

1a. edición, 1994

3a. reimpresión de la primera edición, 1995.

© SECRETARIA DE GOBERNACION

© CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES
AV. DELFIN MADRIGAL No. 665, COL. PEDREGAL SANTO
DOMINGO, DELEGACION COYOACAN, C. P. 04360, MEXICO, D. F.
TELEFONOS: 606 98 37, 606 97 39, 606 99 82,
FAX: 606 16 08

Autores: Mario Ordaz, Roberto Meli, Carlos Montoya-Dulché,
Lorenzo Sánchez y L.E. Pérez Rocha

Impresión a cargo de: Lic. Ricardo Cícero Betancourt y Violeta
Ramos Radilla

Derechos reservados conforme a la ley

IMPRESO EN MEXICO. *PRINTED IN MEXICO*

Distribución Nacional e Internacional: Centro Nacional de
Prevención de Desastres

EL CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO ES
EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DE LOS AUTORES

SECRETARIA DE GOBERNACION

Lic. Emilio Chuayffet Chemor

Secretario de Gobernación

Lic. Juan Ramiro Robledo Ruiz

Subsecretario de Protección Civil y de Prevención
y Readaptación Social

CENTRO NACIONAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES

Dr. Roberto Meli

Director General

Dr. Tatsuo Murota

Jefe de Expertos de la Agencia Internacional de Cooperación del
Japón

Dr. Mario Ordaz

Coordinador de Investigación

M. en I. Roberto Quaas

Coordinador de Instrumentación

Lic. Ricardo Cícero Betancourt

Coordinador de Difusión

SISTEMA NACIONAL DE PROTECCION CIVIL
CENTRO NACIONAL DE PREVENCION DE DESASTRES

BASES DE DATOS PARA LA
ESTIMACION DE RIESGO SISMICO
EN LA CIUDAD DE MEXICO

Mario Ordaz
Roberto Meli
Carlos Montoya-Dulché
Lorenzo Sánchez
L. E. Pérez-Rocha

COORDINACION DE INVESTIGACION
AREA DE RIESGOS GEOLOGICOS

CUADERNOS DE INVESTIGACION

P R E S E N T A C I O N

La Coordinación de Investigación del Centro Nacional de Prevención de Desastres realiza estudios sobre las características de los fenómenos naturales y de las actividades humanas que son fuentes potenciales de desastres, así como sobre las técnicas y medidas que conducen a la reducción de las consecuencias de dichos fenómenos.

Las actividades enfocan la problemática de los Riesgos Geológicos (Sismos y Volcanes), de los Riesgos Hidrometeorológicos (Inundaciones, Huracanes, Sequías, Erosión) y de los Riesgos Químicos (Incendios, Explosiones, Contaminación por Desechos Industriales).

Los resultados de los estudios se publican en Informes Técnicos que se distribuyen a las instituciones y los especialistas relacionados con cada tema específico.

En adición a dichos informes técnicos de carácter muy especializado, el CENAPRED ha emprendido la publicación de esta serie, llamada CUADERNOS DE INVESTIGACION, con el fin de dar a conocer a un público más amplio aquellos estudios que se consideran de interés más general o que contienen información que conviene quede publicada en una edición más formal que la de los Informes Técnicos.

Los Catálogos de Informes Técnicos y de Cuadernos de Investigación, así como las publicaciones específicas pueden obtenerse solicitándolos por escrito a la Coordinación de Investigación del CENAPRED, o pueden consultarse directamente en su Unidad de Información.

CONTENIDO

INTRODUCCION.....	1
EL MODELO.....	2
ESTIMACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL TERRENO.....	4
FUNCIONES DE VULNERABILIDAD.....	6
LEVANTAMIENTO DE EDIFICIOS.....	10
RESULTADOS.....	11
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	12
AGRADECIMIENTOS.....	15
REFERENCIAS.....	15
FIGURAS.....	17

ABSTRACT

After the September 19, 1985 earthquake, which produced severe damage to buildings in Mexico City's lake-bed zone, many efforts have been made to better understand the nature of ground motions and the seismic behavior of structures. Results from these efforts give now the possibility of combining several sources of information to estimate the intensities and damages that would be expected due to the occurrence of postulated earthquakes. In this paper we describe a model to estimate expected ground motions and building damage, based on intensity-damage relations derived for 14 classes of buildings representative of Mexico City's construction. This information, along with the geographic distribution of construction density, allows computation of expected losses during a given event, and their spatial distribution throughout the city. Relevant information is stored in a database, and results are presented by means of a geographic information system.

RESUMEN

Después del temblor del 19 de septiembre de 1985, que produjo severos daños a las edificaciones de la zona de lago de la ciudad de México, se han hecho esfuerzos para entender mejor la naturaleza de los movimientos del terreno y el comportamiento de los edificios. Los resultados de estos esfuerzos permiten que actualmente se esté en posibilidad de combinar diversas fuentes de información para estimar las intensidades y daños esperados como resultado de la ocurrencia de temblores postulados. En el presente trabajo se describe un modelo para estimar movimientos del terreno y daños a edificaciones, el cual está basado en relaciones intensidad-daño derivadas para 14 clases de edificios representativas de la construcción en la ciudad de México. Esta información, aunada a la distribución geográfica de la densidad de construcción, permite el cálculo de pérdidas esperadas durante un evento dado y su distribución geográfica a lo largo de la ciudad. La información se almacena en una base de datos y los resultados se presentan por medio de un sistema de información geográfica.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, la ciudad de México ha sido frecuentemente afectada por temblores, algunos de los cuales han provocado severos daños a las estructuras y enormes pérdidas en vidas y propiedades. Sólo en este siglo, los eventos de 1907, 1911, 1941, 1957, 1979 y 1985 ocasionaron diferentes niveles de daño. Todos estos temblores (con magnitudes, M , entre 7.5 y 8.1) tuvieron su origen en las costas del Pacífico mexicano, con epicentros a más de 250 km de la ciudad de México. Las causas de los intensos movimientos del terreno que se experimentan en la ciudad a distancias epicentrales tan grandes son por lo menos dos: (a) las grandes amplificaciones de las ondas sísmicas en los estratos blandos de la zona del lago -un fenómeno bien documentado desde hace casi 40 años (Rosenblueth, 1953)- y (b) una amplificación regional que implica que aún en la base de los depósitos blandos, el movimiento del suelo es mayor que el que se esperaría en sitios de terreno realmente firme a distancias epicentrales similares (Ordaz y Singh, 1992).

