda de información se concentra más bien en la compilación de información macro-sísmica histórica. La interpretación de toda esta información permite la delineación de las fuentes sismo-generadoras, lo cual, combinado con la aplicación de fórmulas de atenuación permite obtener mapas preliminares de la distribución más probable de la intensidad de las oscilaciones sísmicas. Por tanto, este nivel de zonificación sísmica lleva aparejado un costo económico por concepto de ejecución relativamente bajo, pues explota información ya disponible. Por lo general, estos estudios tienen como objetivo la identificación de las zonas de más riesgo dentro de toda una región con vistas a ampliarlas y aplicar estudios en un segundo nivel de zonificación.

Nivel II: Zonificación Sísmica Intermedia ó Detallada: Estudios a escala intermedia (1:100,000~1:25,000) que comprenden la recopilación de información más detallada para caracterizar las zonas de más riesgo, y de esta forma mejorar los mapas elaborados en el Nivel I. Estos estudios incluyen también la recopilación de información geotécnica que nos permita estimar la distribución de los períodos predominantes y los coeficientes de amplificación locales mediante al análisis de registros o datos instrumentales. En este nivel, la aplicación de técnicas de estimación basadas en el análisis de micro-sismos se perfila como un método conveniente, eficiente y de bajo costo.

Nivel III: Zonificación Sísmica Rigorosa ó Máxima: Estudios a escalas pequeñas (1:25,000~1:1,000) que comprenden la aplicación de métodos instrumentales y analíticos para estimar la respuesta del corte geológico. Estos estudios constituyen los llamados estudios de micro-zonificación sísmica, y por lo general requieren la ejecución de investigaciones adicionales, como por ejemplo la perforación de pozos, la determinación de las propiedades electromecánicas de los estratos que integran el perfil geológico, así como estimaciones de la respuesta del corte geológico aplicando análisis numéricos con la ayuda de técnicas de modelaje. Estos estudios por lo general incurren un alto costo económico asociado a la obtención de información detallada.

La Tabla 1 lista la información que debemos obtener, compilar, e interpretar para llevar a cabo estudios de zonificación sísmica centrados en la estimación de la distribución de la intensidad de las oscilaciones del terreno en cada uno de los tres niveles anteriormente descritos de acuerdo al ISSMFE (Technical Committee for Geotechnical Earthquake Engineering)

Nivel-I (1:1,000,000~1:50,000)	-Terremotos históricos, e información general disponible -Mapas geológicos, topográficos, geomorfológicos, hidrológicos, etc. -Entrevistas a los residentes locales
Nivel-I (1:100,000~1:10,000)	-Análisis de micro sismos -Ejecución de estudios geotécnicos simplificados
Nivel-I (1:25,000~1:5,000)	-Investigaciones geotécnicas detalladas -Modelación y simulación de la respuesta del corte geológico local

Información empleada según el nivel de zonificación

La micro-zonificación sísmica aparece como un caso particular de zonificación sísmica orientado a la estimación de la distribución espacial del riesgo sísmico dentro de un área relativamente pequeña a escalas detalladas (1:25,000~1:10,000)[4]. En el caso particular de obras industriales de envergadura y estructuras inherentemente azarosas, como industrias químicas y plantas electro-nucleares, los requerimientos a la hora de evaluar la vulnerabilidad sísmica de sus posibles asentamientos incluyen la ejecución de estudios de micro-zonificación sísmica a escalas mucho más detalladas (1:10,000~1:1,000). Estos estudios también requieren la compilación de información geológica, tectónica, geotécnica, hidrogeológica, geomorfológica, y sismológica, pero ahora a escalas mucho más detalladas con vistas a garantizar el éxito de las siguientes tareas:

1) Evaluación de la necesidad de trabajos adicionales.
2) El diseño y despliegue de una red de estaciones que nos permita registrar la actividad sísmica en las unidades geológicas representadas en el área. Esto a su vez hace posible la puesta en práctica de métodos de micro-zonificación basados en el análisis de datos instrumentales (registros).
3) La selección de puntos caracterizados por cortes geológicos representativos del área estudiada, lo cual suministra la información geotécnica necesaria para estimar la respuesta dinámica de los perfiles geológicos típicos a través de la aplicación de métodos analíticos.

El mapeo de los efectos de sitio constituye uno de los componentes fundamentales de los estudios de zonificación sísmica, pues tiene como objetivo la estimación de la distribución más probable de la intensidad de las oscilaciones del terreno dentro del área, y dichas estimaciones tienen un gran impacto en la mitigación de desastres ocasionadas por la ocurrencia de terremotos. A través de

[4] Para calcular la distancia en el campo representada por un centímetro en el mapa, basta con eliminar los dos últimos ceros a la derecha de la escala. Por ejemplo: 1:10,000=1:100, o sea, un centímetro en el mapa representa 100 metros en el campo.

los años, diferentes investigadores han propuesto toda una variedad de metodologías para llevar a cabo trabajos de zonificación sísmica.

La primera generación de métodos tuvo un carácter esencialmente cualitativo, pues sus autores correlacionaron la geología superficial con la distribución espacial de los daños. Estos métodos utilizan información acerca de la composición litológica de los suelos y rocas, así como información sobre las condiciones hidrológicas y topográficas. Algunas de ellas permiten solo delimitar las zonas más favorables para las construcciones, mientras que otras permiten evaluar las variaciones de la intensidad sísmica en grados dentro del área considerada.

Más tarde, el despliegue de redes sismológicas y acelerográficas trajo aparejado una creciente disponibilidad de registros sismográficos que permitieron el desarrollo de la segunda generación de métodos, basados en el análisis de datos instrumentales, lo cual permite la obtención de resultados más confiables y fidedignos.

Paralelamente, la aplicación de la teoría de la elasticidad al problema de la propagación de ondas sísmicas en medios estratificados conllevó al desarrollo de diferentes métodos analíticos para estimación de la respuesta dinámica de un corte geológico específico, lo cual constituye la tercera generación de métodos de zonificación sísmica.

También consideramos importante mencionar la creciente aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (GIS) en estudios de zonificación sísmica. Su ventaja radica en el amplio espectro de posibilidades brindado por estos sistemas en términos de compilación, y manipulación de la información, así como a las indiscutibles ventajas que ofrecen a la hora de confeccionar los mapas de zonificación finales.

La mayor parte de las clasificaciones de los métodos de zonificación sísmica sugieren la inclusión de los mismos en uno de los tres niveles de zonificación discutidos anteriormente. Sin embargo, debemos considerar que aunque algunos métodos se prestan más para tareas de mapeo a una escala que otra, su aplicación dependerá de la disponibilidad de información necesaria para aplicarlos. En otras palabras, la escala de un mapa expresa su resolución en términos de la información contenida en el mismo, y por consiguiente, la cantidad de información disponible dictará tanto los métodos a aplicar como la escala de los mapas resultantes, no lo contrario. Sin embargo, una revisión exhaustiva de todos estos métodos se vuelve a la vez tediosa e impráctica. Debido a lo anterior, hemos optado por introducir algunos de estos métodos de zonificación sísmica mediante la presentación de resultados obtenidos de la aplicación de algunos que consideramos poseedores de una particular importancia práctica.

7. Resultados obtenidos de la aplicación de algunos Métodos de Zonificación Sísmica

Métodos basados en el análisis de datos instrumentales prevalecen a la hora de estimar la magnitud de los efectos de sitio sobre las oscilaciones sísmicas, sencillamente porque los registros sísmicos empleados en los mismos constituyen una representación directa del origen de los daños que incluye, al unísono, todos los factores ilustrados en la Figura 1. En este contexto, los métodos más frecuentemente aplicados incluyen un grupo de técnicas agrupadas bajo el nombre de cocientes espectrales (*spectral ratio techniques*). Estas técnicas parten de la idea de que la severidad de los daños asociados a terremotos depende en gran medida del contenido de frecuencias de los ondas sísmicas. Estas técnicas también toman en consideración el hecho de que nos es más fácil analizar el contenido energético de las ondas sísmicas en el dominio de frecuencias que en dominio del tiempo. Por ejemplo, operaciones de con evolución en el dominio del tiempo se convierten en simples operaciones de multiplicación en el dominio de frecuencias.

En general, la comparación del espectro de amplitud de Fourier correspondiente a las oscilaciones registradas en un punto de interés con respecto al perteneciente a un punto fijado como referencia (por lo general roca), proveerá una estimación de los efectos de sitio a lo largo de un cierto intervalo de frecuencias.

En este contexto, asumamos que podemos depender de una variante metodológica basada en registros hechos con un equipo de medición de bajo costo, portátil, y de fácil operación, lo cual nos permitiría medir sin restricciones de lugar u hora. A esto adicionemos que el análisis de los registros hechos con este equipo proporciona estimaciones de los efectos de sitio coincidentes con las basadas en registros acelerográficos. La búsqueda de un método como el descrito llevó a los investigadores a considerar nuevas alternativas para estimar la magnitud de los efectos de sitio. Esta búsqueda fructificó cuando en 1954 el Prof. Kiyoshi Kanai introdujo un método basado en el análisis de micro-temblores que oscilan con períodos menores a un segundo. En este punto consideramos apropiado señalar que aunque otros investigadores habían ya hecho investigaciones sobre las características de micro-temblores (por ejemplo: Omori, 1908; Ishimoto, 1937; Carder et. al. 1945; Wilson, 1953), el progreso en la utilización de micro-sismos para estimar los efectos de sitio se deriva del innovador trabajo del Prof. Kanai y su equipo entre 1954 y 1961. El Departamento de Ciencias del Ministerio de Educación y el Buró de Arquitectura de la ciudad de Tokyo, Japón, financió la ejecución de investigaciones sistemáticas de microsismos en todos los distritos sísmicos de Japón, incluyendo Tokyo, Yokohama, Sakata y Tsuruoka, Osaka, Ichinomiya, y Kawasaki. Después de analizar toda la información compilada, el Prof. Kanai y su equipo reveló la

existencia de un distintivo patrón de micro-sismos para cada una de las cuatro categorías de suelos de cimentación existentes en código de construcción japonés de entonces. Esta idea originalmente desarrollada por el Prof. Kanai ha evolucionado en el tiempo hasta convertirse en una de las variantes metodológicas más prometedoras en la estimación de la magnitud y distribución de los efectos de sitio. Debido en gran medida al hecho de proporcionar buenos resultados prácticos, en la actualidad el cálculo del cociente espectral H/V (componente horizontal sobre la vertical) se ha establecido como la técnica predominante a la hora de estimar las condiciones de sitio utilizando micro-temblores. Este método apareció por primera vez en 1970 en Japón, cuando Nogoshi e Igarashi, dos investigadores de la Universidad de Hokkaido, señalaron la similitud existente entre el cociente H/V de micro-temblores y aquel correspondiente a ondas de Rayleigh. A finales de la década de los ochenta Nakamura, también en Japón, propuso un método semi-empírico para explicar los buenos resultados obtenidos con la aplicación del método H/V en la estimación de los parámetros que caracterizan la respuesta de sitio.

Para evitar tanto confusiones como repeticiones innecesarias a lo largo de la presentación de resultados que sigue, hemos abreviado y homogeneizado los nombres de las técnicas a que nos referiremos. De acuerdo con esto, utilizaremos *H/H* para denotar técnicas basadas en la división de las componentes horizontales de las oscilaciones, y adicionamos subíndices a (1) el numerador, para especificar la parte de los registros analizada, y (2) el denominador, para indicar el origen del espectro fijado como referencia. Después de adoptar esta nomenclatura, H_S en el numerador indica la porción de los registros perteneciente a las ondas S, y si adicionamos los subíndices $_B$ y $_R$ a la *H* en el denominador obtenemos las siguientes notaciones: (1) H_S/H_B para indicar cocientes espectrales con respecto a un espectro registrado en profundidad (pozos), y (2) H_S/H_R denota cocientes espectrales con respecto a un espectro de referencia (roca). De forma similar, emplearemos *H/V* para denotar el cociente espectral de las componentes horizontales con respecto a las verticales, y adicionamos los subíndices $_S$, $_C$, y $_M$ a la V en el denominador para especificar el tipo de registros utilizados en los análisis, o sea: H/V_S para ondas S, H/V_C para ondas coda, y H/V_M para micro-temblores.

