



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**Escenarios de respuesta estructural ante
sismo para la Ciudad de México**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

PRESENTA:

José Francisco Javier Martínez González

Tutor:

Dr. Eduardo Reinoso Angulo

Octubre 2009

JURADO ASIGNADO

Presidente: Dr. Esteva Maraboto Luis

Secretario: Dr. Meli Piralla Roberto

Vocal: Dr. Reinoso Angulo Eduardo

1^{er} Suplente: Dr. Auvinet Guichard Gabriel

2^{do} Suplente: Dr. López Bátiz Oscar

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS:

Eduardo Reinoso Angulo

No te quedes inmóvil
al borde del camino
no congeles el júbilo
no quieras con desgana
no te salves ahora
ni nunca
no te salves
no te llenes de calma
no reserves del mundo
sólo un rincón tranquilo
no dejes caer los párpados
pesados como juicios
no te quedes sin labios
no te duermas sin sueño
no te pienses sin sangre
no te juzgues sin tiempo
pero si
pese a todo
no puedes evitarlo
y congelas el júbilo
y quieres con desgana
y te salvas ahora
y te llenas de calma
y reservas del mundo
sólo un rincón tranquilo
y dejas caer los párpados
pesados como juicios
y te secas sin labios
y te duermes sin sueño
y te piensas sin sangre
y te juzgas sin tiempo
y te quedas inmóvil
al borde del camino
y te salvas
entonces
no te quedes conmigo

No te salves

Mario Benedetti 1920-2009

Dedicada a

A todos aquellos que han formado parte de mi vida, aquellos que han permanecido con el paso de los años y aquellos que se han ido, a los que vendrán y que con ilusión espero.

Mis papás José Guadalupe Martínez Vega y María Guillermina González Islas, con todo mi amor y admiración, porque jamás tendré forma de agradecer todo lo que me han dado, porque ningún esfuerzo que haga se compara con el que ellos han hecho por su familia.

Mis hermanas María Dolores, María Luisa, María Eugenia y María Guillermina, porque son mi apoyo, ejemplo de vida y motivación, porque les debo mucho más de lo que imaginan.

Mis sobrinos Paloma, Niels y Sofía, que son un motivo para ser feliz todos los días.

Mi novia Brenda Valeria Gabilondo Acevedo, por dejar huella en mi corazón, por ser la mejor compañera, porque con ella he aprendido lo que es el amor.

La Universidad Nacional Autónoma de México, por ser la casa que me ha permitido vivir muchos de mis sueños.

Agradecimientos

Como experiencia de los agradecimientos que escribí para mi tesis de licenciatura aprendí que el texto que más se lee son precisamente estas líneas. Me disculpo por el orden en que escribo estos agradecimientos y con todos aquellos que me harán falta mencionar. Te agradezco por leer estas líneas y aún más si tu interés en el tema es mayor por lo que espero encuentres algo atractivo en este trabajo.

Le agradezco a Dios por darme todo lo necesario para estar aquí y permitirme tener tantas experiencias que me hacen ser.

A todos mis maestros en especial mis profesores de la Facultad de Ingeniería y del Posgrado, porque cada clase fue una cátedra y en éstas me convencía de lo maravilloso que es la profesión del ingeniero. A mis maestros del Principal: Gerardo Rodríguez, Adriana Cafaggi, Fabián Cervantes, Alejandro Cadaval †, Héctor Sanginés, Víctor Robles, Carlos Mendoza, Héctor Guzmán, Francisco Moreno, Gabriel Moreno, Pedro Benítez, José Gaya, Roberto Stark, Cesar Valdéz, Marcos Trejo, Francisco Chacón, Oscar Vega, Oscar Martínez, Reginaldo Hernández, Fernando Favela, Manuel Viejo, Miguel Rodríguez, José Salinas, Carlos Chavarri. Les agradezco a mis maestros de la maestría: Octavio García, Luis Esteva Maraboto, Jorge Ávila, Roberto Meli Piralla, Eduardo Miranda, José María Riobbo, Oscar López Bátiz, Mario Ordaz, Juan José Pérez Gavilán, Rodolfo Silva Casarín, Sergio Alcocer.

A mis compañeros de clase, a los compañeros del Instituto de Ingeniería que su trabajo siempre fue una motivación y me siento muy orgulloso de haberlos conocido.

Dr. Eduardo Reinoso por su confianza, apoyo, consejos, ejemplo, y por ser la guía en la realización de los trabajos desarrollados en cuatro años.

A mis sinodales por ofrecerme su tiempo y consejos para completar y corregir este trabajo.

Agradezco infinitamente el apoyo incondicional, la ayuda, la confianza, los consejos y cariño de mi familia.

Bren mi amor te doy infinitas gracias por tus consejos, tus regaños, tu presión, tu interés en mí, tu amor, por ser mi amiga.

Gemma gracias por estar al pendiente siempre, por mostrar interés en lo que hago y por tus palabras y ejemplo siempre motivador, pero sobre todo por confiar en mí.

A mis amigos Miguel, Sergio, Dulce, Perla, Roberto, Sandra, Jorge, Efen , entre otros por escucharme, aconsejarme y acompañarme.

Inic macuilli tonatiuh 4 ollin in itonal mitoa ollintonatiuh ipampa molini in otlatoca auh in yuh conitotihui in huehuetque, ipan inin mochihuaz tlalloliniz mayanaloz inic tipolihuizque.

In ipan in 13 acatl quilmachyeipan in tlatcat in axcan onmantiuh tonatiuh, ye icuac tlauez ye icuac tlathuic in axcan onmantiuh ollin tonatiuh. 4 ollin in itonal, ic 5 inin tonatiuh on mani ipan tlalloliniz mayanaloz.

El Quinto Sol: 4 Movimiento su signo. Se llama Sol de Movimiento, porque se mueve, sigue su camino. Y como andan diciendo los viejos, en él habrá movimientos de tierra, habrá hambre y así pereceremos.

En el año 13 Caña, se dice que vino a existir, nació el Sol que ahora existe. Entonces fue cuando iluminó, cuando amaneció, el Sol de Movimiento que ahora existe. 4 Movimiento es su signo. Es éste el quinto Sol que se cimentó, en él habrá movimiento de tierra, en él habrá hambres.

Códice Chimalpopoca, Anales de Cuauhtitlan Traducción Miguel León-Portilla



Contenido

1	Introducción	1
1.1	Fenómenos Naturales	1
1.2	Sismos	3
1.3	Riesgo Sísmico.....	4
1.4	Escenarios en Tiempo Real	5
1.5	Alcance	6
2	Peligro Sísmico para la Ciudad de México	7
2.1	Introducción	7
2.2	Fuentes Sísmicas	8
2.3	Características de Suelo de la Ciudad de México.....	10
2.4	Funciones de Amplificación y Caracterización del Suelo.....	13
2.4.1	Funciones de Transferencia.....	13
2.4.2	Modelo de Análisis Unidimensional.....	13
2.5	Metodología Empleada para Caracterizar el Suelo.....	15
2.6	Mapas de Peligro Sísmico.....	16
3	Respuesta y Vulnerabilidad de las Estructuras	21
3.1	Introducción	21
3.2	Respuesta de un Modelo Continuo	23
3.3	Vulnerabilidad Estructural.....	25
3.4	Sistema de Información Geográfica y definición de Parámetros Dinámicos de las Estructuras.....	28
3.5	Metodología para el Cálculo de la Respuesta Estructural	35

4	Estimación Inmediata de Daños Sísmicos	41
4.1	Introducción	41
4.2	Sistema de Información para el Cálculo de Respuesta Sísmica	42
4.3	Caracterización del Suelo de la Ciudad de México.....	45
4.4	Escenarios de Respuesta Estructural	48
4.4.1	Escenario Esperado	48
4.4.2	Metodología para Escenario en Tiempo Real.....	52
	 Conclusiones	 54
	Conclusiones Generales	54
	Sugerencias para Futuras Investigaciones	55
	 Referencias	 56

Capítulo 1

Introducción

1.1 Fenómenos naturales

No existe lugar en el mundo que se encuentre libre de la acción de algún fenómeno natural; huracanes, tormentas, tsunamis, tornados, derrumbes, sismos, entre otros afectan varias veces al año a las más diversas poblaciones. La mayoría de las veces dichos fenómenos implican daños materiales o pérdidas humanas lo cual los convierte en desastres naturales.

Grandes cantidades de recursos económicos son invertidos cada año para rescatar y reconstruir localidades que sufren diferentes daños por algún fenómeno natural. En consecuencia miles de personas son afectadas y en ocasiones pierden la mayoría de sus pertenencias víctimas de los desastres naturales que ocurren en el mundo. No se puede modificar la ocurrencia de estos eventos, sin embargo, es fundamental analizar el costo económico y social que conllevan los fenómenos naturales y disminuirlo en lo posible.

La República Mexicana se encuentra siempre en peligro de que se presente algún fenómeno natural, ya que está ubicada en una de las zonas menos favorecidas en cuanto a la ocurrencia de ciclones y sismos (figura 1.1).

En México ocurren al año un promedio de 25 ciclones (15 en el Pacífico y diez en el Atlántico), de éstos seis (cuatro en el Pacífico y dos en el Atlántico) alcanzan la categoría de huracán H5 en la escala Saffir-Simpson, categoría que se refiere al tipo de huracán más destructivo. Dichos huracanes ocurren en épocas del año definidas, para el Pacífico entre el 15 de mayo al 30 de noviembre y para el Atlántico del 1° de junio al 30 de noviembre.

En cuanto a sismos las costas del Pacífico Mexicano se encuentran en el llamado Cinturón de Fuego mostrado en la figura 1.1, el cual se ubica en el continente Americano desde la costa de Chile dobla a la altura de la islas Aleutianas y baja hacia Asia por la costa de China y Japón, ésta región es donde ocurren la mayoría de los movimientos sísmicos fuertes y además existe una actividad volcánica constante.

La ocurrencia de los sismos fuertes en México es cada 20 años aproximadamente aunque en promedio ocurren 40 sismos de intensidad baja a la semana generados principalmente en la costa del Pacífico.

Comparando el costo total para México de los huracanes Wilma y Stan en 1995 fue del orden de los 3,000 millones de dólares mientras que los sismos de septiembre de 1985 costaron al país alrededor de 4,000 millones de dólares.

Existen 14 volcanes activos en diferentes estados de la República Mexicana, entre ellos el Volcán de Fuego en Colima, El Parícutín en Michoacán, Chichonal en Chiapas y el Popocatepetl en la

Ciudad de México, los cuales tienen poblaciones cercanas y su actividad es monitoreada por el Instituto de Geofísica de la UNAM.

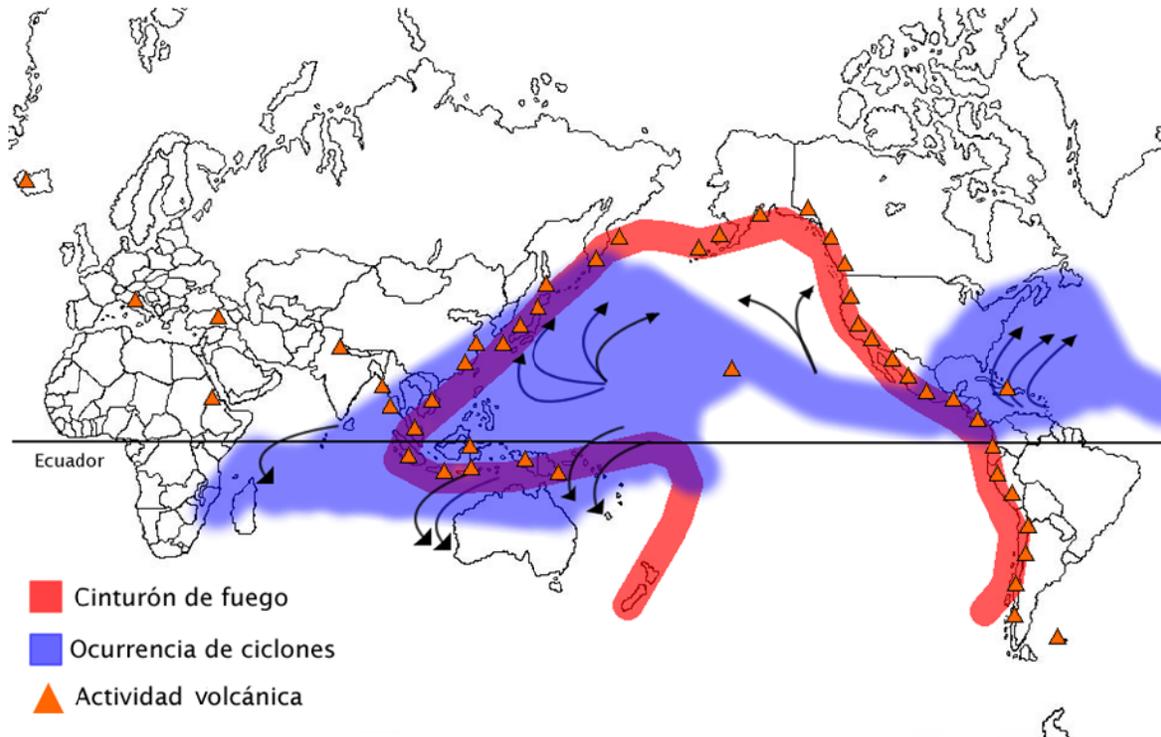


Figura 1.1. Ocurrencia de huracanes, sismos fuertes y actividad volcánica en el mundo

La Ciudad de México es una de las ciudades más peligrosas en cuanto a sismos se refiere, además en cuanto a otros fenómenos naturales está latente el peligro de una erupción volcánica del Popocatepetl o de algún volcán monogenético. En el caso de una erupción fuerte del Popocatepetl el perímetro de influencia para la caída de cenizas está calculado en los 80 kilómetros de distancia lo que involucra a la mayor parte de la ciudad.

La importancia de la Ciudad de México radica en gran parte en que se trata de la capital del país por lo que existe una inmigración frecuente de población, la calidad de vida, la ubicación de fuentes de empleo, entre otras cuestiones hacen que la ciudad cuente con un gran número de pobladores, por lo tanto las estructuras que la componen son de gran importancia.

Desafortunadamente la Ciudad de México se construyó sobre depósitos lacustres. Como consecuencia el suelo en el que se cimenta la hace vulnerable no sólo en cuanto a la respuesta sísmica que pueden tener las estructuras, sino también en relación a las inundaciones que se pueden presentar pues a fin de cuentas la forma de la cuenca la hace propicia para provocar estancamientos e inundaciones de grandes dimensiones. La extracción de agua hace que las características del suelo se modifiquen constantemente y que existan hundimientos regionales que la hacen aún más vulnerable en cuanto a los efectos que producirían una inundación o un sismo. Los códigos de diseño y construcción se deberían actualizar frecuentemente utilizando información de las características del suelo y de la ciudad en general, así como nuevas investigaciones y tecnologías.

1.2 Sismos

Uno de los fenómenos naturales que más ha cobrado vidas en todo el mundo son los sismos. En los últimos 25 años eventos como el de Azerbaiyán, Sichuan, Sumatra, Kobe, entre otros han cobrado más de 500,000 vidas y millones de damnificados, además han significado inversiones de miles de millones de dólares para reconstrucción.

El costo por la ocurrencia de un sismo depende de la magnitud de éste y de las características de la población afectada, sin embargo como promedio se puede suponer el gasto por sismo desastroso para cualquier país es como mínimo del orden de los 1,500 millones de dólares.

Según datos de la Munich Reinsurance Company (2000) el sismo que más ha costado es el de Kobe, Japón de 1995 con magnitud de 6.9 grados en la escala de Richter con un costo de 100 mil millones de dólares; en segundo lugar el de Northridge, Estados Unidos en 1994 de 6.7 grados Richter con costo de 44 mil millones de dólares; en 1999 en Chi Chi, Taiwan el sismo de 7.6 grados Richter provocó pérdidas por 14 mil millones de dólares; en 1988 en Armenia un sismo de 6.7 grados Richter costó 14 mil millones de dólares y en 1999 en Turquía un sismo de 7.6 grados Richter costó 12 mil millones de dólares.

En la figura 1.2 se muestra el porcentaje con respecto al total de muertes registradas oficialmente en el mundo como consecuencia de los sismos fuertes que han ocurrido en los últimos 25 años. Se puede observar que los mayores porcentajes de muertes no están asociados a la región del mundo donde se presenta la mayor actividad sísmica definida por el cinturón de fuego que se mencionó anteriormente; ya que países como Irán y Pakistán están fuera de dicha región. Esto se debe a que en los países donde se dan los sismos con frecuencia existe experiencia y preparación para mitigación del riesgo mientras que en los países donde los sismos ocurren esporádicamente la preparación es nula y por lo tanto han provocado las mayores pérdidas humanas. Por ejemplo un sismo el 21 de agosto de 1987 de 2.7 grados en la escala de Richter en Nepal, India dejó un saldo de 800 muertes, mientras que en Hokaiido, Japón un sismo de 7.8 grados en la escala de Richter tuvo como saldo una persona muerta.

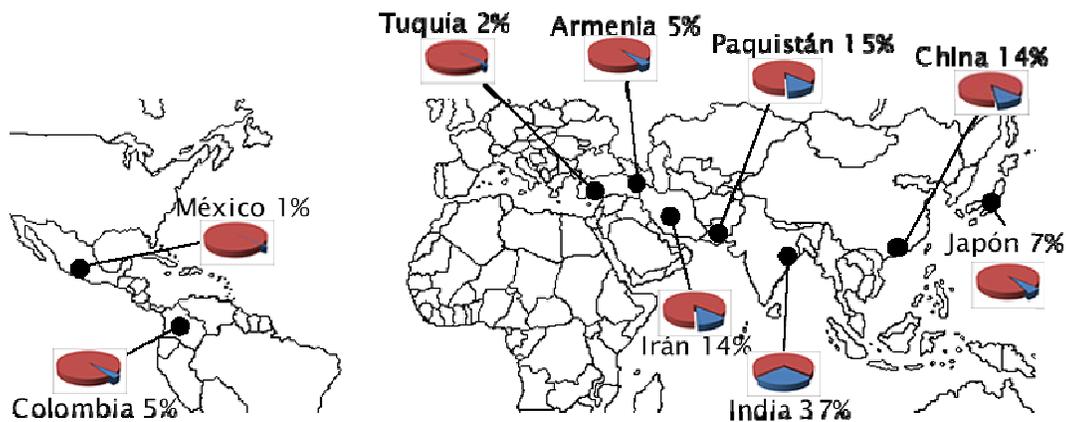


Figura 1.2. Porcentaje con respecto al total de muertes ocasionadas por los sismos ocurridos en los pasados 25 años en el mundo

En México aproximadamente cada 20 años ocurre un sismo fuerte que en ocasiones ha sobrepasado la preparación que se tiene en el país en cuanto al diseño de estructuras y protección civil, por lo que han fallecido más de 20,000 personas en los últimos 25 años. La zona más afectada por los sismos en México son las poblaciones ubicadas en las costas del Pacífico aunque

existen sismos locales y efectos de amplificación que afectan a poblaciones ubicadas lejos de la zona de costa.

Los sismos de 1957 y de 1985 son los que han cambiado la forma de construir y nos han servido para recordar el peligro sísmico que existe en la ciudad. El de 1957, cuando se cayó el ángel de la columna de la Independencia, fue el parte aguas para formalizar el diseño sismo-resistente en la Ciudad de México, los códigos de construcción se hicieron de forma más eficiente para disminuir el riesgo en el que la ciudad está inmersa. El sismo de 1985 es el que más experiencia ha dejado pues se midieron aceleraciones en diversos puntos de la ciudad y esto generó la inquietud para aumentar las estaciones acelerométricas para medir el comportamiento del suelo en la ciudad con lo que se inició la microzonificación de ésta, además de la instrumentación en edificios para conocer su respuesta dinámica.

La Ciudad de México es afectada principalmente por sismos de subducción y de falla normal, además de aquellos movimientos provocados por actividad volcánica dentro de la propia cuenca. Las pérdidas económicas asociadas a un sismo fuerte de subducción podrían ser del orden de los 40 mil millones de dólares mientras que por uno fuerte de falla normal podrían ser de 60 mil millones de dólares al tipo de cambio promedio de 2007 (Figuroa, 2007).

1.3 Riesgo sísmico

Para precisar qué es el riesgo sísmico es necesario definir primero al peligro sísmico y la vulnerabilidad. Peligro sísmico se conoce como la probabilidad que tiene alguna población en particular para que ocurra un evento sísmico y éste afecte el comportamiento dinámico que tiene el suelo que la forma; depende de la ubicación de la población, las condiciones de suelo, entre otras. Vulnerabilidad es qué tan susceptible es cierta estructura para ser dañada o sufrir alguna pérdida, en el caso de las edificaciones de una población depende principalmente del sitio de construcción, tipo de proyecto, arquitectura, elementos estructurales, piso débil, columna corta, torsión, juntas e interacción entre estructuras aledañas y entre elementos no estructurales. El riesgo sísmico se puede evaluar como el producto del peligro sísmico por la vulnerabilidad estructural, es decir el riesgo aumenta mientras mayor sea la vulnerabilidad o mayor sea el peligro, por ejemplo si no existe población construida cerca a una zona con alto peligro sísmico entonces el riesgo sísmico de esa región es muy bajo.

La relación del riesgo sísmico para la estimación de pérdidas está definida por la ecuación 1.1 (Sandi, 1986), donde es asociado un valor para la estructura a la que se le evalúa el riesgo sísmico.

$$\text{Riesgo} = \text{Peligro sísmico} * \text{Vulnerabilidad} * \text{Valor} \quad (1.1)$$

No existe una zona en el mundo que tenga peligro sísmico nulo. El peligro disminuye mientras más lejos se esté de las fuentes sísmicas, sin embargo efectos de resonancia y sismos que se dan de forma local hacen que el peligro siempre exista. Es posible mitigar el peligro estudiando la forma de transmisión de ondas sísmicas y como afectan la estructura del suelo, así se tiene una mejor caracterización del comportamiento dinámico de éste. La vulnerabilidad estructural varía sobre todo con la forma de diseñar y construir, además del costo asociado a la importancia de las edificaciones. La variable que se puede manejar en la mayoría de las ocasiones es la vulnerabilidad estructural construyendo estructuras sismo-resistentes, sin embargo es deseable edificar en lugares donde el peligro sísmico sea mínimo.

1.4 Escenarios en tiempo real

Es necesario calcular de manera anticipada los efectos que provoca la ocurrencia de sismos sobre las ciudades, desde la respuesta estructural esperada hasta los costos asociados a la incidencia de algún evento supuesto. Esto con el fin de mitigar dichas consecuencias las cuales pueden ser clasificadas de acuerdo al tipo y nivel de daño y después elegir la mejor opción de un plan de acción. Es posible asociar el daño a otras variables que en ocasiones son más evidentes para la población en general tales como posibles pérdidas humanas, víctimas atrapadas, tiempo de ocupación esperado, entre otros.

En diversos países se han creado escenarios de riesgo sísmico que muestran un panorama de las consecuencias asociadas a un evento posible y en ocasiones al tiempo de ocurrencia del sismo. En México existen metodologías para la evaluación de escenarios de pérdidas esperadas (Ordaz, et al, 1999). En Estados Unidos se han creado escenarios de riesgo sísmico para Los Ángeles y Nueva York (Perry, et al, 2007; Tantalá, et al, 2007). En algunos países de Europa también se han elaborado escenarios de riesgo y metodologías de evaluación de estos como en Italia (Dolce, et al, 2005; Grasso, et al, 2008; Martinelli, et al, 2008), España (Jiménez, et al, 2000), Bulgaria (Paskaleva, et al, 2007), entre otros.

Para la evaluación de los escenarios es necesario proponer las propiedades del movimiento que generará éste. En algunos trabajos se han planteado dichas características en función de la probabilidad de ocurrencia del sismo, dada por las condiciones del sitio, las características de las fuentes sísmicas y por distintos periodos de retorno (Jiménez, et al, 2000; Martinelli, et al, 2008; Tantalá, et al, 2007), sin embargo en otras ocasiones se propone el movimiento de forma determinista con el sismo de magnitud máxima ocurrido en la región (Ansal, et al, 2008; Dolce, et al, 2005; Fäh, et al, 2001; Grasso, et al, 2008; Hiroyuki, et al, 2007; Paskaleva, et al, 2007). Se han hecho escenarios para la delegación Cuauhtémoc en la Ciudad de México en donde se han evaluado según el tiempo de ocurrencia de éste, ya sea en día hábil o fin de semana, por la noche o durante el día (Martínez-González, 2006; Figueroa, 2007). Después de definir las características del movimiento se evalúan las consecuencias asociadas a él según la vulnerabilidad de las estructuras de interés.

Dichos escenarios no aseguran que el sismo que esté ocurriendo en determinado momento produzca los efectos calculados, ya que éste puede provocar aceleraciones mayores o menores a las supuestas y por lo tanto cuando esté ocurriendo un sismo no se sabe si las consecuencias evaluadas con el escenario supuesto son las que están ocurriendo realmente.

Resulta de gran utilidad evaluar los efectos que provoca un sismo justo en el momento en el que está ocurriendo, es decir en tiempo real, con el objetivo de que las autoridades y organismos pertinentes tomen decisiones inmediatas para el rescate y ayuda de la población que esté siendo afectada en el instante mismo de la ocurrencia del evento, lo cual principalmente salvaría vidas disminuyendo el tiempo de reacción. Además bajo este concepto es posible informar a la población de la situación de daños estimados en que se encuentra la ciudad para que conozcan lo que ocurre en algún sitio de su interés donde pudiera encontrarse algún familiar, lo cual puede ser enviados en informes ocupando las tecnologías actuales como correos electrónicos y telefonía móvil.

En este trabajo se propone evaluar escenarios de riesgo sísmico en tiempo real, para lo cual se comparan los efectos producidos por sismos que han afectado a la ciudad proporcionando una metodología para evaluar los escenarios con una diferencia de unos pocos minutos después de ocurrido el sismo.

1.5 Alcance

Como ingenieros la responsabilidad que se adquiere con la sociedad es para diseñar, construir y administrar los recursos naturales haciendo infraestructura y ciudades seguras, funcionales y cómodas y económicas, por lo que debemos utilizar nuestros recursos académicos e intuitivos, entre otros, para poder hacerlo y actualizarnos a cada instante para aprovechar al máximo todas nuestras posibilidades y resolver los problemas surgidos por las condiciones en que se han construido las ciudades. Como parte de esto se desarrolla este trabajo con el fin de presentar un panorama sobre la situación de las estructuras que componen la Ciudad de México y como se comportan ante los sismos que pueden ocurrir en ésta.