Después de los temblores de septiembre de 1985 se han realizado numerosos esfuerzos para entender la naturaleza de los patrones de amplificación observados durante sismos y para extraer lecciones útiles que permitan mejorar la seguridad sísmica de las edificaciones. Hasta ahora la acción más redituable ha sido la instalación de la Red Acelerográfica de la ciudad de México (RACM), que a la fecha consta de más de 110 instrumentos de registro digital en tres componentes, y es operada por tres instituciones: el Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM), el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico de la Fundación Javier Barros Sierra y el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). La mayor parte de las estaciones tienen acelerógrafos de superficie y cerca de diez sitios están también dotados de sensores profundos. Actualmente se dispone de varios cientos de acelerogramas obtenidos en sitios con muy variadas características de suelo.

También, después de 1985, se iniciaron diversos proyectos de investigación cuyo objetivo fue entender las causas de los daños provocados por los temblores de septiembre de ese año a las construcciones del Distrito Federal y determinar la vulnerabilidad sísmica de las estructuras localizadas en la ciudad. Pocos días después del gran temblor se llevaron a cabo levantamientos de daños (Meli, 1986; Fundación ICA, 1988) y posteriormente el Departamento del Distrito Federal preparó un levantamiento más detallado (DDF, 1988). Se investigaron también las causas de los extensos daños y el desempeño de diferentes tipos de edificios (Rosenblueth y Meli, 1986), y se estudió detalladamente el comportamiento de algunos edificios específicos (Meli y Avila, 1988). Los resultados de estas y otras investigaciones dieron lugar a cambios en el Reglamento para las Construcciones del DF (ver, por ejemplo, Gómez y García-Ranz, 1988; Rosenblueth *et al*, 1989).

El conocimiento acumulado durante muchos años, pero especialmente a partir de 1985, tanto en estimación de movimientos del terreno como en lo concerniente a respuesta estructural de edificios en la ciudad de México, hace que actualmente sea posible combinar información de varias fuentes para estimar las intensidades y daños por sismo en la ciudad de México ante la ocurrencia de temblores postulados, o *escenarios sísmicos*.

En este escrito se describe un modelo para estimar intensidades sísmicas y pérdidas económicas en la ciudad de México por efectos de terremotos de gran magnitud que se generen en la costa del Pacífico. El modelo procesa información de diversos tipos: cantidad de construcción en el DF, propiedades de los suelos, intensidades sísmicas esperadas durante un

temblor costero, y daños esperados a las construcciones de la ciudad. Los datos se almacenan en computadora, formando un sistema de información geográfica que permite generar mapas con la distribución espacial de variables de interés. En particular, pueden obtenerse mapas que muestran, con una resolución del orden de 500 m, los niveles de daño que se alcanzarían en la ciudad de México después de un temblor intenso. Los daños pueden estimarse en forma individual para cada una de las 14 clases de estructuras que se consideran en el estudio, o de manera acumulada, es decir, sumando los daños en todas las construcciones. La estimación puede llevarse a cabo para múltiples escenarios de ocurrencia de temblores; el análisis de los patrones de daño esperados durante los escenarios más probables resulta de gran utilidad para planear el manejo de un eventual desastre, en vista de que se conocerían de antemano las zonas más afectadas.

El sistema también genera mapas que muestran los distintos niveles de intensidad sísmica que se experimentarían en diversas zonas del DF. En el modelo, la intensidad está expresada en términos de cantidades directamente relacionadas con el comportamiento de las estructuras ante sismo. Por esta razón, el análisis de la distribución de intensidades esperadas ante temblores futuros permite saber con precisión en qué zonas de la ciudad son más vulnerables ciertos tipos de estructura. Este conocimiento es útil para fines de reglamentación de la construcción y planeación de uso del suelo.

En el modelo que se describe, el cálculo de daños esperados se inicia estimando el tamaño de los movimientos del terreno que se producirían durante un temblor en un punto de la ciudad de México. En vista de esto, el modelo, con algunas modificaciones, proporciona una estimación preliminar y sumamente rápida, de los daños producidos por un temblor que realmente ocurrió. Para esto, bastaría procesar la información enviada por estaciones acelerográficas conectadas al sistema de estimación temprana, a fin de determinar el tamaño del temblor. Este dato sería introducido al sistema de información geográfica, el cual se encargaría de estimar las intensidades sísmicas en toda la ciudad y, posteriormente, calcular los daños. El sistema es capaz de generar un mapa de daños en unos cuantos minutos.

Este estudio es el resultado de la colaboración de tres instituciones de investigación: el CENAPRED, a cuyo cargo estuvieron el diseño general del sistema, la base de datos sobre construcciones en el DF y el sistema de información geográfica, incluyendo el modelo de estimación de daños; el Centro de Investigación Sísmica de la Fundación Javier Barros Sierra y el II-UNAM, por su parte, colaboraron con el diseño del modelo de estimación de intensidades sísmicas. Esta última porción del proyecto ha sido ejecutada gracias al patrocinio que durante varios años ha otorgado la Secretaría General de Obras del Departamento del Distrito Federal.

2. EL MODELO

El área en estudio se presenta en la figura 1. Comprende la porción más poblada del DF; la parte no cubierta corresponde principalmente a terrenos agrícolas con muy pocas construcciones. El área estudiada se dividió en 751 celdas cuyas dimensiones típicas son del orden de 500 m. La división se llevó a cabo tratando de conseguir que la construcción fuese lo más homogénea posible dentro de una celda. Se siguieron, en muchos casos, fronteras naturales tales como calles, parques, etcétera. Se supone que cada celda es homogénea, en el sentido de que todos sus atributos se toman como constantes al interior de ella. Por ejemplo,

se acepta que el periodo predominante del suelo es único para cada celda.