El basamento teórico de estas técnicas, así como una pormenorizada explicación de su puesta en práctica el lector las podrá encontrar en las referencias bibliográficas sugeridas al final de este artículo. Aquí solo proveeremos el mínimo de información necesaria para interiorizar las ventajas de la aplicación del análisis de micro-temblores como alternativa a técnicas más complejas y costosas, y el potencial del método que proponemos para evaluar y corregir las estimaciones de las condiciones de sitio utilizando solamente registros de micro-temblores.

La base de datos instrumentales empleada en nuestras investigaciones incluye registros acelerográficos correspondientes a 15 terremotos registrados en las 150

estaciones de la red acelerográfica de Yokohama (Figura 11), y un arreglo vertical de 9 acelerógrafos adjunto a la misma. La validación de dichas estimaciones la basamos en su comparación con el cociente de la componente acelerográfica horizontal en superficie y en profundidad, y funciones de amplificación teórica para ondas planas SH verticalmente incidentes en la base del corte geológico.

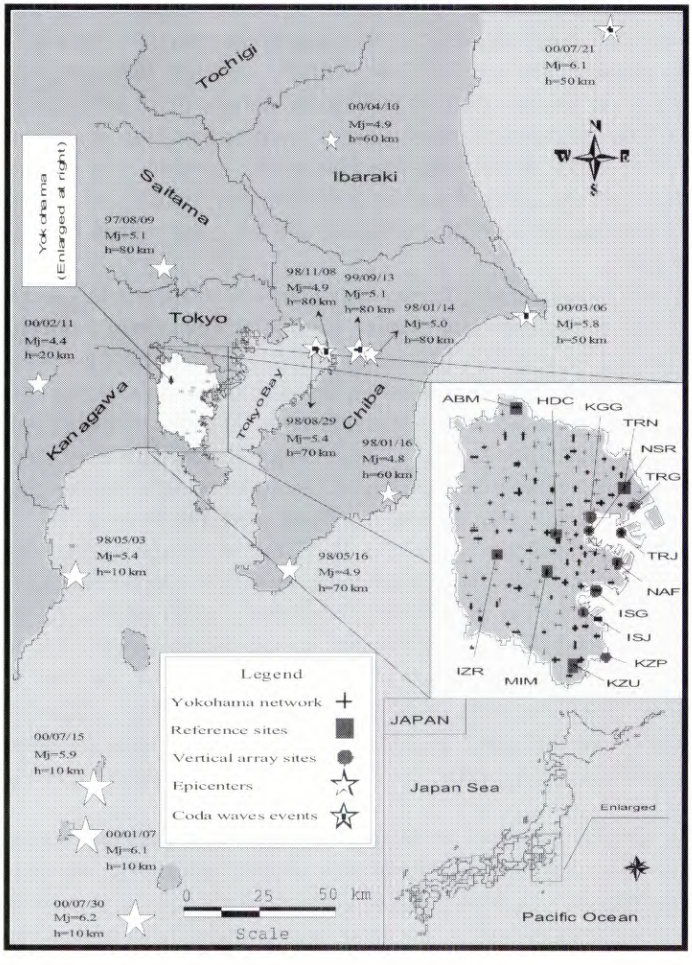


Figura 11. Posición geográfica de la Ciudad de Yokohama, su red acelerográfica, y los epicentros de los eventos sísmicos analizados.

La Figura 12 ilustra la aplicación práctica de los métodos anteriormente mencionados utilizando registros acelerográficos y de micro-temblores obtenidos en un punto de observación caracterizado por la presencia de gruesos paquetes sedimentarios. Si comparamos los acelerogramas ploteados en las Figuras 12(a) y 12(b) podemos afirmar lo siguiente: 1) Los registros acelerográficos obtenidos en la roca de base duran notablemente menos tiempo que el obtenido en la superficie, y 2) La amplitud de las aceleraciones registradas en superficie excede con creces las registradas en la roca de base. Estas dos observaciones prueban sin lugar a dudas que el paquete sedimentario amplifica las ondas sísmicas. Sin embargo, a la hora de determinar en que frecuencias del espectro los paquetes sedimentarios ocasionan las mayores amplificaciones primero debemos aplicar la transformada de Fourier a los registros en el dominio del tiempo, después debemos suavizar los espectros resultantes, y por último aplicar las técnicas basadas en el cálculo de cocientes espectrales anteriormente mencionadas.

Aunque el ejemplo mostrado en la Fig. 12 incluye solamente los resultados obtenidos del análisis de un solo grupo de datos, las funciones de transferencia finales asignadas a cada punto de observación resultan de la determinación del espectro medio a partir de ondas S para 15 terremotos, ondas coda para cinco de ellos, y tres registros de micro-temblores siguiendo el procedimiento de cálculo anteriormente descrito.

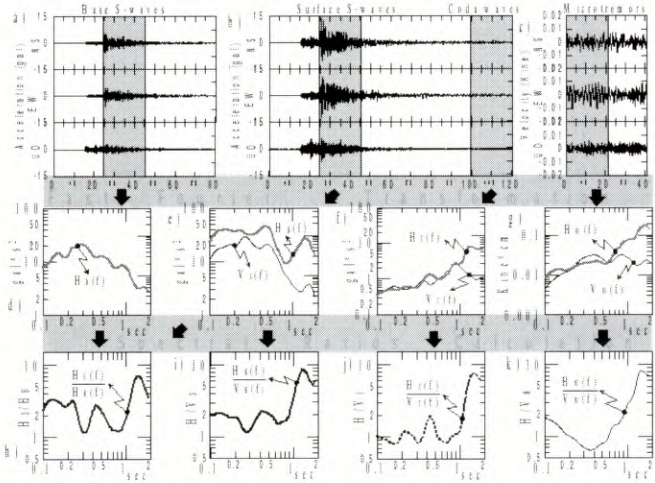


Figura 12. Procedimiento a seguir cuando aplicamos técnicas basadas en el cálculo de cocientes espectrales. (a), (c) Selección de una sección de 20.48 segundos de largo de los registros. (d), (g) Espectros de Fourier para las componentes horizontales después de suavizarlos mediante la aplicación de un filtro logarítmico con un coeficiente b=15. (h), (k) Funciones de transferencia después de dividir los espectros resultantes según indican las flechas. Las funciones de transferencia mostradas en la última fila corresponden a los siguientes métodos: (h) Espectro de amplificación de las componentes horizontales en superficie con respecto a registros en profundidad (HS/HB), y los siguientes espectros de amplificación de las componentes horizontales con respecto a las verticales (H/V); (i) El H/V de la sección de ondas S; (j) el H/V de las ondas Coda; y (k) el H/V de micro-temblores.

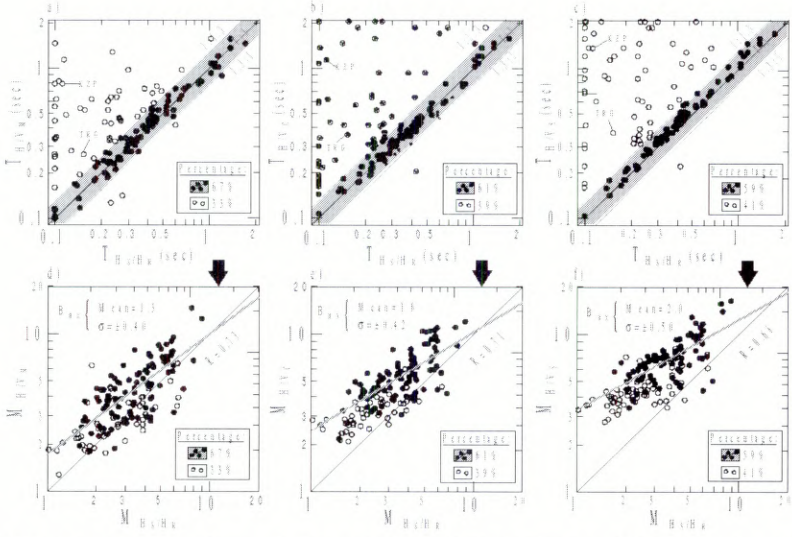


Figura 13. Relación entre los valores de los períodos (T) predominantes (Gráficos a, b, y c) y cocientes de amplificación espectral (M) máximos (Gráficos d, e, y f) obtenidos de la aplicación de la técnica H/V (eje vertical) versus los obtenidos con el método HS/HR (eje horizontal). El análisis estadístico de los tres gráficos mostrados en la banda inferior incluye solo los puntos de observación incluidos en la banda gris que representa no más de un 30% de desviación de los períodos predominantes en los tres gráficos mostrados en la parte superior.

Los resultados ilustrados en la Figura 13 indican que si consideramos parámetros clave como los períodos predominantes (T) y los cocientes de amplificación máxima (M), y aceptamos no más de un 30% de desviación en la determinación de los períodos predominantes, entonces el cociente espectral H/V de microsismos proporciona una mejor coincidencia de las estimaciones de la respuesta del perfil geológico. El análisis de la coincidencia de estos dos parámetros constituye uno de los procedimientos más ampliamente aplicados en estudios de este tipo. No obstante, el restringir el análisis a tan solo dos parámetros hace aún mucho más difícil el discernimiento de la correlación entre los espectros de amplificación y los cortes geológicos correspondientes, sobre todo cuando contamos con los 290 espectros de amplificación mostrados en la Fig. 14.

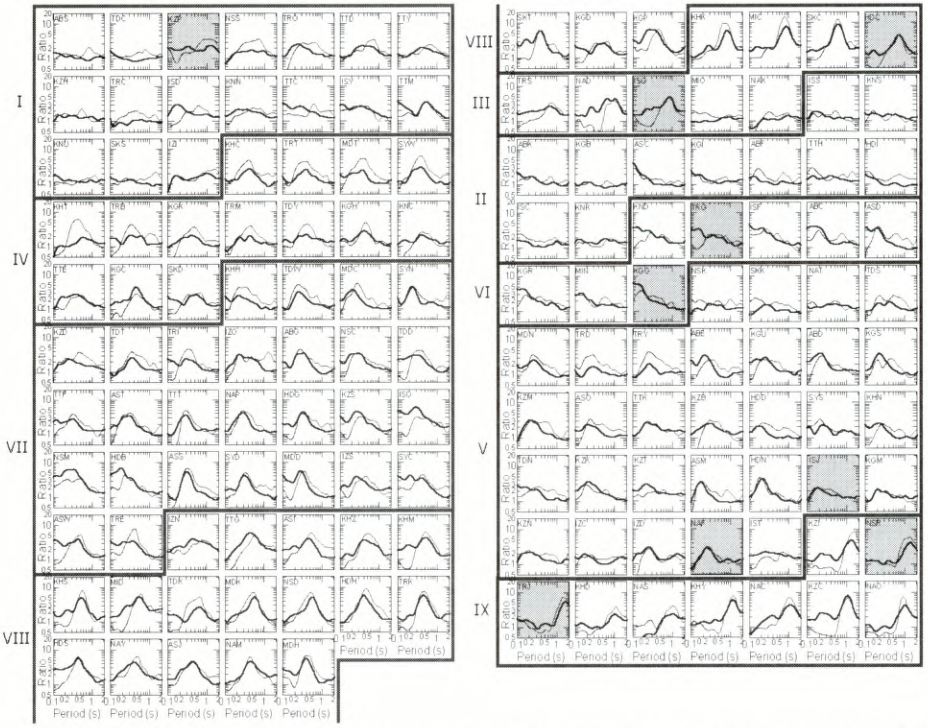


Figura 14. Espectros de amplificación obtenidos de la aplicación de la técnica H/V a microtemblores (línea gruesa), y el análisis de registros acelerográficos con el método HS/HR (línea fina). A pesar de mostrar una cierta diversidad en su forma general, los espectros de amplificación siguen ciertos patrones.