Los alcances de este trabajo son:

- Presentación de modelos utilizados con éxito para representar el comportamiento del suelo y la respuesta estructural ante eventos sísmicos.
- Evaluación de escenarios de estimación temprana de daños y pérdidas.
- Desarrollo de un software de evaluación inmediata del comportamiento de las estructuras ante un evento sísmico.

En la elaboración de este trabajo se actualizaron los mapas de peligro sísmico así como la base de datos de catastro para las estructuras de la Ciudad de México la cual se corroboró durante visitas de campo.

En este trabajo se ha utilizado un modelo de respuesta sísmica que utiliza el mínimo de variables dando una estimación del comportamiento dinámico estructural, así como un modelo para la caracterización del comportamiento del suelo de la ciudad. También se proponen algunas bases para la estimación de daños y se calculan escenarios de riesgo para cada una de las estructuras de la ciudad presentándolos en mapas.

El fin del software que se desarrolla en este trabajo es evaluar de manera inmediata las acciones que ocurren en las estructuras al momento de ocurrir un sismo para así agilizar el movimiento de los cuerpos de rescate así como la velocidad de respuesta de las autoridades pertinentes en caso de ser necesario, además de que la población conozca en cuestión de minutos las estructuras y zonas donde pudieron haber ocurrido daños, así se puede reducir el impacto psicológico que produce un sismo a la población en general.

Capítulo 2

Peligro sísmico para la Ciudad de México

2.1 Introducción

La corteza terrestre está formada por placas tectónicas, éstas se mueven relativamente entre ellas en diferentes direcciones, se rozan, se enciman o se separan. La zona de contacto entre éstas se conoce como falla. El movimiento no es continuo debido a la fricción que existe entre las capas, ésta llega a un límite, se rompe el contacto y se libera energía sísmica, la cual provoca ondas que viajan a través de la corteza terrestre alterando el suelo y a las estructuras construidas sobre él. Éste es el motivo que origina la mayoría de los sismos en el mundo; sin embargo estos pueden darse por otras causas tales como explosiones, colapsos del suelo y actividad volcánica.

El 95% de la energía sísmica liberada proviene de eventos en los cuales se vence el límite de la fricción, el 90% de estos eventos ocurre en la zona que delimita a las placas tectónicas (Subducción) y el resto en el interior de ellas (Falla normal).

El territorio mexicano es afectado por cinco placas tectónicas. En la costa del Pacífico mexicano la placa Norteamericana se separa de la del Pacífico, roza con la del Caribe y choca contra la Rivera y la Cocos. Un esquema de las placas que afectan a México y el movimiento que las rige se muestra en la figura 2.1.

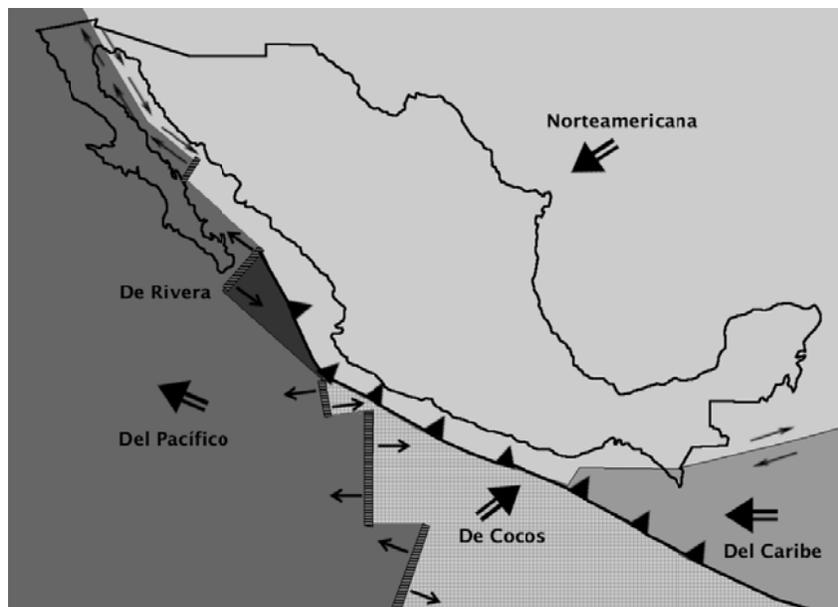


Figura 2.1. Placas tectónicas que actúan en México

Existen segmentos en las placas tectónicas que se conocen como brechas sísmicas las cuales se mueven en forma independiente a la placa. En la costa del Pacífico mexicano existen varias de estas brechas, en ellas se dan los llamados sismos característicos los cuales tienen magnitudes de entre 7.8 y 8.2 grados en la escala de Richter. El periodo de recurrencia estimado de los sismos característicos en México es de entre 30 y 40 años.

Resulta de vital importancia conocer cómo se generan los sismos, la ubicación de las fuentes sísmicas, los periodos de recurrencia, la forma de transmisión de las ondas, entre otros conceptos de sismicidad con el fin de evitar tragedias en las poblaciones construidas mitigando el riesgo que tienen y sobre todo para diseñar ciudades más seguras desde el punto de vista estructural creando códigos que nos permitan construir con el comportamiento ideal de los materiales y los sistemas estructurales.

2.2 Fuentes sísmicas

En México se tienen identificadas las zonas en donde ocurren diferentes tipos de sismo; en la figura 2.2 se muestran dichas zonas conocidas como provincias tectónicas, esto nos es útil para conocer las regiones que son afectadas por cada tipo de sismo en particular ya que el peligro que se genera es diferente dependiendo del tipo de falla, condiciones del suelo, magnitud y distancia del evento. Existen diferentes tipos de sismo que afectan a la Ciudad de México (figura 2.2), en este trabajo se toman en cuenta los sismos de subducción y de falla normal.

Los sismos de subducción ocurren a lo largo de los límites de las placas tectónicas, estos sismos son los que presentan las magnitudes más grandes debido a que en estas zonas se tiene la mayor área de contacto. En México las zonas de subducción se encuentran entre las placas de Rivera y la Norteamericana, otra entre la de Cocos y la Norteamericana, y una más entre las placas de Cocos y del Caribe, dicha zona comprende la costa del Pacífico desde Puerto Vallarta, Jalisco hasta Tapachula, Chiapas (figura 2.2).



Figura 2.2. Provincias tectónicas

Los sismos de subducción que afectan a México tienen su origen cerca de las costas por lo que provocan un alto peligro sísmico en las poblaciones costeras, además son los causantes de los movimientos más fuertes en la Ciudad de México ya que el tipo de ondas que contienen son en su mayoría de periodos largos los cuales no se atenúan fácilmente y se amplifican al pasar por las arcillas del Valle de México.

En México los sismos de subducción se presentan con un periodo de recurrencia de entre 30 a 40 años para sismos mayores a los 7.5 grados en la escala Richter. Este tiempo de recurrencia es relativamente corto comparado con otras zonas de subducción del mundo.

Los sismos de falla normal son aquellos que ocurren a una profundidad mayor a 50 kilómetros dentro de las placas oceánicas bajo el continente. Estos sismos tiene magnitudes menores a los 7.0 grados en la escala de Richter, sin embargo por la cercanía con las poblaciones representan un gran peligro.

En la figura 2.3 se muestran dos cortes con las características de las zonas de falla normal entre la Ciudad de México, la costa de Manzanillo y la costa de Acapulco (Jaimes, et al., 2005), en ésta última se observa un ángulo de subducción relativamente pequeño el cual indica que los sismos producidos en esta zona pueden ocurrir en una región grande de la República Mexicana ya que la zona de falla se alarga incluso después de la Ciudad de México (figura 2.3a), a diferencia de la de Manzanillo que termina poco antes de los 200 kilómetros de distancia de la costa (figura 2.3b).

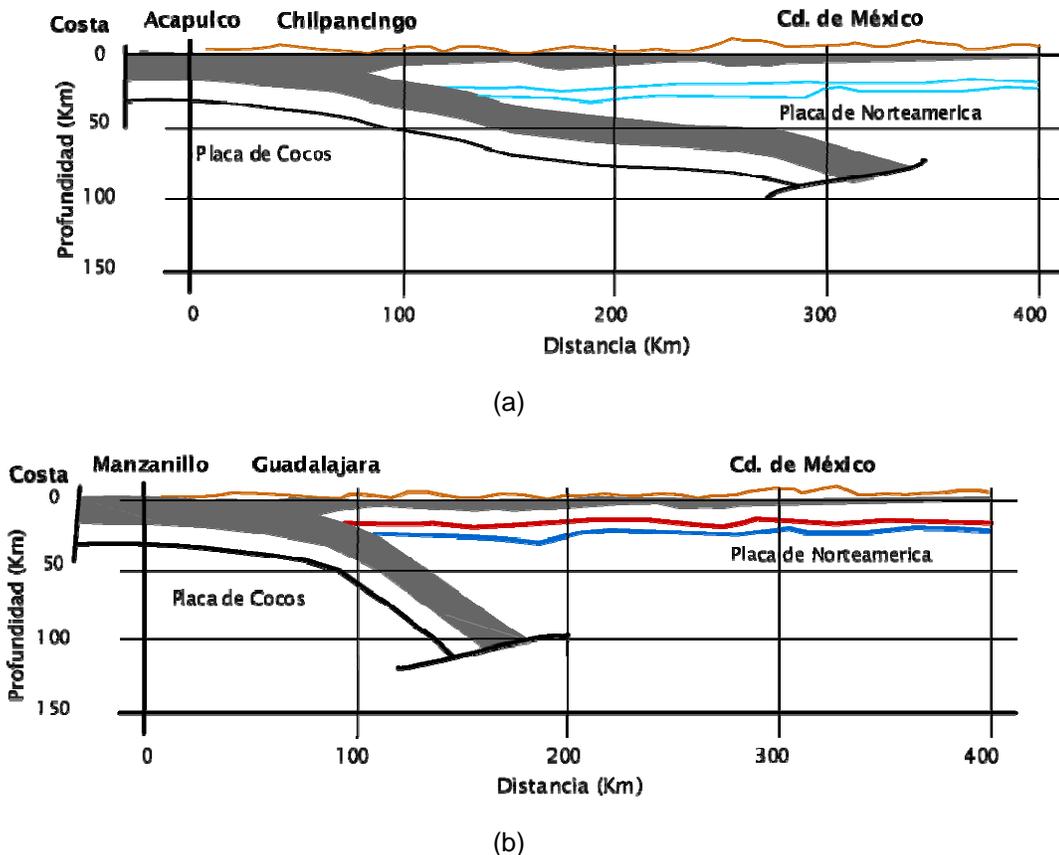


Figura 2.3. Cambios de la zona de subducción entre la placa de Cocos y la placa de Norteamérica
 (a) Acapulco-Cd. de México, (b) Manzanillo-Cd. de México

2.3 Características del suelo de la Ciudad de México

La Ciudad de México se fundó en una cuenca rodeada por montañas altas, la cual drenaba al sur hasta que se formó la sierra del Chichinautzin que cerró la salida de agua y formó un lago en el cual se construyeron tres ciudades, una de ellas fue Tenochtitlan (1325-1521) antecesora de la Ciudad de México.

Los materiales acarreados por el agua, cenizas, lava volcánica y restos de vegetación calcinada llenaron la cuenca formando capas de diferentes espesores y densidades. Al sur de la cuenca se tienen espesores de estrato total hasta la roca firme de 800 metros, los depósitos superficiales que consisten en arcillas altamente hidratadas llegan a tener espesor de hasta 50 metros, el peso de estos depósitos y la extracción de agua causan un lento asentamiento que provoca formaciones subterráneas y diversidad de densidades que a su vez producen amplificación, diferente respuesta sísmica entre capas y amplificación de las ondas sísmicas que llegan a la cuenca.

La Ciudad de México se ha dividido en tres zonas con diferentes condiciones del suelo para propósitos de zonificación geotécnica: en la zona de Lomas se encuentran depósitos compactos de suelos granulares y basalto; en la zona de Lago se encuentran depósitos de suelo muy blando de gran espesor formados por sedimentos aerotransportados, arcilla y por cenizas de los volcanes cercanos que se han depositado intercalándose con el antiguo lago de Texcoco. Este suelo blando por lo general consiste en dos capas de arcilla blanda separadas por una capa compacta de arena llamada capa dura. Entre la zona de Lomas y la zona de Lago se encuentra la zona de Transición, donde los depósitos blandos son más delgados y se intercalan con depósitos aluviales. Esta zonificación geotécnica se muestra en la figura 2.4, en la cual se muestra también la red de estaciones acelerométricas, sitios de referencia y algunas avenidas importantes de la ciudad.

La Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) se encuentra en la zona de Lomas con un espesor de 3 a 5 metros de roca basáltica. En la UNAM se encuentra una estación acelerométrica que ha registrado numerosas señales sísmicas, esta estación será nombrada de aquí en adelante como sitio CU. La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) se encuentra en la región de depósitos blandos de la zona de Lago.

Se han estudiado los efectos de amplificación de la señal registrada en CU para el sismo de 1985 en diferentes sitios de la Ciudad de México. Ese terremoto produjo en el sitio CU aceleraciones de sólo 0.03 g a 0.04 g, en la zona de Transición, las aceleraciones máximas fueron ligeramente mayores a las de CU. Sin embargo, en la zona de Lago las aceleraciones máximas registradas fueron cinco veces mayores que las registradas en CU. Además los contenidos de frecuencia de los sitios de la zona de Lago fueron también diferentes que los de CU; el periodo dominante en SCT fue de 2 seg. Los espectros de respuesta de las tres diferentes zonas se muestran en la figura 2.5 en la cual se pueden ver los efectos de amplificación que tuvieron los suelos arcillosos de la zona de Lago, a periodos de aproximadamente 2 seg, las aceleraciones espectrales del sitio SCT fueron casi diez veces mayores que las de CU.

Los diferentes espesores de los depósitos de suelo en ciertas zonas de la Ciudad de México causaron esta diversidad de amplificaciones del movimiento hasta valores muy altos de aceleración en zonas donde el espesor de las arcillas fue superior a los 40 metros.

Un suelo arcilloso blando, con elevado índice de plasticidad, gran espesor, bajo amortiguamiento y con un comportamiento esfuerzo-deformación lineal incluso para valores elevados de deformación angular es aquél más susceptible de producir grandes amplificaciones de una señal sísmica proveniente de las profundidades rocosas de la corteza terrestre.

Existe una relación entre las condiciones locales de sitio y el daño ocasionado por el sismo de 1985 como se ha mostrado en diferentes estudios. El daño estructural en la Ciudad de México fue

selectivo, muchas partes de la ciudad no experimentaron ningún tipo de daño mientras que otras sufrieron daños muy severos. Los mayores daños ocurrieron en sitios de la zona de Lago donde los espesores de los depósitos blandos son de entre 38 a 50 metros y donde las características de los periodos dominantes de sitio se estiman de 1.9 a 2.8 seg.

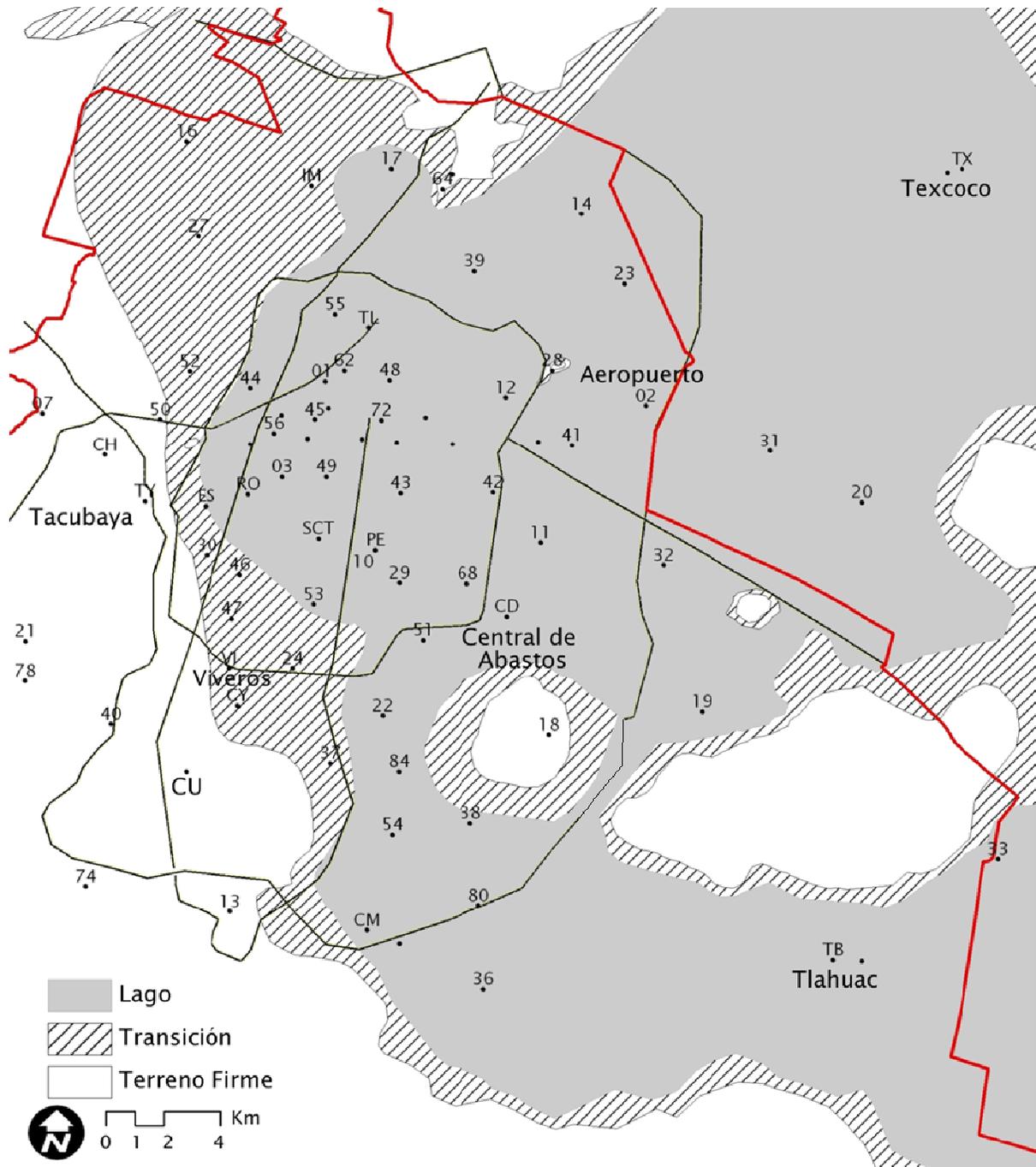


Figura 2.4. Zonificación geotécnica, estaciones acelerométricas y principales avenidas de la Ciudad de México

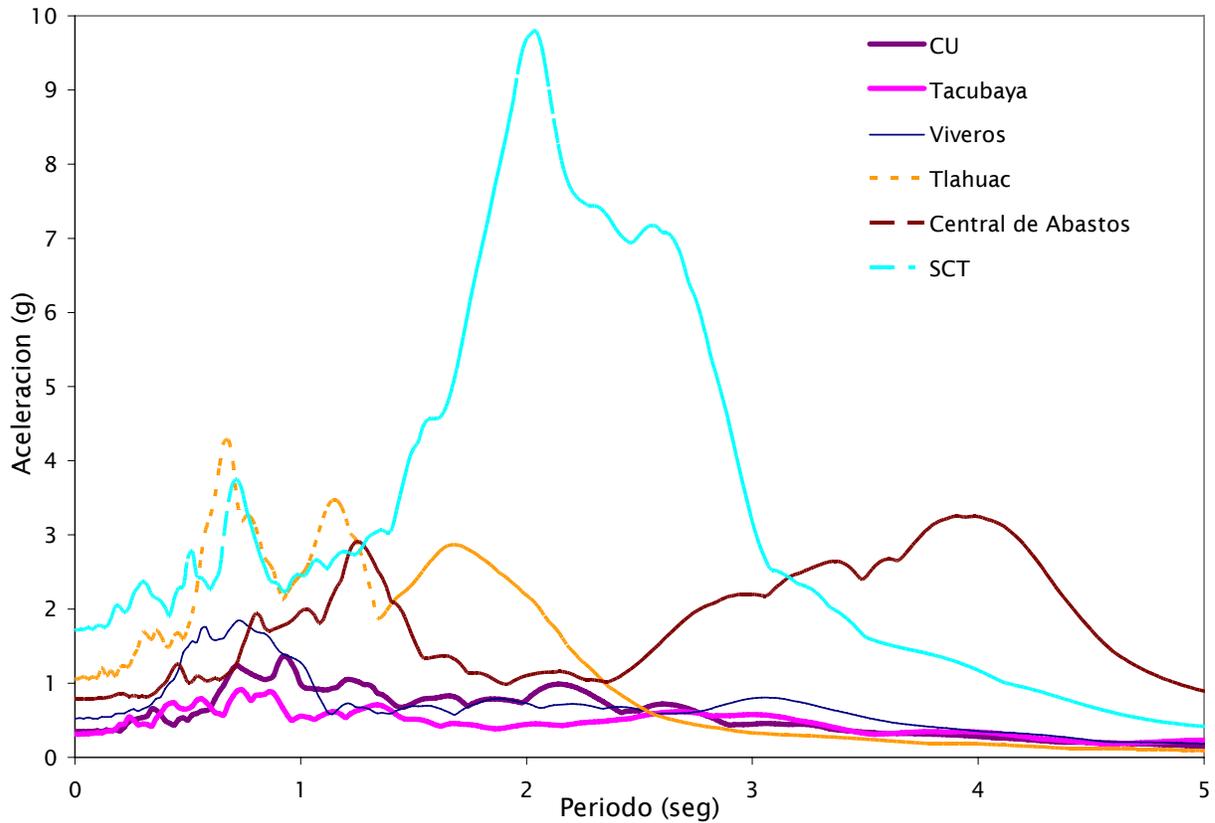


Figura 2.5. Espectros de respuesta en diferentes zonas de la Ciudad de México para el sismo 19/09/85

La red acelerográfica de la Ciudad de México se ha ampliado después del sismo de 1985 registrando los movimientos ocurridos a partir de ese año con mayor atención. Esto ha permitido utilizar dichos registros para analizar el comportamiento del movimiento en las diferentes zonas de la ciudad y con esto afinar principalmente la zonificación geotécnica de la misma. En este trabajo se hace la caracterización de suelo de la ciudad utilizando una función de amplificación y para comparar los resultados analíticos se escogen los sismos que han sido registrados de forma correcta en la mayor cantidad de estaciones con el fin de realizar una mejor caracterización del suelo de la ciudad. Además se toma en cuenta el sismo del 19 de septiembre de 1985 por ser del que más se ha hecho referencia en varios trabajos. Un resumen de las características de estos sismos se presenta en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Características de sismos registrados en la Red Acelerográfica de la Ciudad de México a utilizar

Datos dd/mm/aaaa	Origen	Magnitud	Lat. N	Long. W	Profundidad (km)	Distancia-DF (km)
A 19/09/1985	Subducción	8.1	17.6	102.5		400
B 23/05/1994	Intraplaca	6	18.03	100.57	23	200
C 14/09/1995		7.3	16.31	98.88	22	340
D 15/06/1999	Normal	6.5	18.18	97.51	69	230
E 30/09/1999	Subducción	7.4	15.95	97.03	16	420
F 21/07/2000	Normal	5.9	18.09	98.97	47	145

2.4 Funciones de amplificación y caracterización del suelo

Como se ha mencionado las características de los depósitos de suelo influyen en la amplificación de los movimientos sísmicos. Si suponemos sobre roca basal dos depósitos idénticos de suelo, uno más rígido que el otro, entonces el suelo más blando amplifica los movimientos ricos en bajas frecuencias y el suelo más rígido amplifica los movimientos ricos en altas frecuencias. Siempre y cuando la base rocosa sea rígida, en caso de que la base rocosa sea elástica la amplificación se ve influenciada por la impedancia específica de la roca. Por lo tanto cualquier descripción de las condiciones locales de algún sitio debe incluir densidad y rigidez de la base rocosa. La intensidad del movimiento y las condiciones no lineales del suelo son parámetros que también intervienen en la amplificación del movimiento.

2.4.1 Funciones de transferencia

Función de transferencia es un concepto útil en el análisis de respuesta del terreno en el dominio de la frecuencia, esta depende esencialmente de las condiciones geotécnicas y geológicas de los depósitos de suelo.

Las funciones de transferencia se utilizan para expresar ciertos parámetros de respuesta como el desplazamiento, la aceleración, entre otros, en función de un parámetro del movimiento que pudiera ser la aceleración en la roca basal. Esta relación depende del principio de superposición por lo que se limita al análisis de sistemas lineales, el comportamiento no lineal se puede aproximar usando un proceso iterativo con propiedades del suelo lineal equivalentes.

En el cálculo se involucra el manejo de números complejos sin embargo la aproximación es sencilla. La historia de tiempo del movimiento en roca está caracterizada como una serie de Fourier calculada en este caso con la Transformada Rápida de Fourier (FFT). Cada término de la serie de Fourier se multiplica por la función de transferencia del suelo para obtener la serie de Fourier del movimiento del terreno en la superficie. El movimiento del terreno en la superficie se puede expresar después en el dominio del tiempo usando la inversa de la transformada de Fourier.

A la función de transferencia se le conoce también como función de amplificación debido a que la aceleración en la superficie es mucho mayor a la de la roca. Esto se debe a las características del suelo y en ocasiones a efectos de igual periodo o resonancia entre la frecuencia de la señal en la roca y la frecuencia propia del suelo.

2.4.2 Modelo de análisis unidimensional

Las ondas liberadas por los movimientos sísmicos viajan a través de los materiales geológicos que al entrar en contacto con estos se refractan y se reflejan en varias direcciones, conforme avanzan a través de los diferentes materiales y estratos horizontales estas ondas se van haciendo prácticamente verticales (figura 2.6).

Se puede utilizar un modelo unidimensional de respuesta de terreno para describir los patrones de amplificación del movimiento en la Ciudad de México debido a que los depósitos de la cuenca son relativamente planos y superficiales.