Los edificios fueron divididos en 14 clases, atendiendo a su respuesta dinámica ante sismo y a su frecuencia de uso en la ciudad de México. En la tabla 1 se identifica cada una de las clases, así como sus seis periodos estructurales típicos, cuyo significado se discutirá más adelante. La clasificación de los edificios se hizo tomando en cuenta principalmente las diferencias en la respuesta sísmica y en la vulnerabilidad. Un aspecto importante en definir la respuesta es el periodo fundamental de vibración del edificio, el cual depende de la altura y del sistema de estructuración. Por esta razón, la altura fue un parámetro clave de diferenciación de los edificios. La tipificación de los sistemas estructurales se limitó al mínimo, considerando sólo aquellos que pudieran ser identificados de manera confiable desde el exterior. La clase 1 se refiere a estructuras de hasta tres niveles con muros de carga de mampostería, las cuales son las más comúnmente utilizadas para vivienda unifamiliar. La mampostería está usualmente confinada por elementos livianos de concreto reforzado y los pisos y techos son losas de concreto monolíticas. La clase 2 es la construcción típica de vivienda multifamiliar, con un gran número de muros de carga de mampostería también confinados y con losas de concreto. Las clases 3, 4 y 5 son estructuras a base de marcos con diferentes alturas, casi siempre de concreto reforzado sin muros de cortante u otros elementos de rigidización pero frecuentemente con abundantes muros de relleno de mampostería. Las estructuras de concreto con losas planas aligeradas, que fueron muy populares hasta antes de 1985, se incluyen en este grupo. No se intentó diferenciar entre estructuras de concreto y de acero porque estas últimas son escasas y difíciles de distinguir de las de concreto, ya que las columnas y vigas están generalmente recubiertas en un edificio terminado. Las clases 6 a 8 están formadas principalmente por marcos de concreto rigidizados con muros de cortante; estos tipos de construcción no era muy comunes antes de 1985. Los edificios industriales de las clases 9 y 10 son típicamente de un solo nivel con columnas de concreto y techos livianos de acero para la clase 9, o techo de concreto para la 10. La construcción no ingenieril es comúnmente mampostería no reforzada, principalmente con tabique de arcilla o bloque de concreto, aunque a veces de adobe. Para el tipo ligero -clase 11-, los techos son vigas de madera o armaduras de acero con lámina metálica o de asbesto; para el tipo pesado -clase 12-, los techos son losas de concreto o, en algunas ocasiones, rellenos de tierra con losetas de barro sobre vigas de madera. Las últimas dos clases se refieren a construcciones especiales como iglesias, estadios y teatros.

Conviene anotar que esta clasificación se considera adecuada para los edificios de las ciudad de México pero no necesariamente para los de otras ciudades, donde el tipo de construcción y su vulnerabilidad pueden ser significativamente diferentes.

En el modelo, la intensidad sísmica está caracterizada por un solo parámetro: la ordenada del espectro de respuesta, S (pseudoaceleración, 5% del amortiguamiento crítico), medida a cierto periodo estructural representativo de los edificios de dicha clase. Se supone que el índice de daño D_{ij} experimentado por un grupo de estructuras de la clase i localizadas en la celda j se relaciona con la intensidad sísmica de la siguiente manera:

$$D_{ij} = \min \left\{ \frac{K_i S_{ij}^\alpha}{1} \right\} \quad (1)$$

donde S_{ij} es la aceleración espectral que tuvo lugar en la celda j asociada a estructuras de la

clase i , y K_i y α son parámetros que definen la vulnerabilidad de las estructuras de la clase i .

D_{ij} fluctúa entre 0 y 1; 0 significa ausencia de daño y 1 implica una pérdida equivalente al valor total de la reconstrucción de la edificación. El índice de daño toma en cuenta todas las pérdidas directas debidas a sismo, incluyendo daños no estructurales, pero no incluye costo social, pérdidas en los contenidos de la edificación o costos asociados a la falta de operación del inmueble. Si aceptamos que el valor de la edificación tiene una distribución uniforme por unidad de área, entonces D_{ij} puede ser interpretada como una fracción del área total cubierta por la estructura clase i en la celda j que fue dañada. Si a su vez D_{ij} se multiplica por el área total cubierta por la clase de estructuras i en la celda j , A_{ij} , el resultado es un *área dañada equivalente* cuyo valor monetario de reconstrucción es igual al monto de la pérdida económica debida al sismo.

Si se postula la ocurrencia de un sismo y se estima el movimiento del terreno en cada celda, las pérdidas esperadas en las estructuras clase i situadas en la celda j están dadas por:

$$P_{ij} = K_i S_{ij}^\alpha A_{ij} \quad (2)$$

donde P_{ij} es el área dañada equivalente definida con anterioridad. La pérdida esperada en la celda j para todas las clases estructurales puede ahora ser obtenida mediante simple adición:

$$P_j = \sum_i P_{ij} \quad (3)$$

Una vez que se calculan las pérdidas totales para las 751 celdas pueden generarse mapas que muestren la distribución geográfica del daño esperado.

En los siguientes párrafos se describirán con más detalle los aspectos relevantes del modelo de estimación.

3. ESTIMACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL TERRENO

Como se mencionó anteriormente, el movimiento del terreno se estima en términos de las ordenadas del espectro de respuesta. En el modelo, un sismo se define por su magnitud y distancia focal a la ciudad de México; el análisis está restringido a eventos costeros, con distancias epicentrales superiores a 250 km. Dadas una magnitud y una distancia, es posible estimar el espectro de Fourier de aceleraciones (EFA) en un sitio de referencia por medio de regresiones semiempíricas (Ordaz, 1992). El sitio de referencia se describirá más adelante. Las regresiones se construyeron usando una técnica estadística bayesiana y los datos de más 20 eventos costeros que han ocurrido desde los años 60. Se supone que el movimiento en el sitio de referencia es una medida de la excitación sísmica en los sitios de suelo blando de la ciudad de México.

Para caracterizar la respuesta en sitios instrumentados de la zona del lago se utilizaron cocientes espectrales empíricos promedio, los cuales se interpretan como funciones de

transferencia entre cada sitio instrumentado y el sitio de referencia. Las funciones de transferencia empíricas (FTE) fueron calculadas por Aguilar *et al.* (1991; ver también Singh *et al.* 1988) analizando registros obtenidos por la RACM durante sismos previos. Aguilar *et al.* calcularon las FTE usando cocientes espectrales suavizados con respecto a un sitio hipotético que intenta representar el movimiento promedio para la zona firme de la ciudad; este sitio hipotético es la estación de referencia. Así, para un temblor dado, los cocientes espectrales se calculan con respecto a este punto hipotético cuyo EAF es el promedio del de todos los sitios de zona de lomas en que se registró el movimiento. El usar como referencia este sitio hipotético toma en cuenta gruesamente el hecho de que el movimiento de entrada impuesto al suelo blando en el valle no es único. Ya que las regresiones para los espectros de aceleración de Fourier fueron derivadas originalmente usando los registros de la estación Ciudad Universitaria (CU), ellas incluyen los efectos de amplificación local en este sitio. Para corregir esto, se derivó una función promedio de transferencia empírica para relacionar el movimiento en CU con el movimiento en el sitio hipotético de referencia.

