

EVALUACION DE LA SISMICIDAD EN MEXICO



Emilio Rosenblueth*

INTRODUCCION

Para elegir los niveles óptimos de diseño sísmico necesitamos cuantificar los costos y consecuencias que implican los criterios que nos es dado adoptar. En lo tocante a consecuencias tiene papel crucial la sismicidad, que se refiere a cuándo y dónde se originará cada temblor futuro, cómo serán su área de ruptura, mecanismo focal y las ondas que genere, cómo evolucionarán éstas en diversas formaciones geológicas y cuáles serán los efectos locales de topografía y estratigrafía. Mas la cuantificación de las consecuencias de nuestras decisiones no termina en la evaluación de la sismicidad. Hemos también de calcular las respuestas estructurales y sus implicaciones económicas y sociales directas e indirectas. Dadas nuestras enormes incertidumbres, necesariamente la cuantificación ha de hacerse en términos probabilistas.

En cada paso de todo este proceso acudimos a modelos que simplifican la realidad. Bien sabemos que todos ellos son imprecisos, pero nada alcanzaríamos sin tales simplificaciones, en ocasiones extremas. A veces tenemos que elegir modelos que sabemos que son falsos o con poca probabilidad de ser verdicos. En ello se manifiesta una diferencia esencial con la tarea del científico, quien busca acercarse lo más posible a la verdad, sea en sus descripciones o en sus predicciones, mientras que el ingeniero debe tomar las mejores decisiones que le sea factible, y hacerlo en condiciones que distan de las ideales en cuanto a la información, tiempo y otros recursos disponibles.

En otras ramas de la ingeniería este proceder es ya tradicional. La fórmula que empleamos para calcular la resistencia a la flexión de vigas de concreto subreforzado es sensiblemente la media aritmética de los resultados experimentales; en cambio para calcular la capacidad en tensión diagonal nos basamos en una especie de envolvente inferior de los resultados de ensayos, y el criterio usual que aplicamos en lo tocante al pandeo lateral de vigas concuerda con los datos experimentales para relaciones de esbeltez pequeñas pero yerra seriamente para relaciones elevadas. Lo que sucede es que diseñamos como si sólo nos interesara resistir las fuerzas que van a obrar cuando en rigor tam-

* Instituto de Ingeniería, UNAM y Centro de Investigación Sísmica, A.C., México, D.F.

bién nos interesa que en caso de falla ésta tenga alta probabilidad de ser dúctil a fin de aprovechar las redundancias y tener aviso de la falla.

Tanto en ingeniería sísmica como en otras ramas de la ingeniería esta tradición ha tratado la información sobre costos y consecuencias de manera intuitiva, informal. Comienza a racionalizarse y a formalizarse el proceso (1), como lo hemos visto en uno de los trabajos que se presentaron en este congreso (2). Pero como también lo hemos visto aquí, la racionalización y formalización es aún ardua, tanto por el gran número de variables que deben tenerse en cuenta como porque ha de procederse en forma francamente interdisciplinaria, así que seguimos apelando a lo intuitivo, a lo informal y a la toma de decisiones por consenso tenido de lo visceral. Creo que en buena medida así lo seguiremos haciendo durante muchos años, y con este enfoque es que hemos llegado a la mayoría de los modelos a que me referiré en los párrafos que siguen. Haré alusión primordialmente a los resultados de los estudios realizados en nuestro país.

TEMBLORES TECTONICOS Y VOLCANICOS

Todavía el terremoto de 85 captura casi toda nuestra atención, y en efecto, los eventos más devastadores que esperamos para los próximos años o decenios también se originarán en la subducción de la placa de Cocos bajo la de Norteamérica. Pero el resto de la República reclama atención. Hay asimismo probabilidad alta de un macrosismo causado por la subducción de la placa Rivera, y no podemos olvidar que a este proceso obedeció el temblor que en 1932 desencadenó la máxima de las energías liberadas en México durante el último siglo (3) y que la segunda ciudad del país se halla cerca de allí. La misma placa de Cocos subduce también bajo la del Caribe. Por otra parte los movimientos relativos entre placas no se reducen a la subducción: los estados aledaños al golfo de California y el estado de Chiapas son afectados por temblores que nacen en fallas de transformación. Las placas de Cocos y Rivera subducidas se rompen en fallas normales y causan temblores de profundidad intermedia que han alcanzado magnitudes de 8 (4). A mayor profundidad esas placas se calientan y se funden. El magma ascendente y la formación de volcanes induce flexiones y tensiones en las placas de Norteamérica y del Caribe. Finalmente los movimientos relativos entre las diversas placas producen fallas de cizalleo y fallas inversas, de compresión, en las placas superficiales (5). Se suman a estos sismos los asociados directamente a la actividad volcánica, que en nuestro país es importante.