8. Método para la Clasificación de las Condiciones de Sitio utilizando Patrones de Amplificación Espectral para Cocientes H/VM de Microtemblores

Cuando tratamos de discernir la relación entre los espectros de amplificación obtenidos del análisis de registros acelerográficos, micro-temblores, y los cortes geológicos correspondientes debemos considerar los siguientes factores:

a) Mapas geológicos por lo general muestran solo la distribución de los estratos más cercanos a la superficie. Por tanto, la relación entre los períodos predominantes y la geología local se torna clara solo en el caso de períodos de resonancia cortos (altas frecuencias), o sea, en el caso de estratos de resonancia cercanos a la superficie.

b) Cortes geológicos diferentes pueden de hecho aparecer caracterizados por períodos predominantes y máximos de amplificación similares. Sin embargo, la forma general de sus espectros de amplificación correspondientes pueden aún mostrar características bien contrastantes.

En este contexto, decidimos tomar en consideración estudios anteriores cuyos resultados sugieren que los cocientes espectrales correspondientes a diferentes frecuencias reflejan las características del corte geológico a diferentes profundidades. Visto desde este ángulo, podemos visualizar el corte geológico como un filtro múltiple compuesto de diferentes estratos que opera sobre los ondas sísmicas. Por tanto, podemos considerar la forma general de los espectros de amplificación como una representación indirecta del corte geológico local. Si considerando su forma general los espectros de amplificación forman grupos homogéneos, entonces los cortes geológicos correspondientes deben tener características similares. Para probar la validez de esta hipótesis decidimos agrupar todos los puntos de observación mediante la aplicación de técnicas de reconocimiento de patrones, y así tener en cuenta, al unísono, los siguientes factores:

a) La forma general de los espectros de amplificación H/V_M y H_S/H_R a lo largo del rango de frecuencias de interés (0.5 ~ 10 Hz).
b) El nivel de coincidencia entre los períodos predominantes y los máximos de amplificación.
c) El nivel de coincidencia general entre las estimaciones basadas en el análisis de registros acelerográficos y micro-sismos.

Los bloques de puntos de observación delimitados en la Figura 14 con líneas rojas gruesas ilustran el resultado de un análisis cuyos detalles el lector interesado puede encontrar en las referencias bibliográficas. Como se puede observar en la Figura 14, estos grupos de puntos de observación exhiben espectros de amplificación con características muy similares dentro del grupo, pero diferentes con respecto a otros grupos. También pudimos corroborar que tanto los perfiles de velocidad de ondas S, como los cortes geológicos muestran características similares entre los miembros de un mismo grupo, pero diferentes entre grupos. Las Figuras 15 y 16 constituyen una condensación de las características de estos nueve grupos típicos o Patrones de Amplificación Espectral (PAE).

De esta manera, la aplicación de técnicas de reconocimiento de patrones nos permite revelar una estructura jerárquica compuesta de categorías que reflejan las características relacionales entre estimaciones basadas en el análisis de registros acelerográficos y de micro-temblores. El cálculo de cocientes espectrales entre las componentes verticales en superficie y en profundidad, así como el cálculo teórico de cocientes espectrales H/V para ondas planas SV también confirman lo robusto del esquema de agrupamiento obtenido. Los nueve patrones de amplificación espectral (PAE) así validados constituyen el núcleo de nuestro método para la evaluación de las condiciones de sitio. El método representa un esfuerzo

encaminado a expandir la utilidad del análisis de micro-temblores como herramienta para estimar los efectos de sitio a través del mejoramiento de su confiabilidad. Para lograrlo, explotamos el nexo entre los nueve patrones de amplificación espectral revelados en nuestras investigaciones y las condiciones geológicas locales correspondientes. La aplicación del método consta de tres pasos:

1) Cálculo de los espectros de amplificación H/V_M y determinación de los períodos predominantes y los máximos de amplificación espectral correspondientes: Utilizamos plural para enfatizar la posibilidad de evaluar un grupo de espectros de amplificación basados en el análisis de micro-temblores, y no tan solo casos aislados. Una vez que estimamos los períodos predominantes y los máximos de amplificación correspondientes, se comparan con los característicos de los Patrones de Amplificación Espectral (PAE) utilizando el gráfico mostrado en la Figura 15. Esto proporciona una forma rápida para evaluar la confiabilidad de los parámetros basados en el método H/V_M. Cuando los valores plotean sobre una de las regiones de solapamiento, para juzgar la validez de los valores basados en el H/V_M debemos chequear la coincidencia de la forma general del nuevo espectro de amplificación H/V_M con aquellos típicos para los nueve PAE mostrados en la Figura 16.

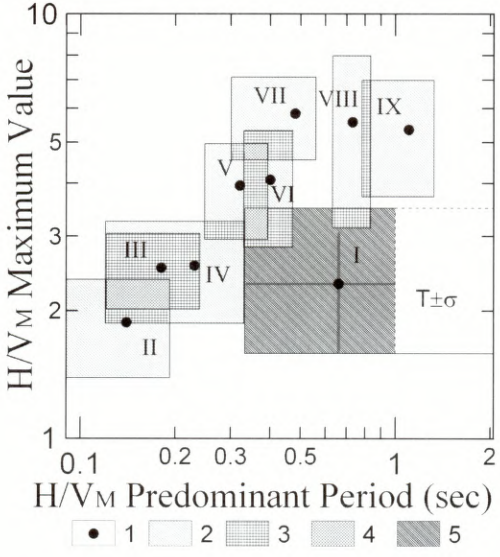


Figura 15. Gráfico propuesto para llevar a cabo una evaluación preliminar de la confiabilidad y validez de las estimaciones de los efectos de sitio basadas en el método H/V_M (microtemblores). Los rectángulos representan regiones de influencia (períodos predominantes y máximos de amplificación espectral para los nueve Patrones de Amplificación Espectral (PAS). 1: Valores medios para cada patrón, 2: Ausencia de solapamiento, 3: Solapamiento entre dos regiones, 4: Solapamiento entre tres regiones, 5: Región de influencia del Patrón I.

2) Evaluación de la Confiabilidad de los Espectros H/V_M obtenidos: En este paso comparamos la forma de los espectros calculados en el paso I con los correspondientes a los nueve Patrones de Amplificación Espectral (PAE). Es decir, clasificamos los puntos de observación y tratamos de determinar si su espectro H/V_M correspondiente se ajusta a una de las categorías tipificadas por los PAE. Si consideramos que espectros de amplificación H/V_M análogos sugieren la presencia de cortes geológicos similares, entonces podemos extrapolar la confiabilidad de los H/V_M inherente a cada patrón a los nuevos miembros.

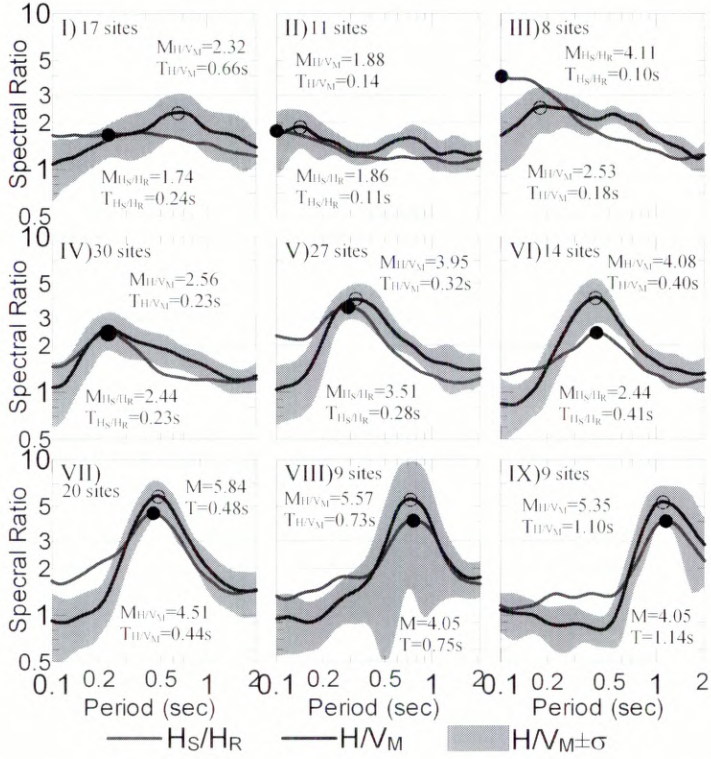


Figura 16. Gráfico para examinar de forma más exhaustiva la coincidencia de nuevos espectros de amplificación H/V_M con la forma general de la media de los espectros de amplificación H/V_M que caracterizan los nueve Patrones de Amplificación Espectral (PAE). La zona sombreada representa el H/V_M medio. Una vez identificados, podemos eliminar la tendencia multiplicando los espectros H/V_M obtenidos por la serie de coeficientes de corrección representados por la línea de puntos. En el caso de tratarse de un punto de medición clasificado como perteneciente al grupo I la eliminación de esta tendencia se torna ineludible. En el caso del resto de los patrones la eliminación de esta tendencia también proveerá resultados más cercanos a aquellos que obtendríamos si utilizáramos registros acelerográficos.

3) Asignación de Parámetros: Una vez que hemos identificado un nuevo espectro de amplificación H/V_M como perteneciente a uno de los nueve patrones podemos utilizar la tendencia de las desviaciones típicas para cada patrón para corregir los nuevos espectros de amplificación H/V_M. Esta tendencia aparece representada en la Figura 16 con líneas de puntos. Para concluir, determinamos los períodos predominantes y los máximos de amplificación a partir de los espectros corregidos.

Esta técnica y el procedimiento aplicado en la determinación de los Patrones de Amplificación Espectral (PAE) lo podemos extrapolar al análisis de diferentes métodos y parámetros. La posibilidad de obtener estimaciones más confiables de los parámetros que describen los efectos de sitio a través del empleo de un método relativamente simple, y a un costo económico comparativamente bajo, así como la posibilidad de aplicarlo sin restricciones de hora o lugar convierte la técnica de micro-temblores en una opción particularmente atractiva.

9. Referencias Bibliográficas

1. Rodríguez V.H.S. and Midorikawa S., 'Applicability of microtremors in assessing site effects on ground motion', Earthquake engineering & Structural Dynamis, 31, 261-279, 2002
2. Rodríguez V.H.S. and Midorikawa S., 'Comparison of Spectral Ratio Techniques for Estimation of site Effects using Microtremor Data and Earthquake Motions recorded at the Surface and in Boreholes', Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 32, 1691-1714, 2003
3. Sardiña V.H.R. and Midorikawa S., 'Site Classification based on Spectral Amplification Patters for Microtremor H/V Ratios', 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1770, Vancouver, B.C., Canada, August, 2004

Lo que debemos aprender a través de experiencias pasadas en los desastres por terremotos y otros desastres naturales

Kazuoh Seo

Traducción: Walter Salazar

1. Confusión y orden en la sociedad durante los desastres por terremotos – desde el terremoto de Kanto de 1923 hasta el terremoto de Kobe de 1995, y....?

1.1 Introducción

EN ESTA sección, se realiza una reseña histórica sobre los terremotos que han causado serios daños a la población japonesa. Antes de introducir ejemplos específicos, la manera como nos debemos preparar para futuros terremotos es mostrada en la Figura 1. Siempre existe una incertidumbre de cómo debemos prepararnos para futuros terremotos, por tanto, se necesita preparar estrategias y medidas de mitigación siempre basándose en experiencias pasadas. Esto es como un círculo entre experiencias pasadas y medidas futuras. Si se desea una excelente preparación, se necesita entender las bases y/o las características de nuestra sociedad incluyendo tanto las condiciones naturales y la relación entre muchos campos de investigación.