Las FTE sólo pueden estimarse para los sitios de suelo blando instrumentado en que se hayan obtenido registros. Sin embargo, se requiere una FTE en el centro de cada uno de los 751 polígonos; estos puntos, en general, no coinciden con los sitios instrumentados. Por esta razón se desarrolló un procedimiento de interpolación con las siguientes bases: primero, las abscisas de la FTE (periodos) en puntos instrumentados se normalizaron con respecto al periodo dominante del sitio. La información acerca de los periodos dominantes fue obtenida usando técnicas de microtemblores, sondeos geotécnicos y registros de movimientos fuertes (ver, por ejemplo, DDF, 1987; Reinoso y Lermo, 1991). Posteriormente las FTE normalizadas se utilizaron en una interpolación bidimensional para obtener las FTE normalizadas en sitios arbitrarios. Finalmente, las FTE interpoladas se renormalizaron con respecto al periodo dominante apropiado. Esta interpolación supone variaciones suaves en la velocidad promedio de las ondas S -o, alternativamente, profundidad de la capa dura-, y es exacta para la respuesta unidimensional de un estrato. Sin embargo, los efectos bi o tridimensionales quedan incluidos en vista de que las FTE se obtuvieron de registros reales. Una vez obtenidas las FTE para cada celda, el correspondiente EAF en el sitio se calcula multiplicando la FTE por el EAF en el sitio de referencia. Esta información, aunada a la duración estimada del movimiento, se usa para calcular los espectros de respuesta esperados utilizando la teoría de vibraciones aleatorias (Boore, 1983; Boore y Joyner, 1984)

La duración del movimiento del terreno, T_s , fue estimada ajustando los datos de acelerogramas observados a una expresión de la forma

$$T_s = w_1 + w_2 T_0 \quad (4)$$

donde T_s está en segundos, T_0 es el periodo dominante del sitio, en segundos, y $W_1=40$ y $W_2=13.2$ son constantes empíricas. La ecuación 4 recuerda la expresión para la duración de la respuesta de un oscilador de un grado de libertad. Mientras que la correlación con el periodo predominante del suelo es excelente, se encontró muy poca correlación entre T_s y magnitud.

Ordaz *et al.* (1988) mostraron que el procedimiento que se ha descrito (sin incluir la interpolación) es adecuado para reproducir los espectros de respuesta en sitios en que se registró el temblor del 19 de septiembre de 1985.

Con este enfoque se está en capacidad de estimar espectros de respuesta en los centros de las 751 celdas. Cada estructura es sensible a la ordenada espectral medida a cierto periodo. Sin embargo, no todas las estructuras que pertenecen a una misma clase estructural tienen el mismo periodo, sino un intervalo de periodos. La tabla 1 muestra tres periodos característicos (T_1 , T_2 y T_m) para las 14 clases estructurales y para dos tipos de terreno -firme y suave-. Se supone que para una clase estructural dada, un edificio individual tiene un periodo estructural aleatorio con distribución triangular entre T_1 y T_2 con máximo en T_m . Los periodos característicos que se dan en la tabla 1 toman en cuenta la pérdida de rigidez debida a comportamiento no lineal del edificio durante movimiento intenso y fueron derivados atendiendo a la práctica común de construcción y materiales de la ciudad de México.

Para simplificar los cálculos determinamos, para cada clase estructural i en la celda j , una *ordenada espectral equivalente*, SE_{ij} , que toma en cuenta la incertidumbre en el periodo estructural de las construcciones de la clase y celda correspondientes. SE_{ij} se define como la ordenada espectral que se requeriría para producir el mismo nivel de daño en la totalidad de las estructuras de una clase y celda que el que se calcularía si se llevara a cabo una suma exacta de los daños en cada estructura individual. En otras palabras,

$$K_i (SE_{ij})^\alpha = \int_{T_1}^{T_2} K_i (S_i)^{\alpha} h(T) dT \quad (5)$$

donde $h(T)$ es la distribución de periodos de edificios de una misma clase; la integración se lleva a cabo con respecto al periodo estructural. De esta suerte, para cada celda y clase estructural, el movimiento del suelo se caracteriza mediante esta ordenada espectral equivalente.

4. FUNCIONES DE VULNERABILIDAD

Como se señala en la sección 2, la vulnerabilidad de las construcciones de la clase i está definida por los parámetros K_i y α de la función que relaciona el daño esperado, D , con la intensidad sísmica (ver ec 1). Procede entonces determinar los valores de estos parámetros para las 14 clases de construcción y los tipos de suelo considerados.

En otros estudios de este tipo los parámetros de la función de vulnerabilidad están basados en relaciones empíricas entre el daño y el cociente entre intensidad sísmica y capacidad sísmica teórica del edificio. En nuestro caso podemos proceder de una manera más directa con base en la estimación del daño sufrido por los diferentes tipos de construcciones durante la ocurrencia de algunos temblores que produjeron intensidades conocidas. En particular, las evaluaciones de daño del gran temblor de 1985 constituyen nuestra mejor fuente de información.

La mayoría de los levantamientos de daños sólo reportan el número de edificios afectados y, a lo sumo, una evaluación cualitativa del grado de daño. Para el temblor de 1985, además de los levantamientos del tipo mencionado, se cuenta con una evaluación cuantitativa de los daños a partir del estudio de riesgo sísmico realizado por Esteva *et al.* (1988) con datos proporcionados por compañías de seguros. Esta base de datos contiene 1597 construcciones

clasificadas por tipo de edificio y tipo de suelo sobre el que están desplantados. El número de edificios asegurados no constituye una muestra representativa del universo de construcciones de la ciudad de México. Por tanto, sólo pueden usarse algunos parámetros generales para nuestros fines.

Tabla 1. Periodos característicos y parámetros vulnerabilidad para las 14 clases de edificios

Clase	Terreno firme			Terreno blando			K^b	Descripción de la clase (N = número de pisos)
	T_1^a	T_M	T_2	T_1	T_M	T_2		
1	0.05	0.10	0.20	0.20	0.30	0.50	1.00	M, $N < 3$
2	0.15	0.20	0.30	0.30	0.40	0.60	0.93	M, $N > 3$
3	0.10	0.30	0.80	0.20	0.50	1.20	1.02	Mc, $N < 5$
4	0.60	1.00	1.40	0.90	1.50	2.20	1.62	Mc, $5 < N < 10$
5	1.10	1.80	3.00	1.60	2.70	4.50	0.97	Mc, $N > 10$
6	0.10	0.20	0.50	0.10	0.30	0.80	0.71	MR, $N < 5$
7	0.40	0.70	0.90	0.60	1.00	1.40	0.97	MR, $5 < N < 10$
8	0.70	1.20	2.00	1.10	1.80	3.00	0.49	MR, $N > 10$
9	0.10	0.20	0.30	0.20	0.30	0.50	0.80	IL
10	0.10	0.20	0.40	0.20	0.30	0.60	1.30	IP
11	0.05	0.15	0.20	0.15	0.20	0.30	2.00	NIL
12	0.10	0.15	0.30	0.15	0.30	0.50	4.00	NIP
13	0.10	0.15	0.20	0.15	0.20	0.30	1.50	OL
14	0.10	0.15	0.30	0.15	0.30	0.50	3.00	OP

^a T_1 , T_2 y T_M son los periodos característicos, en segundos, para cada clase de estructura y tipo de suelo.