Como resultado, hemos de considerar en ingeniería sísmica todos los tipos de temblor conocidos, y lo que inferimos de un tipo no es del todo generalizable a otros: cambian las relaciones entre características de una falla o volcán, las magnitudes que allí pueden generarse y los espectros de las ondas emitidas. La gran diversidad de

formaciones geológicas que existen en el país hace que los procesos de atenuación también difieran de un sitio a otro. Y no se diga los efectos locales: en partes del valle de México un análisis unidimensional de ondas SH de trayectoria vertical y la hipótesis de comportamiento lineal suministran una buena primera aproximación a los espectros de respuesta, al menos para temblores tan intensos como los que han ocurrido durante el último siglo, y además puede uno desentenderse del peligro de licuación de arenas; en cambio, en varios otros sitios del país los fenómenos bi y tridimensionales y la no linealidad pueden ser decisivos e, incluso, el evitar la licuación puede tornarse en la consideración más trascendente.

En pocas palabras, el reto que enfrenta la evaluación de la sismicidad en México dista de estar confinado a un solo aspecto del problema global; este reto es un monstruo de muchas cabezas.

DATOS INICIALES

El ingrediente de máxima importancia en la evaluación de la sismicidad son los datos sobre los temblores que han ocurrido. Dado que el periodo de recurrencia de los temblores de gran magnitud es del orden de medio siglo a más de un siglo, su elenco queda demasiado corto a menos que, en adición a los datos instrumentales, se incluya información histórica, arqueológica y paleosísmica, esta última resultado de estudios geológicos. En nuestro país se carece de información de los dos últimos tipos. La historia está siendo evaluada por historiadores y sismólogos (6), pero resulta muy fragmentaria e incierta en lo que atañe a fechas anteriores al siglo XVII. La tarea no es fácil aun para los siglos XVII - XIX, pues las magnitudes y coordenadas focales han de inferirse, en parte, de las intensidades, que deben cuantificarse teniendo en cuenta los cambios arquitectónicos y de materiales de construcción a lo largo del tiempo; durante la Colonia las duraciones se medían en función del tiempo que llevaba rezar un credo, y una medida de intensidad se tiene en el tipo de ceremonia religiosa que se celebraba a raíz del terremoto. Además los calendarios no estaban unificados en todo el país; finalmente, las sucesivas transcripciones introdujeron exageraciones y errores.

Los datos instrumentales han requerido reinterpretación aprovechando tanto registros obtenidos en estaciones nacionales como registros telesísmicos, y las revisiones de magnitudes y coordenadas del foco han sido muy significativas en ocasiones.

A la fecha el Instituto de Geofísica de la UNAM cuenta con un catálogo completo y fidedigno de los temblores del presente siglo con magnitudes moderadas y grandes, y del XIX con magnitudes mayores de 7 y está avanzando en lo que toca a siglos anteriores (7).

TASAS DE EXCEDENCIA

Dependiendo de la importancia que revistan las consecuencias de daño y falla de una estructura, así como la sensibilidad de su costo inicial al grado de seguridad para el que se la diseñe, será el intervalo de intensidades sísmicas que en mayor grado controle su diseño. Cuando a este intervalo contribuyen con frecuencias comparables los temblores que se originan en varias fuentes cuyas actividades son aproximadamente independientes entre sí, vale la hipótesis de que los tiempos de arribo de los temblores de interés obedecen a un proceso de Poisson, es decir carente de memoria, y que por tanto la distribución de probabilidades de los intervalos entre dichos arribos es exponencial. En estas circunstancias, a sabiendas de que el proceso sismogénico en cada fuente dista de ser poissoniano, cabe idealizarlo como si lo fuera. A la misma conclusión se llega cuando el diseño está gobernado por sismos de magnitudes moderadas y pequeñas. Ello simplifica grandemente el análisis pues basta con calcular tasas de excedencia de magnitudes dadas sin ocuparse de los demás parámetros que definen las distribuciones de probabilidades de los tiempos entre eventos.

Trabajando con esta hipótesis ya se dispone de métodos eficientes para generar curvas de tasa de excedencia en fallas geológicas por simulación, aprovechando el principio de autosemejanza aplicado a cada falla (8), así como para incorporar información estadística (9,10). Para ello se han elaborado teorías que se apoyan en la estadística bayesiana. El mismo tipo de herramientas permite calcular las distribuciones de los parámetros que definen a las distribuciones en cuestión (9-11). En particular, la distribución de probabilidades de la magnitud máxima que puede generarse en una falla se debe basar en datos de tipo tectónico aunados al uso de fórmulas semiempíricas y en opiniones de expertos, y se han desarrollado métodos que permiten integrar los diversos tipos de información (11).

No se ha progresado de manera comparable en el análisis de datos sobre temblores de origen volcánico.