La Figura 2 muestra la distribución de recientes desastres naturales en el Japón, tanto para terremotos, lluvia, tifones o erupciones volcánicas.

Un famoso físico japonés llamado Dr. Torahiko Terada (1878-1935) introdujo una filosofía sobre la ciencia de los desastres naturales. Su famosa frase era: "Otro desastre nos ataca después que hemos olvidado el último", la cual se basaba en consideraciones de muchos trabajos de campo.

Hubo una importante controversia de un futuro terremoto en Tokio entre dos sismólogos. El Dr. Akitsune Imamura, Profesor asociado de la Universidad Imperial de Tokio (actualmente la Universidad de Tokio), predijo que un gran terremoto podría golpear Tokio en los próximos 50 años, y que las víctimas serían más de 100,000 debido a los incendios. Todos los ciudadanos entraron en una gran confusión ya que el Dr. Imamura publicó su predicción en una revista popular del

Japón. Dr. Fusakichi Omori, la autoridad japonesa en sismología y Profesor de la Universidad Imperial de Tokio inmediatamente negó estas predicciones para evitar el pánico en la ciudadanía. Pero el terremoto predicho ocurrió en 1923 dieciocho años después que el Dr. Imamura presentó su primer reporte. La pregunta es cómo el Dr. Imamura pudo realizar una predicción tan precisa a pesar de existir en ese tiempo una sismología tan pobre.



Figura 1. Características de la sociedad, incluyendo tanto las condiciones naturales y la relación entre diversos campos de investigación.

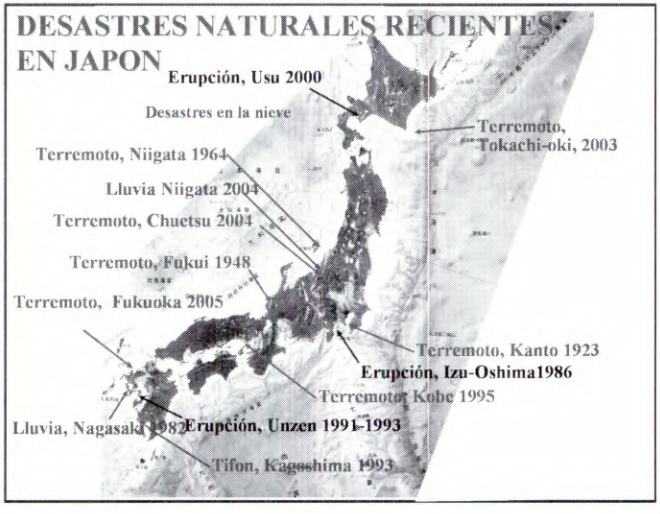


Figura 2. Mapa de ubicación de las ciudades japonesas que han sufrido desastres recientemente.

1.2 La experiencia del terremoto de Kanto de 1923.

El terremoto de Kanto con una magnitud de 7.9 ocurrió dos minutos después del mediodía, el día 1° de Septiembre de 1923. Existen muchas publicaciones y fotos describiendo la condición catastrófica en Tokio (Figura 3). Hay muchas publicaciones científicas y técnicas sobre aspectos sismológicos, geológicos, geotécnicos e ingenieriles en detalle. Por tanto, es posible reconocer el mecanismo de la fuente y la distribución de daños en este evento. El principal problema fue el fuego justamente después del terremoto. Un científico en la Universidad de Tokio realizó un levantamiento preciso sobre el esparcimiento de los incendios en la ciudad. La zonas centrales de Tokio y Yokohama fueron completamente destruidas por el fuego y un total de 140,000 personas murieron. En aquel tiempo, la población de Tokio era aproximadamente de 2 millones de personas. Existían sismómetros mecánicos en la Universidad Imperial que registraron el movimiento fuerte durante el terremoto, pero ninguno de ellos pudo registrar la sacudida completamente. La intensidad en Odawara, Fujisawa, Kamamura, Tokosuka en la Prefectura de Kanagawa, y Tateyama en la Prefectura de Chiba fue de 6, la cual corresponde a la máxima intensidad en la escala japonesa. La proporción total de casas colapsadas entre el total de viviendas habitadas fue más del 50% en estas áreas. Esta proporción fue del 30% en Yokohama y menos del 10% en Tokio.



Figura 3. Condición catastrófica de Tokio después del terremoto de Kanto en 1923.

1.3 La experiencia del terremoto de Fukui de 1948

Un terremoto de carácter superficial ocurrió justo por debajo del valle de Fukui en 1948, después de tres años de la segunda guerra mundial. La población japonesa justamente estaba recuperándose de las ruinas de la guerra. El movimiento del suelo ha sido estimado con una aceleración máxima de 0.6 g, y fue tan fuerte que la ciudad de Fukui fue completamente destruida como se muestra en la Figura 4. Justamente después del terremoto, el gobierno evaluó la proporción de casas colapsadas y casas habitadas con un total del 100% en la mayoría de lugares en el valle de Fukui. Posteriormente, el Instituto de Arquitectura del Japón re-evaluó esta proporción de daños, ya que el 100% parecía ser demasiado grande. Pero se encontró una tendencia similar, aunque el 100% fue sustituido por el 80%. Cabe destacar que el efecto de sitio aparece como un factor importante en este terremoto, ya que el mayor daño ocurrió solamente en la zona de suelos blandos del valle. No hubo casas colapsadas en las afueras del valle. Después del terremoto, trabajos de campo geodésicos confirmaron el movimiento lateral de desgarre en el mecanismo del terremoto. El terremoto de Fukui también se caracterizó por grandes incendios en la región central de la ciudad.



Figura 4. Terremoto de la ciudad de Fukui, 1948. La ciudad fue completamente destruida.

1.4 La experiencia del terremoto de Niigata de 1964

Un terremoto de magnitud 7.5 ocurrió en el Mar del Japón, aproximadamente a 60km de la ciudad de Niigata. Se le llamó el terremoto de Niigata, ya que el daño en esta ciudad fue muy grande a pesar de la lejana distancia de ésta al epicentro. Una característica especial de este terremoto fue el fenómeno de licuefacción en arena suelta a lo largo del Río Shinano, la cual produjo el volcamiento de estructuras de concreto armado, falla en puentes, flujos de lodo e inundaciones. Grandes reservorios de aceite se incendiaron después de un comportamiento de chapoteo debido a movimientos de largo período. Como puede verse en la Figura 5. Una mujer fue rescatada satisfactoriamente de la azotea de un edificio el cual se había volcado sin sufrir ningún daño ya que éste volcó muy lentamente después de la sacudida fuerte. También, en este caso se encontraron daños severos para condiciones de suelos blandos a lo largo del río. El centro de la ciudad de Niigata que fue desarrollado hace mucho tiempo, solamente sufrió daños leves.

1.5 Observaciones en base a estas experiencias

Revisando estas experiencias, podemos destacar aspectos importantes para los futuros desastres por terremoto. El punto es cómo podemos cambiar la situación de pánico y confusión para establecer un orden durante y/o después de una catástrofe. Las lecciones aprendidas en desastres de terremotos pasados son muy importantes y útiles para la preparación futura y tomar las medidas necesarias para mitigar los daños. Pero se deben revisar cuidadosamente los antecedentes históricos, las condiciones económicas, las condiciones naturales y sociales de cada experiencia individual en el pasado ya que podrían ser distintas de una experiencia a otra.



Figura 5. Terremoto de Niigata de 1964. Volcamiento de estructuras de concreto armado y falla en puentes debido a la licuefacción del suelo.

1.6 La experiencia del terremoto de Kobe de 1995

Un terremoto de magnitud 7.0 atacó repentinamente la ciudad de Kobe y distritos aledaños en la madrugada del 17 de enero de 1995. La gente pensaba que la sismicidad en esta zona era mucho menor que en la zona de Tokio, sin embargo sismólogos y geólogos habían publicado la posibilidad de un terremoto grande. Por tanto, justamente después del terremoto, nadie obtuvo información confiable. La municipalidad de Kobe había estado desarrollando construcciones en rellenos artificiales mar adentro y en las montañas tras la ciudad. Por tanto, Kobe era una de las ciudades más avanzadas y preciosas en el Japón. Pero se tornó muy vulnerable durante el terremoto, el cual causó una franja de daño muy fuerte que atravesó la zona central de la ciudad (Figura 6). La zona con mayores daños (Figura 7) corresponde al lugar donde fallecieron 5,500 personas, pero al mismo tiempo, ésta fue definida con una Intensidad de 7, la máxima en la escala japonesa después que se dispuso ampliarla tras el terremoto de Fukui en 1948. Se realizaron muchos estudios en el campo de la sismología y la ingeniería sísmica utilizando registros de movimiento fuerte alrededor de las zonas dañadas, como características del movimiento fuerte, inversiones de la fuente sísmica, características en la atenuación de la aceleración y velocidad máxima del suelo, distribución de daños, etc. El servicio del tren bala (Shinkansen) sufrió daños severos y su reconstrucción fue de carácter urgente. Afortunadamente no había servicio de trenes porque el terremoto ocurrió en la madrugada. Las edificaciones que sufrieron mayores daños fueron las que habían sido diseñadas con un código sísmico antiguo.

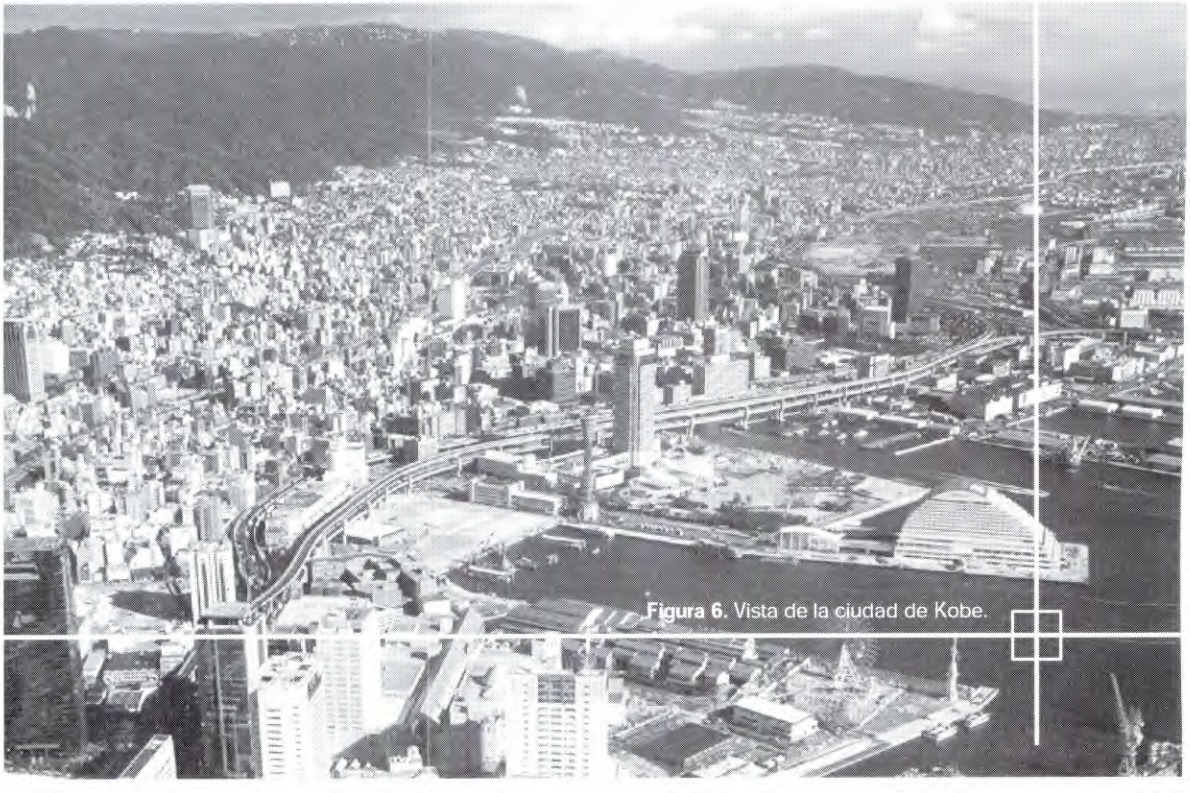


Figura 6. Vista de la ciudad de Kobe.