^b Los valores mostrados en la tabla son coeficientes de vulnerabilidad relativos al coeficiente de la clase 1 de estructuras en terreno blando. El valor absoluto de este coeficiente es 6.79×10^{-5} (cuando la intensidad se expresa en gal). Los coeficientes en terreno firme se obtienen multiplicando el correspondiente en terreno blando por 1.3. En todos los casos se tomó $\alpha = 1.6$.

NOTACION:

M, mampostería; Mc, marcos; MR, marcos rigidizados; IL, industrial ligera; IP, industrial pesada; NIL, no ingenieril ligera; NIP, no ingenieril pesada; OL, otras (ligeras); OP, otras (pesadas).

El parámetro básico derivado de los datos de las compañías de seguros es el índice de daño neto, es decir, el cociente entre costo de reparación y el costo del edificio.

Para el temblor de 1985, el índice de daño para todos los edificios asegurados en la zona blanda fue 0.06. Este índice disminuye a 0.03 cuando se toma en cuenta la distribución real de edificios. La diferencia se deriva del hecho de que la cantidad relativa de edificios muy vulnerables (edificios de alturas intermedias a grandes) es mayor entre los edificios asegurados que en la población total de edificios. En la tabla 2 se presenta la distribución de algunos de los tipos más comunes de edificio en las dos poblaciones: la de asegurados y la total, junto con los índices de daño experimentados por estos tipos de edificio. Para obtener estos valores se efectuaron algunas correcciones a los datos de las compañías de seguros, a fin de ajustar el número de edificios dañados a los de otros levantamientos más detallados.

En la ciudad de México, contrariamente a lo que se observa en otras regiones sísmicas del mundo, la construcción de mampostería, que constituye la mayoría del parque de edificaciones, es mucho menos vulnerable que la de concreto reforzado. Esto se debe al tipo peculiar de movimiento del terreno durante sismo en la zona blanda, con oscilaciones de periodo largo, y también a la gran capacidad lateral de la mampostería, típicamente con grandes cantidades de muros confinados con elementos ligeros de concreto.

Tabla 2 Distribución de las clases más comunes de edificios e índices de daño inferidos para el temblor de 1985 (zona de lago)

Tipo de edificio (N = número de pisos)	% de edificios		Índice de daño, %
	Otros levantamientos	Compañías de seguros	
Mampostería, N < 3	68	60	3
Mampostería, N > 3	12		3
Marcos 1 < N < 5	14	15	5
Marcos 6 < N < 10	3.1	14	15
Marcos N > 10	0.9	11	13
Otros	2		5

El índice de daño para marcos típicos de concreto reforzado de entre 6 y 10 pisos fue de 0.15 para la zona de lago, lo cual implica que el monto del daño equivale al 15% del costo total de estas construcciones en esta zona crítica. Para edificios a base de muros de carga de mampostería, esta medida fue de 0.03, es decir, la quinta parte que para los de concreto.

Otros parámetros derivados de los datos de las compañías de seguros son las relaciones entre los daños en diferentes zonas de la ciudad. Se encontró que el daño total para la zona firme fue 12 veces menor que para la zona blanda, mientras que en la zona de transición esta relación fue de 6. Se supuso que estas relaciones eran constantes independientemente de la clase

estructural.

Se admitió que el cociente entre la cantidad pagada por las compañías de seguros en los temblores de 1985 y 1979 era una estimación del daño relativo ocasionado por estos dos temblores. Con base en esta información, los daños en el temblor de 1979 se tomaron como 7.9 y 3.4 veces inferiores que para el evento de 1985, en las zonas de lago y firme, respectivamente.

El temblor de 1979 tuvo su epicentro aproximadamente en la misma área que el de 1985, pero su magnitud fue inferior (7.6 contra 8.1). A fin de determinar los parámetros de las funciones de vulnerabilidad requerimos además de una estimación del nivel de intensidad sísmica durante los dos eventos. Para esto, seleccionamos cinco estaciones acelerográficas, una en zona firme (CU) y cuatro en zona de lago (SCT, CDAO, 56 y NON). Ambos temblores fueron registrados en CU; el evento de 1985 fue registrado además en SCT y CDAO, mientras que el evento de 1979 se registró solamente en NON. Usando el enfoque de estimación de movimientos fuertes que se describió en la sección 3 estimamos los espectro de respuesta en NON para el temblor de 1979 (direcciones NS y EW) y los comparamos con los calculados a partir de los acelerogramas registrados. Se aceptó que los cocientes entre los espectros calculados con estos dos procedimientos eran representativos del error inherente al proceso de estimación, por lo que se aplicó un factor de corrección a los espectros estimados para las estaciones SCT, CDAO y 56. Para el temblor de 1985 utilizamos los espectros exactos en SCT y CDAO y los estimados para NON y 56. Este procedimiento permitió contar con estimaciones razonables de las intensidades en cinco sitios para los dos temblores. En la fig 2 se compara el espectro de la estación NON (dirección EW) para el temblor de 1979 con el correspondiente en SCT para el temblor de 1985.

Los datos de intensidad sísmica e índice de daño experimentados por cada tipo de construcción durante los eventos de 1979 y 1985 permiten fijar dos puntos de las funciones de vulnerabilidad y, por tanto, obtener los dos parámetros, K_i y α , que las caracterizan. Se encontró que α era similar para todas las clases estructurales, por lo que se adoptó un valor constante $\alpha=1.6$. Los valores obtenidos de K_i se presentan en la Tabla 1.

El procedimiento que se ha indicado se utilizó para determinar los coeficientes K_i de las clases estructurales 1 a 5. Para el resto, las estadísticas de daño son pobres o inexistentes. Por esto, los valores de vulnerabilidad se derivaron de evaluaciones aproximadas de la capacidad sísmica de estructuras típicas relativa a su contraparte en estructuras del primer grupo.