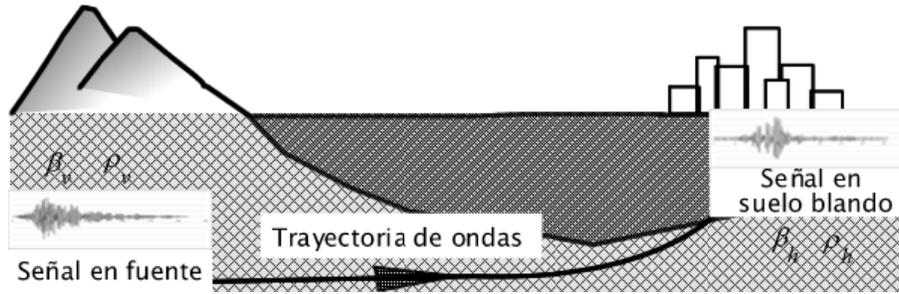


Figura 2.6. Esquema de diferencia entre propiedades y respuesta de roca basal y estrato blando

El análisis unidimensional del terreno se basa en las siguientes hipótesis:

- Los estratos, al llegar cerca de la superficie de la Tierra, son horizontales.
- La superficie en el depósito es una frontera libre y no existe ninguna estructura o excavación cercana.
- La respuesta del depósito es causada por la propagación vertical de onda SH desde la roca subyacente.
- El depósito de suelo y la superficie de la roca son infinitos en la dirección horizontal.

El modelo ha sido empleado para predecir la amplificación del movimiento sísmico en la zona de Lago (Reinoso, 1994; Seed, et al. 1988; Bard, et al. 1988). Uno de estos trabajos es el diseño de los espectros del diseño incluidos en el código sísmico de 1987 (Rosenblueth, et al. 1988). Otros trabajos basados en esta hipótesis han sido utilizados para predecir respuestas del terreno y en muchos casos los valores registrados son prácticamente iguales a los obtenidos con este análisis (Alarcon, 1989; Ovando, 2000).

La expresión para el factor de la amplificación de los desplazamientos de la superficie debido a una onda incidente vertical sobre una capa superficial blanda es:

$$U(\omega) = 2 \left\{ \cos^2 \left(\frac{\omega H}{\beta_v} \right) + \left(\frac{\rho_v \beta_v}{\rho_h \beta_h} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\omega H}{\beta_v} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

donde la onda incidente es una función armónica con amplitud unitaria y frecuencia ω , H es el espesor de la capa, β y ρ son la velocidad de corte y la densidad para la capa superficial y del lecho rocoso. La ecuación predice una amplificación en la superficie libre por un factor de dos.

El período dominante del estrato está dado por la ecuación 2.2. Estas expresiones son válidas para la incidencia vertical de las ondas. Para obtener la respuesta para ondas incidentes oblicuas y para varios estratos, son necesarias otras expresiones.

$$T = \frac{4H}{\beta} \quad (2.2)$$

En la figura 2.7 se muestra la forma de la función de transferencia descrita por el modelo unidimensional para un sitio con 30 metros de espesor de estrato, capa superficial con $\rho_v= 1.4 \text{ T/m}^3$, $\beta_v= 80 \text{ m/s}$ y lecho rocoso con $\rho_h= 2.3 \text{ T/m}^3$, $\beta_h= 1300 \text{ m/s}$ (figura 2.7a). Estas características de velocidad de corte, densidad y profundidad de estrato corresponden a un sitio en la Ciudad de México identificado con el número 84 (Reinoso, 1994), el cual fue uno de los afectados severamente en el sismo de 1985 y las características del movimiento son similares en los sitios

aledaños. El periodo de suelo calculado con la ecuación 2.2 es igual a 1.5 segundos el cual es el periodo dominante en la función (figura 2.7b). La función de transferencia que se multiplicará por la transformada de Fourier de la señal que se quiere amplificar debe estar en el dominio de la frecuencia, la forma que tiene se presenta en la figura 2.7c.

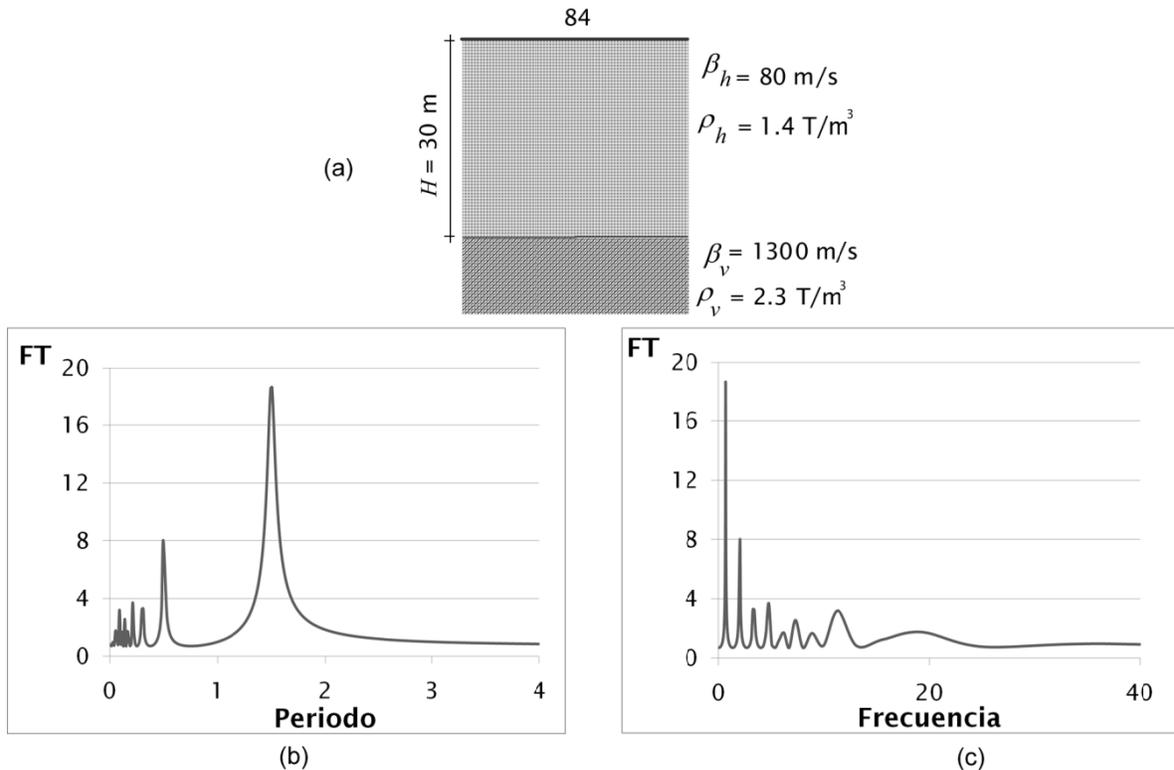


Figura 2.7. Función de transferencia para sitio con $H = 30$ metros, $T = 1.5$ segundos
(a) Propiedades, (b) Periodo, (c) Frecuencia

2.5 Metodología empleada para caracterizar el suelo

Un diagrama del método que se emplea en este trabajo para obtener la respuesta unidimensional de un depósito de suelo se muestra en la figura 2.8, el cual ilustra los siguientes pasos:

- Obtener un registro sísmico en roca o terreno firme subyacente al depósito del suelo.
- Representar el registro como un espectro de Fourier.
- Multiplicar cada término del espectro de Fourier del registro en roca por la función de transferencia FT obtenida previamente como un modelo unidimensional, para así obtener la respuesta del depósito como un espectro de Fourier.
- Obtener la respuesta en el dominio del tiempo utilizando la inversa de la transformada de Fourier.

Este método se realiza de forma iterativa para cada estación en la que se desea caracterizar las aceleraciones que se presentarán en el futuro, modificando el espesor de estrato de la ecuación 2.1 que define un modelo unidimensional.

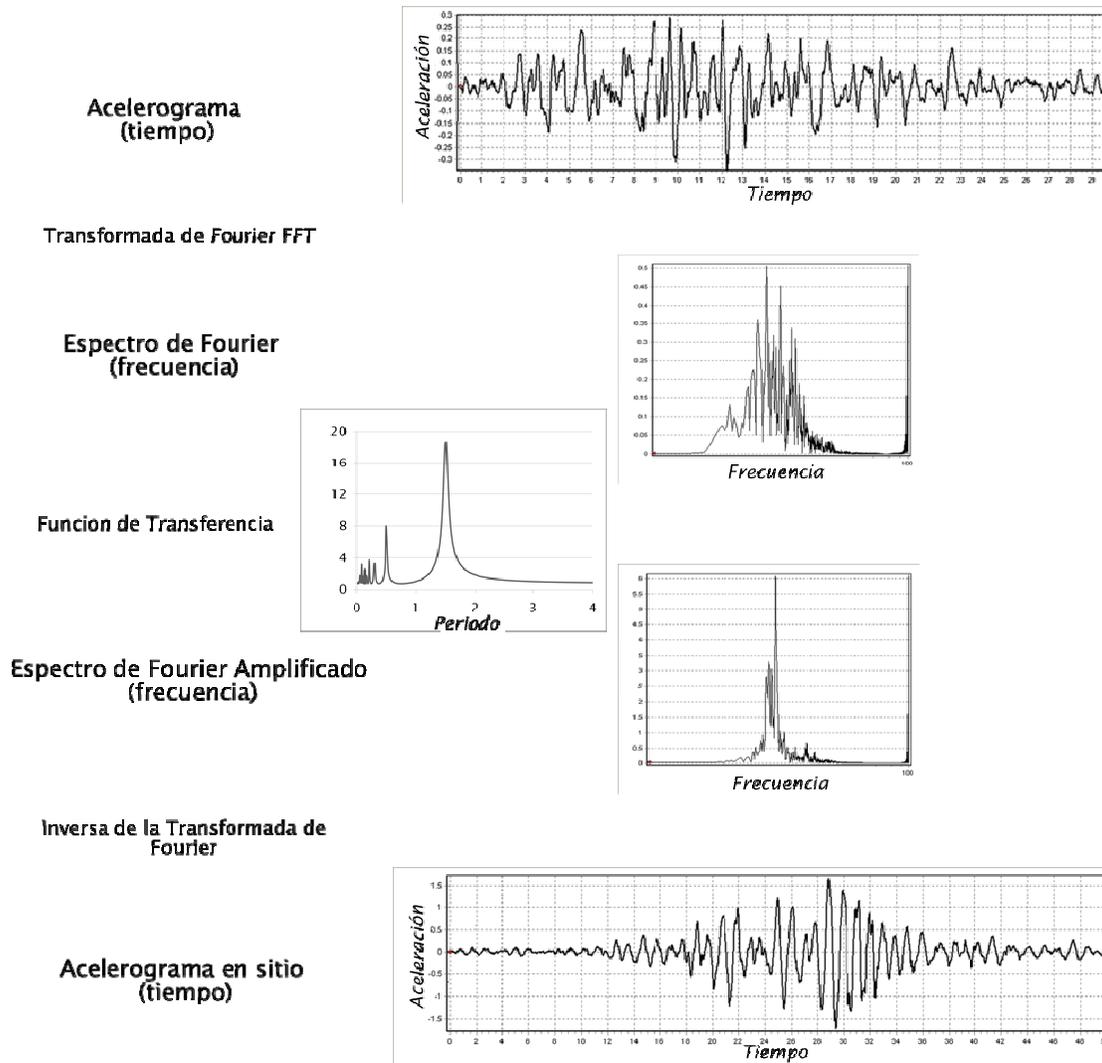


Figura 2.8. Diagrama del cálculo del movimiento del suelo en cualquier punto donde se conozca su función de transferencia ante un registro en roca o terreno firme

2.6 Mapas de peligro sísmico

La técnica de las funciones de transferencia o cocientes espectrales ha servido para medir la amplificación relativa de los sitios en zonas de Lago y Transición con respecto a los del terreno firme, utilizando la red acelerográfica de la Ciudad de México.

Debido al peligro sísmico de la Ciudad de México se han desarrollado herramientas e investigaciones que ayudan a mitigar dicho peligro, entre otros, se han elaborado cocientes espectrales para la ciudad para los diferentes tipos de sismo que afectan a ésta. Los cocientes espectrales representan la amplificación medida y refleja las características dinámicas del sitio, entre ellas el periodo o frecuencias dominantes.

Como aplicación de las funciones de transferencia o cocientes espectrales se hicieron mapas de peligro sísmico que forman parte del Atlas de Riesgos de la Ciudad de México y son difundidos por la Secretaría de Protección Civil del Gobierno del Distrito Federal. Se cuenta con los cocientes espectrales de las estaciones acelerométricas de la ciudad, los cuales al estar georreferenciados se interpolan para obtener las aceleraciones esperadas en toda la ciudad asociadas a sismos de distintos periodos de retorno y a diferentes periodos estructurales.

Estos mapas están elaborados para diferentes periodos de retorno 10, 20, 125 y 475 años. Este periodo se elige dependiendo la importancia y vida útil de la estructura. Las intensidades producidas por un sismo con periodo de retorno de 10 años deben ser resistidas por cualquier estructura construida en la ciudad sin producir ningún daño estructural; un periodo de retorno de 20 años produce intensidades que como límite podrían provocar daños en elementos no estructurales como plafones, acabados, entre otros elementos frágiles en las estructuras. El periodo de retorno de 125 años está asociado a intensidades que provocan los sismos ocasionales como el del 19 de septiembre de 1981. Por último el periodo de retorno de 475 años se relaciona con eventos extraordinarios los cuales están tomados en cuenta por el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y para éstos las estructuras vitales como son hospitales y centrales de comunicación deben funcionar en toda su capacidad en caso de una contingencia urbana por lo que no pueden sufrir daños.

Los mapas están creados para diferentes periodos estructurales (0, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 4.0 segundos) con los cuales se pueden caracterizar los distintos tipos de estructuras que existen en la ciudad, como es sabido una forma aproximada de calcular el periodo es dividir el número de pisos de la estructura entre diez.

Con estos mapas es posible identificar las aceleraciones máximas que actuarían sobre las construcciones según su ubicación lo que puede funcionar como una ayuda de diseño. También se pueden utilizar para la concientización de la población en general del riesgo que existe en la ciudad, así como para ser estudiados por los cuerpos de rescate y protección civil para reconocer zonas de alto riesgo para elegir un plan de acción en caso de sismo, entre otras aplicaciones que tengan como objetivo mitigar el riesgo sísmico.

Se muestra en la figura 2.9 un mapa de peligro sísmico para un periodo de retorno de 125 años el cual, como se mencionó anteriormente, se relaciona con intensidades sísmicas que se correlacionan con el sismo ocurrido el 19 de septiembre de 1985 para un periodo estructural de 2.0 segundos que corresponde a edificaciones de entre 12 y 16 niveles. Las intensidades mostradas en este mapa se correlacionan con la zona donde ocurrieron la mayor cantidad de daños en el sismo de 1985. Es notable cómo la ciudad se encuentra afectada por aceleraciones que pueden tener diferencias de hasta diez veces en distancias relativamente cortas de alrededor de dos kilómetros. Las aceleraciones máximas están fuera de la ciudad en la zona del lago de Texcoco donde la aceleración es de hasta 810 cm/seg^2 . Dentro de la ciudad la zona con mayor aceleración es en la zona cercana al cruce de las calles de Reforma e Insurgentes, colonias Roma y Juárez, extendiéndose hasta la colonia Doctores donde se encuentra el Centro Médico Nacional. Con la misma intensidad de aceleraciones se encuentra la zona del cruce de las avenidas Tlalpan y Circuito Interior, región donde se localizaba el edificio de la Universidad Iberoamericana que se dañó con el sismo de Petatlán del 14 de marzo de 1979.

Para observar la diferencia entre la sollicitación de aceleraciones para los diferentes tipos de estructuras se presenta la figura 2.10 correspondiente al mapa de periodo de retorno de 125 años y periodo estructural de 0.5 seg. Las aceleraciones máximas para éste periodo estructural son de 250 cm/seg^2 , lo que equivale a tres veces menos las sollicitadas para el periodo estructural de 2 seg (figura 2.9). En este caso la región donde se presentan las aceleraciones máximas es mayor que en el caso anterior e incluye Azcapotzalco y San Juan de Aragón al norte, así como Xochimilco al sur.

Mapa de Peligro Sísmico para la Ciudad de México

Periodo de Retorno $T_r = 125$ años
 $T = 2.0$ segundos

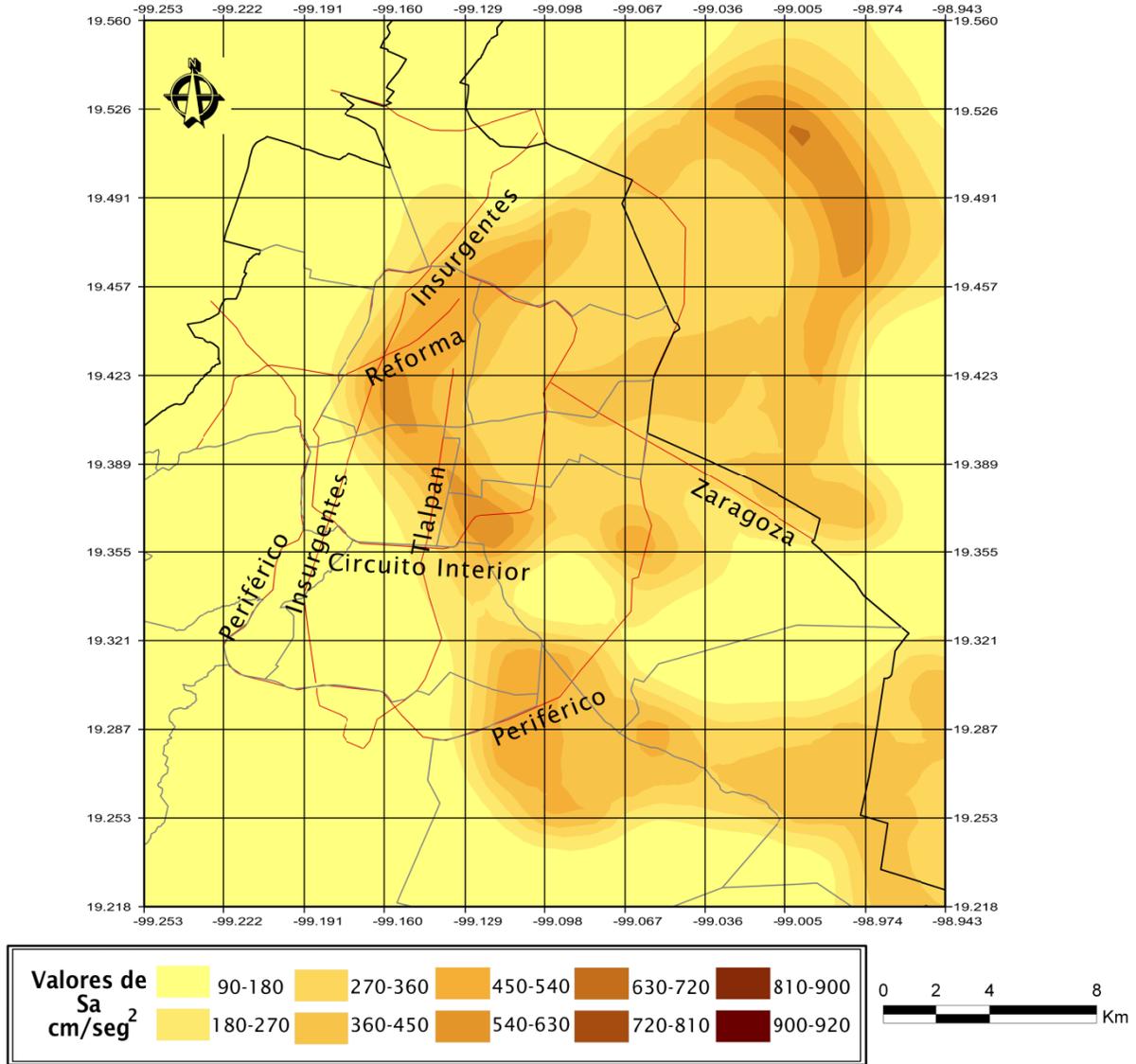


Figura 2.9. Mapa de peligro sísmico para la Ciudad de México: $T_r = 125$ años, $T = 2$ segundos

Con el fin de indicar las diferencias de las aceleraciones solicitadas entre el periodo de retorno de 10 años y el de 125 años (figura 2.10), en la figura 2.11 se presenta el mapa correspondiente a un periodo de retorno de 10 años para estructuras con periodo estructural de 0.5 seg. En dicha figura se observa que la aceleración máxima que se da es de 100 cm/seg^2 , aproximadamente la mitad que en el caso anterior. Estas aceleraciones máximas se dan en la colonia Roma y hacia el norte en Azcapotzalco extendiéndose hasta las cercanías de la Basílica de Guadalupe.

Recordando que el periodo de retorno de 10 años está asociado a aceleraciones que no deben producir ningún daño en las estructuras con el periodo estructural correspondiente, en este caso

0.5 seg, se puede sugerir que las estructuras menores a 5 pisos deben resistir por lo menos las aceleraciones mostradas en la figura 2.11.

Mapa de Peligro Sísmico para la Ciudad de México

Periodo de Retorno $T_r = 125$ años
 $T = 0.5$ segundos

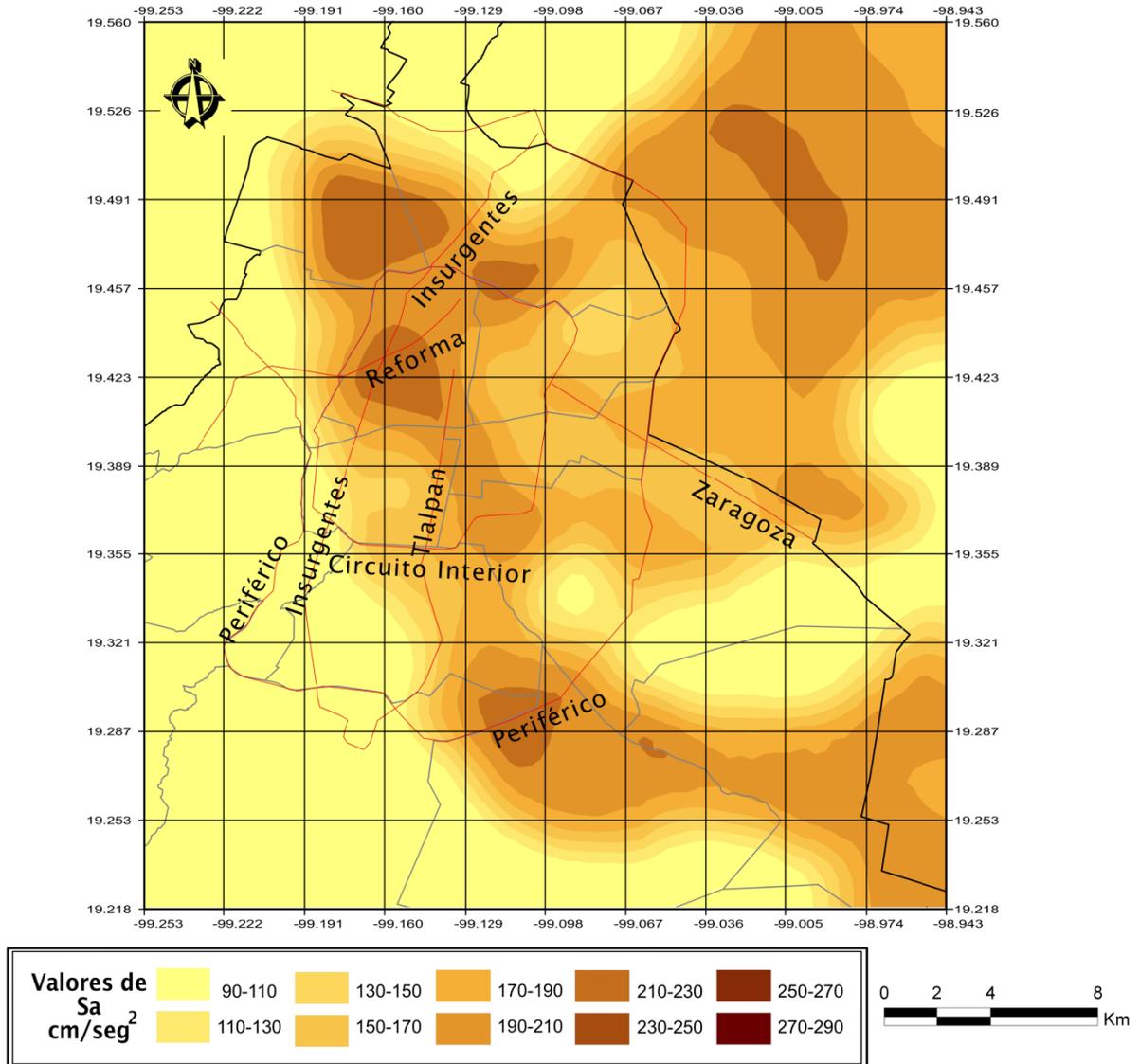


Figura 2.10. Mapa de peligro sísmico para la Ciudad de México: $T_r = 125$ años, $T = 0.5$ segundos

Mapa de Peligro Sísmico para la Ciudad de México

Periodo de Retorno $T_r = 10$ años
 $T = 0.5$ segundos

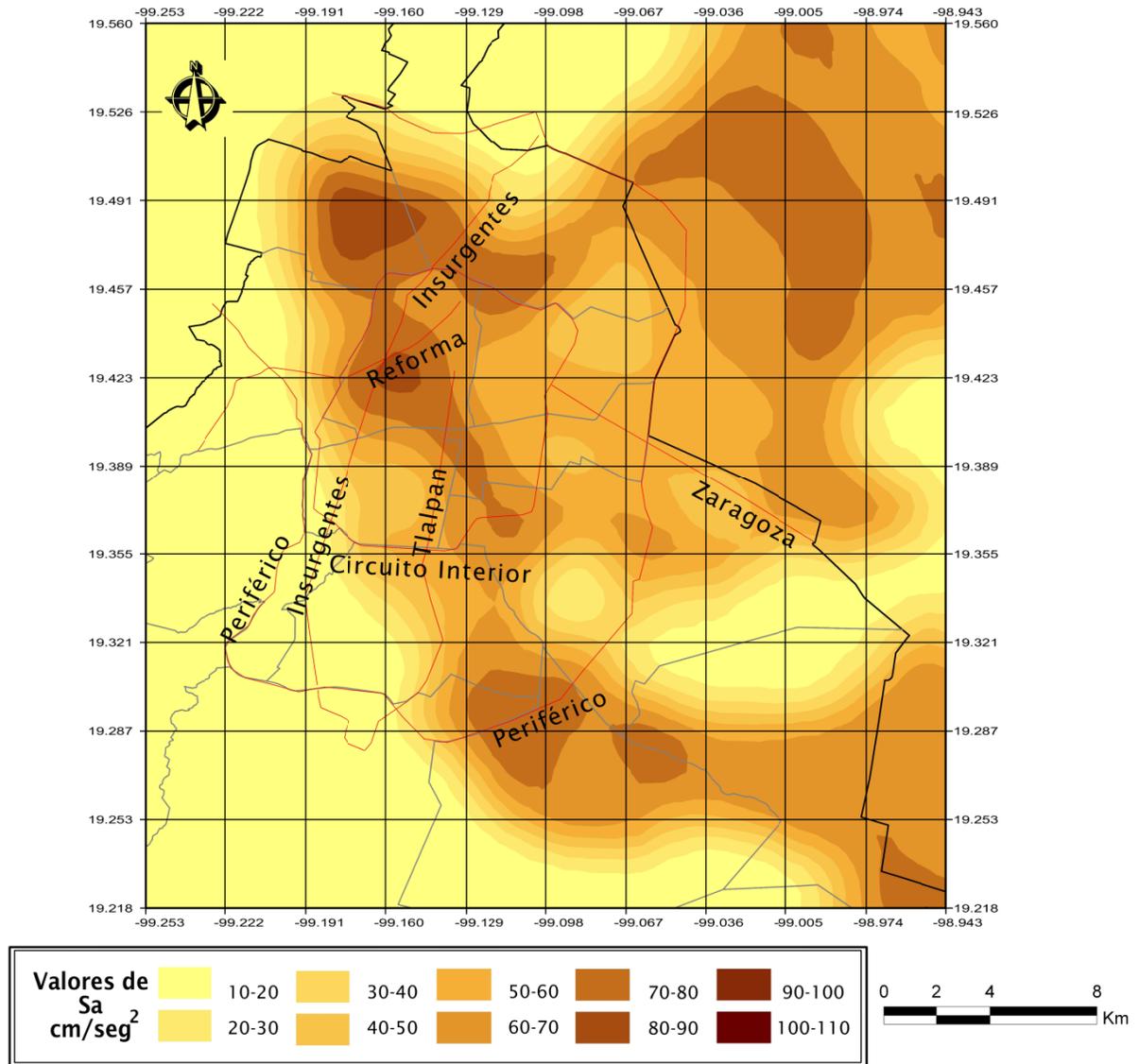


Figura 2.11. Mapa de peligro sísmico para la Ciudad de México: $T_r = 10$ años, $T = 0.5$ segundos

Capítulo 3

Respuesta y vulnerabilidad de las estructuras

3.1 Introducción

En la práctica común las estructuras se diseñan por sismo a partir de las fuerzas que se presentarán sobre éstas en su vida útil y se analiza que las fuerzas resistentes sean mayores a las fuerzas actuantes. Al final del proceso de diseño se revisan los desplazamientos que tendrá la estructura basándose en estados límite de servicio. Esta práctica se ha modificado en años recientes por la comunidad de ingenieros porque se ha demostrado que las deformaciones son un mejor parámetro de diseño que el cálculo de las fuerzas, debido a que se tiene un mejor control del nivel de daño que se espera y éste se puede relacionar con variables que son más evidentes para los dueños de las estructuras como son costo de reparación, tiempo de desocupación y posibles pérdidas humanas.