El autor encontró un ejemplo típico que confirma la diferencia de daños entre dos edificios similares diseñados con diferentes códigos sísmicos. El más viejo fue construido en base a las normativas antiguas vigentes antes de 1981, el cual sufrió grandes daños. En el caso contrario, el edificio nuevo no sufrió daños esto fue confirmado mediante entrevistas a las personas residentes. Las carreteras también sufrieron grandes daños y el tráfico fue interrumpido durante más de un año. Mucha gente perdió sus propias casas, y tuvo que estar pacientemente 5 largos años en casas temporales. Sumando a estos problemas, la ciudad de Kobe ha sufrido frecuentemente deslizamientos y desastres por lluvia. La municipalidad alarmó a la población que deslizamientos adicionales inducidos por lluvia podrían ocurrir después del terremoto. También las casas tradicionales japonesas sufrieron grandes daños, debido al gran peso del techo, los cuales son convenientes para la protección contra desastres por tifones. Los residentes de estas casas se organizaron para realizar actividades de rescate en sus comunidades. Después del terremoto, muchos señalaron los serios problemas sociales que desencadenó este evento. La gente recibió un pago doble por sus casas colapsadas y una casa nueva, asistencia médica y psicológica para personas con trauma post-desastre, y educación para sus hijos.

Después de 10 años del terremoto, el 17 de Enero de 2005, hubo ceremonias organizadas por la prefectura de Hyogo y otras organizaciones en la ciudad de Kobe. En la impresión del autor, los gobiernos locales parecen haber terminado con todas las actividades post-terremoto celebrando este tipo de ceremonias. Sin embargo al visitar la ciudad de Kobe, se pueden encontrar muchos monumentos en memoria del desastre de 1995. De hecho, en algunas partes de la ciudad la reconstrucción no ha sido finalizada aún después de 10 años.

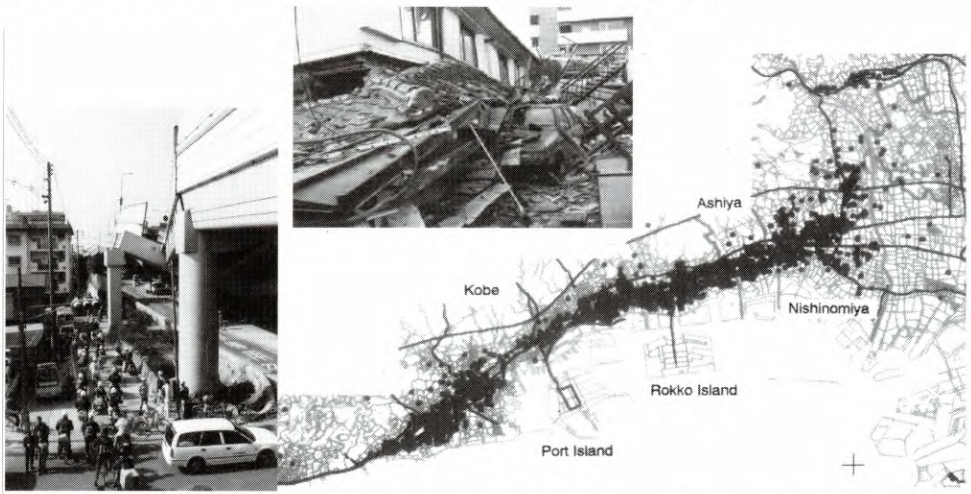


Figura 7. El mapa a la derecha muestra la zona de mayor intensidad (puntos) durante el sismo. Las imágenes de la izquierda, muestran el colapso del Honshin-Highway.

1.7 El terremoto de Niigata de 2004.

Recientemente un terremoto de magnitud 6.8 atacó el área de Chuetsu, el distrito central de la prefectura de Niigata el 23 de octubre de 2004 (Figura 8a). Las áreas dañadas se distribuyeron en algunas partes planas de ciudades locales y pueblos, pero en la mayoría de los casos, en algunas aldeas situadas aleatoriamente en las montañas. Muchas casas colapsaron y se reportó una intensidad de 7, la máxima en la escala japonesa, observada alrededor del epicentro. El número de víctimas fue de 40, no solamente por el colapso de las viviendas, sino por enfermedades y exaltación después del evento. Las líneas ferroviarias del tren bala (Shinkansen) sufrieron grandes daños incluyendo descarrilamiento, destrucción de columnas y daños en túneles. Por fortuna estas fallas no dejaron victimas. Después de dos meses, la fuerte nieve cubrió la parte total del área dañada por un período de tres meses con un espesor de más de 3m. Tales condiciones dificultaron los trabajos de reconstrucción en esta zona. Se observaron varios deslizamientos de tierra en zonas montañosas

1.8 El terremoto de Fukuoka-oki de 2005.

Un terremoto de magnitud 7.0 atacó la ciudad Fukuoka en distritos aledaños en la parte norte de la Isla de Kyushu el 20 de marzo de 2005 (Figura 8b). Se ha reconocido que esta zona es una de las que posee más baja actividad sísmica en el Japón. De ahí que los sismólogos afirmaron la poca confianza que existe en la predicción de terremotos. Los daños no fueron muy severos, a excepción de los localizados en una pequeña isla cercana a la zona epicentral.

La ciudad de Fukuoka posee 1.3 millones de habitantes y el 70% de la población vive en residenciales con edificios altos. Las fallas en estos edificios fueron secundarias (no estructurales). Las oficinas de Fukuoka trabajaron excepcionalmente bien a pesar de no tener experiencia en desastres naturales.



Figura 8a. Daños en las ciudades de Kawaguchi durante el terremoto de Nigata en 2004.

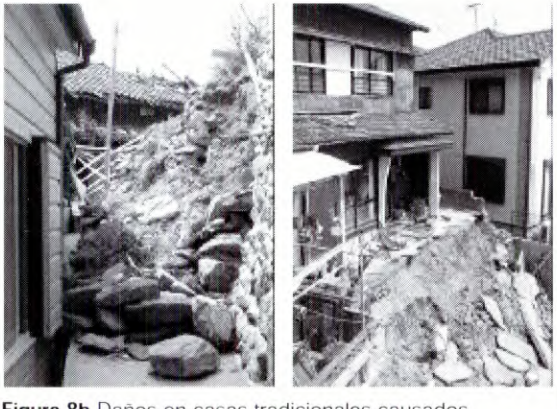


Figura 8b Daños en casas tradicionales causados por el terremoto de Fukuoka en 2005.

1.9 Comentarios adicionales en base a las experiencias de terremotos recientes. Después del terremoto de Kobe de 1995, el gobierno financió la preparación de medidas completas en *hardware* y *software* en términos de estrategias para la mitigación de futuros terremotos grandes. Al mismo tiempo, una revisión rápida fue realizada para confirmar medidas típicas realizadas por el gobierno japonés en las últimas décadas. El primer intento para preparar una ley nacional para un futuro terremoto de magnitud 8.0 en la zona de Tokai fue realizado en 1978. Las municipalidades esperaban que un evento produjera una intensidad sísmica de 6 o más para preparar las provisiones completas antes de un terremoto. En 1992, el gobierno declaró que en cualquier lugar del distrito de Kanto, incluyendo Tokio y Yokohama, existía la posibilidad de que un terremoto de magnitud 7.0 ocurriera muy pronto, sin embargo, no se pudo identificar el lugar exacto de la fuente. Más aún en 1997, se sugirió la posibilidad de un terremoto de magnitud 8.0 con un desplazamiento de falla entre 5 y 10m en la Prefectura de Kanagawa, muy pronto o después de 100 años. Aceptando estas consideraciones, la oficina de la ciudad de Yokohama, por ejemplo, preparó un mapa de micro-zonificación (Figura 9). En el 2003 un sismólogo destacó la importancia de revisar tan pronto como fuera posible una planta nuclear situada en la proyección de la falla en la superficie del terremoto hipotético de Tokai.

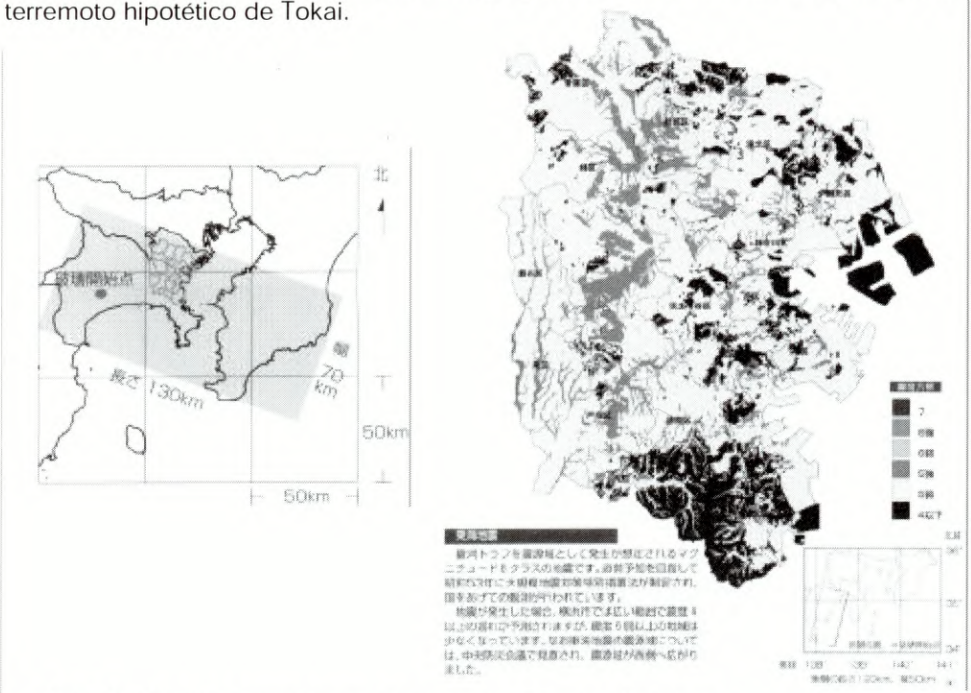


Figura 9. Mapa de microzonificación sísmica de la Ciudad de Yokohama.

El autor enfatiza y resume sus comentarios otra vez más acerca de los tópicos necesarios para establecer una ciudad libre de desastres. Asimismo, refuerza la importancia de la cooperación entre diferentes campos de investigación, ya que los desastres pueden ser concurrentes como un terremoto después de unas fuertes lluvias, o fuertes tormentas antes de un terremoto, fuertes lluvias después de una erupción volcánica, etc. De acuerdo a datos estadísticos japoneses; los desastres por lluvia causan mayor número de víctimas que aquellos por terremotos. Actualmente en el 2004, las islas japonesas han sido atacadas por 10 tifones ocasionando grandes deslizamientos e inundaciones. Una lluvia causó una precipitación de 400mm en total durante un día y medio. Recientemente, el Ministerio de Construcción preparó una nueva ley para prohibir la construcción en zonas de amenaza alta. Las erupciones volcánicas pueden ocasionar otro tipo de problemas los cuales explicará el autor en detalle en otra oportunidad. (Figura 10)



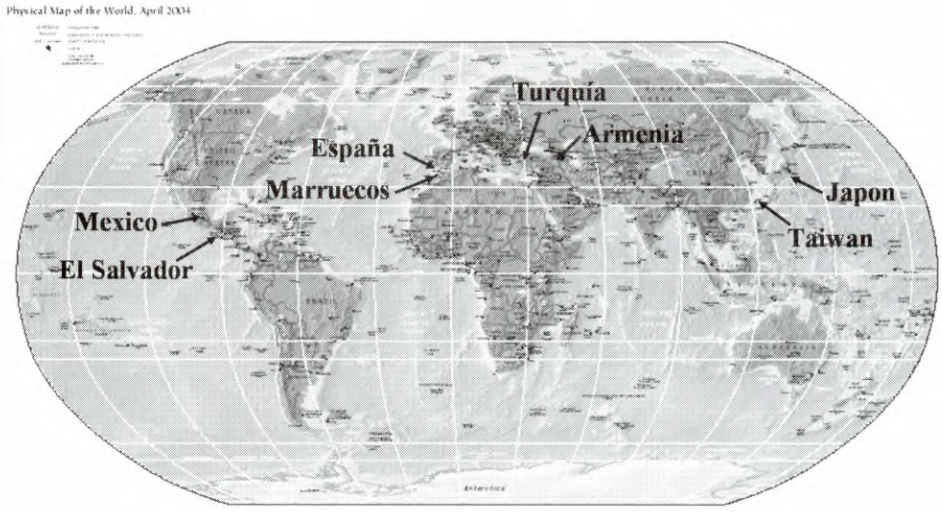
Figura 10. Nueva ley en Japón, para controlar utilización del suelo y así reducir el riesgo de deslizamientos de tierra.