Las curvas de vulnerabilidad para las clases estructurales más comunes se muestran en la fig 3. Como puede apreciarse, para todas las clases estructurales la curva indica daños despreciables hasta que se alcanza cierto valor de la ordenada espectral, a partir del cual los daños aumentan muy rápidamente. A fin de verificar las funciones de vulnerabilidad derivadas estadísticamente se llevó a cabo una encuesta a expertos. Se reunió a 14 ingenieros estructurales con amplia experiencia en ingeniería sísmica y se les hizo la siguiente pregunta: "Imaginen un parque de edificaciones como el de la ciudad de México, localizadas en un sitio típico de zona de lago (o de zona firme). ¿Por qué factor debería escalarse el temblor de 1985 para producir un daño de 10% (y de 50%) en cada clase de estructuras? Las respuestas a esta pregunta permiten fijar dos puntos de las funciones de vulnerabilidad.

En el caso de daños a edificios en zona de lago, la mayor parte de las respuestas de los expertos yacieron en un rango relativamente estrecho, pero para terreno firme se encontró una dispersión mucho mayor. La razón es que el temblor de 1985 produjo daños en la zona de lago que no están excesivamente lejos de los niveles considerados en la pregunta; en terreno firme, sin embargo, el daño en 1985 fue muy pequeño, por lo que se requería una gran extrapolación para contestar la pregunta.

Las estimaciones promedio de los expertos, para estructuras en zona de lago, no difieren significativamente de los resultados derivados del procedimiento estadístico. Por otra parte, para edificios en terreno firme, los expertos subestimaron fuertemente los niveles de intensidad requeridos para producir un nivel de daño dado. Las opiniones de los expertos no modificaron los parámetros obtenidos a partir de los daños observados.

5. LEVANTAMIENTO DE EDIFICIOS

El tamaño de la ciudad de México hace que el levantamiento exhaustivo de sus edificios sea una tarea descomunal. Más aun, la información disponible sobre las características de la edificación en algunas áreas no es apropiada para nuestros fines. Por tales motivos se decidió hacer una cuantificación independiente de la construcción del DF con base en mapas catastrales, fotografías aéreas e inspección directa. Como podrá apreciarse de la descripción del levantamiento que se emprendió, se obtuvo una estimación gruesa de la densidad de construcción; podría obtenerse una mejor estimación si se dedicara un mayor esfuerzo a la tarea. Sin embargo, juzgamos que la calidad de esta información es consistente con las incertidumbres presentes en otros aspectos del modelo, tales como la definición de los parámetros de las funciones de vulnerabilidad.

El levantamiento se llevó a cabo de la siguiente manera: primero, se midió el área de cada una de las 751 celdas en mapas catastrales (escala 1:2000). Se midió también el área cubierta por edificios, con lo que se define un porcentaje de área construida. Después, las 751 celdas fueron divididas en 60 familias con características similares. Para cada familia se eligió una celda representativa, misma que fue estudiada con detalle con levantamientos de campo. Para cada una de las celdas representativas se obtuvo el porcentaje de área ocupada por construcciones de cada clase y posteriormente, para cada clase, se obtuvo la siguiente información como un promedio para la celda:

- 1) Porcentaje del área ocupada por edificios
- 2) Número de pisos
- 3) Calidad de la construcción. Desde el punto de vista de su resistencia sísmica los edificios se calificaron con B (resistencia promedio, la mayor parte de los edificios), A (resistencia especialmente alta), C (resistencia claramente inferior) y D (extremadamente débil).

A partir de esta información se calculó el área de construcción de cada clase estructural y se asignó un índice de calidad en cada caso. Se multiplicó el índice básico de vulnerabilidad K_v , derivado en la sección precedente, por 0.8 para calidad A, 1.25 para calidad C y 1.35 para calidad D.

Para las otras celdas pertenecientes a alguna de las 60 familias se aplicaron los factores

obtenidos en la celda representativa por lo que concierne a porcentaje del área cubierta por cada clase estructural, porcentaje del área total ocupada, número medio de pisos e índice de calidad. Finalmente, los resultados obtenidos para cada celda fueron verificados mediante un examen rápido -recorriendo las celdas en vehículo- y se llevaron a cabo algunos ajustes para corregir diferencias obvias con la celda representativa.

Posteriormente se integró una base de datos con las características de los edificios, misma que se usó como entrada en el sistema general de estimación de riesgo. Algunos datos generales del levantamiento podrían ser de interés:

- Área total estudiada: 682 millones de metros cuadrados.
- Área construida total: 612 millones de metros cuadrados.

Porcentajes de construcción para algunas clases estructurales (área cubierta por edificios de cada clase dividida entre área construida total):

- Mampostería de pocos niveles: 48 %
- Construcción a base de marcos con alturas de hasta 5 niveles: 8.3 %
- Construcción a base de marcos con alturas de entre 5 y 10 niveles: 12 %

Debe tenerse en cuenta que la clasificación de los tipos de construcción se llevó a cabo mediante una inspección desde afuera del edificio. Por tanto, existen posibilidades de error en la clasificación. Fue particularmente difícil distinguir entre marcos rigidizados y no rigidizados y, en algunos casos, marcos con muros de relleno de marcos con muros de carga.

6. RESULTADOS

Toda la información usada en el modelo de estimación está almacenada en bases de datos. Algunas cantidades, como el área total, el área cubierta por las diversas clases estructurales, el periodo predominante del suelo, los espesores de la primera formación arcillosa y las FTE, son atributos de cada celda. Por otra parte, la información sobre las intensidades varía de temblor a temblor, de suerte que se requiere una base de datos para cada escenario sísmico.

La mayor parte de la información generada puede visualizarse mediante un sistema de información geográfica, el cual puede producir los siguientes mapas:

- 1) Distribución del área construida, para cada clase estructural y para el total de las construcciones. En las figuras 4-10 se presentan ejemplos de estos mapas.
- 2) Distribución del espesor de la formación arcillosa del suelo (figura 11).
- 3) Para un temblor especificado, la distribución de la ordenada espectral para cualquier periodo entre 0 y 5 seg, en dos componentes ortogonales (NS y EW). Ejemplos de estos mapas se presentan en las figuras 12-17.
- 4) Distribución de la ordenada espectral máxima en los componentes NS y EW, sin importar el periodo al que ocurra (figura 18).
- 5) Distribución del daño producido por un temblor dado, para cada clase estructural y

para el total de las construcciones. Las figuras 19-25 presentan algunos de los mapas de daño que pueden generarse.

- 6) Para una celda seleccionada, la distribución por clases estructurales del área construida, la densidad de construcción, el espectro de respuesta asociado a un temblor predeterminado y el daño provocado a cada clase estructural en esa celda. Un ejemplo de esta salida se presenta en la fig 26.

