

IX. PAPEL DE LA SISMOLOGIA EN LA ORDENACION DEL TERRITORIO
Y EL URBANISMO

9.1 Introducción

Hacia 1920, fecha en que aparecieron normas para la construcción de obras civiles en las zonas sísmicas, la sismología, ciencia puramente descriptiva, se convirtió en una de las ramas principales de las investigaciones sobre la prevención de los desastres naturales. En un principio, esa prevención se basaba únicamente en el diseño de las estructuras. Lo que se hacía era reconstruir más sólidamente los edificios de las zonas en que los seísmos habían provocado ya siniestros. Sólo más adelante una acción orientada a coordinar de manera más general la prevención y a racionalizar la ordenación misma del territorio revistió carácter de política. Sin embargo, se encuentran algunos ejemplos de una acción de esa índole en un pasado reciente: la planificación de las zonas vírgenes de México o de la región que rodea a Boston se hizo sobre la base de una política precisa que tenía en cuenta especialmente la vulnerabilidad sísmica entre los parámetros elegidos. Se puede citar también a este respecto la elección del emplazamiento de las centrales nucleares o de otras obras que suponen inversiones considerables y un riesgo potencial elevado para las poblaciones.

Desde el punto de vista de la prevención, en una acción coordinada, es necesario tomar en consideración, además de los seísmos, todos los demás fenómenos naturales como inundaciones, sequías, desprendimientos, aludes, tornados, huracanes, etc... Aunque todos esos fenómenos sean desde hace tiempo objeto de investigaciones profundas, sólo desde hace una decena de años se ha intentado establecer comparaciones entre sus peligros potenciales y basarse en estadísticas homogéneas.

Los riesgos de desastres naturales pueden introducirse como parámetros restrictivos en los trabajos de planificación de un territorio, es decir, al distribuir en el territorio las diferentes actividades: agricultura, instalaciones urbanas o industriales, etc.

Si no existen datos sobre esos riesgos o si no se han tenido en cuenta, se corre el riesgo de establecer nuevas aglomeraciones urbanas o construir instalaciones que impliquen inversiones considerables sin haber adoptado medida alguna de prevención. Así, hay muchos casos en que la reconstrucción, en un mismo lugar, de una aldea destruida por un terremoto se ha hecho sin analizar previamente las posibles variantes, simplemente en función de diferentes presiones de carácter políticoeconómico.

En occidente al menos, sólo desde hace poco tiempo se intenta hacer la síntesis de los diferentes factores limitativos que intervienen en la planificación del territorio, teniendo en cuenta los riesgos existentes de desastres naturales. A este respecto se observará que es importante hacer una ponderación apropiada de los parámetros antes de hacerlos intervenir en cualquier proyecto de planificación.

Así, teniendo en cuenta exclusivamente los datos sísmicos, se hubiera podido frenar el desarrollo de ciudades (como algunas de California o de Nueva Zelanda) que, dejando aparte su evidente vulnerabilidad a los fenómenos sísmicos, ofrecen perspectivas de desarrollo sin peligro en todos los demás aspectos.

Los criterios para expresar de manera homogénea los riesgos aparejados a diversos desastres naturales no se han definido aún de forma sencilla. Por otra parte, si no se pueden hacer previsiones seguras del instante en que se producirá el desastre natural, se puede, por lo menos, adoptar medidas apropiadas en los lugares más

expuestos. Tal política puede llegar hoy a la formulación de propuestas sobre la manera de diversificar las distintas inversiones, teniendo en cuenta la influencia que en ellas tienen las diferentes catástrofes naturales. Por ejemplo, se puede dar preferencia a las inversiones agrícolas sobre las contrucciones urbanas cuando, siendo iguales las demás parámetros, los peligros sísmicos son mayores. Se trata de una medida de prevención de desastres naturales que debe tener prioridad, incluso sobre la protección de las construcciones por medidas antisísmicas.

Por consiguiente, la solución consistiría en determinar, durante el proceso de planificación, cierto número de limitaciones de ordenación y de vivienda obtenidas mediante una estimación ponderada de algunos factores (intensidad, frecuencia vulnerabilidad de algunas estructuras) relacionados con un riesgo determinado. Tal tentativa tiene grandes probabilidades de tener éxito si existe una colaboración estrecha entre economistas, sociólogos y políticos, por una parte, y sismólogos, meteorólogos y geólogos, por otra.

Para volver a la sismología y a la clase de actividades en que los fenómenos sísmicos tienen mayor influencia, es decir, la ingeniería civil, hay que decir ante todo que, en teoría, no se debe afirmar que un lugar determinado sea, en sentido absoluto, más peligroso que otro, porque ese aspecto depende también del tipo de construcción.