TIEMPOS ENTRE EVENTOS

Están poco desarrollados los métodos de análisis para cuantificar los efectos acumulados de temblores sucesivos en las estructuras y hasta ahora no se han formalizado mayormente los procedimientos para tomar decisiones respecto a evacuación, apuntalamiento y mera reparación de estructuras a raíz de un temblor. Por consiguiente no podría hacerse gran cosa con el conocimiento que pudiera obtenerse acerca de las distribuciones de probabilidades de los tiempos entre temblores pequeños o moderados, que ocurren a intervalos sumamente breves. No importa, pues, que idealicemos sus procesos generadores como poissonianos y les demos el tratamiento a que nos referimos en el inciso anterior. Sin embargo, para temblores de gran magnitud, como lo son los llamados temblores característicos, los tiempos entre

eventos pueden ser sumamente largos. Si las estructuras que interesan se ven afectadas principalmente por los grandes sismos que se originan en una sola falla o en un número pequeño de ellas, especialmente cuando hay correlación espacio-temporal entre sus eventos, importa reconocer que las consecuencias a corto plazo suelen tener apreciablemente mayor importancia actual que las que ocurren en un futuro lejano. Sabemos además que estos temblores ocurren de manera casi periódica en cada falla geológica. En tales circunstancias es obligado el cálculo de las distribuciones de probabilidades de los tiempos entre grandes temblores.

El método formal para seleccionar un modelo al que al principio me referí, (1) ya se ha aplicado a las distribuciones de probabilidades de los intervalos entre grandes temblores de subducción de varias partes del mundo, en especial a las de la costa mexicana del Pacífico con énfasis en la brecha de Guerrero y teniendo en mente el diseño de estructuras del valle de México (2). Se está en proceso de aplicarlo a los mismos temblores mexicanos de subducción pero con referencia al diseño de estructuras ubicadas en otros sitios y a temblores originados en y cerca de nuestro país por otros mecanismos tectónicos.

Recientemente J. Lomnitz-Adler y R. Pérez-Pascual (12) han estudiado la interacción de osciladores no lineales que simulan la interacción entre diversos segmentos de una falla. Mediante el uso de la teoría de sistemas dinámicos han desarrollado un algoritmo que describe el comportamiento de dos segmentos. Encuentran que aun con parámetros deterministas se puede llegar a un comportamiento caótico, esto es totalmente impredecible. Es de esperarse que con la introducción de restricciones físicas y la consideración de la mecánica de la fractura este enfoque produzca resultados esclarecedores.

CAMPO CERCANO

Cerca de la fuente general no hay oportunidad para que las irregularidades geológicas influyan marcadamente en la forma de las ondas sísmicas. En consecuencia suelen ser válidas las soluciones que, salvo por lo que ocurre en la fuente misma, idealizan la Tierra como un espacio o semiespacio elástico lineal homogéneo. Si bien las soluciones son complicadas, ya es posible calcular las formas de las ondas emanadas si se especifican detalladamente los procesos que ocurren en la fuente y puede incluso tenerse en cuenta la propagación de la ruptura en una falla geológica (13).

Existen métodos inversos también, que hacen factible reconstruir el proceso sismogénico detallado a partir de los registros obtenidos en diversos sitios (14).

Hubo un trabajo pionero de Rascón y Cornell (15), en que se tuvieron en cuenta la propagación de la ruptura en una falla geológica y la emisión de ondas tratadas como aleatorias. Singh a su vez ah rea-

lizado estudios sobre los espectros de campo cercano de temblores mexicanos (16). Aparte de esto no parecen haberse hecho contribuciones fundamentales a este problema en nuestro país. Sin embargo, de los estudios de Singh se concluye que algunas relaciones entre parámetros focales que valen en otros sitios no son estrictamente aplicables a nuestros temblores de subducción, y es posible que otros tipos de sismos mexicanos también merezcan atención.

ATENUACION

Dadas las enormes heterogeneidad y variabilidad de las formaciones geológicas está por ahora fuera de consideración el empleo de soluciones analíticas para calcular la atenuación de amplitud que experimentan las ondas de una frecuencia dada. Ha sido muy usual acudir a las expresiones semiempíricas que se han inferido de datos correspondientes a temblores californianos suponiendo que serán aplicables a todo el mundo. Sin embargo, se han detectado diferencias importantes entre las atenuaciones en el Este y en el Oeste de Estados Unidos, y entre lo que sucede en California y en Italia o en los Balcanes. Se hace necesario ajustar esas formas a cada región de la Tierra. Es posible que el contenido anómalo de energía que tuvo el temblor del 19 de septiembre 1985 en terreno duro del valle de México en torno a frecuencias de 0.3 a 1 Hz haya obedecido a un efecto de trayectoria (17). Sin embargo, las incertidumbres son aún grandes y no ha sido posible dilucidar si este fue el caso o si la anomalía ha de atribuirse a un fenómeno en la fuente. De hecho, Singh et al (18) ha encontrado en algunos registros telesísmicos evidencia de irradiación anómala de ondas de cuerpo que apoya esta interpretación.

Es debatible la aplicabilidad en el territorio mexicano de expresiones semiempíricas basadas en datos de otros lugares. No conozco otras fórmulas que tengan en cuenta datos de temblores intensos registrados en México aparte de las de Esteva y Villaverde (19), Bufalza (20) y Singh et al (21). Recientemente Castro et al (11) desarrollaron una fórmula que predice las amplitudes espectrales de Fourier en función de la magnitud y distancia focal para temblores costeros; esta ley de atenuación suministra mayor información sobre los movimientos futuros que las que sólo se refieren a valores máximos. Todas ellas tienen limitaciones en su aplicabilidad y es mucho lo que falta por hacer para que dispongamos de criterios válidos en toda la República.