La diferencia de desplazamientos entre dos pisos continuos normalizados entre su altura es conocida como distorsión de entrepiso, esta diferencia de desplazamientos es provocada por el movimiento de la estructura al aplicarle fuerzas laterales. La distorsión de entrepiso es una medida confiable del nivel de daño esperado en una estructura ya que por esta diferencia de desplazamientos se provocan rotaciones entre los elementos estructurales, las cuales al sobrepasar cierto valor definido en el rango elástico de la curva esfuerzo-deformación ocasionan articulaciones plásticas que disminuyen paulatinamente la capacidad resistente.

La distorsión de entrepiso es además una causa de los daños en elementos no estructurales y en los contenidos de los edificios, por lo tanto es primordial estimar su intensidad y distribución en la altura de las estructuras con lo cual es posible diseñar anclajes y soportes eficientes para los contenidos, fachadas prefabricadas, instalaciones, entre otros.

El daño de contenidos en una estructura implica grandes pérdidas económicas. Éstas pueden representar una inversión muy alta que llega a ser hasta el 75% del costo total de la estructura (Reinoso y Miranda, 2004). En la figura 3.1 podemos ver el porcentaje del costo de cada elemento en las estructuras según el uso de éstas, en los tres usos el costo de los elementos estructurales jamás sobrepasa el 20%, mientras que en hospitales los elementos no estructurales y contenidos pueden ser hasta el 92% del costo total de la estructura. Además en el caso de hospitales, centrales de comunicación, centrales eléctricas, entre otros es fundamental garantizar la funcionalidad de sus contenidos en todo momento. El conocimiento de la respuesta de los contenidos puede ser vital en ocasiones como el caso de estantes en bodegas comerciales u oficinas que al volcarse pueden provocar pérdidas humanas a parte de las pérdidas económicas. Los daños en contenidos se deben a los efectos inerciales de la aceleración y la velocidad en la base de éstos (Arredondo, 2006), y como esto depende de la ubicación espacial en la estructura es necesario conocer la distribución de dichas respuestas en la altura de la misma.

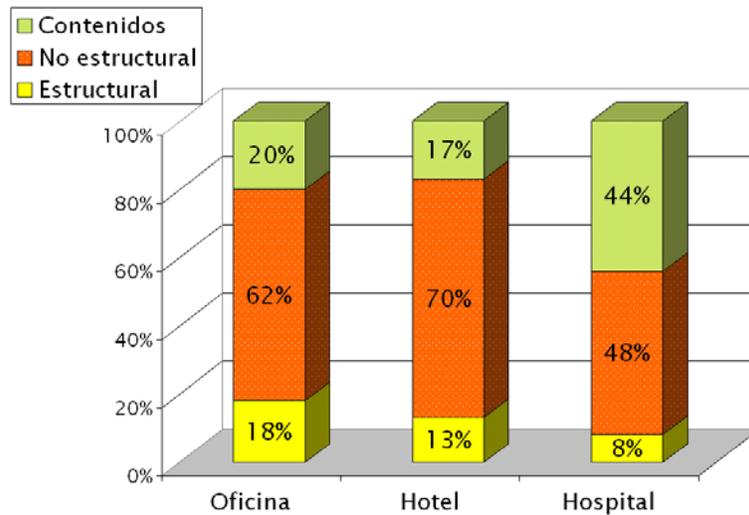


Figura 3.1. Porcentaje del costo en una estructura de elementos estructurales, no estructurales y contenidos según el uso de la estructura

Como criterio de mitigación del riesgo sísmico es necesario evaluar la respuesta de estructuras ya construidas, porque así se puede revisar el comportamiento que tendrán y de ser necesario modificar sus características ya sea rigidizando para limitar los desplazamientos o aumentando la capacidad de deformación de los elementos estructurales.

Al conocer la respuesta sísmica de una población de estructuras podemos saber cuáles son las zonas urbanas más vulnerables y estimar cuáles son aquellos edificios que pueden sufrir daños; es posible diseñar planes de acción para enviar cuerpos de rescate que salvarían cientos de vidas en las primeras horas después de ocurrido un sismo.

Por lo mencionado anteriormente sabemos que es necesario proponer y manejar un método confiable para la evaluación de la respuesta sísmica, que sea útil desde el proceso de diseño de una estructura hasta el análisis de estructuras ya construidas y que además requiera de pocas variables para su implantación.

Una forma de calcular la repuesta sísmica es con el espectro de respuesta el cual provee una medida total de la demanda de desplazamientos, sin embargo los desplazamientos nunca ocurren de forma distribuida como son evaluados con el método, además de que éste no toma en cuenta los modos de vibrar superiores (Miranda y Akkar, 2006); por lo tanto el espectro de respuesta no da un dato correcto sobre la distorsión máxima. Se han formulado otros métodos de evaluación de la respuesta sísmica que toman en cuenta los modos de vibrar superiores ya que no en todas las estructuras rige el primer modo y que dan la historia de desplazamientos a lo largo de la altura del edificio con lo cual se puede identificar la demanda de desplazamientos para cada nivel evitando el piso blando; uno de estos métodos de evaluación de respuesta es el modelo continuo y en este trabajo se maneja el propuesto por Miranda (1999).

3.2 Respuesta de un modelo continuo

Se ha propuesto la utilización de modelos continuos para la evaluación de la respuesta estructural a partir de una excitación dinámica (Miranda, 1999; Miranda y Akkar, 2006). Existen modelos que definen a las estructuras como vigas de corte, sin embargo se ha estudiado que el comportamiento de las estructuras corresponde más a una combinación de la respuesta como viga de corte y viga de flexión (figura 3.2). Miranda (1999) propone un modelo continuo para evaluar la respuesta dinámica de estructuras a partir de dos vigas en voladizo que combinan deformaciones laterales de corte de flexión conectadas entre sí por un número infinito de elementos axialmente rígidos los cuales transmiten las fuerzas horizontales entre dichas vigas debido a una aceleración en su base, el esquema del modelo se muestra en la figura 3.3. La combinación de la respuesta de las vigas del modelo da como solución la respuesta de una estructura cualquiera. El modelo utilizado no considera el comportamiento no lineal de las estructuras, de ser necesario es posible actualizar para eventos posteriores los parámetros que definen el comportamiento dinámico de las estructuras.

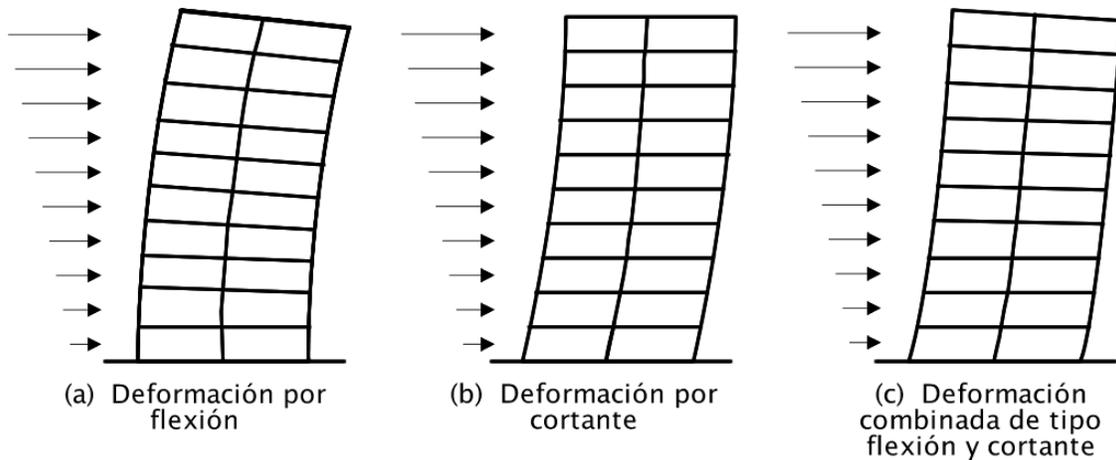


Figura 3.2. Deformaciones en edificios debidas a fuerzas laterales

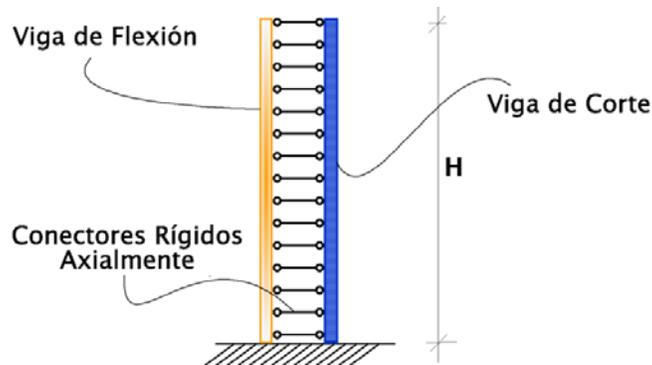


Figura 3.3. Representación del modelo continuo

La ecuación 3.1 define el modelo continuo propuesto por Miranda y Taghavi (2005):

$$\frac{\rho}{EI} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} + \frac{1}{H^4} \frac{\partial^4 u(x,t)}{\partial x^4} - \frac{\alpha^2}{H^4} \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = -\frac{\rho}{EI} \frac{\partial^2 u_g(t)}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

donde H es la altura total del edificio, ρ es la masa por unidad de longitud y α es un parámetro adimensional dado por la ecuación 3.2:

$$\alpha = H \sqrt{\frac{GA}{EI}} \quad (3.2)$$

en la que GA y EI son la rigidez lateral de la viga de cortante y flexión respectivamente.

El valor α es conocido como el grado de participación de la rigidez a cortante y a flexión de las vigas del modelo; éste controla sobre todo la respuesta del modelo en los modos superiores (Miranda y Taghavi, 2005).

Si se considera que la masa por unidad de volumen ρ y la distribución de rigideces en altura son uniformes, las aceleraciones a una altura x de un edificio con comportamiento elástico se pueden obtener como la superposición de la respuesta de todos los modos de vibrar según la ecuación 3.3 (Reinoso y Miranda, 2005):

$$\ddot{u}'(x,t) = \left[1 - \sum_{i=1}^m \Gamma_i \phi_i(x) \right] \cdot \ddot{u}_g(t) + \sum_{i=1}^m \Gamma_i \phi_i(x) A_i(t) \quad (3.3)$$

donde m es el número de modos considerados en la respuesta, Γ_i el factor de participación del i -ésimo modo de vibrar, $\phi_i(x)$ es la amplitud de la i -ésima forma modal a una altura x , $A_i(t)$ es la historia de aceleración absoluta para un sistema de un grado de libertad (por sus siglas en inglés SDOF) con periodo y amortiguamiento correspondientes al modo i y $\ddot{u}_g(t)$ es la aceleración del suelo.

En este trabajo se toman los seis primeros modos de vibrar; en algunos edificios altos de Estados Unidos se ha visto que modos superiores (> 4) contribuyen notablemente a la respuesta total (Reinoso y Miranda, 2005).

Las ecuaciones que definen y resuelven el modelo requieren básicamente de tres parámetros dinámicos para evaluar la respuesta de las estructuras, periodo fundamental de vibración T , fracción de amortiguamiento crítico ζ y el factor α , el cual define la participación de las deformaciones por cortante y por flexión del modelo. Un valor de $\alpha = 0$ se refiere a una respuesta como viga de flexión y un $\alpha \rightarrow \infty$ se refiere a un comportamiento como viga de corte (figura 3.4), la variedad de valores de α definen el comportamiento de las estructuras como la combinación de participación en la respuesta real.



Figura 3.4. Esquemmatización del factor de participación α

Según Miranda y Akkar (2006) para periodos estructurales menores a 1.5 segundos el parámetro α utilizado en el modelo continuo no contribuye a la respuesta estructural, es decir, en estos edificios

el comportamiento puede ser calculado como aquel que tiene una viga de flexión con $\alpha = 0$. Los valores de α para edificios regulares con comportamiento elástico estructurados con muros de concreto están entre 0 y 2, con sistemas de rigidez combinados a base de marcos y muros de cortante o marcos y contraventeos están entre 1.5 y 5, sistemas con marcos estructurales entre 5 y 15 (Miranda y Reyes, 2002).

El modelo propuesto es una herramienta rápida para la evaluación de la respuesta estructural debido al poco esfuerzo computacional requerido y a la cantidad mínima de variables necesarias para definir a las estructuras dando muy buenos resultados como se ha publicado en diversos trabajos (Miranda y Taghavi, 2005; Reinoso y Miranda, 2006; Miranda y Akkar, 2006; Reinoso y Miranda, 2004). También se ha utilizado para definir las propiedades dinámicas de las estructuras a partir de la instrumentación de éstas y de registros históricos de aceleraciones (Arredondo, et al. 2005) (Mosquera, et al. 2006), y para evaluar la respuesta y propiedades de los contenidos en las estructuras (Arredondo, 2006).

Es posible analizar la respuesta de muchas estructuras en forma relativamente rápida y con el mínimo de parámetros que definan las propiedades dinámicas de éstas, por lo que en este trabajo se propone evaluar la respuesta de una población de estructuras. Para esto es necesario definir las propiedades dinámicas de los edificios lo cual se puede hacer tomando en cuenta los datos de catastro que se tienen en un Sistema de Información Geográfica (SIG) que constan principalmente de año de construcción o de última remodelación, grado de conservación, uso estructural y número de pisos. Con estos datos se calcula el periodo fundamental de las estructuras utilizando el programa RSMex® (Ordaz, et al. 2000), se toma en cuenta la irregularidad en planta y elevación, entre otros (Quiroga y Reinoso, 2004); además se infiere la fracción de amortiguamiento crítico ζ y el factor de participación α .

3.3 Vulnerabilidad estructural

La respuesta de la estructura, en este caso obtenida con el modelo continuo, se debe asociar a un valor que nos indique el nivel de daño que se presentará, éste puede ser la distorsión de entrepiso, que después se puede relacionar a términos económicos como costo de reparación o de desocupación. No todos los sistemas estructurales se comportan de la misma forma y por lo tanto su nivel de desempeño o resistencia al daño no es la misma, por lo tanto es necesario evaluar la vulnerabilidad de las estructuras o qué tan sensibles son éstas al daño.

La vulnerabilidad estructural nos indica el daño que se puede tener en los edificios ante la ocurrencia de algún fenómeno natural. Entre más vulnerable sea una construcción mayor es el daño probable. Es decir, la vulnerabilidad en este caso está en función de la intensidad del movimiento sísmico y el nivel de daño que sufre la estructura.

Es necesario conocer las características de las estructuras para poder evaluar el daño que se espera. Datos como el sistema estructural, año de construcción, grado de conservación, irregularidades en elevación y en planta, entre otras, son útiles para definir el tipo de estructura. Para calcular el daño total de una edificación o pérdida bruta, se deben sumar los daños en la estructura, los de los contenidos y las consecuencias por haberse dañado.

Como se mencionó anteriormente el daño o pérdida se relaciona con el valor de la distorsión de entrepiso que denotaremos γ . Este parámetro de respuesta es el que tiene mejor correlación con el daño estructural y no estructural y por lo tanto con la pérdida bruta. El valor esperado de daño o pérdida bruta β se puede estimar con la ecuación 3.4. Dicha ecuación varía entre cero a uno, el

valor de cero corresponde a daño nulo y el valor de uno se refiere al daño total, como se muestra en la figura 3.5 que define a la también conocida como función de vulnerabilidad.

$$E(\beta / \gamma_i) = 1 - 0.5^\theta \quad (3.4)$$

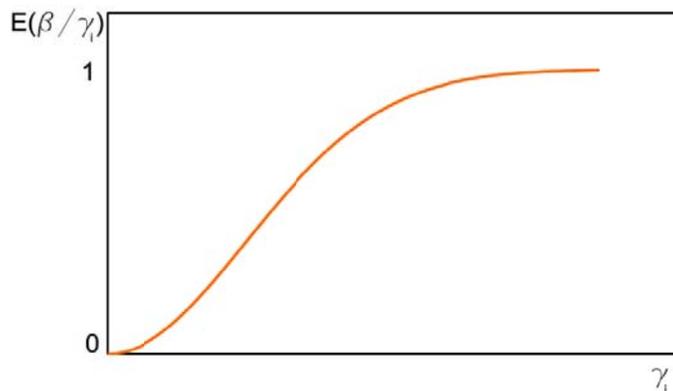


Figura 3.5. Relación entre distorsión de entrepiso y valor esperado de daño, función de vulnerabilidad

La ecuación que define el valor esperado de daño depende del exponente θ el cual se define con la expresión 3.5, en la cual γ' y ρ son función de la distorsión que inicia el daño y de la distorsión que provoca el daño total de los elementos estructurales o no estructurales que la soportan, en algunos trabajos γ' se ha definido como la distorsión referida al 50% del valor total del inmueble. El valor ρ es un parámetro de vulnerabilidad que depende del tipo estructural y del tipo de diseño asociado al reglamento de construcción vigente al momento de su concepción, éste es del orden de dos. La variable γ_i es la distorsión demandada y depende de la aceleración espectral S_a ; en este caso la distorsión demandada γ_i se calcula con el modelo continuo de Miranda y Taghavi (2005).

$$\theta = \left(\frac{\gamma_i}{\gamma'} \right)^\rho \quad (3.5)$$

Reyes (1999) propone valores límite de distorsión de entrepiso con los que se puede definir el parámetro γ' . Estos valores están definidos para los casos en que se inicien los daños en estructuras y aquellos que provocan el daño total. Reyes (1999) presenta valores para las distorsiones que afectan las estructuras, los contenidos y a la percepción de la gente que ocupa las estructuras.

En la tabla 3.1 se presentan las distorsiones límite para diferentes sistemas estructurales propuestas por Reyes (1999), en dicha tabla podemos observar cómo los marcos de concreto, marcos de acero y mampostería confinada presentan un rango amplio entre el inicio del daño y el daño total. Estas distorsiones límite son una buena medida para conocer el grado de deformación que puede resistir cierto tipo estructural.

La tabla 3.2 presenta las distorsiones límite para los elementos no estructurales como muros de relleno o divisorios, fachadas y plafones, estos elementos al dañarse crean una percepción errónea del daño sobre la estructura y una sensación de inseguridad que puede dejar sin funcionar a los edificios, además el daño en estos elementos representa altos costos de reparación.

La tabla 3.3 muestra los valores límite de aceleración máxima en este caso que evitan la incomodidad personal y la caída o balanceo de objetos.

Tabla 3.1. Distorsiones de entrepiso que inician el daño en diferentes sistemas estructurales (Reyes 1999)

Sistema estructural	Distorsión de entrepiso que inicia el daño	Distorsión de entrepiso para daño total
Marcos de concreto detallados sísmicamente	0.005	0.04
Marcos de concreto sin un buen detallado sísmico	0.0073	0.0217
Losa plana	0.008 para: $v_g < 0.88\sqrt{f_c}$ (psi) 0.004 $v_g > 1.44\sqrt{f_c}$ (psi)	0.012 Si $v_u/v_g = 0.45$
Muros de mampostería		
De piezas macizas	0.001	0.006
De piezas tipo panal	0.001	0.006
De piezas huecas con refuerzo interior y confinadas por castillos y dalas	0.0007	0.006
De piezas huecas con refuerzo interior sin confinar	0.0005	0.003
De bloque de concreto confinados por castillos y dalas	0.0005	0.005
De piezas huecas pegadas con mortero pobre o bien piezas Silicocalcárea	0.0003	0.003
Muros de concreto	0.0015 para $h/b > 2.0$ 0.001 para $h/b < 2.0$	Depende del nivel de carga axial
Marcos de acero detallados sísmicamente	0.0055	0.02
Marcos de acero sin un buen detallado sísmico	0.0074	0.0298
Marcos de acero contraventeados con diagonales concéntricas	0.005	No se determinó
Marcos de acero contraventeados con diagonales excéntricas	0.004	No se determinó

V_g es el esfuerzo cortante debido a carga gravitacional actuando en la sección crítica de la losa. Los valores de V_g que se presentan en la tabla corresponden a un nivel bajo y a uno alto de carga vertical, por lo que para encontrar la distorsión que inicia el daño correspondiente a valores intermedios de V_g se pueden interpolar linealmente entre ambos valores

Tabla 3.2. Distorsiones de entrepiso que inician el daño en diferentes elementos no estructurales (Reyes 1999)

Elemento no estructural	Distorsión de entrepiso que inicia el daño	Distorsión de entrepiso para daño total
Muros de mampostería		
De piezas macizas	0.002	0.007
De piezas tipo panal	0.002	0.007
De piezas huecas con refuerzo interior y confinadas por castillos y dalas	0.0017	0.007
De piezas huecas con refuerzo interior sin confinar	0.0015	0.004
De bloque de concreto confinados por castillos y dalas	0.0015	0.006
De piezas huecas pegadas con mortero pobre o bien piezas Silicocalcárea	0.0013	0.004
Muros de tablaroca		
Con marco de lámina delgada	0.004	0.008
Con marco de madera y la tablaroca clavada	0.002	0.005
Con marco de madera y la tablaroca clavada y pegada	0.003	0.008
Fachadas de vidrio	0.025	0.047
Fachadas precoladas		
De desplazamiento horizontal	0.004	0.016
De balanceo	>1.5	>2
Plafones	0.008	0.016

Tabla 3.3. Valores límite de las variables que evitan incomodidad personal y la caída de objetos (Reyes 1999)

Parámetro a evitar	Límite
Incomodidad personal	$a_{max} < 0.05 \text{ g}$ (g aceleración de la gravedad)
Balanceo de Objetos	$a_{max}/g < B/H$ para $H > 50 \text{ cm}$
Caída de objetos (para $H > 50 \text{ cm}$)	$v_{max} < 10 \text{ B}/\sqrt{H}$
Caída de objetos (para $H < 50 \text{ cm}$)	Si $0.00 < a_{max}/g < 0.20$ entonces $B/H > 0.20$ Si $0.20 < a_{max}/g < 0.44$ entonces $B/H > 0.44$ Si $0.44 < a_{max}/g < 1.20$ entonces $B/H > 0.51$

Los datos presentados en estas tablas son utilizados para evaluar el nivel de daño esperado asociado al sistema estructural de cada una de las edificaciones de la Ciudad de México.

3.4 Sistema de Información Geográfica y definición de parámetros dinámicos de las estructuras

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son herramientas computacionales en los cuales se puede administrar una gran cantidad de información con la ventaja de tenerla espacialmente referenciada, con lo que se tiene un panorama sobre su ubicación y por lo tanto con el entorno. Esto es fundamental para tomar decisiones eficientes en las zonas de estudio. Estos sistemas tienen muchas aplicaciones, una de ellas es el manejo de información de los desastres naturales, con el fin, entre otros, de mitigar sus efectos y daños.

Se cuenta con un SIG con datos catastrales para cada uno de los predios que componen el Distrito Federal, esta información consta principalmente de año de construcción o de última remodelación, grado de conservación de la construcción, uso estructural y número de pisos (figura 3.6). Además con estos datos y algunas consideraciones de la práctica común de diseño estructural es posible asignar a cada estructura otras características como sistema estructural, amortiguamiento crítico, entre otras. Con estos datos se calcula el periodo fundamental de las estructuras utilizando el programa RSMex® (Ordaz, et al., 2000). En la figura 3.6 se presenta un despliegue de la información contenida en el SIG tal como la tabla de atributos que contiene la información de cada estructura y la capa de polígonos que forman los predios que contienen las estructuras caracterizadas por la información de catastro.

En el SIG de la Ciudad de México se tiene más de un millón de predios que conforman el universo de estructuras de la ciudad, en la figura 3.7 se presentan algunas referencias útiles para ubicarse en el mapa de la ciudad y de las que se hace mención en lo siguiente tal como principales avenidas, colonias y respectiva zona de terreno donde se ubican las estructuras.

La información catastral del SIG de la Ciudad de México contiene el número de niveles los cuales están dados en rangos que corresponden al número de plantas de las construcciones de cada predio a partir del primer nivel utilizable o edificado.