La vulnerabilidad de un edificio excepcionalmente alto no será igual a la de un edificio sumamente rígido, aunque el riesgo absoluto sea el mismo en un punto dado. Por consiguiente, se puede definir un lugar como más peligroso que otro, con independencia del tipo de construcción. Esto es importante desde el punto de vista de la metodología que se está elaborando, la cual prevé la separación del aspecto puramente físico, que depende de las características del lugar estudiado, del de ingeniería civil, a fin de determinar los criterios óptimos de protección y de prevención de desastres.

Teniendo en cuenta esas consideraciones, el presente capítulo, dedicado al papel de la sismología en la planificación del territorio, se articulará del siguiente modo:

1. Se presentará ante todo una técnica de "macrozonificación", es decir, de delimitación de zonas sísmicas en gran escala. Hay que señalar desde ahora que esa expresión no comprende ni el estudio de la influencia de las condiciones pedológicas locales, que se hace al delimitar las microzonas sísmicas, ni el de los problemas de ingeniería civil relacionados con la interacción entre las estructuras y el suelo en que se construyen. En principio, la delimitación de las zonas sísmicas conduce esencialmente a la elaboración de uno o varios mapas en que se definen las zonas sísmicas en función de la intensidad previsible de las futuras sacudidas sísmicas. Como esos mapas se preparan con fines prácticos, su contenido varía según las necesidades y la información de que se dispone. En la actualidad, los mapas que acompañan a los reglamentos oficiales de la construcción sólo contienen por lo común indicaciones relativas a la distribución del territorio en dos o tres categorías, que corresponden a los grados VIII, IX y X de la escala de intensidades de Mercalli.
2. A continuación se describirán las técnicas de "microzonificación" más empleadas, es decir, la subdivisión ulterior de una región de poca extensión, cuya actividad sísmica general se conoce por el análisis precedente, a fin de tener en cuenta la influencia considerable de las condiciones geológicas y del estado del subsuelo en los efectos sísmicos en un lugar determinado.

La naturaleza del terreno puede influir de dos maneras: por una parte, la inestabilidad del suelo puede producir movimientos permanentes de la superficie, lo que implica deformaciones de las estructuras edificadas en ese suelo; por otra, las aceleraciones del terreno, que dependen de las condiciones locales, influyen en las fuerzas de inercia que sufren los edificios.

Las técnicas utilizadas permiten elaborar mapas que indiquen con mayor o menor detalle el riesgo resultante de los fenómenos sísmicos. Esos mapas pueden servir entonces para calcular las fuerzas horizontales que deben tomarse en consideración al proyectar una obra que haya de resistir sacudidas sísmicas de una intensidad determinada.

El problema más general de la planificación del territorio exige fijar criterios que permitan traducir en terminos económicos los datos de los mapas de zonas sísmicas. En otras palabras, para cada actividad que deba planificarse (agricultura, instalaciones urbanas o industriales), hay que calcular el costo suplementario resultante del hecho de su situación en una zona sísmica. Ese costo suplementario comprende la cuantía de los daños previstos, ya que para cada construcción habrá siempre una probabilidad, (débil, pero no despreciable) de daños y una probabilidad aún menor, pero no nula, de que la estructura se derrumbe. Se tratará de este aspecto en el capítulo X, limitando el estudio de los costos suplementarios a las obras civiles. La metodología descrita, sin embargo, podrá aplicarse también a otras actividades

Esos costos suplementarios ofrecen un denominador común que permite comparar los efectos económicos de los diferentes tipos de riesgos.

9.2 Técnica de la macrozonificación

La presente sección trata de la aplicación de las técnicas de delimitación en gran escala de zonas sísmicas, y se basa en el ejemplo del valle del Po, en el norte de Italia, en donde se supondrá un proyecto de construcción de una central nuclear. Para una obra de esa indole, lo mismo que en el caso de un dique o de una instalación productora de materias tóxicas, hace falta que la estanqueidad de las estructuras quede garantizada incluso en las condiciones de carga más rigurosas y especialmente bajo la acción del seísmo más violento.

La sismología, como ciencia, existe desde hace menos de un siglo ; de hecho se remonta a 1879, año en que Milne inventó el primer sismógrafo.

Esos hechos no carecen de importancia. Como la actividad sísmica de una región sólo ha podido estudiarse durante un período de algunos decenios, resulta imperativo, en el estudio de las principales características sísmicas de una zona, basarse en observaciones históricas que se remonten lo más posible en el pasado. En los capítulos anteriores se ha estimado que era preciso abarcar, por lo menos, un período de 1.000 años.