En las figuras 12-17, que muestran mapas de ordenadas espectrales estimadas para un temblor como el de 1985, puede apreciarse cómo las zonas de máxima intensidad se mueven hacia el Este conforme aumenta el periodo al que se mide la ordenada espectral. Esto refleja la distribución de periodos predominantes del suelo en la ciudad de México (figura 27). Los mapas de intensidad esperada hacen ver que el daño es altamente dependiente de la localización de un edificio y que probablemente deberían existir diferentes mapas de microzonificación para diferentes clases de edificios.

En la fig 25 se presenta el daño total estimado para el temblor de 1985. Conviene notar que las áreas de máximo daño no coinciden necesariamente con las de máxima intensidad sísmica, puesto que aquel depende también de la vulnerabilidad estructural en la zona y de la densidad de construcción. Esta observación muestra claramente la diferencia entre peligro y riesgo sísmicos.

7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

En lo que sigue discutiremos algunas de las limitaciones del modelo que se propone.

7.1 Estimación de movimiento del terreno

En su versión actual, el modelo es adecuado exclusivamente para temblores con origen costero. Aunque estos eventos son los que históricamente han producido la mayoría de los daños en la ciudad de México, debe reconocerse el potencial destructivo de otros tipos de temblores (Rosenblueth *et al*, 1989). Las distribuciones de intensidad asociadas a esos otros temblores, de foco más cercano, podrían diferir sustancialmente de las correspondientes a eventos costeros.

Los efectos de sitio se caracterizan mediante las FTE determinadas a partir de un modesto número de temblores registrados. Aunque no se ha identificado comportamiento no lineal apreciable del suelo en ningún sitio del valle de México, las FTE en algunos lugares varían de un temblor a otro, fenómeno para el cual no se tienen todavía explicaciones cuantitativas. Esto constituye una fuente de dispersión en nuestras estimaciones.

Por otra parte, la estimación del movimiento incidente al valle de México se obtiene mediante una regresión semiempírica. Esta involucra incertidumbres de hasta un factor de 2 en las ordenadas del espectro de Fourier. Aun cuando se impusieron restricciones teóricas a los coeficientes de la regresión usando estadística bayesiana, las estimaciones para temblores con $M > 8$ dependen fuertemente de los datos de 1985. Juzgamos que en algunas estaciones los espectros calculados podrían tener errores de hasta 50% en algunos periodos. Sin embargo, la forma de estos espectros es muy confiable puesto que se cuenta con información muy detallada y de alta calidad sobre los periodos predominantes del suelo.

7.2 Funciones de vulnerabilidad

La principal limitación de nuestro enfoque para modelar las relaciones intensidad-daño es la selección de la medida de intensidad. Las ordenadas espectrales elásticas capturan algunas de las características más relevantes del movimiento, tal como la amplificación dinámica dependiente del periodo; sin embargo, esta medida no está completamente correlacionada con los daños estructurales puesto que no se toman en cuenta factores importantes como la duración, excursiones al rango inelástico y degradación de la resistencia. A pesar de esto, creemos que el enfoque adoptado es robusto dentro del relativamente estrecho intervalo de intensidades de interés. En efecto, las intensidades de los eventos de 1979 y 1985 difieren en un factor de alrededor de 3. Movimientos más leves que los de 1979 sólo producirán daños menores, mientras que intensidades del doble de las experimentadas en 1985 parecen improbables. En vista de esto, aun cuando la medida de intensidad y la relación funcional intensidad-daño adoptadas tengan un significado físico pobre, los índices de daño predichos están razonablemente bien restringidos en ambos extremos del intervalo de máxima importancia. Sólo podrán tenerse mejores maneras de relacionar el comportamiento estructural con los daños observados cuando se hayan entendido mejor las particularidades del comportamiento no lineal de las estructuras, sus propiedades materiales y las fuentes de sobrerresistencia.

Hemos estimado la vulnerabilidad de edificios con base en información sobre su comportamiento en el pasado. Creemos que su vulnerabilidad actual podría ser menor por varias razones: a) los edificios más vulnerables de la ciudad colapsaron durante el temblor de 1985; b) los edificios importantes que experimentaron daños en 1985 fueron reforzados a fin de satisfacer los requisitos de los nuevos reglamentos de construcción; c) los nuevos edificios están siendo diseñados para resistir fuerzas sísmicas mayores. Por otra parte, algunos edificios que sufrieron daños moderados y no fueron reforzados están actualmente en una situación más desfavorable. Si nuestra conjetura es cierta, nuestras estimaciones de daño podrían ser conservadoras.

7.3 Levantamiento de edificios

Sus mayores limitaciones son evidentes de la descripción del levantamiento. Creemos, sin embargo, que mejorías sustanciales requerirían un esfuerzo un orden de magnitud mayor. Actualmente, realizar tal esfuerzo está fuera de nuestras posibilidades.

7.4 Aplicación del método a otras ciudades

Conceptualmente, los métodos que se han expuesto para evaluar las pérdidas esperadas por sismo son aplicables a cualquier localidad: división del área de interés en celdas, estimación de movimiento fuerte en un sitio de referencia, relaciones entre el movimiento en este sitio y el movimiento en el resto de las celdas y uso de relaciones intensidad-daño esperado. Sin embargo, cada una de estas actividades puede tomar formas específicas dependiendo de la zona que se estudie. Comentaremos algunas de las diferencias que podrían aparecer al tratar ciudades con ambientes diferentes al de la ciudad de México.

Por definición, se considera que todos los atributos de una celda son constantes al interior de ella. Para la ciudad de México, la división en las celdas de la fig 1 estuvo gobernada principalmente por el hecho de que las características del subsuelo varían rápidamente dentro de la ciudad y con ellas la naturaleza de los movimientos durante sismo. Esta heterogeneidad de la geología superficial no es de esperarse en muchas otras ciudades. Por tal motivo, es probable que la división en celdas para otras localidades quedara gobernada principalmente por la heterogeneidad en construcción. Por otra parte, consideramos que hubiera sido mucho más

fácil desde el punto de vista computacional manejar celdas cuadradas que las irregulares que se escogieron. Aunque estas últimas tienen la virtud de lograr mayor homogeneidad en cuanto a tipos de construcción, su forma es irrelevante para fines de describir las variaciones en la geología local -que no distingue calles-.