Cuando el último nivel de un edificio tiene un porcentaje de construcción menor al 20% de la planta anterior el rango de nivel del inmueble corresponde al número de niveles sin tomar en cuenta dicho nivel. El rango de niveles utilizado se considera conforme a la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Características de los niveles contenidos en el catastro

Clave Niveles	Descripción
01	Superficies construidas descubierta
02	De uno a dos niveles o bien si no existe una clara distinción de ellos y la construcción tenga una altura de hasta 6 metros
05	De tres a cinco niveles o bien si no existe una clara distinción de ellos y la construcción tenga una altura de 6.01 a 15 metros
10	De seis a diez niveles
15	De 11 a 15 niveles
20	De 16 a 20 niveles
99	De 21 a más niveles
RU	Edificaciones sin clara distinción de niveles pero exceden altura de 15 metros

CLAVE CATASTRO	USO	TIPO	NIVELES	ANO
010-265.04	H	5	6	1959
010-265.03	H	5	3	1960
010-261.23	C	2	5	1982
010-265.02	H	5	6	1963
010-265.31	Q	5	1	1960
010-265.05	H	15	2	1980
010-261.20	H	5	5	1954
010-261.22	H	5	6	1982
010-265.06	H	5	3	1957
010-261.40	H	10	4	1960

Tabla de Atributos

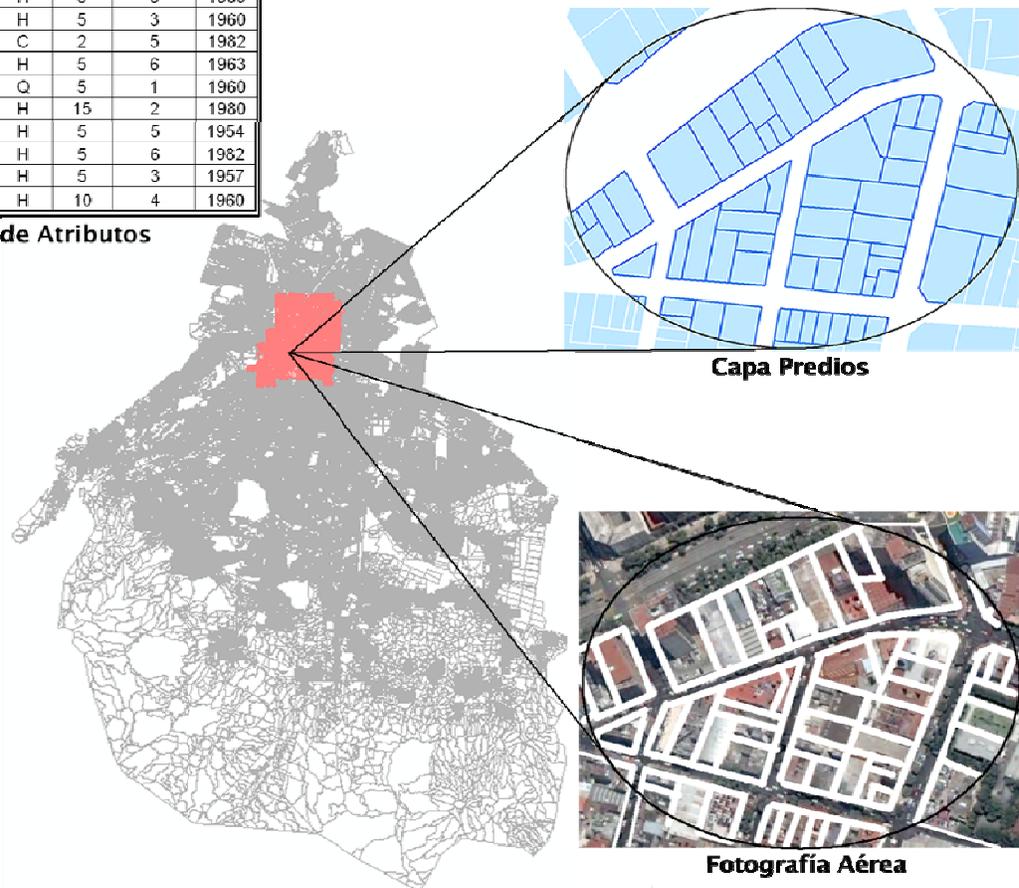


Figura 3.6. Despliegue de información del SIG

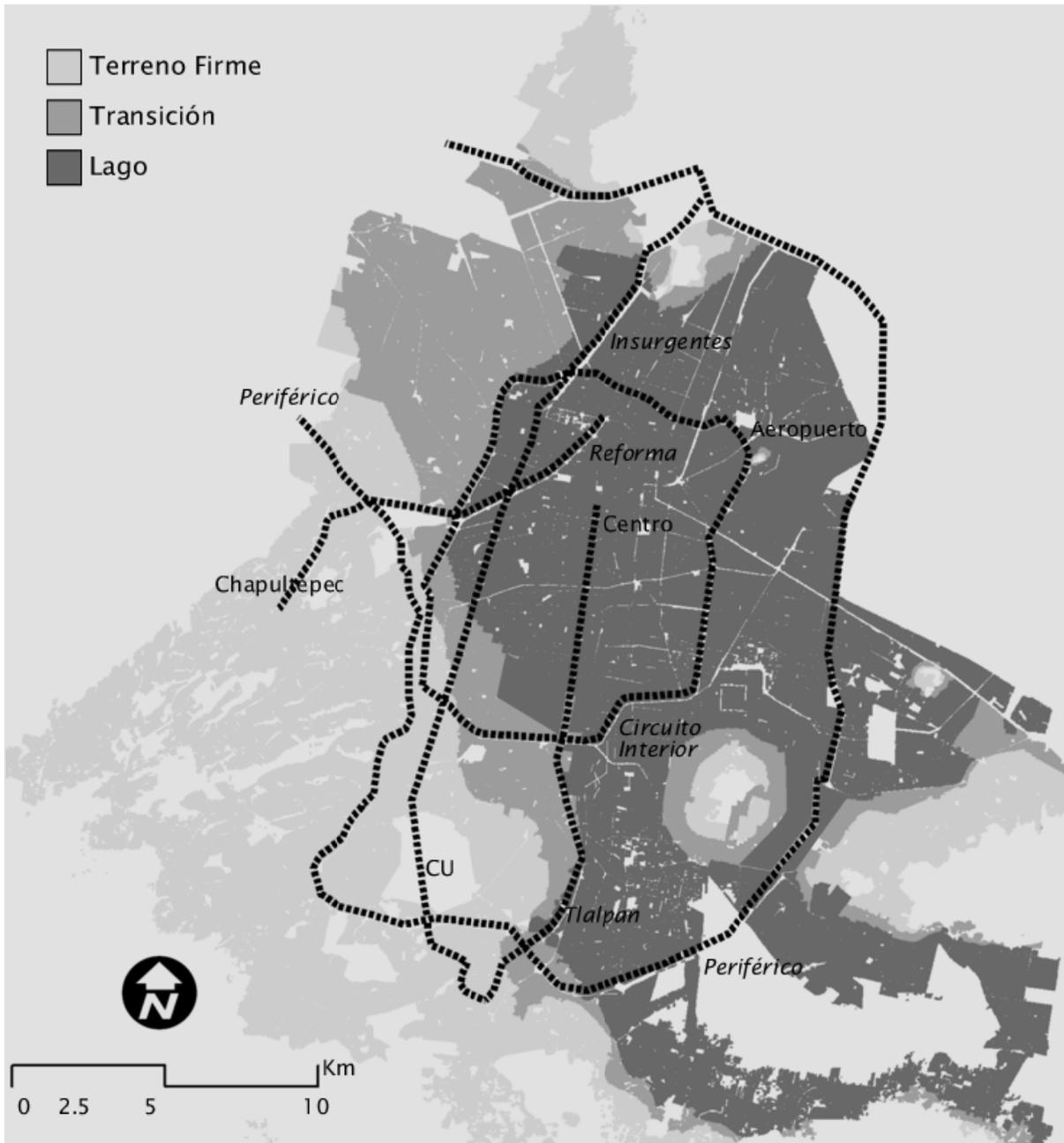


Figura 3.7. Referencias para la Ciudad de México

En la Ciudad de México predominan edificios de hasta dos pisos de altura siendo un 71% del total; el 27% va de los tres a los cinco pisos mientras que sólo el 1.5% son estructuras mayores a los seis niveles (figura 3.8a). Para estructuras mayores a los seis pisos se presenta la figura 3.8b, en la que se tiene que la mayoría es de entre seis y diez pisos; aquellas con 21 pisos o más son sólo el 0.021% del total lo que representa alrededor de 200 estructuras.

Más del 50% de las estructuras existentes en la Ciudad de México han sido construidas o tienen su fecha de última remodelación después de 1985 (figura 3.9a); en los últimos 20 años se ha construido intensamente incrementando el número de estructuras en la misma proporción de las

que existían hasta 1985; casi el 1% tiene fecha de construcción después de 2004, es decir, unas 10,000 estructuras se han construido en los últimos 4 años (figura 3.9a). El uso que tiene la mayoría de estructuras es habitacional; comercios son el 2.4%, seguido por industrias, oficinas, educación y servicios de salud (figura 3.9b). Las estructuras están construidas con sistemas estructurales de mampostería, una proporción relativamente pequeña son construidas con concreto y acero con porcentajes de 1.4% y 1% respectivamente (figura 3.9c).

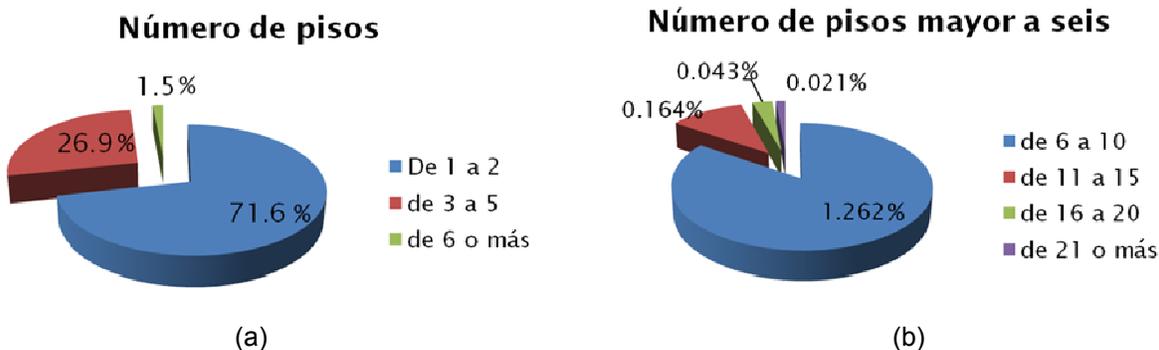


Figura 3.8. Características de las estructuras de la Ciudad de México (a) Niveles, (b) Mayor a seis niveles

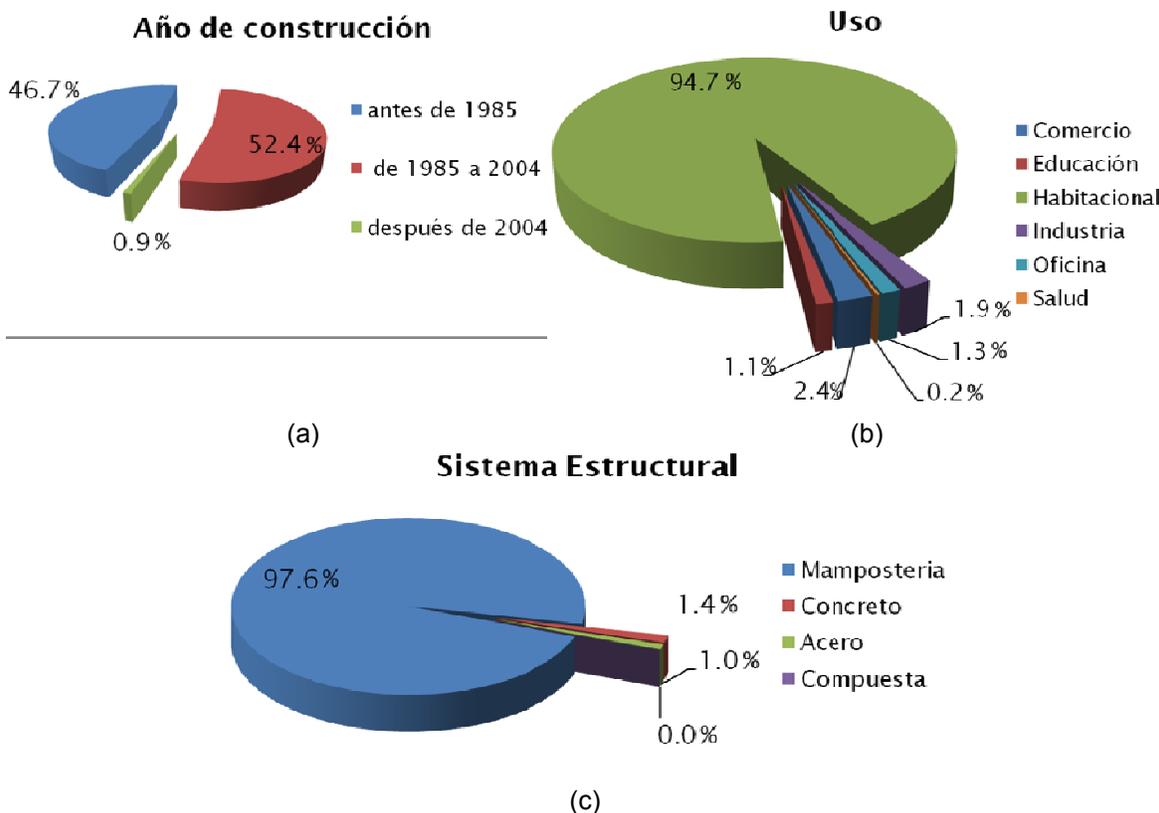


Figura 3.9. Características de las estructuras de la Ciudad de México (a) Año de construcción, (b) Uso, (c) Sistema estructural

Los porcentajes presentados dan una idea de la situación de las estructuras de la ciudad. Se puede decir en resumen que predominan las estructuras con uso habitacional construidas después de 1985 y con sistema estructural de mampostería. Sin embargo contar con un SIG nos ofrece, además de manejar esta gran cantidad de datos, la ventaja de analizar la distribución espacial de las estructuras y con esto hacer inferencias sobre la situación objetiva de las mismas y de la ciudad en general.

En la figura 3.10 se muestra la distribución de estructuras existentes con respecto al número de pisos, en ésta se puede ver que las estructuras con niveles menores a dos se encuentran distribuidos a lo largo de toda la ciudad con una concentración hacia el sur, las de tres a cinco pisos se encuentran distribuidas en una amplia región del centro de la ciudad. Las estructuras mayores a seis niveles se encuentran principalmente en la parte central y hacia el oeste donde es sabido que se encuentra la mayor actividad económica y de la población en la ciudad, además es evidente que las estructuras más altas se encuentran concentradas hacia las avenidas principales como Insurgentes, Reforma, Circuito Interior y Periférico.

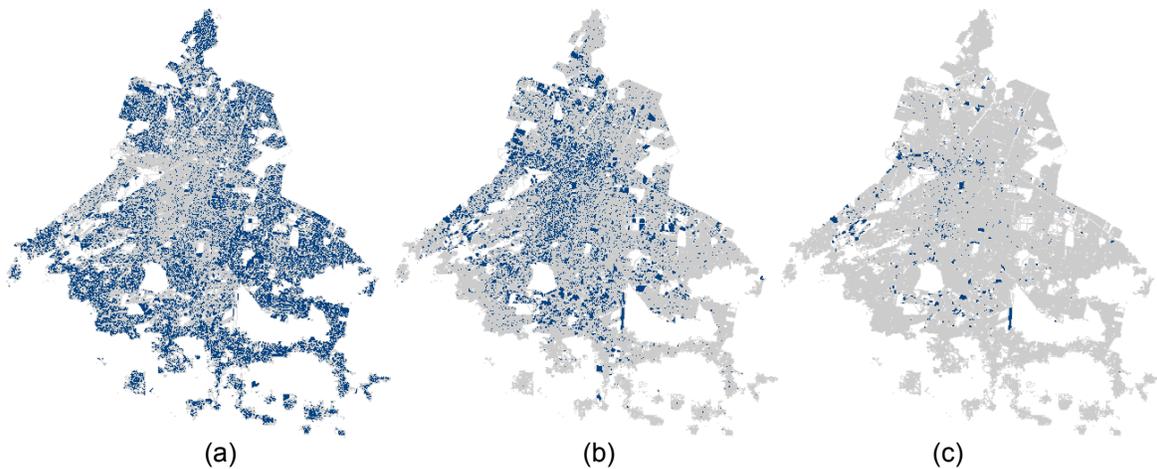


Figura 3.10. Distribución de estructuras de la Ciudad de México por número de pisos, (a) Hasta dos pisos, (b) Tres a cinco, (c) Mayor a seis

En la figura 3.11 se presenta la distribución de estructuras por año de construcción. En esta figura se observa que las estructuras construidas antes de 1985 se encuentran en el centro y al norte de la ciudad mientras que existe un incremento de las construidas después de 1985 hacia la parte externa de ésta sobre todo en el sur. Las estructuras construidas después de 2004 se encuentran en la parte central de la ciudad, región en la cual a partir de ese año se incrementó la construcción de viviendas con el fin de evitar el desplazamiento de la población hacia la parte externa de la ciudad.

La figura 3.12 muestra la distribución de estructuras según su uso. En ésta observamos que las estructuras con uso habitación se encuentran construidas de forma igual por toda la ciudad con una concentración casi imperceptible en la figura mencionada hacia el sur, donde se encuentra la mayoría de las estructuras de menos de dos pisos. Los comercios se encuentran por toda la ciudad, las industrias al norte y el este, las oficinas se encuentran en la parte central por lo que se puede decir que la actividad económica y comercial de la ciudad se encuentra principalmente en el centro de la ciudad. Las estructuras con uso educación y salud se encuentran distribuidas por toda la ciudad.

En la figura 3.13 tenemos la distribución de estructuras en cuanto a su sistema estructural. Se observa que las estructuras construidas con mampostería son la mayoría y se encuentran por toda

la ciudad, en la parte central y hacia las avenidas principales existen por igual estructuras de concreto y acero con un incremento de éstas últimas hacia el norte en la zona industrial.

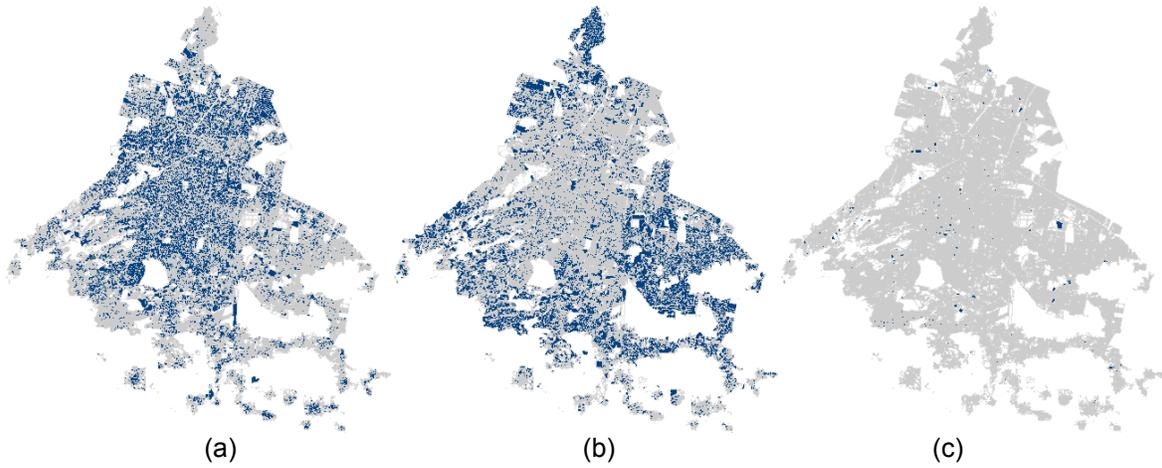


Figura 3.11. Distribución de estructuras de la Ciudad de México por año de construcción, (a) Antes de 1985, (b) Después de 1985, (c) Después de 2004

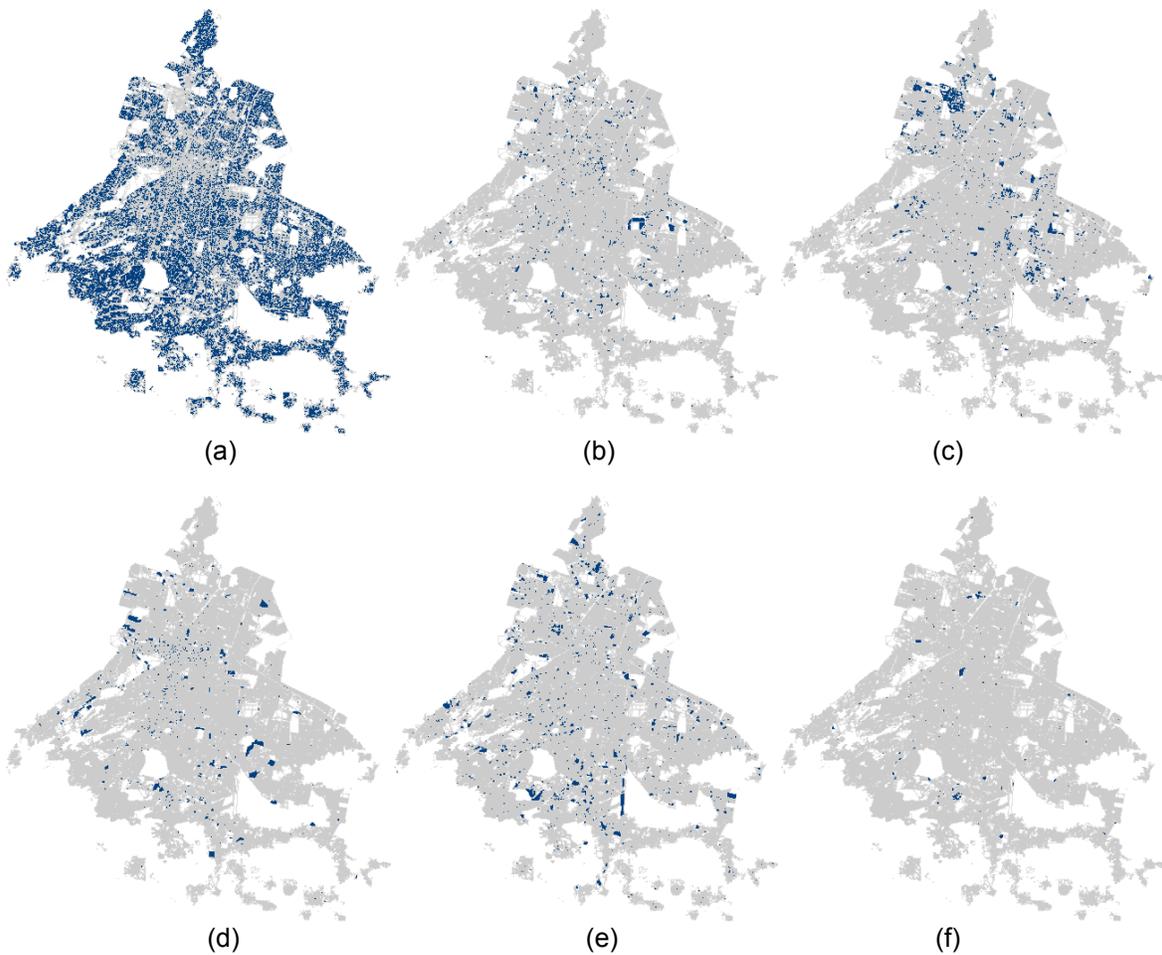


Figura 3.12. Distribución de estructuras de la Ciudad de México por uso estructural, (a) Habitación, (b) Comercio, (c) Industria, (d) Oficinas, (e) Educación, (f) Salud



Figura 3.13. Distribución de estructuras de la Ciudad de México por sistema estructural, (a) Mampostería, (b) Concreto, (c) Acero

Podemos decir que las estructuras de la ciudad son principalmente de mampostería, con uso habitación, construidas después de 1985 y con alturas que van hasta los dos niveles o los 6 metros y están ubicadas en la parte externa, es decir en la zona de lomas. En la parte central de la ciudad se encuentran estructuras tanto de concreto como de acero, con uso comercio y oficina con alturas mayores a los seis pisos.

Como se ha mencionado la información contenida en el SIG es utilizada en este trabajo para evaluar la respuesta estructural ante sismos. Es necesario hacer algunas consideraciones para definir las propiedades dinámicas de las estructuras, factor α y fracción de amortiguamiento crítico, las cuales fueron incluidas en el SIG como parte de la información característica de cada estructura y después utilizada en la evaluación de su respuesta con el modelo continuo referido anteriormente.

Según Miranda y Akkar (2006) para estructuras con periodos menores a 1.5 segundos el parámetro α utilizado en el modelo continuo no contribuye a la respuesta estructural, es decir, en estos edificios el comportamiento puede ser calculado como aquel que tiene una viga de flexión. En este trabajo se toma en cuenta este hecho y a las estructuras con periodos estructurales menores a 1.5 segundos se les ha considerado un valor de $\alpha = 0$, que es el que da en la evaluación del modelo una respuesta mayor. Para periodos mayores que 1.5 segundos α se ha tomado igual a cero para sistemas estructurales a base de muros de mampostería, $\alpha = 5$ para sistemas estructurales a base de columnas de concreto y losa plana, y $\alpha = 20$ para sistemas a base de marcos de concreto y marcos acero (Miranda y Akkar, 2006).

La fracción de amortiguamiento crítico se tomó como un promedio del que se presenta en diferentes recomendaciones las cuales fueron ajustadas según el sistema estructural, el grado de conservación y el año de construcción, que es la información que se tiene en el SIG, los valores que se utilizan se presentan en la tabla 3.5.

Tabla 3.5. Valores de amortiguamiento crítico

Sistema estructural	Fracción de amortiguamiento crítico %	
	Año de construcción	
	Antes de 1985	Después de 1985
Muros de mampostería	7	4
Marcos de Concreto	4	2
Marcos de Acero	3	1

3.5 Metodología para el cálculo de la respuesta estructural

Con los datos descritos anteriormente que forman el SIG de la Ciudad de México actualizado al año 2007, se calculó el desplazamiento lateral máximo resolviendo las ecuaciones del modelo continuo propuesto por Miranda (1999) para los primeros seis modos de vibrar de cada estructura.

Para evaluar la respuesta se requiere la entrada de un acelerograma que represente el movimiento del suelo en el que está desplantada la estructura. Se escogieron tres acelerogramas de estaciones ubicadas en las tres distintas zonas geotécnicas. Se utilizó el sismo del 19 de septiembre de 1985 registrado en las estaciones, CU (Lomas), Viveros (Transición) y SCT (Lago).