2. Ingeniería estructural y aspectos de micro-zonificación sísmica relacionados con terremotos devastadores en el mundo.

2.1 Introducción

En esta sección se realiza una revisión de terremotos típicos en el mundo que han causado daños severos. (Figura 11)

Figura 11



2.2 El terremoto de Michoacán, México de 1985

Un terremoto de subducción entre la placa de Cocos y Norteamérica golpeó la ciudad de México ocasionando grandes daños a pesar de la distancia epicentral de 350km. Arcillas extremadamente blandas amplificaron el movimiento sísmico produciéndose el colapso de muchos edificios en la región central de la ciudad. Las personas residentes en diferentes condiciones de suelo, como flujos de lava o roca volcánica en la superficie, no imaginaba el gran daño en la zona central. Los registros de movimiento fuerte se hicieron en varios lugares con condiciones de sitio distintas y fueron abiertos al público rápidamente. Mediciones de micro-trepidaciones fueron realizadas por un grupo de expertos japoneses con el objetivo de explicar las condiciones de sitio. Existe una buena correlación entre las micro-trepidaciones y los registros de movimiento fuerte para condiciones de suelo blando.

Posteriormente la técnica de micro-trepidación fue aplicada para generar mapas de micro-zonificación. Las Figuras 12a y 12b muestran un ejemplo de la estimación de la respuesta espectral de aceleración de un sistema de un grado de libertad con período de 2.0s y un amortiguamiento del 5% durante el terremoto de 1985. El período fundamental de los edificios fue confirmado también utilizando micro-trepidaciones (Figura 13b). Realizando estos trabajos de campo, las características de las condiciones de suelo blando en la ciudad de México y la importancia de las condiciones de sitio durante los terremotos fueron examinadas en detalle en esta ocasión.

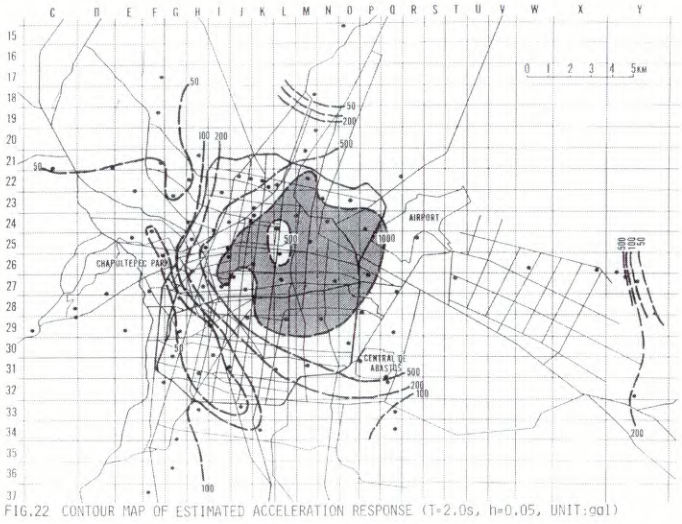


FIG.22 CONTOUR MAP OF ESTIMATED ACCELERATION RESPONSE (T=2.0s, h=0.05, UNIT:gal)

Figura 12a. Mapa de contornos de estimación de la respuesta de la aceleración para un periodo de 2.0s y un amortiguamiento del 5% unidades (cm/s2).

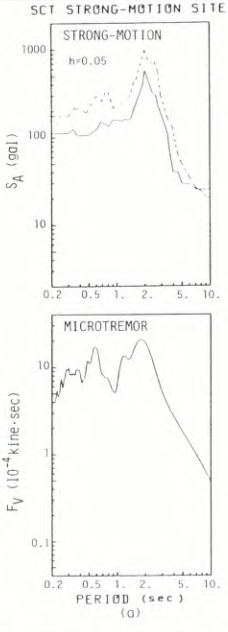


Figura 12b. Comparación entre micro trepidación y registro de movimiento fuerte en la ciudad de México.



Figura 13a. Edificio colapsado y dañado en la ciudad de México.

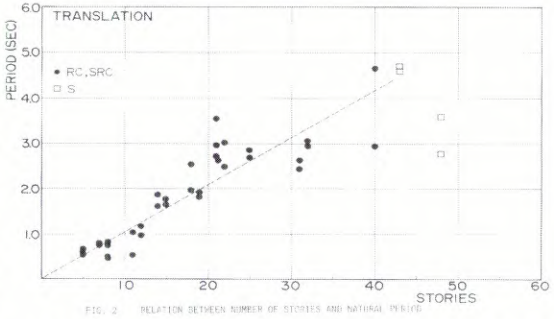


Figura 13b. Período fundamental de vibración vrs. Numero de pisos para edificios en ciudad de México.

2.3 Los terremotos de Loma Prieta de 1989 y Northridge de 1994 en California

Después de las investigaciones de campo para ambos terremotos, se encontraron diferentes características de sitio entre San Francisco y Los Angeles. En el área de la bahía de San Francisco, los resultados de las mediciones de micro-trepidación muestran una gran diferencia entre las zonas dañadas y no dañadas. Sobre sitios de suelo blando ocurrieron grandes daños durante el terremoto de 1989; los períodos predominantes aparecen muy claramente con largas amplitudes, sin embargo para sitios de suelo firme sin daños, no se observaron picos predominantes en las micro-trepidaciones.

En Los Ángeles, las características de las micro-trepidaciones no coincidieron con las zonas dañadas y no dañadas. En otras palabras las condiciones de sitio aparecieron muy claras en San Francisco no así en la región de Los Angeles.

También se examinaron las características dinámicas de las estructuras utilizando micro-trepidaciones (Figura 14a y b). El período fundamental de un edificio alto fue medido en 2.0s, pero el período predominante durante la sacudida fuerte de 1989 fue de 3.0s, debido a los efectos no-lineales.

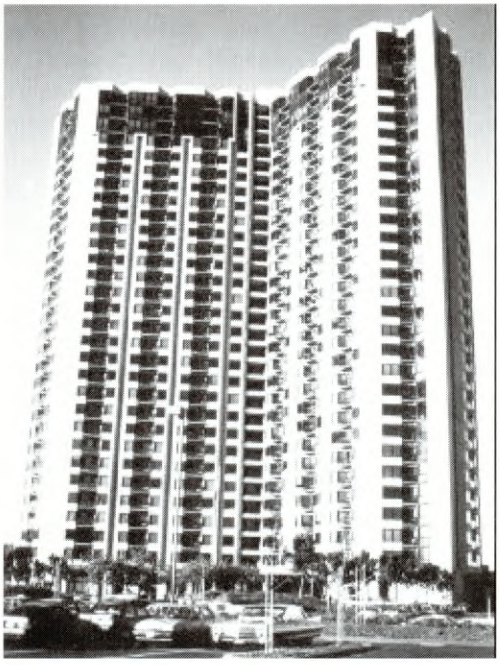


Figura 14a. Zona urbana de San Francisco. Se trata de ejemplificar las condiciones reales del suelo que no son apreciadas, cuando ya existen urbanizaciones.

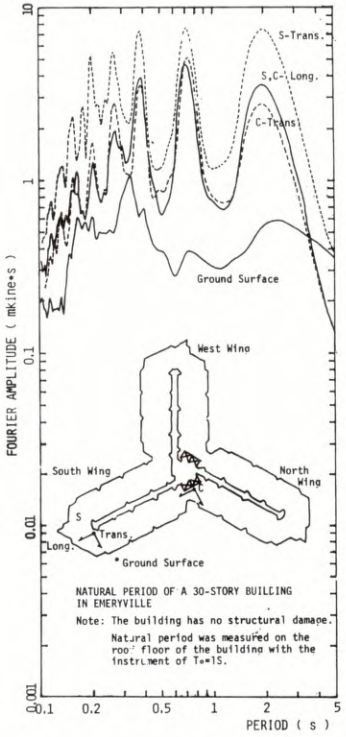


Figura 14b. Obtención del período fundamental y subsecuentes armónicas a través de espectros de amplitud de Fourier utilizando microtrepidaciones.

2.4 El terremoto de Chi-Chi en Taiwan de 1999.

El terremoto de Chi-Chi con magnitud 7.7 tuvo lugar en la parte central de Taiwán. Ya que fue un terremoto *entre*-placa de subducción, la ruptura de la falla inversa apareció en la superficie del suelo. Por tanto las estructuras fueron seriamente dañadas en la región epicentral (Figura 15). La ciudad capital, Taipei, se encontraba muy lejana a la zona del epicentro, por tanto el daño no fue considerable. Pero la ocurrencia de este terremoto sugiere la importancia de la micro-zonificación sísmica en el valle de Taipei, ya que la ciudad está creciendo hacia la zona con peores condiciones de suelo en el valle.

2.5 El terremoto de Kocaeli en Turquía de 1999.

Turquía ha sufrido frecuentemente terremotos debido a la sección norte de la Falla Anatolia. El terremoto de 1999 con magnitud de 7.8 ocurrió en el distrito de Kocaeli es uno de ellos. La ciudad de Adaparazi sufrió severos daños debido a la condición de suelos blandos (Figura 16a y b). Se realizó un intento de evaluar el movimiento fuerte durante la sacudida principal utilizando registros de réplicas y micro-trepidaciones. Solamente una estación registró el movimiento fuerte para el terremoto principal. En primer lugar, la sacudida principal fue estimada para varias estaciones donde las réplicas fueron registradas. Como primer paso, las razones espectrales de las réplicas fueron utilizadas para obtener una función de transferencia relativa, entre una estación arbitraria que ha registrado la réplica y la estación de referencia donde el evento principal fue registrado. En el segundo paso, la razón espectral de las micro-trepidaciones se utilizaron de la misma manera para transferir la información de la estación más cercana con registro de réplica a una estación arbitraria donde se mide la micro-trepidación. La información obtenida mediante esta metodología fue distribuida y comparada con la razón de daños en edificaciones. Como resultado, se realizaron mapas de micro-zonificación para períodos predominantes y amplificación.



Figura 15. El terremoto del Chi-Chi en Taiwán, 1999.