EFFECTOS LOCALES

En nuestro seguimiento de las ondas sísmicas desde que emanan de la fuente las encontramos ahora en la superficie, que suponemos horizontal, de una formación de roca basal. Son pocas las estructuras que se apoyan en tales formaciones. Para disponer de modelos más realistas debemos tener en cuenta, en algunos casos, la topografía del sitio y, en la mayoría de las aplicaciones, las propiedades del suelo

local. Especial mención requieren los múltiples esfuerzos realizados recientemente para mejorar el conocimiento de las propiedades de los suelos de la Ciudad de México cuando son sometidos a excitación sísmica. Los estudios han abarcado mediciones de periodos de microsismos (22, 23, 24,) y de velocidades de propagación de ondas (24) pruebas de laboratorio (25, 26,) y extensas campañas de exploración geofísica por CFE y PEMEX. Se han revisado sondeos recientes y del pasado (27). Podremos esperar que nuestra visión global del valle de México mejore significativamente en un futuro próximo.

Mientras valga suponer que el suelo se mantiene dentro de su rango de comportamiento lineal, se dispone de métodos de análisis rigurosos muy generales (28, 29) que en algunas circunstancias son directamente aplicables a problemas prácticos. Seguramente el marco riguroso más general para análisis de estos fenómenos (y de muchos otros en medios continuos) es el debido a Ismael Herrera (30), que aprovecha propiedades de biortogonalidad de las soluciones. Para aplicaciones prácticas, sin embargo, es necesario introducir simplificaciones que limitan los intervalos de aplicabilidad de las soluciones. Así, bajo diversas hipótesis simplificadoras se han estudiado irregularidades topográficas (31), depósitos aluviales (32, 33) y problemas tridimensionales (34, 35). Estos estudios, aunque limitados a bajas frecuencias, han permitido mejorar la comprensión de la manera en que las irregularidades laterales afectan el movimiento sísmico en un sitio dado.

Podría pensarse que en vista de la gran versatilidad de los métodos que emplean elementos finitos, de que su grado de precisión puede llevarse en principio al nivel que uno quiera y de que si se desea son capaces incluso de lidiar con el comportamiento no lineal, todos los efectos locales podrían analizarse empleando esta sola herramienta. No es el caso. El número de elementos que se requiere para alcanzar una precisión aceptable puede resultar a tal grado excesivo que se tenga que desechar este enfoque, pues el tamaño de los elementos limita las frecuencias máximas de vibración para las que se obtienen resultados confiables. Por ejemplo si deseamos cubrir confiablemente frecuencias hasta de 2 Hz en el valle de México (lo que no es ni con mucho demasiado ambicioso en vista de las frecuencias fundamentales de los edificios de mediana altura), requerimos modelar el valle con 3×10^4 elementos finitos. Su análisis dinámico aun en el rango lineal supera por órdenes de magnitud la capacidad de las computadoras más poderosas que existen. Si bien las irregularidades topográficas de pequeñas dimensiones y los efectos bidimensionales de canales o cauces de ríos rellenos de material compresible o de pequeños valles pueden analizarse adecuadamente empleando elementos finitos o de frontera, en otros casos es necesario combinar estas técnicas con otras, más poderosas, que suministren información entre las respuestas globales en rangos de frecuencias moderadas y grandes. En este contexto es particularmente promisorio el método de origami desarrollado por F.J. Sánchez-Sesma y sus colaboradores (36-39) para análisis lineales en

dos dimensiones ya que virtualmente no tiene límite superior de frecuencias.

El reconocimiento del comportamiento no lineal del suelo puede ser decisivo en el análisis. Se han validado, pero sólo en contextos limitados, métodos sencillos que permiten hacer este reconocimiento mediante el uso de sistemas lineales equivalentes (40, 41). En nuestro país se trabaja actualmente en el desarrollo y calibración de métodos confiables más generales.

Hay indicios (42) de que la presencia de minas u otras oquedades de dimensiones moderadas no afecta significativamente los movimientos del terreno, si bien debe dedicarse atención al peligro de colapso de techos causado por sismos. El tema puede considerarse como caso particular de irregularidades topográficas. En cambio, los efectos de topografía debidos a la presencia de canales, ríos, montañas y otros accidentes pueden ser muy significativos (43), y aparentemente no se dispone de métodos que permitan cuantificar los efectos de cámaras magmáticas ni se sabe si pueden ser importantes y apenas comienzan a desarrollarse técnicas para detectarlas y conocer su configuración (44).