Para la evaluación se dividió la población de estructuras en varios grupos dependiendo de su periodo estructural y el periodo predominante del suelo en el que se encuentran, después según su sistema estructural y año de construcción. Clasificados los grupos de estructuras se hicieron combinaciones de datos necesarios por el programa (propiedades y acelerograma) correspondientes a cada grupo, con lo que resultaron 255 casos evaluados. Se calculó la respuesta y se agregó el dato de desplazamiento máximo en la altura de la estructura al SIG, con éste dato se hicieron mapas del nivel de respuesta y de distorsión para las estructuras de la Ciudad de México ante el sismo del 19 de septiembre de 1985.

A continuación se enlista el proceso que se siguió para la evaluación y realización de los mapas.

1. Obtención y validación de los datos de catastro. La oficina de catastro del Gobierno de Distrito Federal proporcionó para un proyecto la cartografía de la Ciudad de México actualizada al 2007 la cual fue modificada de forma que se pudiera utilizar como un SIG. Durante el proyecto realizado para el Gobierno del Distrito Federal se comprobó que la información de catastro correspondiera a lo construido con fotografías y visitas de campo.
2. Con la información en el SIG se separaron grupos de estructuras a partir del sistema estructural asignado a partir de las propiedades, el año de construcción incluido en la base catastral y el periodo estructural calculado con el programa RSMex® (Ordaz, et al., 2000).
3. Se estableció un valor de α y amortiguamiento ζ para cada grupo.
4. A partir de la zona geotécnica donde se encuentra desplantada cada estructura se les asignó un registro correspondiente a la estación acelerométrica de cada tipo de suelo.
5. Se aplicó el modelo continuo a cada caso de estructuras separadas por sus características estructurales y ubicación.
6. Se unieron todos los grupos para evaluar la diferencia de desplazamientos entre los pisos consecutivos en este caso dividiendo la respuesta máxima entre el número de niveles, esta forma de evaluar nos da una distorsión simplificada evaluada con un modelo de un sistema de un grado de libertad.
7. Se separó a las estructuras a partir de la distorsión calculada para asignar un color de acuerdo a un rango de intensidades.
8. Se elaboraron los mapas del nivel de respuesta y de distorsión máxima por estructura.

Se presenta un mapa de distorsión máxima (figura 3.14) calculado con los registros y parámetros mencionados anteriormente. En dicha figura se observa que en la zona de lomas el comportamiento es aceptable debido a que las distorsiones de entrepiso son menores a 0.001 lo cual no sobrepasa los límites resistidos por los sistemas estructurales definidos. Existe una

concentración de estructuras con distorsiones grandes en la zona central de la ciudad, donde se sabe que hay un alto riesgo sísmico y se han presentado la mayor cantidad de daños en sismos anteriores. También se tienen algunas estructuras al sur de la ciudad con distorsiones grandes debido a que en esta zona hay una región de suelo que pertenece a la zona de lago, sin embargo el número de estructuras no es tan significativo como las de la zona centro.

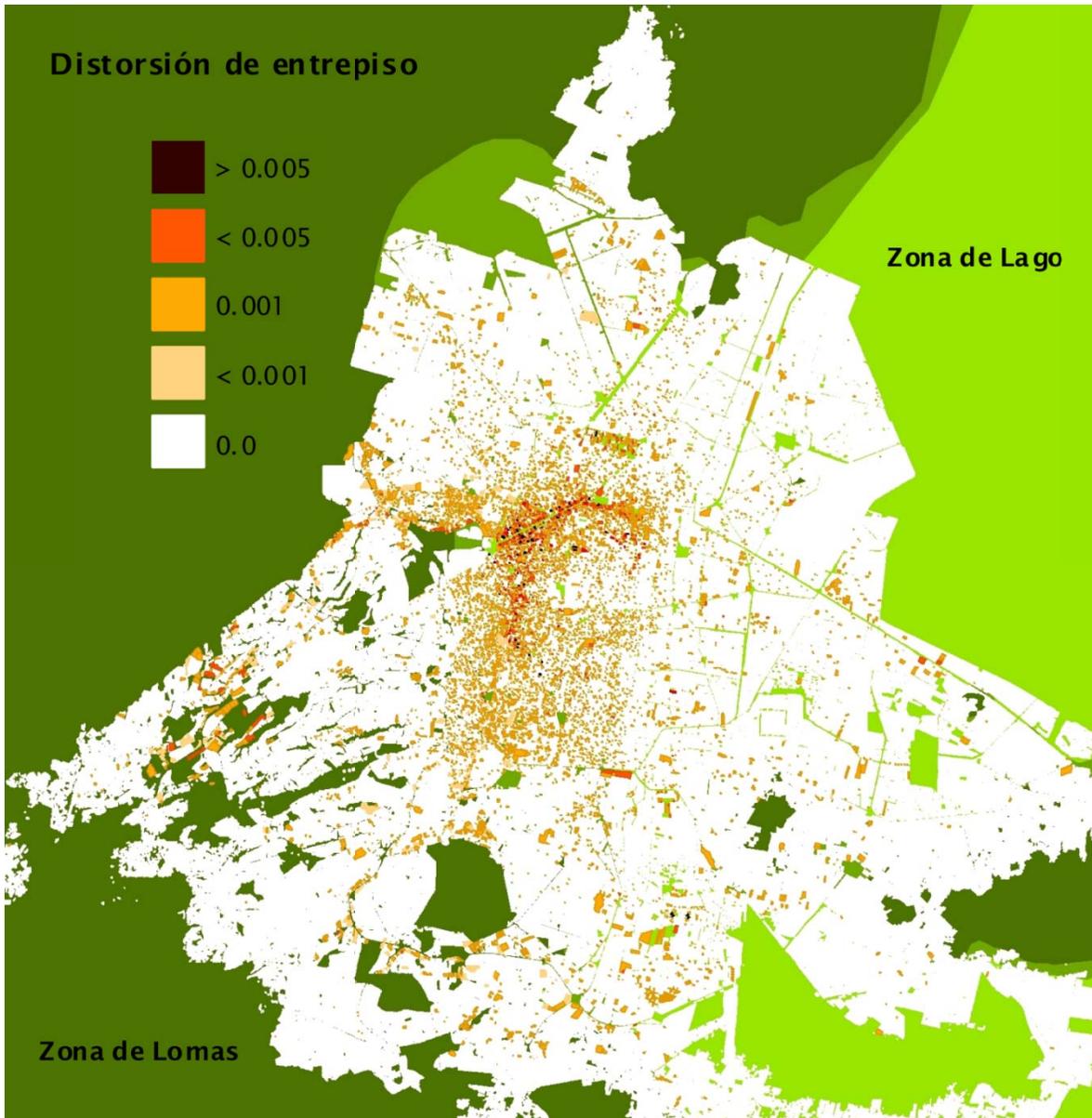


Figura 3.14. Mapa de intensidad de la respuesta máxima de estructuras en la Ciudad de México

Las distorsiones calculadas dependen del sistema estructural, sin embargo para cada sistema el valor de distorsión máxima permisible por los códigos y sugeridas en este trabajo son diferentes, por lo tanto para la estructura de interés se debe evaluar si la distorsión sobrepasa a la distorsión límite.

Tomando en cuenta la distorsión límite propuesta por Reyes (1999) en este ejemplo se tiene que 144 estructuras sobrepasarían el límite para su sistema estructural. El 98% de las estructura presentan distorsiones de entrepiso menores a las que provocarían algún daño aunque fueran construidas con mampostería que es el sistema que se daña a las distorsiones más pequeñas. De las estructuras que presentan valores de distorsión mayores tenemos que para el 95% su distorsión sería igual a 0.001, valor para el cual si la estructura fuera de mampostería, sin detallado sísmico y en las peores condiciones sufriría daño. El 4% (alrededor de 600 estructuras) presenta un valor de distorsión igual a 0.002, valor límite para el cual una estructura de concreto iniciaría el daño, y el 1% (aproximadamente 100 estructuras) presentan una distorsión mayor a 0.002. Los porcentajes se presentan en la figura 3.15.



Figura 3.15. Porcentaje de estructuras de la Ciudad de México con distorsión de entrepiso mayor a 0.001 para el ejemplo evaluado

En la figura 3.16 se muestra un acercamiento del mapa anterior para la zona donde se encuentran las estructuras que presentan las mayores distorsiones. En este acercamiento se observa que la distorsión máxima se da en la zona de lago y en la zona de transición no hay respuesta notablemente alta. Con este resultado se puede decir que la respuesta está dominada preponderantemente por el tipo de suelo en el que se desplanta la estructura. En la ciudad el cambio de suelo entre terreno firme y zona de lago se puede dar en unos cuantos metros de distancia por lo que se ha visto que estructuras con características idénticas se dañan en forma diferente aún estando a pocos metros de separación. Se indican algunos acercamientos que se presentan en la figura 3.17.

Los acercamientos mostrados en la figura 3.17 corresponden a las zonas con estructuras cuya distorsión sobrepasa los límites resistidos por su sistema estructural, es de notar el edificio ubicado en la Unidad Nonoalco-Tlatelolco donde en 1985 se derrumbó el edificio Nuevo León, así como los edificios del Conjunto Habitacional Alianza Popular Revolucionaria al sur de la ciudad. La zona centro presenta la mayor cantidad de estructura con distorsión al límite de su capacidad, sobre todo estructuras altas construidas sobre el Paseo de la Reforma, así como algunos edificios de la colonia Condesa. En la colonia Del Valle se encuentran también algunas estructuras en los límites de la zona de lago y la zona de transición. Cabe recordar que estas distorsiones son las que se presentarían en estructuras actuales ante los registros del sismo de 1985.

Otra forma de presentar los datos calculados aprovechando las ventajas de SIG es mostrar una tabla con las características de las estructuras con alto riesgo. Como muestra de esta opción se muestra la tabla 3.6 en la cual se presentan algunas de las 144 estructuras que tuvieron mayor respuesta en el caso evaluado, se nota como las estructuras son de muy variados niveles usos y años de construcción lo que no muestra una tendencia singular que nos concluya que cierta estructura en particular presenta distorsiones mayores. Esta tabla es muy útil pues se puede enviar a las autoridades pertinentes para que tomen las medidas adecuadas.

Tabla 3.6. Estructuras con las distorsiones máximas calculadas

Estructura	Clave de Catastro	Niveles	Uso	Año de Construcción	Sistema Estructural	Periodo Estructural
1	001-030.05	14	Oficina Privada	1989	Acero	1.5
2	001-072.11	20	Oficina Gubernamental	1992	Acero	1.7
3	001-072.21	17	Habitación	1992	Acero	1.9
4	001-072.22	20	Comercio	1988	Concreto	1.7
5	001-079.05	18	Oficina Privada	1984	Acero	1.8
6	002-084.16	19	Habitación	1988	Concreto	1.7
7	007-287.01	16	Oficina Privada	1966	Acero	1.8
8	007-298.07	16	Oficina Gubernamental	1986	Acero	1.7
9	007-299.01	16	Habitación	1980	Acero	1.7
10	009-002.01	1	Habitación	1970	Concreto	1.8
11	009-002.05	18	Habitación	1970	Concreto	1.8
12	009-002.12	16	Habitación	1970	Concreto	1.7
13	009-003.44	15	Habitación	1969	Concreto	1.8
14	010-154.14	15	Oficina Privada	1975	Acero	1.7
15	010-213.14	17	Oficina Gubernamental	1979	Acero	1.7
16	010-218.03	18	Oficina Privada	1968	Acero	1.8
17	011-069.07	17	Habitación	1969	Concreto	1.8
18	011-072.01	14	Oficina Privada	1940	Acero	1.7
19	011-079.12	19	Oficina Gubernamental	1976	Acero	1.9
20	011-084.01	17	Oficina Gubernamental	1964	Acero	1.8
21	011-153.01	20	Oficina Privada	1970	Acero	2.0
22	011-161.17	16	Hotel	1965	Concreto	1.8
23	011-163.01	16	Oficina Privada	1952	Concreto	1.8
24	011-163.23	19	Oficina Privada	1994	Acero	1.7
25	011-186.23	19	Hotel	1995	Concreto	1.7
26	011-190.18	15	Comercio	1964	Concreto	1.7
27	011-191.01	17	Oficina Privada	1990	Acero	1.5
28	011-214.22	16	Hotel	1977	Concreto	1.7
29	011-234.13	19	Oficina Gubernamental	1988	Acero	1.7
30	011-235.01	20	Hotel	1993	Concreto	1.7
31	011-261.06	16	Hotel	1987	Concreto	1.5
32	011-276.06	17	Habitación	1976	Concreto	1.8
33	011-277.02	18	Oficina Privada	1989	Acero	1.6
34	011-282.29	16	Oficina Gubernamental	1980	Acero	1.7
35	027-032.11	16	Habitación	1978	Concreto	1.8
36	027-052.11	15	Oficina Privada	1983	Acero	1.7
37	027-052.17	16	Oficina Privada	1968	Acero	1.7
38	027-054.15	18	Habitación	1965	Concreto	1.8
39	027-070.17	17	Habitación	1980	Concreto	1.8
40	027-123.09	14	Oficina Privada	1975	Acero	1.7
41	027-161.04	15	Oficina Gubernamental	1965	Acero	1.8
42	027-173.10	18	Habitación	1990	Concreto	1.8
43	027-177.09	14	Habitación	1990	Concreto	1.5

Este ejercicio de evaluación de mapas es muy útil por los resultados que se obtienen, sobre todo para concientizarse de que aún después del sismo de 1985 y con las respectivas modificaciones a los códigos de construcción las estructuras en la Ciudad de México presentan características que de darse un sismo similar al de 1985 tendrían distorsiones que ponen en riesgo la seguridad estructural de éstas. Sin embargo lo ideal será evaluar los mapas de daño esperado en tiempo real justo en el momento en el que esté ocurriendo el sismo para que en cuestión de minutos se conozcan las zonas donde están ocurriendo los daños y de ser posible una lista con las características de las estructuras que sufrieron daño.

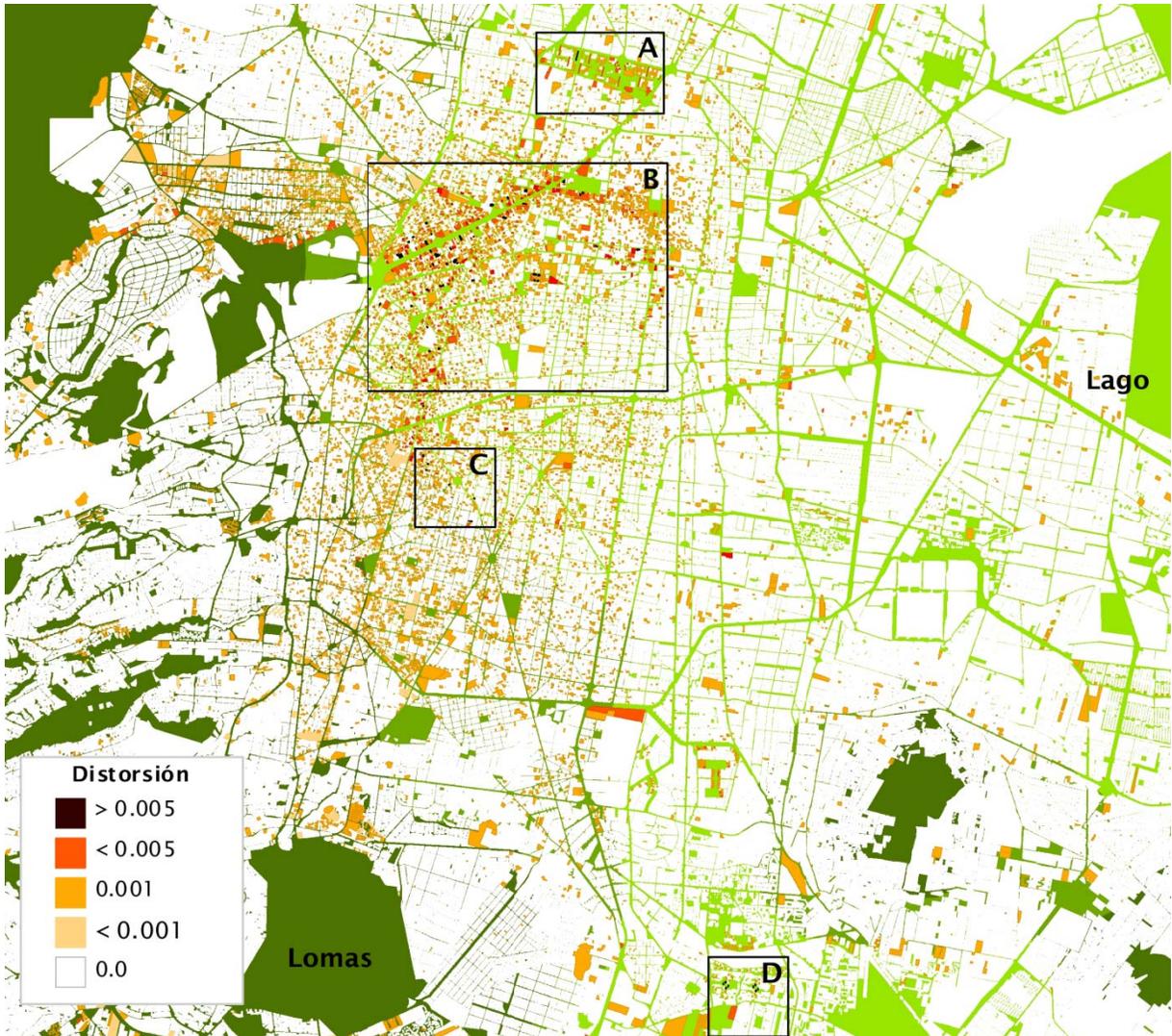


Figura 3.16. Acercamiento del mapa de distorsión máxima de estructuras de la Ciudad de México

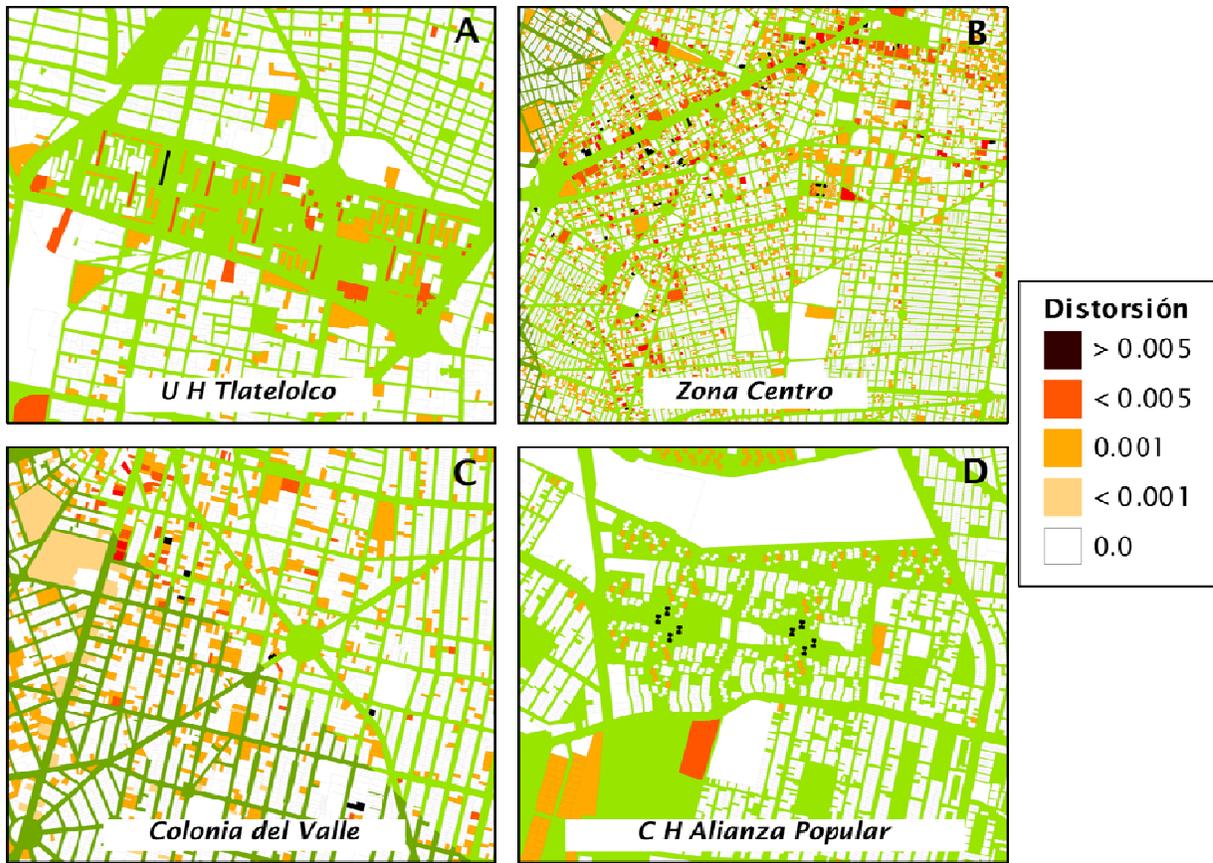


Figura 3.17. Zonas de distorsión máxima de estructuras de la Ciudad de México

Capítulo 4

Estimación inmediata de daños sísmicos

4.1 Introducción

En México existe un sistema de alarma sísmica que, idealmente advierte a la población sobre la ocurrencia de un sismo de intensidad fuerte por medio de una señal de alarma que es transmitida por los medios de comunicación, también es puesta en marcha en algunos edificios donde se ha instalado. Dicha alarma se activa segundos antes de que las ondas sísmicas lleguen a la Ciudad de México así es posible desalojar las estructuras para que no quede gente atrapada en caso de que ocurra un colapso. Sin embargo este sistema de alarma sísmica no es suficiente ya que es deseable saber cuál será el comportamiento de las estructuras como consecuencia de las aceleraciones producidas ya sean desplazamientos o aceleraciones máximas como índices del nivel de daño.

Es necesario evaluar en el menor tiempo posible los efectos que produce un sismo en una población en particular, en este caso la Ciudad de México, desde daños en las estructuras, número de personas afectadas y víctimas fatales, hasta el costo de reparaciones inmediatas para infraestructura vital como son redes de agua potable y vías de comunicación. Mientras más rápido se hagan estas evaluaciones las decisiones que se tomen serán más eficientes para la recuperación de la población afectada.

El conocimiento de la respuesta sísmica estructural puede hacerse de manera anticipada con el fin de corregir si fuera necesario el comportamiento inadecuado de las estructuras e identificar zonas de mayor riesgo sísmico para anticipar posibles daños. También es deseable conocer el comportamiento estructural durante la ocurrencia de un sismo para tomar decisiones eficientes y en caso de que se presenten colapsos se salvarían más vidas debido a la disminución del tiempo de reacción de los cuerpos de rescate.

La respuesta inmediata de los servicios de emergencia es fundamental para salvar el mayor número de vidas ya que la probabilidad de que los atrapados sean rescatados con vida disminuye durante las primeras 24 horas. En Filipinas por ejemplo, la supervivencia de los atrapados declinó rápidamente de 88% rescatados el primer día a 35% el segundo día, a 9% el tercer día (González, 2005). También se reducirían los costos de traslado de recursos humanos y maquinaria a puntos bien definidos donde se necesite ayuda inmediata y se agilizaría el flujo de tránsito vehicular.

En este trabajo se evalúan escenarios de riesgo sísmico presentados en mapas para las estructuras actuales de la ciudad con registros de movimientos observados. Con la metodología empleada se establecen las bases de un sistema que calcule daños minutos después de ocurrir un sismo. Para que el procedimiento sea considerado como una evaluación en tiempo real debe realizarse en el momento en el que está ocurriendo el sismo, en este trabajo los resultados son calculados con una diferencia máxima de diez minutos después de ocurrido un evento. Esta evaluación involucra el reto de efectuar miles de operaciones de manera inmediata pues se calcula

la respuesta de cada una de las estructuras, por esta razón se utilizan métodos simplificados de análisis que requieren poca información y se han utilizado anteriormente con buenos resultados, El primero es la utilización de un modelo unidimensional para la caracterización del comportamiento del suelo (Reinoso, 1994; Seed, et al. 1988; Bard, et al. 1988, Rosenblueth, et al. 1988, Alarcon, 1989; Ovando, 2000) y el otro es el método de cálculo de respuesta estructural propuesto por Miranda (1999) de modelación de un sistema continuo (Miranda y Taghavi, 2005; Reinoso y Miranda, 2006; Miranda y Akkar, 2006; Reinoso y Miranda, 2004, Arredondo, et al. 2005, Arredondo, et al. 2006, Mosquera, et al. 2006), dichos métodos han sido explicados en los capítulos anteriores.

4.2 Sistema de información para el cálculo de respuesta sísmica

Se cuenta con información catastral de cada una de las estructuras que componen la Ciudad de México. Con dicha información se ha asignado a cada estructura los parámetros necesarios por el modelo continuo de Miranda (1999) que son: periodo fundamental de vibración de la estructura, parámetro α de comportamiento como viga de corte o de flexión, así como la fracción de amortiguamiento crítico. Para la obtención de estos parámetros fue necesaria alguna información incluida en el catastro como año de construcción, uso, niveles, y algunas recomendaciones de diseño para definir el sistema estructural. Esta información forma parte de un archivo de entrada para el software de evaluación inmediata desarrollado en este trabajo.

Otro archivo requerido por el programa de evaluación es aquel formado por las coordenadas georreferenciadas de cada uno de los vértices que forman los predios que contienen las estructuras de la ciudad. Dicho archivo de coordenadas es necesario para dibujar los polígonos que forman los predios y poder hacer los mapas de respuesta. Las coordenadas de los vértices se obtienen de un documento de formato de archivo gráfico llamado PostScript encapsulado (EPS) generado con una capa de predios de la Ciudad de México desplegada con el software Arcmap®.

En la tabla 4.1 se muestra la configuración de los archivos de entrada. La base de datos de las estructuras que componen a la Ciudad de México ha sido dividida por delegaciones debido a que el tamaño del archivo de vértices de toda la ciudad hace poco eficiente el uso de una computadora personal para abrir dicho archivo.

Tabla 4.1. Configuración de archivos de entrada al programa de evaluación de respuesta, (a) propiedades de las estructuras, (b) coordenadas de los predios

Consecutivo	Clave de Catastro	Periodo Fundamental	Parámetro Alfa	Fracción de amortiguamiento	Acelerograma
0	002-013.18	0.3	0	0.07	01 Alameda
1	002-018.03	2	5	0.02	01 Alameda
2	002-014.02	1	0	0.04	01 Alameda

(a)

Consecutivo	Número de vértices	Coordenada x_1	Coordenada y_1	Coordenada x_i	Coordenada y_i
0	17	99.145302904291	19.436529804882
1	25	99.145302933781	19.436547522216
2	32	99.145302920674	19.436565239551

(b)

En este trabajo se utiliza la delegación Cuauhtémoc (figura 4.1) por ser la zona donde se ha concentrado la mayor cantidad de daños en sismos anteriores. Resulta de interés analizar lo que ocurre con las estructuras en esta área además de conocer el riesgo sísmico que existe tratándose de una delegación con una gran importancia y complejidad en cuanto a servicios, población, estructuras e historia.