En el caso concreto del valle del Po, las informaciones provienen de la historia de Italia en general y de las crónicas locales. Además de esos datos históricos, hay que tener en cuenta los datos geográficos regionales. El procedimiento generalmente aceptado para establecer la relación entre esas dos series de datos es el definido por la Atomic Energy Commission en el caso de las instalaciones nucleares. Ese procedimiento implica las siguientes operaciones :

1. se definen, en torno al lugar considerado, zonas cuyas características geotectónicas sean claramente similares
2. en el interior de esas zonas, y más especialmente en el interior de la zona en que se encuentre el lugar considerado, se identifican las principales estructuras geotectónicas en que pueden producirse terremotos (véase la figura 9-1) ;
3. en cada estructura geotectónica se calcula cuál será la intensidad máxima de un seísmo provocado por las fallas presentes. Ese cálculo se basa en algunos criterios como, por ejemplo, la longitud de la falla. Sin embargo, hay que observar que algunos terremotos recientes han sido de correlación entre la longitud de la falla y la intensidad. Por consiguiente, hay que mostrar cierta prudencia al deducir conclusiones de esa índole ;

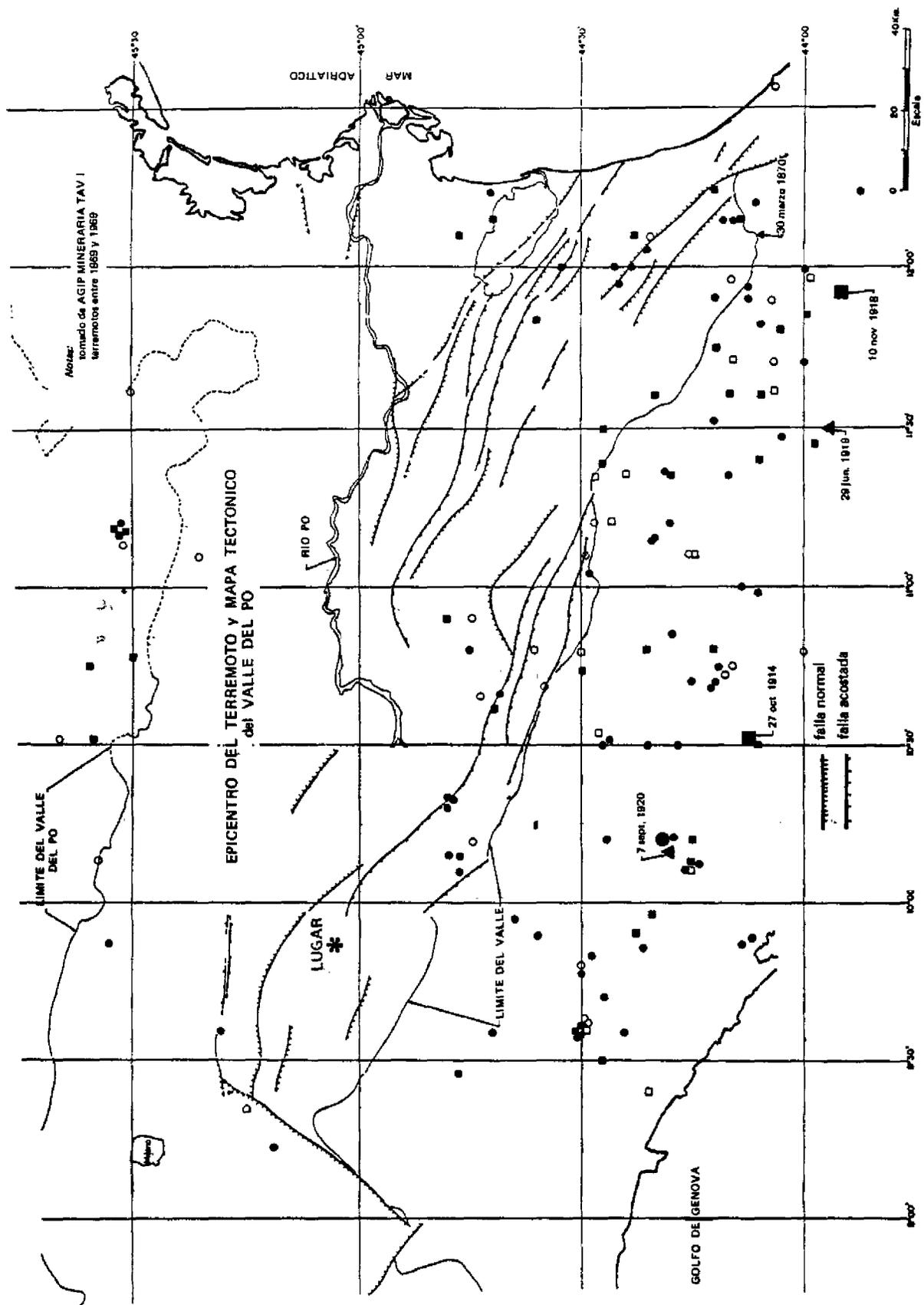


Figura 9-1: Principales estructuras geotectónicas y mapas de epicentros del valle del Po.

4. a continuación se determina, para cada zona, el terremoto más intenso que no se puede asociar a alguna de las estructuras sismotectónicas anteriormente definidas. Para hacerlo, se tienen en cuenta todos los terremotos que no se encuentran claramente alineados en las fallas activas conocidas en la zona considerada;
5. se procede del siguiente modo:
 - a) se admite que el seísmo más intenso entre los asignados a cada estructura tectónica puede producirse en el punto de esa estructura más próximo al lugar considerado;
 - b) se admite además que el seísmo más intenso de la zona que comprende el lugar puede producirse en la proximidad inmediata de éste;
 - c) para los seísmos que tienen su origen en las zonas limítrofes y que no se pueden asociar a una de las estructuras tectónicas definidas, se admite de oficio que tienen su origen en el límite de la zona, en el punto más próximo del lugar estudiado.

La aplicación de esa técnica tropieza de hecho con algunas dificultades. Por lo que se refiere a los datos históricos, hay que observar la existencia de incertidumbres en la determinación de las isosistas, es decir, las líneas del contorno de las zonas que han sufrido daños de una intensidad determinada (véase la figura 4-1). En efecto, es difícil obtener datos seguros, sobre todo cuando se trata de acontecimientos muy antiguos. Debe examinarse también la figura 4-2, que muestra la dispersión de los efectos de un seísmo según el tipo de terreno.