Los efectos que los suelos blandos tienen en las ondas sísmicas comenzaron a recibir atención en relación con el valle de México en 1952 (45-47). Recibieron auge a propósito de la reevaluación de la sismicidad de Laguna Verde (48), donde se halla nuestra primera planta nucleoelectrónica, y, mucho más, a raíz de los temblores de 1985 de nuevo en relación con el valle de México (40,49). El éxito del análisis unidimensional de estos efectos, suponiendo incidencia vertical de ondas SH para predecir espectros de respuesta correspondiente a 5% de amortiguamiento para movimiento horizontal del terreno, hizo pensar que esta herramienta sería suficiente para cuantificar los efectos locales en el valle de México y que las ondas superficiales no serían significativas. Sin embargo, hay varias razones para asegurar que tales ondas tienen una influencia decisiva en las obras del hombre que se hallan en el valle:

- 1 De ser estrictamente aplicable el análisis unidimensional no habría habido daños a tuberías subterráneas prácticamente horizontales. Sin embargo, su número de rupturas fue muy elevado y sólo puede explicarse en términos de ondas superficiales importantes.

- 2 Las amplificaciones en las ordenadas de espectros de amplitud de Fourier entre terrenos duro y blando no pueden pasar de 12 según los análisis unidimensionales. Sin embargo, en varios sitios y para determinadas frecuencias superan 50 y en ocasiones llegan a 70. Este concepto se liga estrechamente con el que sigue.

- 3 Los análisis unidimensionales no predicen la aparición de una larga cauda en los registros del movimiento sobre terreno blando. Su

aparición sólo puede explicarse reconociendo la presencia de ondas superficiales. La cauda hace que determinadas frecuencias se amplifiquen extraordinariamente en espectros de Fourier. En cambio, afectan poco a los espectros de respuestas que corresponden a 5% o más de amortiguamiento pues cuando llega la cauda la estructura ha perdido la mayor parte de su respuesta a la fase intensa del movimiento.

4 Los resultados preliminares de análisis bidimensionales no dejan lugar a duda respecto a la importancia de las ondas superficiales. También los resultados de analizar la respuesta unidimensional del terreno a ondas SV de incidencia oblicua, señalan la presencia de oscilaciones de gran duración que no aparecen como respuesta a ondas SH de incidencia vertical.

5 Según testimonio de personas fidedignas, en partes de la ciudad de México se observaron ondas superficiales a simple vista durante el macrosismo de septiembre 1985. En esos sitios tales ondas quedaron "congeladas" en la superficie del terreno, y aunque de amplitudes remanentes menores que las observadas durante el temblor, podían constatarse durante varias semanas posteriores a él. (Este argumento, en particular, es debatible por la dificultad de verificarlo hoy en día.).

6 En la mayor parte de los registros del 19 de septiembre 1985 los espectros del movimiento en dirección NS tienen ordenadas generalmente mayores que en la EW. Sucede lo contrario en algunas zonas como lo atestiguan los registros de SCT. Es más, para estos últimos la aceleración máxima del terreno en dirección S60E es 2.5 veces mayor que en la perpendicular a ella. Todo esto carece de explicación si nos contentamos con análisis unidimensionales y constituye evidencia inequívoca de la ocurrencia de ondas superficiales. Y si los análisis unidimensionales llevan a predicción aceptable del promedio de las ordenadas espectrales de respuesta en las direcciones NS y EW, va implícita la admisión de que las subestiman seriamente en una dirección y sobrestiman en la perpendicular a ella.

La última prueba esgrimida hace ver que aun para el cálculo de los espectros de respuesta amortiguada del movimiento horizontal del suelo blando son deficientes los análisis unidimensionales. El hecho de que la duración del movimiento esté condicionada en buena parte por ondas que no se consideran en este tipo de análisis lleva a concluir que los criterios de diseño que tengan en cuenta explícitamente el deterioro de los materiales estructurales ante cargas alternantes habrán de superar las limitaciones del análisis unidimensional. Apunta en la misma dirección la importancia de tener en cuenta excitaciones rotacionales del terreno, que los análisis unidimensionales de ondas SH no consideran.

Merecen mención los estudios realizados por un grupo destacado de físicos (50), en que idealizan el subsuelo del valle de México como un

líquido capaz de transmitir únicamente ondas P y cuyas fronteras superior e inferior equivalen a placas indeformables mientras que las fronteras laterales se toman como una superficie cilíndrica rígida. Según ha manifestado uno de los autores (Octavio Novaro, comunicación personal), el grupo seguirá trabajando en el tema empleando idealizaciones más realistas del suelo y de sus condiciones de frontera. Será interesante conocer la convergencia de esos estudios con los otros a que me he referido.

Por su parte Cinna Lomnitz (51) ha señalado que la acción de la gravedad puede tal vez modificar sustancialmente a las ondas que implican componente vertical del movimiento del suelo. Este asunto no se ha estudiado para las condiciones del valle de México e indudablemente requiere atención.

Bien que los análisis unidimensionales mencionados hayan cumplido la misión de permitir el cálculo de espectros de diseño para el Reglamento de 1987 del Distrito Federal. Sin embargo, de aquí en adelante sólo tendrán sentido práctico para el valle de México los análisis que usen modelos más realistas y reconozcan al menos incidencia oblicua de ondas y la naturaleza bi o tridimensional del fenómeno. En otras partes de la República esta consideración puede ser aún más importante.