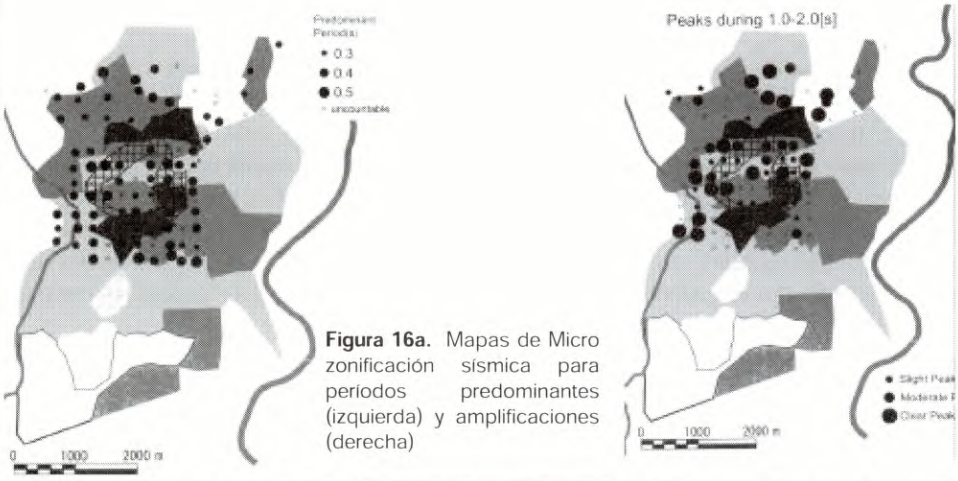


Figura 16a. Mapas de Micro zonificación sísmica para períodos predominantes (izquierda) y amplificaciones (derecha)



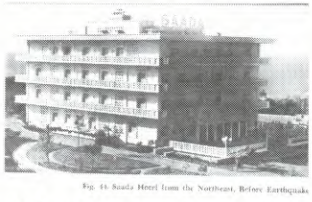
Figura 16b. El terremoto de Kocaeli en Turquía de 1999.

2.6 Ejemplo de un edificio con estructura vulnerable

Entre muchos países que han tenido desastres por terremoto, uno de los peores ejemplos es Marruecos (Figura 17). Los fundamentos de una estructura de concreto armado se basan en como combinar los marcos con las paredes ubicadas entre estos. No es imaginable la brecha entre lo que es visible durante la construcción y después de finalizarla.



Edificio en construcción a base de concreto armado



Antes del terremoto



Después del terremoto

Figura 17. Ejemplo de edificio con estructura vulnerable, en Marruecos.

2.7 Actividades de investigación sobre Ingeniería Sísmica en Armenia

El propósito de esta investigación era estudiar la reparación y preservación de templos tradicionales armenios como herencia cultural de esta nación. Al mismo tiempo, se estudió el terremoto de Spitak en 1988 y sus implicaciones sociales y técnicas. Se visitaron muchos templos tradicionales distribuidos en todo el país, encontrando algunos de ellos todavía funcionado y otros en estado de colapso inminente. La calidad de estas construcciones luce muy fina con materiales rocosos de origen volcánico. Esa tradición permanece porque la superficie del país está llena de rocas volcánicas.

Al mismo tiempo, se entrevistaron sismólogos e ingenieros sísmicos para aprender acerca del terremoto de Spitak. Las inspecciones después del terremoto han sido completadas y ya se han realizado reconstrucciones cuidadosamente. Pero existen serios problemas todavía en la ciudad de Yerevan, donde muchos edificios no han sido reforzados. Por tanto se concluye que el reforzamiento de residencias modernas en edificios requiere una atención urgente más que las iglesias tradicionales, ya que mucha gente todavía reside en estas edificaciones vulnerables. Además las iglesias tradicionales poseen dos ventajas, la primera es que la calidad de la construcción es muy buena debido a la tradición transmitida de generación en generación, y la segunda es que están cimentadas sobre suelo firme.

2.8 Los terremotos de El Salvador en 2001

El primer terremoto tuvo lugar el 13 de enero de 2001 con una magnitud de 7.8 con su epicentro en el Océano Pacífico. Este evento *intra*-placa provocó muchos deslizamientos en todo el país, ya que en su mayoría está cubierto por cenizas volcánicas ó "Tierra Blanca" (Figura 18a y b). Casas construidas de materiales tradicionales como el adobe y el bahareque fueron fuertemente dañadas, sin embargo, el bahareque tuvo un mejor comportamiento ante la sacudida fuerte que el adobe. Un segundo sismo ocurrió el 13 de febrero en la cadena volcánica dañando las mismas casas tradicionales.

Se concluyen tres aspectos importantes para el país: a) Alta sismicidad de la placa de Coco y la Cadena Volcánica, b) Condiciones especiales de suelo (Tierra Blanca) debido a actividad volcánica, c) Casas tradicionales de adobe y bahareque. Se recomienda realizar mapas de micro-zonificación en términos de amplificación, reforzar las casas vulnerables, una evaluación de riesgo, y preparación y educación de carácter general en el campo de los desastres naturales.

Figura 18a. Las Colinas, Santa Tecla, El Salvador.



Figura 18b. Carretera Panamericana curva La Leona , El Salvador



3. Aspectos de ingeniería concernientes a la mitigación del desastre por terremoto

3.1 Una revisión de cómo preparar movimientos del terreno para sitios específicos

Se ha realizado una evaluación de cómo analizar movimientos sísmicos para el diseño de estructuras a través del comité técnico en la Sociedad Japonesa para el Aislamiento Sísmico de Edificios (JSSI). El propósito es identificar insertazas e irregularidades en el proceso de obtener movimientos sísmicos. Para ello, se utiliza una base común de datos para la localización de la fuente sísmica suponiendo la ocurrencia del terremoto de Kanto de 1923, sitio de construcción en el área de la Bahía de Tokio (Figura 19b) y parámetros del suelo para el mismo sitio. Los seis miembros del comité, estimaron el movimiento del suelo utilizando sus propias herramientas y predecir movimientos del terreno en el lecho rocoso y en la superficie del terreno. La razón de la dispersión, se debe a que se utilizan diferentes modelos de la fuente y se introducen efectos no-lineales en los suelos blandos (Figura 19a).

Se realizó otra evaluación para confirmar las características de fase, ya que el código japonés solamente incluye un espectro de respuesta de amplitud.

En este caso, se confirma que es inevitable obtener irregularidades en la respuesta del modelo estructural utilizado, a pesar de que se ha proporcionado el espectro de diseño. (Figura 20).

En la mayoría de grandes ciudades localizadas en sitios con un gran espesor de sedimentos, se debe prestar especial atención a los movimientos de largo período.

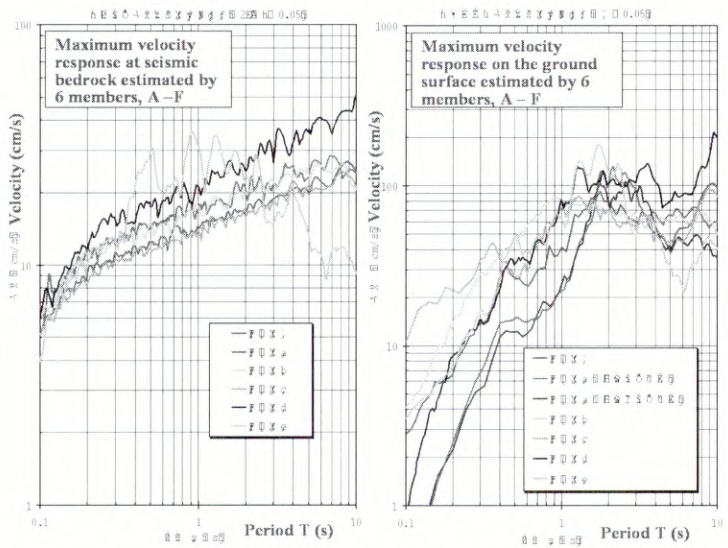


Figura 19a. Estimación del espectro de velocidad en la roca (izquierda) considerando el efecto de sitio (derecha) para el terreno de Kanto 1923. Como modelo de la fuente sísmica.

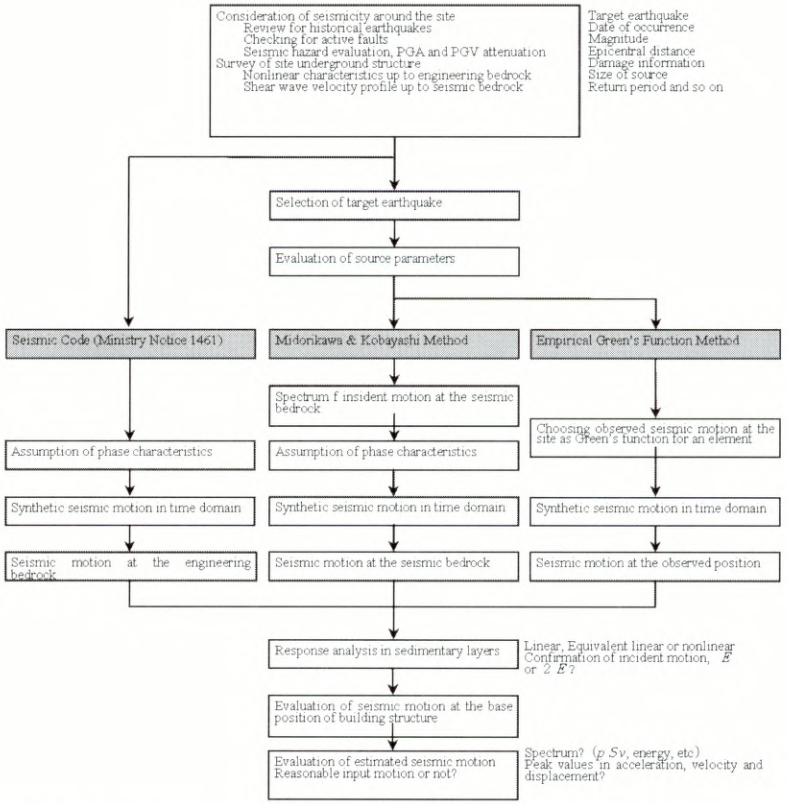


Figura 19b. Flujograma que muestra el proceso para obtener movimientos del terreno durante terremotos para edificios a base isoladores sísmicos, tomando en cuenta efectos de sitio en el lugar de construcción.

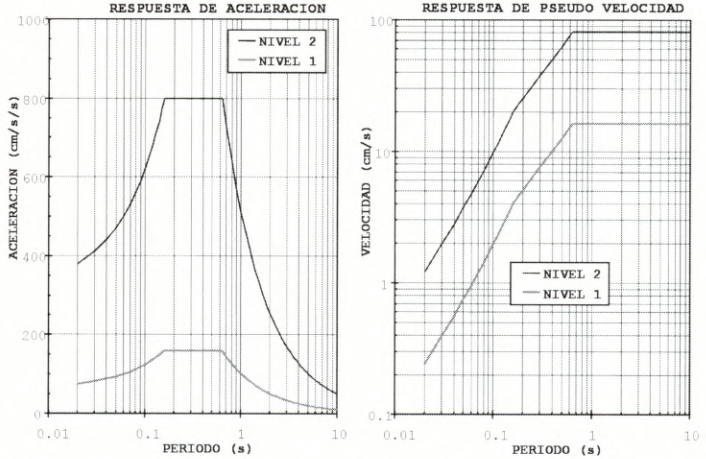


Figura 20. Espectros de respuesta definidos por el Código Sísmico de Japón.

3.2 Lecciones aprendidas sobre movimientos sísmicos observados y exploraciones sísmicas.

Desde el terremoto de Kanto de 1923 se han observado los movimientos del terreno. En aquel entonces se utilizaban sismómetros mecánicos diseñados por el Dr. Imamura, sin embargo, éstos no eran capaces de registrar el movimiento sísmico completo. Lo importante es que los períodos predominantes y la duración de la sacudida podían evaluarse muy bien. Después de comparar estos registros clásicos con los obtenidos mediante instrumentos modernos, se asegura que el área de Tokio posee un período natural de vibración de 7 segundos en todos los movimientos del terreno (Figura 21).