Según datos de la administración de la delegación Cuauhtémoc durante el 2008, ésta aporta el 4.6% del PIB nacional, cuenta con una población flotante de 5 millones de personas diarias, tiene más de 500,000 habitantes y por ella transitan del orden de 800,000 vehículos al día. Ocupa el 2.2% del territorio de la Ciudad de México con 3,244 hectáreas y cuenta con 1,500 inmuebles catalogados como patrimonio nacional.

El suelo es de origen lacustre formado por grandes espesores de arcillas blandas de alta compresibilidad que subyacen a una costra endurecida superficial. Corresponde a la zona III (zona de lago) según la zonificación geotécnica de la ciudad. En este suelo se presentan hundimientos regionales debido a la extracción de agua y a la consolidación de suelo por la carga de las estructuras, éstos provocan hundimientos diferenciales que generan esfuerzos en las estructuras para los cuales no han sido diseñadas.

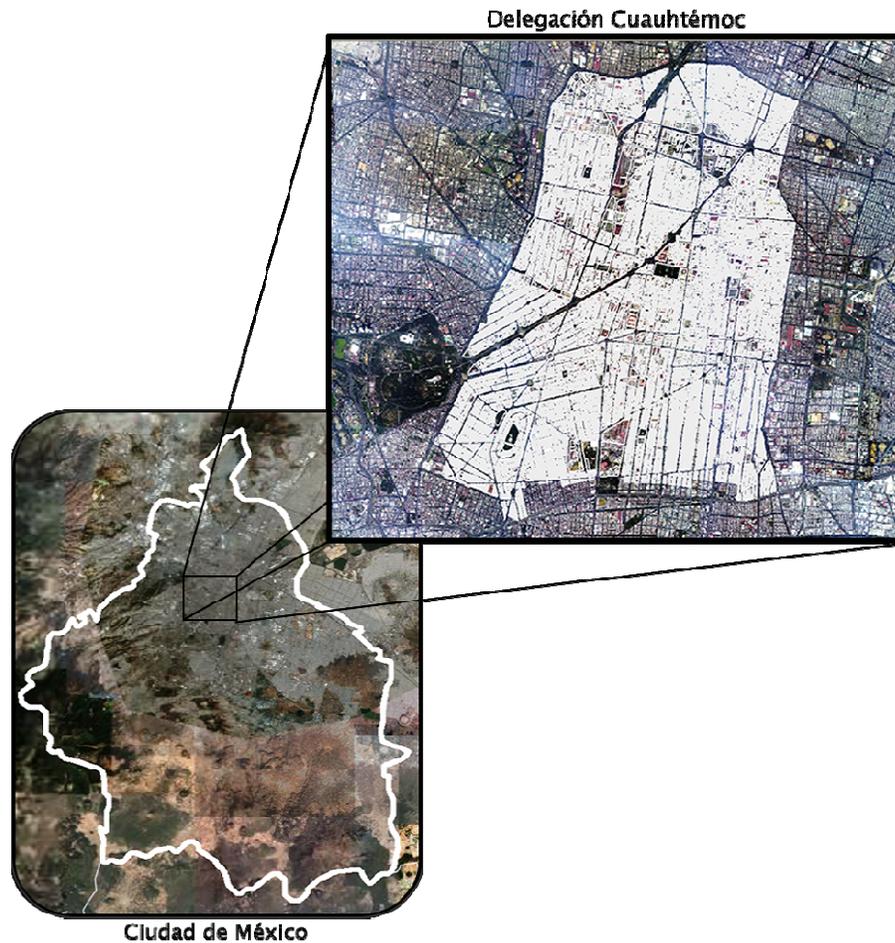


Figura 4.1. Zona de estudio: Delegación Cuauhtémoc

En la delegación Cuauhtémoc existen colonias, calles y lugares de los que se hace referencia con frecuencia por lo que conviene indicarlas para una mejor ubicación. En la figura 4.2 se muestran

las colonias Centro, Guerrero, Juárez y Roma, así como la avenida Insurgentes y el Paseo de la Reforma; se muestra la ubicación de la Unidad Habitacional Tlaltelolco, Monumento a la Revolución, Catedral Metropolitana, Glorieta de Insurgentes, entre otros.

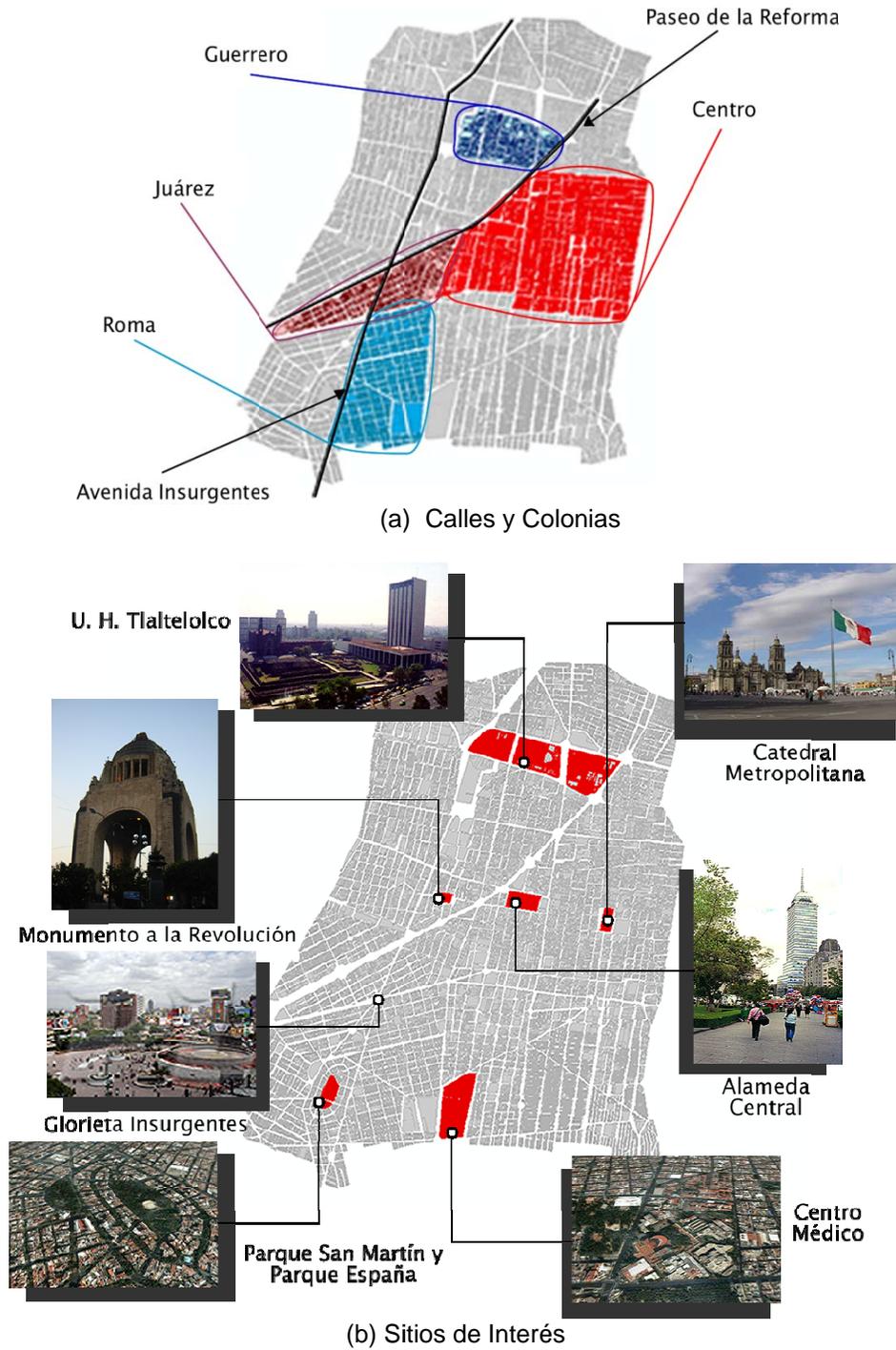


Figura 4.2. Ubicación de algunas referencias en la delegación Cuauhtémoc

4.3 Caracterización del suelo de la Ciudad de México

Para realizar los mapas de respuesta sísmica de la Ciudad de México se debe conocer la historia de aceleraciones a la que es sometida cada una de las estructuras. Para esto se recurre a la utilización de funciones de transferencia. Con éstas al tener el acelerograma de un lugar específico de terreno firme se pueden calcular las aceleraciones experimentadas en cualquier punto de la ciudad multiplicando la transformada de Fourier del acelerograma conocido por la función de transferencia del sitio donde se desea saber la historia de aceleraciones.

En la figura 4.3 se muestra una configuración típica de la estratigrafía de la Ciudad de México. El estrato blando del suelo de la ciudad está compuesto por arcilla limosa lacustre. El Valle de México está formado en una cuenca cerrada cuyo perfil puede ser simplificado a una superficie semicircular plana con dos estratos uno blando y el otro firme los cuales tienen diferentes espesores entre el estrato blando que va de los 20 a los 70 metros. En este trabajo se toma en cuenta esta característica para modelar el suelo de la ciudad como una cuenca en la que varía el espesor del estrato blando y la respuesta dinámica del suelo depende de esto. Haciendo esta consideración es posible utilizar el modelo unidimensional de análisis mencionado en anteriormente para calcular las funciones de transferencia y con estas definir la historia de aceleraciones que tendrá cualquier punto de la ciudad en caso de un movimiento sísmico registrado en terreno firme, en este trabajo se toma el registro de la estación CU.

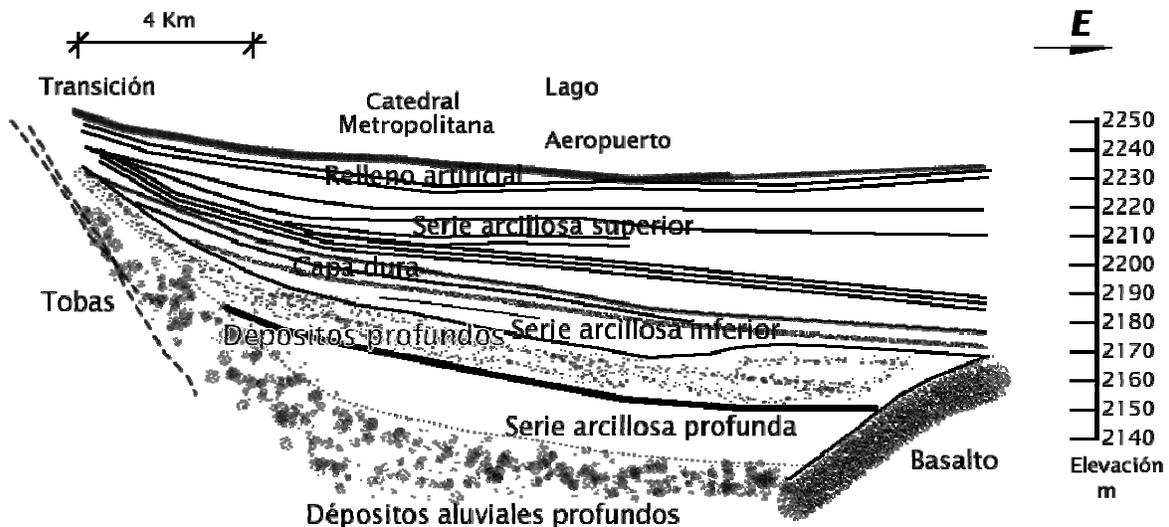


Figura 4.3. Estratigrafía típica de la Ciudad de México

En el modelo unidimensional de análisis se requiere de la velocidad de corte β y la densidad ρ para los dos estratos, dichas propiedades varían a lo largo del perfil estratigráfico, sin embargo en este trabajo se considera que éstas son constantes en cualquier punto de la ciudad.

En la figura 4.4 se muestra un mapa donde se establecen las líneas de igual profundidad de estrato de suelo blando para la Ciudad de México establecidos en las Normas Técnicas Complementarias de Diseño por Sismo. En la figura se presentan los valores de profundidad de estrato en metros, las estaciones acelerométricas y las zonas geotécnicas, se nota como en terreno firme los espesores son considerados menores a diez metros, en zona de transición llegan a los 20 metros mientras que en suelo blando los espesores llegan hasta los 70 metros.

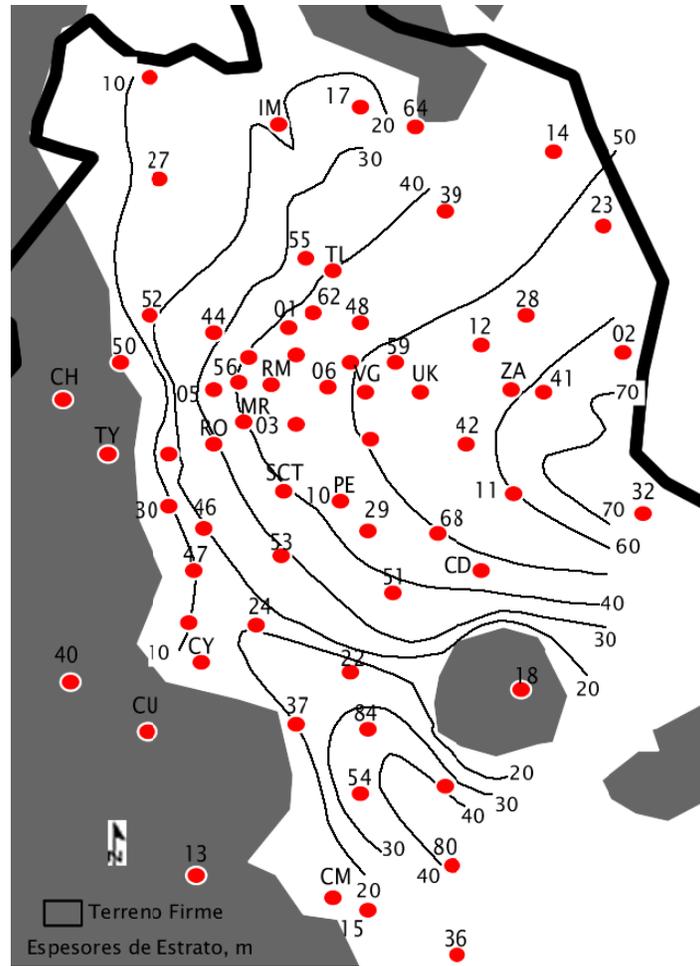


Figura 4.4. Mapa de iguales profundidades para el estrato de suelo blando en la Ciudad de México

Un mapa de iguales periodos de vibración para el suelo de la Ciudad de México se muestra en la figura 4.5 en ésta se presenta la diferencia entre el suelo firme y la zona donde se tiene un espesor considerable de estrato arcilloso. Los datos presentados en esta figura son utilizados como guía para establecer la profundidad de estrato blando en las estaciones acelerométricas de la ciudad, la cual es necesaria para definir la función de transferencia del sitio y por lo tanto la historia de aceleraciones que se presentará en caso del registro del movimiento en terreno firme. El espesor del estrato se definió con la ecuación 4.1. En los registros acelerométricos de cada estación se definen algunas características del suelo en el que están desplantadas, entre las que se especifica el periodo predominante. En esta ecuación la velocidad de corte del lecho rocoso β también se asume como constante para toda la Ciudad de México.

$$T = \frac{4H}{\beta} \quad (4.1)$$

A cada estructura de la Ciudad de México se le asignó una estación acelerométrica de tal forma que fuera la más cercana tomando en cuenta la diferencia entre estaciones y estructuras que están ubicadas en las distintas zonas geotécnicas de la ciudad. Dicha estación asociada fue incorporada en el archivo de entrada para el programa de evaluación de la respuesta sísmica, así cada estructura tiene una función de transferencia definida por su ubicación y por lo tanto una historia de aceleraciones.

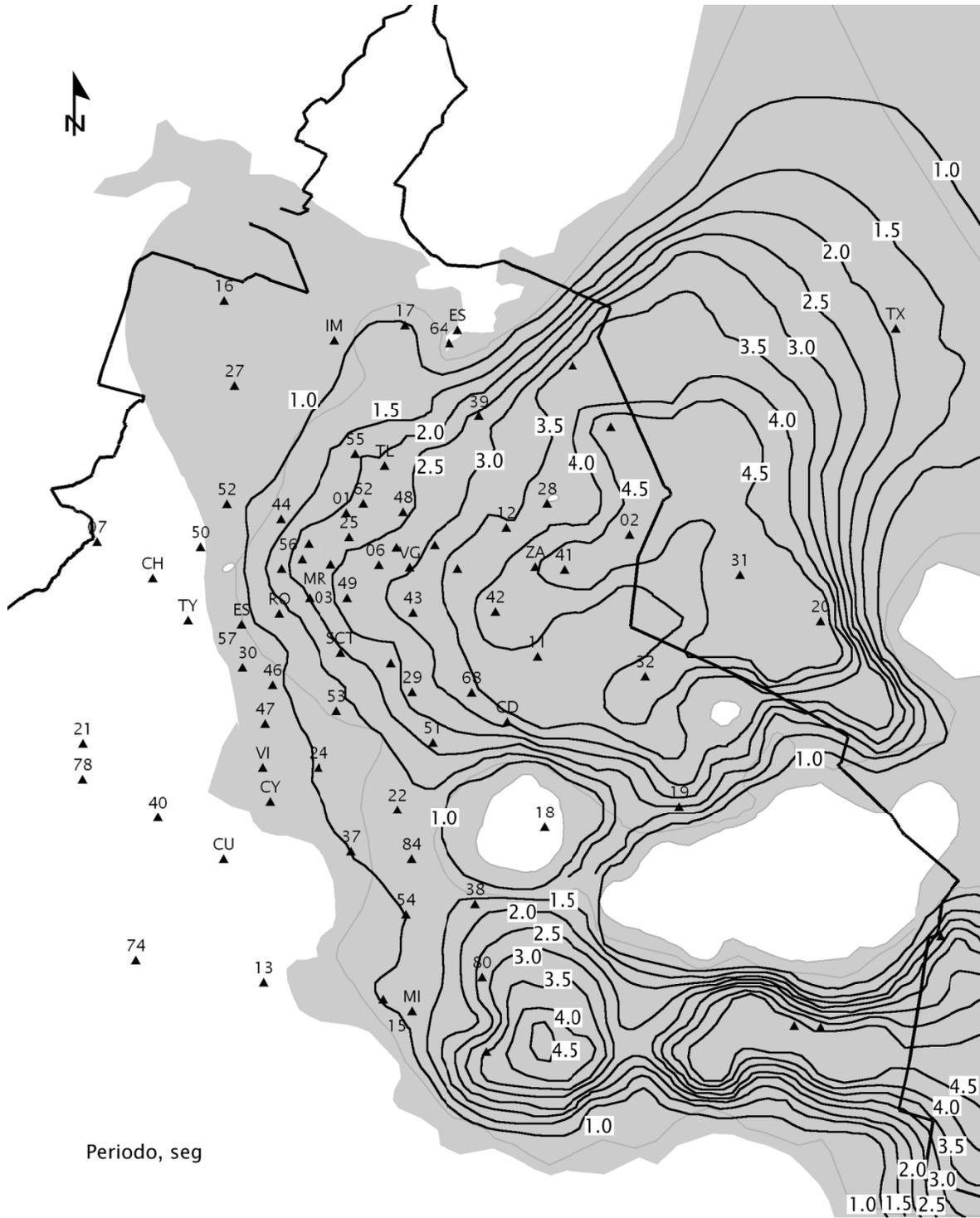


Figura 4.5. Mapa de igual periodo para el suelo de la Ciudad de México

4.4 Escenarios de respuesta estructural

4.4.1 Escenario esperado

Como se ha comentado anteriormente se ha diseñado un programa para la evaluación de escenarios de respuesta estructural inmediata. Una configuración para el programa se muestra en la figura 4.6 donde se presenta el acelerograma de terreno firme y el mapa de resultados. Se propone dejar la opción de presentar los mapas con distorsiones o con intensidades máximas, así como poder indicar el archivo de salida que se quiere generar que puede ser desde la transformada de Fourier calculada del acelerograma en terreno firme hasta las distorsiones máximas de cada estructura, además es posible realizar acercamientos al mapa.

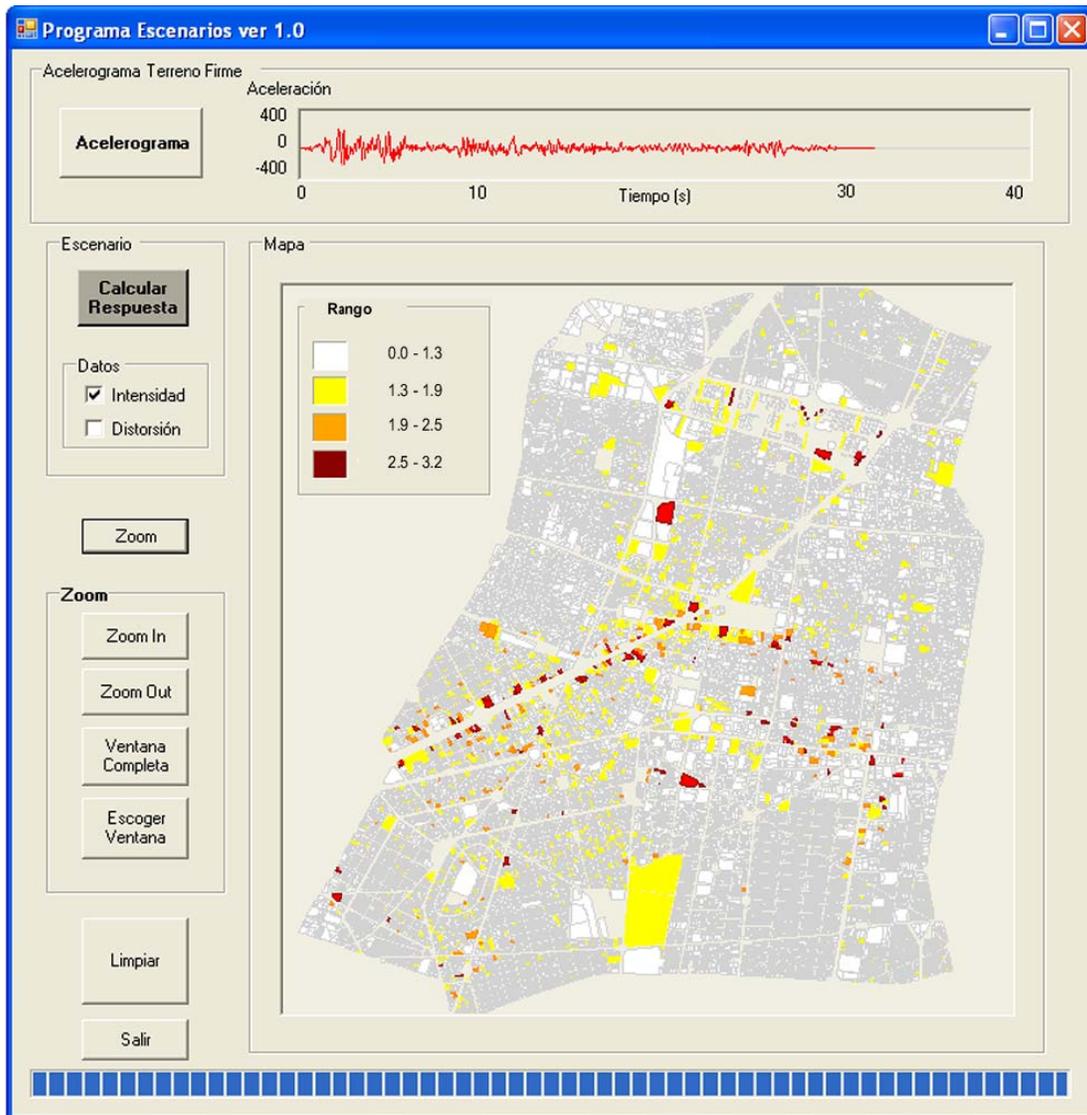


Figura 4.6. Vista del programa de cálculo de mapas de respuesta sísmica estructural inmediata para la Ciudad de México

El programa se desarrolló en lenguaje Visual Basic, su funcionamiento se puede definir principalmente en tres módulos. El primer módulo consiste en cargar en matrices los archivos de entrada, el de información de las estructuras y el de coordenadas de los predios para poder dibujarlos. El segundo módulo consiste en la lectura del acelerograma en terreno firme (estación CU), después se procede a la obtención de su transformada de Fourier, posteriormente se hace la definición y cálculo de las funciones de transferencia las cuales son asociadas a cada estructura dependiendo del espesor de estrato blando en la estación acelerométrica más cercana a la estructura. A continuación se multiplican dichas funciones por el espectro de Fourier calculado, a este producto se le obtiene su antitransformada de Fourier para así conseguir una historia de aceleraciones de cada estación y por lo tanto para cada estructura. El tercer módulo se trata del cálculo de la respuesta estructural con el modelo continuo, el dibujo del mapa con una escala de intensidades y la escritura de archivos de resultados.

El cálculo de la respuesta es evaluada de la siguiente manera:

- Se obtienen los desplazamientos máximos experimentados durante el movimiento sísmico en la altura de la estructura.
- Se calcula la distorsión global máxima, dividiendo el valor máximo del desplazamiento relativo del extremo superior con respecto a la base entre la altura total del edificio.
- Se obtiene la distorsión máxima de cada entrepiso dividiendo el máximo desplazamiento relativo entre los dos niveles consecutivos que lo limitan entre la altura de entrepiso.

El tiempo de cálculo promedio de los mapas para la delegación Cuauhtémoc es de diez minutos, este tiempo depende principalmente de la cantidad de puntos en el acelerograma. Se han considerado grupos de estructuras con características iguales incluyendo su historia de aceleraciones así es posible reducir el número de cálculos se obtiene una respuesta para cada grupo y después asignar este valor a cada estructura para ser dibujada, con esta consideración se redujo el tiempo de cálculo considerablemente ya que hacerlo para cada estructura lleva alrededor de dos horas para 53,000 estructuras.

Se evaluaron los mapas de respuesta sísmica estructural para los sismos que se presentan en la tabla 4.2. Se eligieron sismos representativos de subducción y falla normal con el fin de observar las diferencias en la respuesta debidas al origen. El cálculo se hizo con la base de datos de estructuras actuales.