La no linealidad del suelo, que puede ignorarse sin gran error en el cálculo de espectros de respuesta amortiguada en el valle de México incluso para temblores tan intensos como el del 19 de septiembre 1985 (aunque no en el cálculo de espectros de Fourier), puede ser muy significativa en otros sitios de la República.

La licuación de materiales no cohesivos ha sido estudiada ampliamente en el extranjero (véase la ref. 52, por ejemplo). También aquí se han hecho contribuciones básicas (53 - 56) y se ha descrito el fenómeno cuando lo han causado algunos temblores, como el de Jáltipan en la zona de Jáltipan-Pajaritos-Coatzacoalcos (57) y, en la proximidad del foco, el temblor de Michoacán del 19 de septiembre 1985 (58).

El conocimiento de la sismicidad fuera de la ciudad de México requerirá tanto de estudios tectónicos y sobre volcanismo como la instalación y operación de instrumentos y la exploración de los suelos locales desde el punto de vista sísmico. Algo de esto ya se ha hecho. Por ejemplo, podrán aprovecharse los estudios muy completos que se han llevado a cabo para redaluar la sismicidad de Laguna Verde y los estudios de mecánica de suelos que en varias ciudades de la República ha recolectado y sistematizado la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. La mayor parte, sin embargo, está por hacerse. En la labor que falta, es posible que resulten útiles las mediciones de microsismos en que se saque provecho de la experiencia habida en la capital.

Los estudios de sismicidad realizados en nuestro país han recibido un fuerte impulso a raíz de los temblores de 1985. No obstante, los proyectos que se han emprendido para conocer la sismicidad del valle de México están seriamente incompletos. Nos falta conocer mucho más sobre magnitudes máximas posibles, distribuciones de probabilidades de los intervalos entre eventos y, más destacadamente, efectos de fuente y de trayectoria y efectos locales. Subsisten incluso grandes incógnitas acerca de las características más notables del temblor del 19 de septiembre de 1985: sus anómalamente altos contenidos de energía en torno a periodos de 1 a 3 s. Los análisis unidimensionales de los efectos que tienen los suelos del valle han rendido frutos, particularmente merced al mejor conocimiento que ahora tenemos de su estratigrafía, pero urge disponer de resultados basados en modelos más realistas, bi y tridimensionales.

Son de esperarse resultados interesantes de enfoques originales, como los que se realizan en el Instituto de Física de la UNAM, una vez que en ellos se adopten modelos suficientemente realistas.

Hemos tenido casi olvidado el resto de las zonas sísmicas de la República. Demandan atención, y en ellas cobran importancia fenómenos locales que no han sido significativos en la ciudad capital, en particular las consecuencias del comportamiento no lineal de los suelos.

Lo que hagamos en adelante requerirá un nuevo impulso a los métodos de análisis y, más aún, a la instrumentación sísmica y exploración de suelos, sobre todo fuera de la ciudad de México.

Todo lo que hagamos encontrará aplicación práctica y así tendrá sentido en tanto que desarrollemos modelos suficientemente sencillos a la vez que realistas. Pero este paso, si ha de merecer confianza, deberá basarse no sólo en el conocimiento de los fenómenos físicos y de las propiedades de suelos y rocas que los condicionan, sino también en marcos razonablemente completos de los costos y consecuencias de las decisiones que puedan tomarse, y entre esas consecuencias figuran prominentemente, además de las respuestas estructurales, las consecuencias de carácter social, que apenas si han recibido atención. Para avanzar en el conocimiento de la sismicidad necesitaremos avanzar en multitud de disciplinas, que van desde la física, la sismología, la mecánica de suelos y la de rocas hasta la ingeniería estructural, la economía y las demás ciencias sociales.

El reto que tenemos ante nosotros es en verdad enorme y es fascinante. Nos vamos del VII Congreso Nacional invitados a enfrentar el reto, y este congreso nos ha abierto el apetito.

RECONOCIMIENTO

Agradezco a Mario Ordaz y a Francisco J Sánchez-Sesma su revisión crítica del manuscrito y su ayuda en elaborarlo.

REFERENCIAS

1 Grigoriu, M, Veneziano, D y Cornell, C A, "Probabilistic modeling as decision making", J Engrg Mechs Div, ASCE, 105, EM4 (1979), 585-96.

2 Jara, J M, Rosenblueth, E y Rueda, R., "Distribuciones de los tiempos entre temblores característicos", Memorias 7o Congr Nac de Ing Sism, Querétaro, Qro (1987).

3 Singh, S K, Astiz, L y Havskov, J, " Seismic gaps and recurrence periods of large earthquakes along the Mexican subduction zone: a reexamination", Bul Seism Soc Am, 71, 3 (1981), 827-43.

4 Suárez, G. y Singh, S K, "Tectonic interpretation of the Trans-Mexican Volcanic Belt. Discussion", Tectonophysics, 127 (1986), 155-60.