La técnica de predicción del movimiento del terreno en el sitio de referencia puede aplicarse en cualquier ambiente; lo mismo sucede con las funciones de transferencia empíricas (FTE). Sin embargo, es poco probable que en otras ciudades se encuentren FTE con máximos tan conspicuos como las del DF. El concepto mismo de periodo predominante del suelo se vuelve oscuro y de muy dudosa utilidad cuando se trata con terrenos considerablemente más firmes que los de la ciudad de México. En la mayor parte de los casos será suficiente con obtener FTE que describan la amplificación de las ondas sísmicas en unas cuantas bandas de frecuencia. Por otra parte, la determinación de las FTE del DF ha descansado fuertemente en los más de 100 acelerógrafos con que cuenta la ciudad. Esta es una situación afortunada pero única en el país. En otras ciudades deberá utilizarse información de otro tipo, como la obtenida en mediciones adecuadas de microtemblores, datos geotécnicos e información de geología superficial.

Las funciones de vulnerabilidad que se usaron en el presente estudio son de aplicación exclusiva a la ciudad de México. Esto es así principalmente por dos razones:

- 1) La medida de intensidad usada deja de lado características importantes del movimiento del suelo como la duración. Sin embargo, como los acelerogramas de la ciudad de México son sistemáticamente largos, el efecto de la duración está gruesamente incluido en las funciones de vulnerabilidad obtenidas con las intensidades y daños observados en el DF. Esto implica que si en otra localidad se presentara un sismo que indujera la misma intensidad nominal, pero que tuviera menor duración, los daños calculados con nuestras funciones de vulnerabilidad serían excesivos.
- 2) Las funciones de vulnerabilidad determinadas están fuertemente ligadas a las prácticas constructivas y de diseño sísmico que han prevalecido en la ciudad de México en las últimas décadas. En ciudades sin tradición de diseño sísmico sería de esperarse mayor vulnerabilidad estructural. Un ejemplo que ilustra esta situación es el caso de las estructuras de mampostería, que, como se ha señalado, resultan ser mucho menos vulnerables en el DF que en otras regiones de México y Latinoamérica.

7.5 Uso del sistema en microzonificación sísmica

A primera vista podría pensarse que, al estar en capacidad de estimar el movimiento del suelo durante temblores intensos para 751 puntos en el DF, los resultados aquí presentados son directamente aplicables al diseño de estructuras. No pensamos que este sea el caso. Estos resultados abren la puerta a una microzonificación más detallada que la que ahora existe, pero deben tenerse en cuenta varios hechos. Por ejemplo, aunque la estimación de periodos predominantes del suelo es muy confiable, no lo es tanto la estimación de las amplitudes espectrales; como hemos señalado, no son inconcebibles errores de hasta 50% en estas amplitudes en algunos sitios. Juzgamos que sería más razonable construir, para cada celda, espectros de diseño cuyas formas estuvieran basadas en las de los espectros de respuesta estimados por el sistema, pero con amplitudes de diseño conservadoras que variaran mucho menos que las amplitudes máximas de los espectros de respuesta calculados.

7.6 Comentarios generales

A lo largo del estudio adoptamos lo que podría llamarse "aproximación de primer orden", una manera elegante de decir que hemos ignorado las incertidumbres. La principal razón para esto es que, aunque podemos acotar razonablemente la incertidumbre en la estimación del movimiento del terreno, no hemos estimado formalmente las incertidumbres involucradas en las otras partes del proceso.

Se considera que el modelo desarrollado podría ser de utilidad para las autoridades metropolitanas en sus funciones de planeación de uso del suelo y manejo de emergencias.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la invaluable participación de muchos estudiantes y ayudantes de investigación en el levantamiento de edificios. Agradecemos también la participación de muchas personas del Centro de Investigación Sísmica que han colaborado en el proyecto por varios años, en particular la de E. Reinoso. J. Arboleda revisó el manuscrito original e hizo valiosas sugerencias. Apreciamos profundamente la motivación y paciencia de D. Ruiz, Secretario General de Obras del DDF.

9. REFERENCIAS

Aguilar, R., A. Arciniega, M. Ordaz, L.E. Pérez-Rocha, E. Reinoso, y F.J. Sánchez-Sesma (1991). Respuesta sísmica del valle de México: Aplicaciones y teoría, *Informe final de actividades del Centro de Investigación Sísmica A.C. a la Secretaría General de Obras del Departamento del Distrito Federal*.

Boore, D.M. (1983). Stochastic simulation of high-frequency ground motion based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, 1865-1894.

Boore, D.M. y W.B. Joyner (1984). A note on the use of random vibration theory to predict peak amplitudes of transient signals, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 74, 2035-2039.

DDF (1988). Estudios sobre sismicidad en el valle de México.

DDF (1987). Normas Complementarias para Diseño por Sismo.

Esteve, L., O. Díaz, A. Terán y J. García (1988). Costos probables de daños causados en construcciones, *Informe Interno 8750*, Instituto de Ingeniería, UNAM.

Gómez, R. y F. García-Ranz (1988). Complementary Technical Norms of earthquake resistant design, *Earthquake Spectra*, 4, 441-460.

Fundación ICA (1988). Experiencias derivadas de los sismos de 1985, Noriega Editores, México DF.

Meli, R. (1986). Evaluación de los efectos de los sismos de 1985 en los edificios de la ciudad de México (3 volúmenes y 7 anexos), *Informe Interno DE/EST-V2/1*, Instituto de

Ingeniería, UNAM.

Meli, R. y Avila, J. (1988). Analysis of building response, *Earthquake Spectra*, 5, 1-18.

Ordaz, M., S.K. Singh, E. Reinoso, J. Lermo, J.M. Espinosa, y T. Domínguez (1988), Estimation of response spectra in the lake-bed zone of the Valley of Mexico, *Earthquake Spectra*, 4, 815-834.

Ordaz, M. (1992). Atenuación de las ondas sísmicas ante temblores mexicanos de subducción, Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Ordaz, M. y S.K. Singh (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.

Reinoso, E. y J. Lermo (1991). Periodos del suelo del valle de México medidos en sismos y con vibración ambiental, *Memorias del IX Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*, Manzanillo, Col., 2.149-2.156.

Rosenblueth, E. (1953). Teoría del diseño sísmico sobre mantos blandos, *Ediciones ICA*, Serie B 14, 3-12.

Rosenblueth, E. y R. Meli (1986). The 1985 earthquake: causes and effects in Mexico City, *Concrete International*, May.

Rosenblueth, E., M. Ordaz, F.J. Sánchez- Sesma, y S.K. Singh (1989). Design spectra for Mexico's Federal District, *Earthquake Spectra*, 5, 273-284.

Singh, S.K., J. Lermo, T. Domínguez, M. Ordaz, J.M. Espinosa, E. Mena, y R. Quaas (1988). A study of amplification of seismic waves in the Valley of Mexico with respect to a hill-zone y site, *Earthquake Spectra*, 4, 653-674.