Tabla 4.2. Características de los sismos elegidos para evaluar escenarios

Fecha	Origen	Magnitud	Distancia a CU (km)
19/09/85	Subducción (Mich.)	8.1	380
25/04/89	Subducción (Gro.)	6.9	305
15/06/99	Normal	6.4	193

En la figura 4.7 se presenta el mapa para el escenario dado el acelerograma del sismo de 1985. En este mapa se puede notar la ubicación de las estructuras que presentan una distorsión alta, entre éstas se encuentra el Centro Médico y algunos edificios localizados en avenida Reforma, la mayoría se encuentra en la colonia Roma la cual fue afectada en el sismo de 1985 y con las estructuras actuales nuevamente se vería afectada aunque en este escenario no se presentaría colapso total de ninguna estructura. Según el archivo de salida 43 estructuras presentan una distorsión que es mayor o igual al límite de la distorsión que inicia el daño según su sistema estructural.

El mapa para el escenario con el sismo de 1989 se presenta en la figura 4.8. En este mapa se observa que las distorsiones máximas ocurren prácticamente en las mismas estructuras que en el escenario del sismo de 1985, sin embargo las diferencias más notables son para estructuras con niveles medios de distorsión además que los valores se modifican y las intensidades son menores que en el escenario anterior. En este escenario casi 2000 estructuras presentan distorsiones de entrepiso mayores a aquellas definidas como límite para iniciar el daño lo que representa un 4% del total.

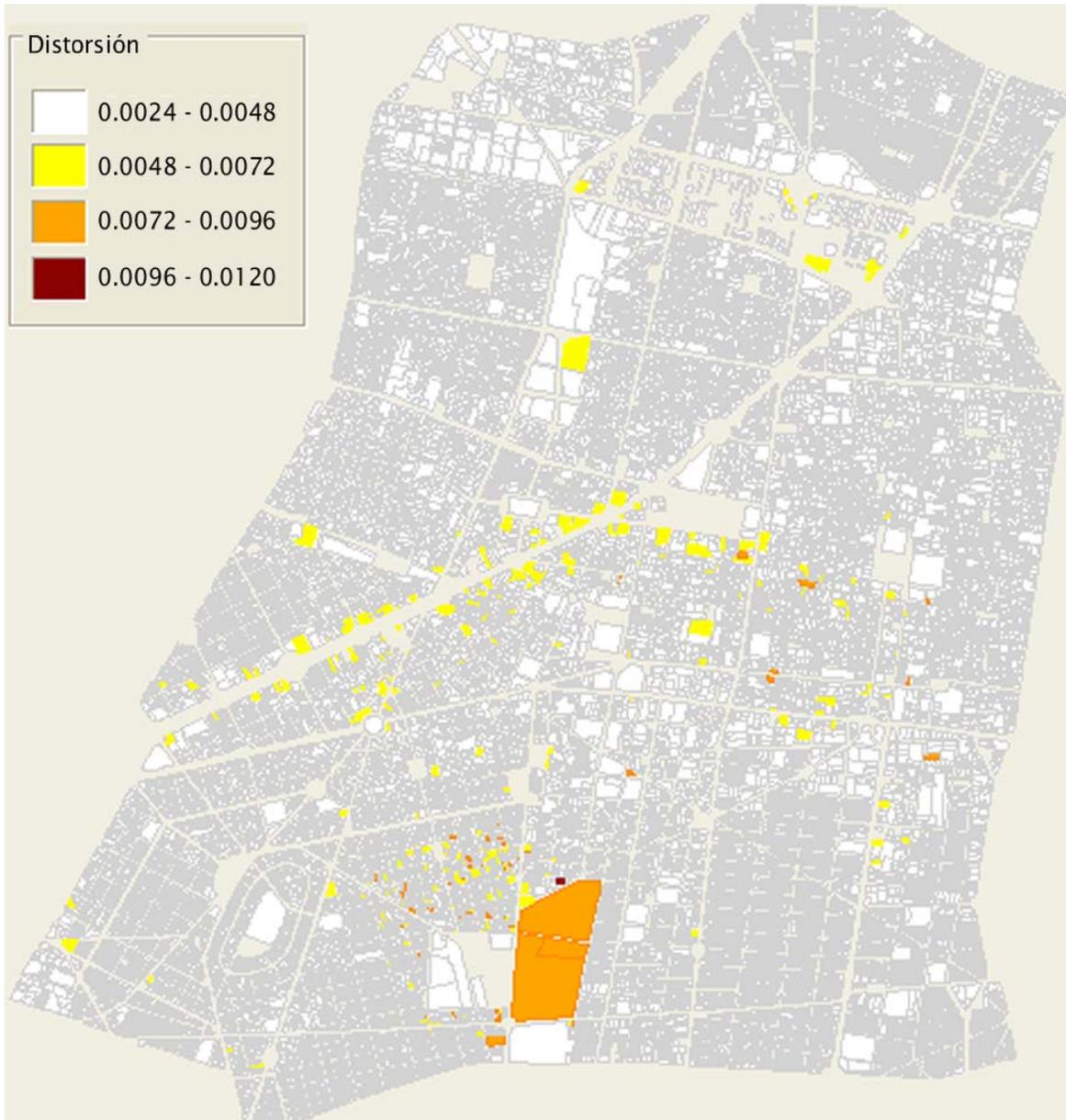


Figura 4.7. Escenario para la delegación Cuauhtémoc dado el sismo de 1985

El escenario para el sismo de 1999 se presenta en la figura 4.9, en este mapa podemos observar como existen muchas estructuras con distorsiones altas, sin embargo los valores son diez veces menores que para los casos anteriores por lo que en ninguna estructura se presentaría algún daño.

Este es el caso en el que si los mapas no son interpretados por un especialista puede generarse una confusión por lo que no se deben difundir los mapas de todos los eventos que se calculen en tiempo real o generar los mapas en una escala de daño esperado en lugar de distorsión calculada. De acuerdo a estos resultados podemos decir que las distorsiones de entrepiso más grandes se producen con sismos de subducción y también son los de mayores magnitudes.

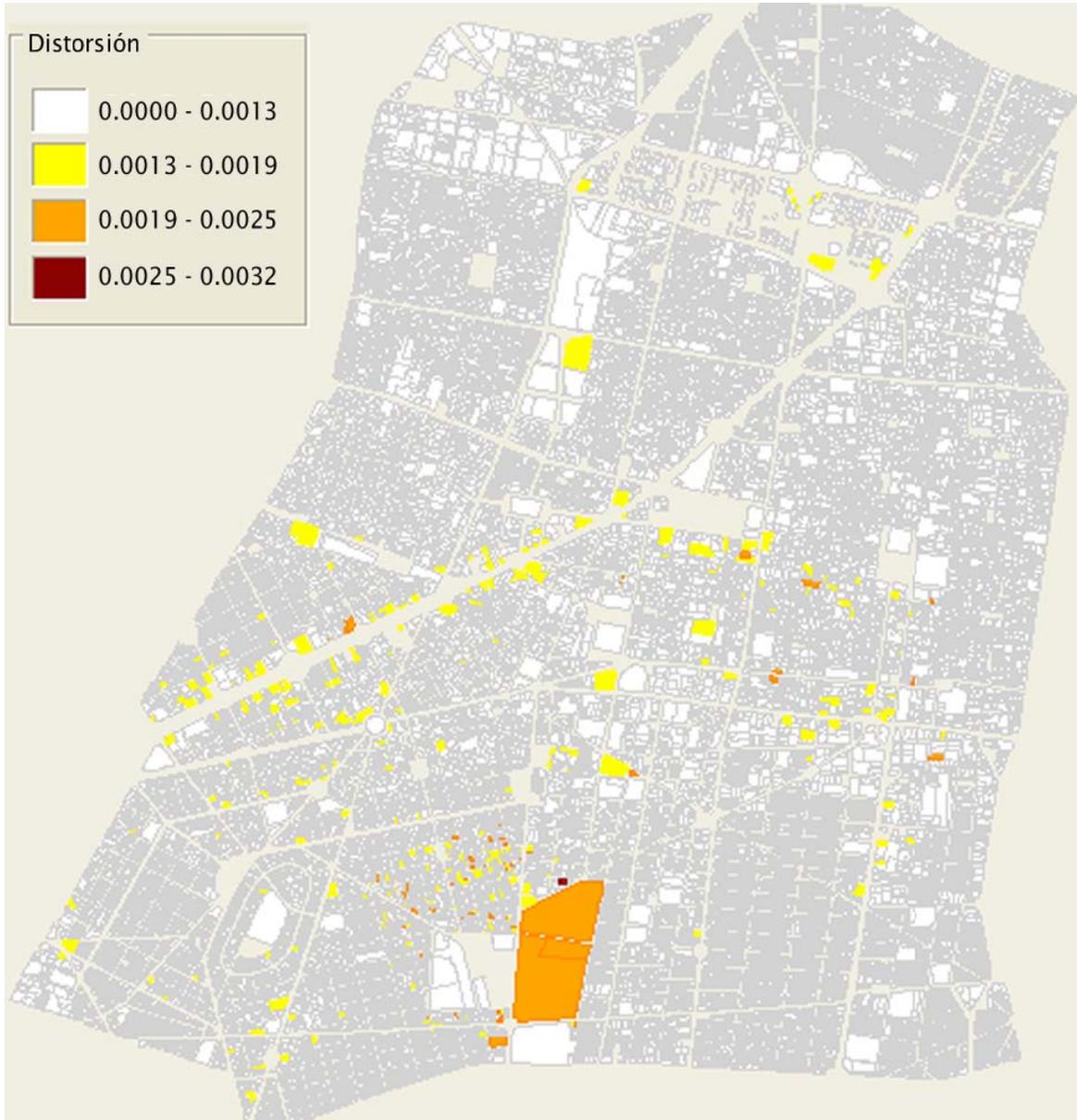


Figura 4.8. Escenario para la delegación Cuauhtémoc dado el sismo de 1989

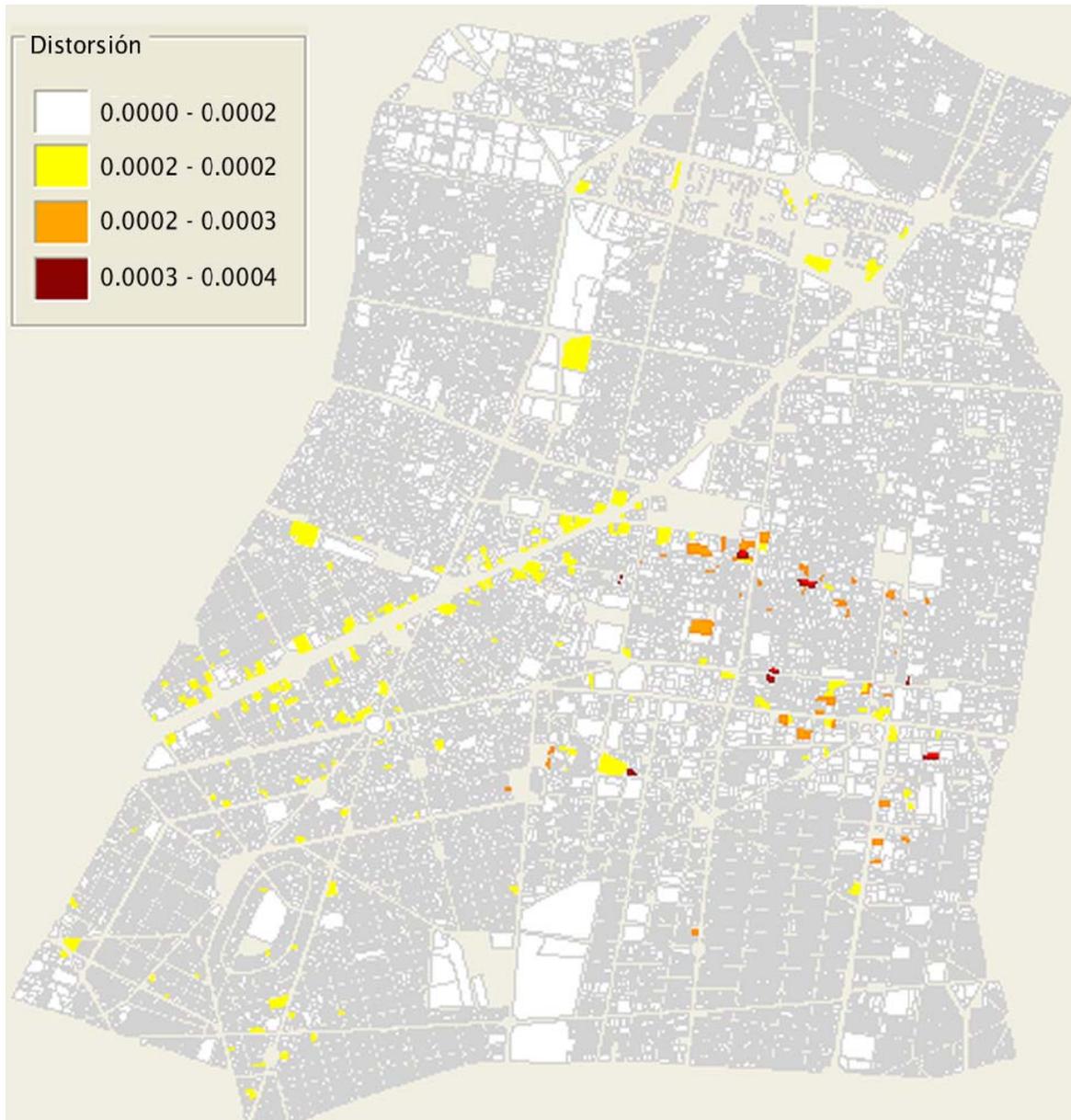


Figura 4.9. Escenario para la delegación Cuauhtémoc dado el sismo de 1999

4.4.2 Metodología para escenario en tiempo real

Con el programa desarrollado es posible calcular la respuesta estructural minutos después de haber terminado el sismo. El programa debe estar recibiendo los datos de la estación acelerométrica en CU. Cuando se registre una aceleración con la que comience el registro de un movimiento fuerte se cargan los archivos de entrada que pueden ser actualizados siempre que sea necesario cuando se termine el sismo se calculan los mapas de riesgo por delegación y se obtiene el archivo de salida donde se incluye la clave de estructuras, sus características y el

desplazamiento máximo. En la figura 4.10 se muestra un resumen de la metodología propuesta. Estos resultados se envían a las distintas autoridades para que manejen la información y evalúen si es recomendable hacer públicos los resultados para ser enviados a los cuerpos de rescate y población interesada. En la actualidad existen algunos métodos para evaluar escenarios de riesgo sísmico que son difundidos en tiempo real como es el caso del Estudio Geológico de los Estados Unidos (USGS), sin embargo sólo se evalúan por zonas y no estructura por estructura ya que esto implica una gran cantidad de operaciones que en este trabajo se han simplificado con los modelos y sólo así es posible hacer dichos escenarios con una diferencia de minutos después de ocurrido el sismo.



Figura 4.10. Metodología para el cálculo de mapas de respuesta inmediata para la Ciudad de México

Conclusiones

Conclusiones generales

En este trabajo se han presentado modelos utilizados con éxito en trabajos anteriores para representar el comportamiento del suelo y la respuesta estructural ante eventos sísmicos. Estos modelos requieren el mínimo de variables lo cual hace posible hacer una estimación del comportamiento dinámico de un gran número de estructuras y por lo tanto aplicarlos a la evaluación temprana de escenarios de riesgo.

Las características de la cuenca que forma la Ciudad de México nos permiten hacer una simplificación para conocer el comportamiento del suelo de la ciudad aplicando un modelo unidimensional de análisis. Con este modelo podemos evaluar una historia de aceleraciones en cualquier punto de la ciudad.

Dada la información catastral de la Ciudad de México es posible definir algunas propiedades dinámicas de las estructuras necesarias para evaluar su comportamiento utilizando un modelo continuo. Con dicho modelo se evalúan la historia de desplazamientos y de aceleraciones en las estructuras con lo cual es posible calcular daños.

Se ha presentado un panorama sobre la situación de las estructuras que componen la Ciudad de México y como se comportan ante los sismos. Se proponen algunas bases para la estimación de daños y se calculan escenarios de riesgo para cada una de las estructuras de la ciudad presentándolos en mapas.

Se hicieron escenarios de daños para la delegación Cuauhtémoc utilizando un método de evaluación inmediata y sismos representativos de diferentes fuentes.

Según los mapas evaluados en este trabajo el comportamiento de las estructuras de la Ciudad de México es adecuado para sismos de intensidad moderada dándose distorsiones que llegan al límite del inicio del daño, sin embargo con intensidades fuertes algunas estructuras sufrirían daños en zonas afectadas en sismos anteriores como es el caso de las colonias Roma y Condesa, así como en Tlatelolco.

Durante la elaboración de este trabajo también se actualizaron los mapas de peligro sísmico así como la base de datos de catastro para las estructuras de la Ciudad de México la cual se corroboró con visitas de campo.

Se desarrolló un método y software para la evaluación inmediata del comportamiento de las estructuras ante un evento sísmico. Una aplicación del método es agilizar el movimiento de los cuerpos de rescate y la velocidad de respuesta de las autoridades pertinentes en caso de ser necesario, además de que la población conozca en cuestión de minutos las estructuras y zonas donde pudieron haber ocurrido daños.

Sugerencias para futuras investigaciones

Esta tesis ofrece un método para desarrollar un sistema de evaluación inmediata de daños y pérdidas. Dicho método debe complementarse con las necesidades y recursos con los que cuentan las autoridades encargadas de protección civil. El método propuesto debe utilizarse en otras ciudades en las cuales las herramientas desarrolladas sean útiles como es el caso de Guerrero, Oaxaca, entre otros. Para esto es necesario difundir el método planteado, actualizar las bases catastrales de las ciudades y adaptar la caracterización del suelo a los recursos y teorías que se tengan en las ciudades afectadas por sismos.

En la Ciudad de México es necesario refinar las características que se han agregado en la base de datos de las estructuras. La base de catastro presenta simplificaciones que para los cálculos presentados son suficientes, sin embargo una base de datos más completa disminuiría los errores. Información como la existencia de piso débil, daños previos, inclinaciones, asimetría estructural, entre otras son muy útiles para definir las propiedades dinámicas de las estructuras y por lo tanto conocer la respuesta estructural.

Al cálculo que se hace con las herramientas propuestas se le deben agregar otros factores como puede ser la vulnerabilidad y el costo de cada estructura, así la evaluación daría como resultado costos reales en evaluaciones en tiempo real o pérdidas esperadas en el caso de evaluación de escenarios. Estos resultados serían de gran utilidad para las autoridades encargadas de evaluar pérdidas y las compañías de seguros.

Referencias

Arredondo C., (2006), **“Comportamiento sísmico de contenidos en edificios”**, Tesis Doctoral, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería UNAM.

Arredondo C., Reinoso E., Mosquera J., y Miranda E. (2005), **“Comparison of recorded strong motion data and estimated lateral acceleration demands in buildings located in the soft soil region of México City”**, 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco.

Bard P., Campillo M., Chávez-García F., Sánchez-Sesma F., (1988), **“The México earthquake of September 19, 1985 – A theoretical investigations of large – and small – scale amplification effects in the México City Valley”**, Earthquake Spectra, Vol. 4, No. 3, 1988.

Cinna, **“Las causas probables de la catástrofe sísmica del 19 de septiembre de 1985”**, Ciencia y Desarrollo, septiembre/octubre 1988 Vol. XIV Núm. 82, CONACYT.

DGPC, (2002), **“Sismicidad y peligro sísmico en la Ciudad de México”**, Servicio Geológico Metropolitano, Dirección General de Protección Civil del Distrito Federal, UNAM.

Figueroa J., (2007), **“Escenarios de pérdidas por riesgo sísmico para la Ciudad de México”**, Tesis, División de Ingenierías Civil y Geomática, Facultad de Ingeniería UNAM.

García A., (2000), **“Comportamiento de la arcilla del Valle de México”**, Tesis, División de Ingeniería Civil Topográfica y Geodésica, Facultad de Ingeniería UNAM, México 2000.

González M., Reinoso E., (2005), **“Estimación de atrapados y estrategias de rescate con base en la información de daños del sismo de 1985”**, XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, México 2005.

IG/II, (1985), **“El sismo del 19 de septiembre de 1985”**, Instituto de Geofísica UNAM/Instituto de Ingeniería UNAM, México 1985.

Jaimes M., (2007), **“Acelerogramas de diseño en sitios afectados por varias fuentes sísmicas”**, Tesis Doctoral, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería UNAM.

Jaimes M., Reinoso E., **“Peligro sísmico en la Ciudad de México debido a sismos de subducción, falla normal e intraplaca”**

Ladislao U., (1987) **“Los sismos dos años después”**, ICyT Octubre de 1987, Vol. 9 Núm.133.

Marsal, R., (1986), **“Notas sobre el diseño y construcciones de cimentaciones en el Distrito Federal”**, Comisión Federal de Electricidad, México 1986.

Martínez-González J., (2006), **“Análisis espacial de estructuras dañadas en la delegación Cuauhtémoc por los sismos de 1985”**, Tesis, División de Ingenierías Civil y Geomática, Facultad de Ingeniería UNAM.

Medina, J., (2002) **“De buenos cimientos”**, Construcción y Tecnología IMCYC, Febrero 2002, México.

Meli R., Miranda E., (1986), **“Evaluación de los efectos de los sismos de septiembre de 1985 en los edificios de la Ciudad de México – Evaluación de daños”**, Publicación del Instituto de Ingeniería UNAM.

Miranda E., (1999), **“Approximate seismic lateral deformation demands in multistory buildings”**, Journal of Structural Engineering.

Miranda E., Akkar S., (2006), **“Generalized interstory drift spectrum”**, Journal of Structural Engineering, ASCE, June 2006, pp. 840-852.

Miranda E., Reyes C., (2002), **“Approximate lateral drift demands in multistory buildings with nonuniform stiffness”**, Journal of Structural Engineering.

Miranda E., Taghavi S., (2005), **“Approximate floor acceleration demands in multistory buildings. I: Formulation”**, Journal of Structural Engineering, ASCE, 131, (2) 203-211.

Mosquera J., Miranda E., Reinoso E. (2006), **“Estimación y variación del periodo fundamental de vibración de edificios de concreto reforzado inferidas a partir de edificios instrumentados ubicados en la Ciudad de México y California”**, XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco, 2006.

“Normas técnicas complementarias para diseño por sismo”, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México octubre 2004.

“Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de cimentaciones”, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México octubre 2004.

OPS/OMS, (1999) **“Fundamentos para la mitigación de desastres en establecimientos de salud”** Organización Panamericana de la salud/ Oficina Regional de la Organización Mundial de la Salud, Washington. <http://www.paho.org/spanish/ped/pedesres.htm>.

Ordaz M., Miranda E., Reinoso E., Perez-Rocha L. (2000), **“Seismic loss estimation model for México City”**, XII World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.

Ordaz M., Singh S., (1992), **“Source spectra and spectral attenuation of seismic waves from Mexican earthquakes, and evidence of amplification in the hill zone of Mexico City”**, Bull. Seism. Soc. Am., 82, 24-43.

Perry S., Cox D., Jones L., Bernknopf R., Goltz J., Hudnut K., Mileti D., Ponti D., Porter K., Reichle M., Seligson H., Shoaf K., Treinman J., Wein A., (2008), **“The Shakeout Earthquake Scenario – A Story that Southern Californians are Writing”**, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.

Quiroga C., Reinoso E., (2004), **“Evaluación de los daños del sismo del 19 de septiembre de 1985 a la luz de nuevos datos y estudios y con ayuda del Sistemas de Información Geográfica”**, XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco Gro., 2004.

Quiroga C., Reinoso E., (2005), **“Daño estructural en la Ciudad de México por el sismo del 19/Sep/85: Correlación con la intensidad sísmica y utilización de SIG”**, XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, México, 2005.

Reinoso E., (1994), **“Boundary element modeling of scattering from topographical structures with applications to the México City Valley”**, PhD Thesis, Wessex Institute of Technology, University of Portsmouth.

- Reinoso E., (1996), **“Algunos resultados recientes sobre el peligro sísmico en la Ciudad de México”**, Revista de Ingeniería Sísmica, No. 53, 1-24.
- Reinoso E., Flores F., Ordaz M., Sánchez F., (1996), **“Investigación de la amplificación sísmica en el Valle de México con base en registros de la red acelerográfica”**, Centro de Investigación Sísmico, diciembre.
- Reinoso E., Machicao R., Ordaz M., Guerrero R., (1999) **“Comparación de la respuesta sísmica de un edificio de concreto reforzado ubicado en distintos sitios de la Ciudad de México”**, IX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Morelia Mich., 1999.
- Reinoso E., Miranda E., (2005), **“Estimation of floor acceleration demands in high-rise buildings during earthquakes”**, Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 14 pp. 107-130.
- Reinoso E., Miranda E., (2005), **“Rapid estimation of displacement and acceleration demands in high-rise buildings during moderate earthquakes”**, 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco.
- Reinoso E., Ordaz M., (1999), **“Spectral ratios for Mexico City from free-field recordings”**, Earthquake Spectra, 273, 2, may.
- Reinoso E., Ordaz M., (2001), **“Duration of strong ground motion during Mexican earthquakes in terms of magnitude, distance to the rupture area and dominant site period”**, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 30, 653-673, august.
- Reyes C., (1999), **“El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios”**, Tesis Doctoral, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería UNAM.
- Reyes C., Miranda E., Ordaz M., Meli R., (2002), **“Estimación de espectros de aceleraciones correspondientes a diferentes periodos de retorno para las distintas zonas sísmicas de la Ciudad de México”**, Revista de Ingeniería Sísmica No. 66 95-121, México.
- Rosenblueth E., Meli R., (1986), **“The 1895 earthquake: causes and effects in México City”**, Concrete International.
- Rosenblueth E., Ordaz M., Sánchez-Sesma F., Singh S., (1989), **“The México earthquake of September 19, 1985 – Design spectra for México’s Federal District”**, Earthquake Spectra, Vol. 5, No. 1.
- Seed H., Romo M., Sun J., Jaime A., Lysmer J., (1988), **“The México earthquake of September 19, 1985 – Relationships between soil conditions and earthquake ground motions”**, Earthquake Spectra Vol. 4, No. 4.
- Taghavi S., y Miranda E., (2005), **“Seismic demand assessment on acceleration-sensitive building nonstructural components”**, 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco.
- Wrobel L., Reinoso E., Power H., (2003), **“Numerical simulation of seismic wave scattering and site amplification, with application to the México City Valley”**, Boundary Elements Methods For Soil-Structure Interaction.