5 National Geographic Society, "Earth's dynamic crust", W E Garret, ed, Natl Geographic Magazine (ago 1985).

6 Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, Y volvió a temblar. Cronología de los sismos en México (de 1 pedernal a 1819). T Rojas, J M Pérez y V García, coordinadores (1986).

7 Singh, S K, Rodríguez, M y Espíndola, J M, "A catalog of shallow earthquakes of Mexico, from 1900 to 1981", Bul Seism Soc Am, 74, 1 (1984), 267-80.

8 Ordaz, M y Rosenblueth, E, "Earthquake magnitude exceedance rate and self-similarity", sometido para publicación en Earthq Engrg Structl Dyns (1987).

9 Rosenblueth, E, "Use of statistical data in assessing local seismicity", Earthq Struct Dyns, 14, 3 (may-jun 1986), 325-27.

10 Rosenblueth, E y Ordaz, M, "Use of seismic data from similar regions", Earthq Engrg Struct Dyns, 1987

11 Rosenblueth, E y Ordaz, M, "Maximum earthquake magnitude from a fault", 6th ASCE Engrg Mechs Div Specialty Conf, Buffalo, NY (may 1987).

12 Lomnitz-Adler, J y Pérez Pascual, R, "Theory of coupled nonlinear oscillators", Memorias de la Tercera Esc Mex de Fis Estadíst, Soc Mex de Fis, 32 51 (may 1986), 5221-31.

13 Bouchon, M, "Predictability of ground displacement and velocity near an earthquake fault. An example: The Parkfield earthquake of 1966", J Geophys Res, 84 (1979), 6149-56.

14 Hartzell, S H, y Heaton, T H, "Rupture history of the 1984 Morgan Hill,

California earthquake from the inversion of strong motion records", Bul Seism Soc Am, 76 (1986), 649-74.

15 Rascón, O A y Cornell, C A, "A physically based model to simulate strong earthquake records on firm ground", Proc Fourth World Conf Earthq Engrs, Santiago, Chile (1969), A-1, 84-96.

16 Singh, S K, Mena, E, Anderson, J G, Lermo, J y Quaas, R, "Source spectra and rms acceleration of Mexican subduction zone earthquakes", manuscrito inédito (1987).

17 Aki, K, Steacy, S, Campillo, M, Kawase, H y Sánchez-Sesma, F J, "Source, path and site effects on strong motion during the Michoacan earthquake of 1985", AGU Fall Meeting (1987), San Francisco.

18 Singh, S K, Mena, E, King, R y Kruger, F, "Evidence for anomalous body wave radiation between 0.4 and 1 Hz from 19 September 1985, Michoacan, Mexico earthquake", manuscrito inédito (1987).

19 Esteva, L y Villaverde R, "Seismic risk, desing spectra and structural reliability", Proc Fifth World Conf Earth Engrg, Roma, Italia (1973), 2586-97.

20 Bufaliza, M, "Atenuación de intensidades sísmicas con la distancia en sismos mexicanos", Tesls de maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM (1984).

21 Singh, S K, Mena, E, Castro, R y Carmona, C, "Prediction of peak, horizontal ground motion in Ciudad Universitaria, Mexico City from coastal earthquakes", Bul Seism Soc Am (1987), en presva.

22 Kobayashi, H, Seo, K, Samano, T y Midonkawa, S. "Interpretation of strong motions in the Mexico City during the Michoacan, Mexico earthquake of sept 19, 1985", Report on the Seismic microzoning Mexico earthquakes of sept 19, 1985, Part 3 (1985).

23 Lermo, J y Rodríguez, M, "Microzonificación de México, D F, usando microtemblores (Primer informe técnico)", Instituto de Ingeniería, UNAM, México (1987).

24 Masaki, K, "On the observation of microtremors in the valle of Mexico", manuscrito inédito, México (1987).

25 Jaime, A, Romo, M y Ovando, E, "Características del suelo en varios sitios del valle de México", Instituto de Ingeniería, UNAM, México (1987).

26 Jaime, A, comunicación personal.

27 Suárez, M, Sánchez-Sesma, F J, Bravo, M A y Lermo, J, "Características de los depósitos superficiales del valle de México, Instituto de Ingeniería, UNAM, México (1987).

28 Sánchez-Sesma, F J, "Site effects in strong ground motion", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 6 (1987), 124-32.

29 Bravo, M A, Sánchez-Sesma, F J y Chávez-García, F J, "Ground motion on stratified alluvial deposits for incident SH waven" Bul Seism Soc Am (1988), en prensa.

30 Herrera, I., Boundary methods: on algebraic theory, Pitman Adv Publishing Program, Boston (1984).

31 Sánchez-Sesma, F J y Rosenblueth, E, "Ground motion at canyons of arbitrary shape under incident SH waves", Earthq Engrg Struct Dyn, 7 (1979), 441-50.

32 Sánchez-Sesma, F J y Esquivel, J, "Ground motion on alluvial valleys under incident plane SH waves", Bul Seism Soc Am, 69 (1979), 1107-20.