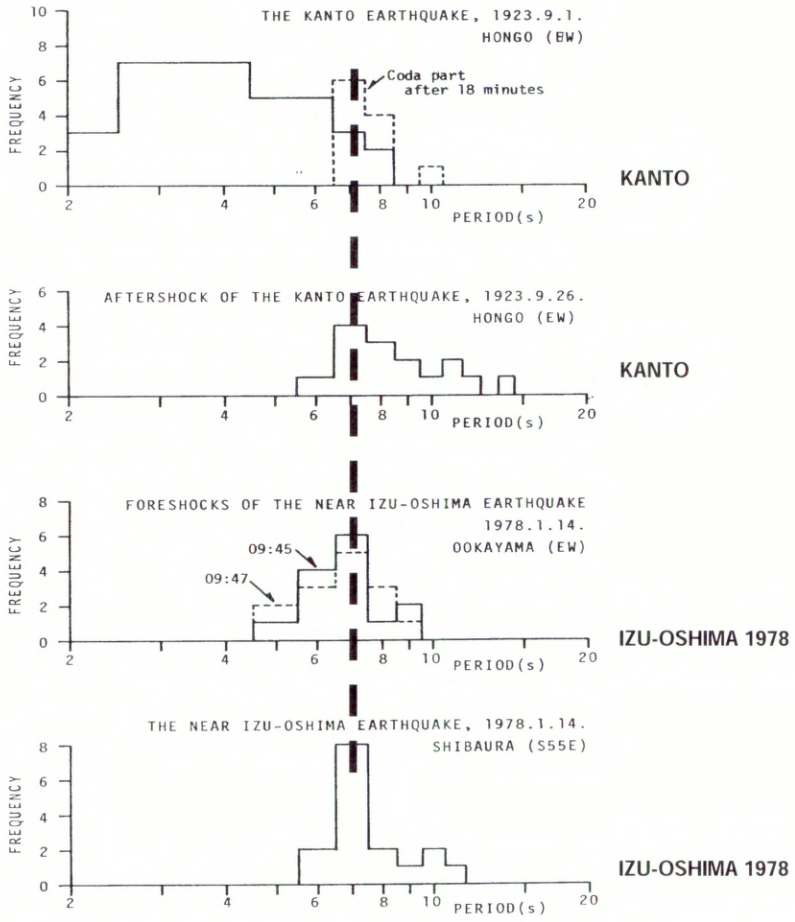


Figura 21. Períodos de vibración para el movimiento del suelo en el área de Tokio.

Se han realizado muchas exploraciones para detectar la estructura del suelo a grandes profundidades y para poder explicar el período de 7 segundos en el movimiento del suelo. La Figura 22 muestra los epicentros de las explosiones y las estaciones temporales de observación para este propósito. Estas explosiones son utilizadas para aplicar un método de refracción, el cual ha sido muy exitoso, ya que realizar estas explosiones resulta muy difícil en ciudades densamente pobladas. Hoy en día pruebas de reflexión con vibradores son muy populares también, por tanto se espera en detalle el perfil del subsuelo. Otro método simple es el arreglo de mediciones de micro-trepidación para estimar el perfil de las ondas S con un análisis de inversión de las ondas dispersas Rayleigh en las micro-trepidaciones.

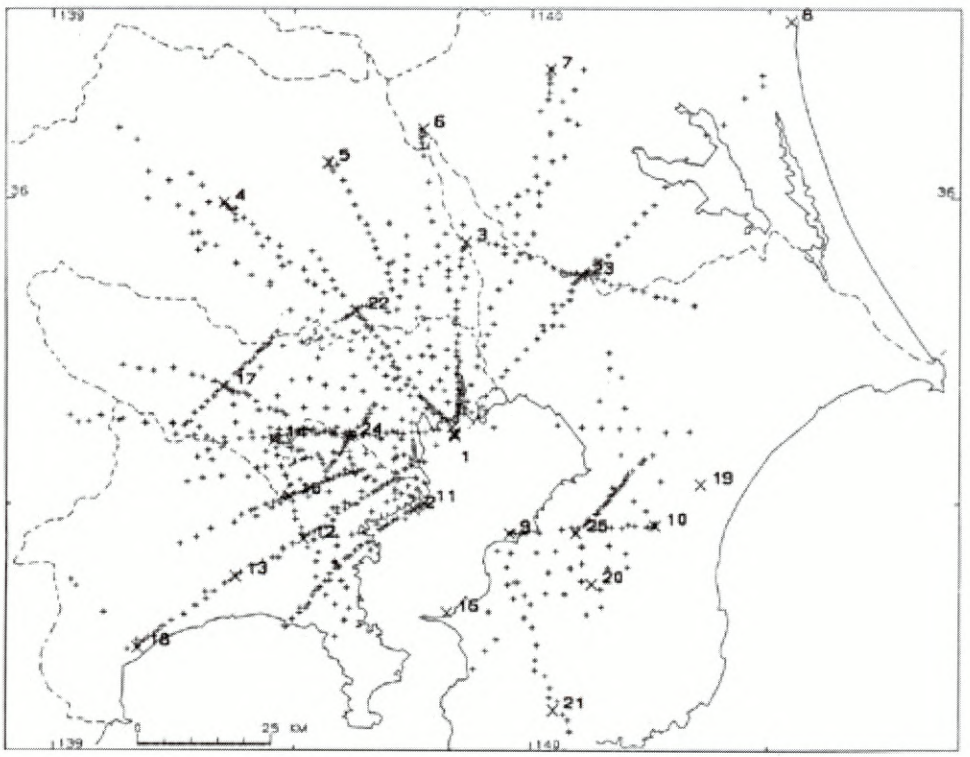


Figura 22. Epicentros de explosiones en el área de Tokio para conocer las características dinámicas del suelo en la región.

3.3 Movimientos de largo período recientemente observados en sitios de sedimentos.

Durante el terremoto de Tokachi-oki en 2003 con magnitud de 8.0 en el distrito de Hokkaido, la estación de Tomakomai registró movimientos de largo período entre 6s y 8s. Esta componente aparece tanto en la sacudida principal como en las réplicas, lo que afirma que se debe al efecto de sitio alrededor de la estación de Tomakomai. Esta estación está localizada sobre un sedimento de 2km de profundidad. En el área de Kanto se han observado similares componentes de largo período pero no ha sido registrado un terremoto de magnitud 8.0 después del evento de 1923 (Figura 23).

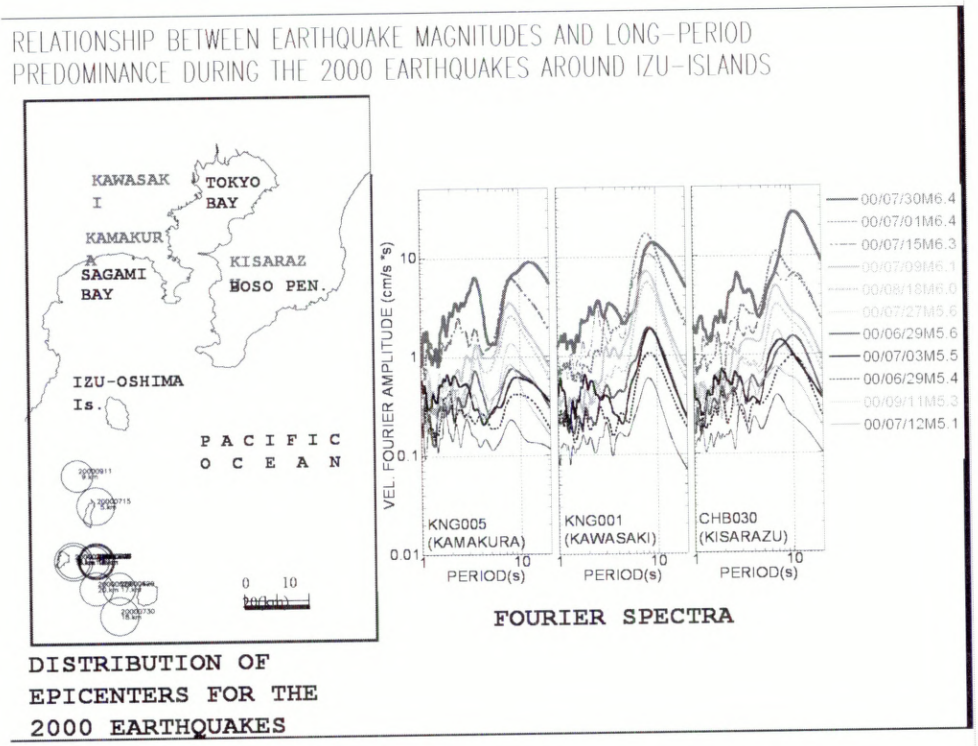


Figura 23. Relación entre magnitud de terremotos y periodos largos predominantes durante los terremotos del año 2000 alrededor de Islas Izu.

Si se toma como experiencia lo ocurrido en Tomakomai para la zona de Kanto incluyendo Tokio, Kanagawa y los distritos de Chiba, se podría estimar las amplitudes para un terremoto de magnitud 8.0. La amplificación sería del orden de 10 veces para un terremoto de magnitud 7.0 o magnitud 8.0. En el 2004, hubo un terremoto de magnitud 7.4 y se encontraron diferentes características en los períodos predominantes en el área de Kanto.
Tales movimientos de largo período pueden ser muy importantes para las medidas que se deben tomar en el caso de la ocurrencia de un terremoto de magnitud 8.0, ya que existen muchos rascacielos y enormes tanques de aceite en el área de Tokio, los cuales son muy sensitivos a movimientos del suelo con largo período.

3.3 Prospectos (Alternativas/Perspectivas) para la predicción del movimiento fuerte del terreno

En esta sección se hace énfasis en factores que deben ser investigados para poder predecir movimientos fuertes del terreno. A continuación se destacan algunos temas importantes que deben ser resueltos en un futuro cercano:

a. Estudiar los componentes de largo período debido a las ondas superficiales y ondas de cuerpo originadas por sedimentos de gran espesor.
b. Se necesita entender las características de fase del movimiento sísmico del terreno.
c. Se necesita una evaluación más precisa sobre la componente vertical del movimiento sísmico del terreno.
d. Hoy en día la sismología esta siendo más aplicable al campo de la ingeniería. Entonces el mecanismo de la fuente debe ser tomado en cuenta para considerarlo en el proceso de diseño estructural. En este proceso se necesita estar seguro de las características de las asperezas en los modelos de la fuente sísmica.

Agradecimientos

El autor desea expresar su agradecimiento por tener la buena oportunidad de discutir los tópicos antes mencionados con los expertos de la Universidad Centroamericana UCA. Desea dar las gracias al Dr. Walter Salazar por su excelente arreglo para estas ponencias. Finalmente, desea expresar su simpatía por el Prof. Jon de Cortina, fallecido recientemente, de quien reconoce que ha estado liderando y promoviendo continuamente la capacitación de investigadores y educadores para el concepto de micro-zonificación sísmica, para mitigar el riesgo sísmico y realizar las gestiones correspondientes en El Salvador.

Walter Salazar

Salvadoreño, Ingeniero Civil, Doctor en Ingeniería Sísmica. Catedrático, Investigador y Coordinador en la Carrera de Ingeniería Civil en la UCA (Universidad Centroamericana José Simeón Cañas). Áreas de investigación: Estimación del Movimiento Fuerte, Efectos de Sitio, Peligrosidad Sísmica.

Víctor Sardiña

Cubano-americano, Ingeniero Geólogo. Maestría en Ingeniería, Doctor en Ingeniería, labora como geofísico en el Centro de Alertas de Tsunamis del Pacifico en Hawai, Estados Unidos. Áreas de investigación: zonación y microzonación sísmica, ingeniería geológica, efectos de sitio durante terremotos, peligrosidad sísmica, sistemas de alerta de tsunamis.

Kazuoh Seo

Japonés, Ingeniería Civil e Ingeniería Sismológica, Doctor en Ingeniería, Profesor del Instituto Tecnológico de Tokio. Investigador y educador en los campos de Ciencias en Desastres Naturales, Predicción de Movimiento Fuerte, Mitigación de desastres por terremoto y Sismología Social. Miembro del comité de prevención de desastres naturales del AIJ (Instituto de Arquitectura del Japón) y para isoladores sísmicos del JSSI (Sociedad Japonesa de Isoladores sísmicos).