33 Bravo, M A y Sánchez-Sesma, F J, "Seismic response of alluvial valleys for incident P, SV and Rayleigh waves", Soil Dyn Earthq Engrg (1988), en prensa.

34 Sánchez-Sesma, FJ, "Diffraction of elastic waves by three dimensional surface irregularities", Bul Seism Soc Am, 73 (1983), 1621-36.

35 Pérez-Rocha, L E y Sánchez-Sesma, F J, "Difracción de ondas sísmicas por depósitos tridimensionales de suelos blandos", Instituto de Ingeniería, UNAM (1987).

36 Sánchez-Sesma, F J, Chávez-García, F J Bravo, M A, "Seismic response of a class of alluvial valleys for incident SH waves", Bul Seism Soc Am (1987), en prensa.

37 Sánchez-Sesma, F J y Velázquez, S A "On the seismic response of a dipping layer", Wave Motion (1987), en prensa.

38 Velázquez, S A y Sánchez-Sesma, F J, "Respuesta sísmica de un estrato con irregularidad lateral", Memorias de este congreso (1987).

39 Pérez-Rocha L E, Sánchez-Sesma, F J Bravo, M A, "Influencia de las condiciones locales en la duración de los temblores y su importancia en ingeniería sísmica", Memorias de este congreso (1987).

40 Seed, H B e Idriss, J M, "The influence of soil conditions on ground motions during earthquakes", J Soil Mech Found Div, ASCE, Vol 94 (1969), 93-137.

41 Romo, M P y Seed, H B, "Analytical modeling of dynamic soil response in the Mexico earthquakes, factors involved and lessons learned", Reunión especial ASCE, México, (sep 1986).

42 Rosenblueth, E. "Diseno sísmico en zonas minadas", Simposio Cimentaciones en Zonas Minadas de la Ciudad de México, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (mar 1976), 79-80.

43 Sánchez-Sesma, F J, Herrera, I y Avilés, J, "A boundary method for elastic wave diffraction. Application to scattering of SH waves by surface irregularities", Bul Seism Soc Am, 72 91982), 473-90.

44 Julian, B R y Sipkin, S A, "Earthquake processes in the Long Valley caldera area, California", I Gephy Res, 90 (1985), 11155-69.

45 Rosenblueth, E, "Teoría del diseno sísmico sobre mantos blandos", Ediciones ICA, Serie B, 14 (1952), 3-12.

46 Bustamante, J I, , "Response spectra of earthquakes on very soft clay", Bul Seism Soc Am, 54 (1964), 855-66.

47 Herrera, I, Rosenblueth, E y Rascón, O, "Earthquake spectrum prediction for the Valley of México", Proc 3rd World Conf Earthq Engrg, Auckland-Wellington, Nueva Zelanda. 1 (1965), 61-44.

48 Sánchez-Sesma, F J, "Análisis de riesgo sísmico en Laguna Verde, Ver, Parte I. Determinación de espectros de respuesta específicos", Instituto de Ingeniería, UNAM (1985).

49 Chávez-García, F J y Sánchez-Sesma, F J, "SPECTRA 86 un programa de computadora para el cálculo de espectros de respuesta en formaciones estratificadas", Fundación J Barros Sierra (1986).

50 Flores, J, Novaro, O y Seligman, TH, "Possible resonance effect in the distribution of earthquake damage in Mexico City", Nature, 326 (1987), 783-85.

51 Lomnitz, C, "Gravitational amplification of sedimentary surface waves during the 1985 Mexico earthquake, manuscrito inédito (1987).

52 Seed, H B e Idriss, I M, Ground motions and soil liquefaction during earthquakes, Earthquakes, Engineering Research Institute, El Cerrito California (1982).

53 Jaime, A, "Comportamiento de arenas bajo carga estática y cíclica", tesis de maestría, DEPMI, UNAM (1978), México, D F.

54 Jaime, A, Montáñez, L, Romo, M P y Arguello, M, "Estudio de licuación del subsuelo del complejo industrial de Fosforados Fertimex, S A, Lázaro Cárdenas, Mich.", Instituto de Ingeniería, UNAM (1979), México, D F.

55 Jaime, A, Romo, M P y Montáñez, L, "Observed and predicted liquefaction of a sand stratum", Internatl Conf on Recent Advances in Geotechnical Earthq Engrg and Soil Dyn, St Louis, Missouri, 1 (abr 1981).

56 Jaime, A, Montanez. L y Romo, M P, "Liquefaction of the Enmedio Island soil deposits", Internatl Conf on Recent Advances in Geotechnical Earthq Engrs and Soil Dyn, St Louis, Missouri, 1 (abr 1981).

57 Díaz de Cossío, R, "Comportamiento de las estructuras", Ingeniería, 34 (jul 1964), 379-84.

58 Flores Berrones, R, "El efecto de los sísmos en las tuberías subterráneas para agua potable", Memorias del Simposio Los Sísmos de 1985: Casos de Mecánica de Suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (sep 1986).