Hay que observar además que pocos países disponen de información sobre acontecimientos pertenecientes a un pasado histórico lejano. Así ocurre efectivamente en Europa, en donde los sismólogos ocomenzaron,

hace más de un siglo, a reunir y clasificar las informaciones sobre los efectos de los seísmos consignadas desde la antigüedad en los archivos de los monjes, los cronistas de diferentes ciudades, etc. Para Italia, el historiador Baratta elaboró un amplio catálogo de los principales acontecimientos ocurridos en el territorio nacional, cubriendo un período de unos dos mil años. Los datos reunidos se expusieron por Baratta de forma crítica y presentan por ello un grado de homogeneidad satisfactorio. Así, en el caso considerado, el valle del Po, los datos de que se dispone se refieren a 500 acontecimientos diferentes.

Esas informaciones y los anales originales sirvieron de base a una reciente publicación de Vit Karnik sobre el conjunto de Europa y de la zona mediterránea, preparada de conformidad con las recomendaciones del Comité Europeo de Sismología.

El primer volumen publicado por Vit Karnik comprende el período 1901-1955 y el segundo el período 1801-1900.

Continuamente se efectúan estudios sísmicos de esa clase, consistentes en un análisis profundo de los acontecimientos ocurridos en cada país, en los diferentes institutos nacionales de geofísica de Europa.

En el caso de los datos sismotectónicos, una de las dificultades con que se tropieza para la identificación de las fallas principales es la de su clasificación en fallas activas y no activas. En una encuesta relativa a una zona tan extensa como el valle del Po, de cerca de 80.000 km², a menudo se tiende a olvidar las fallas secundarias, ramificaciones de las fallas principales.

No obstante, gracias a una buena interpretación estadística de los datos y teniendo en cuenta que las informaciones históricas y las tectónicas se completan entre sí, pueden superarse esas dificultades. En efecto, la sismotectónica permite definir mejor los límites de zonas que han sufrido daños de cierta intensidad y obtener informaciones incluso cuando faltan datos históricos, ya sea por la inexistencia de crónicas locales, ya sea por la falta de construcciones significativas para la evaluación de la intensidad del seísmo.

Por lo que se refiere a los resultados, se comprueba, cuando sólo se tienen en cuenta los datos históricos (figuras 9-2, 9-3 y 9-4), que el mapa de intensidades máximas (I_{max}) determinadas por ese procedimiento coincide con los mapas de intensidades máximas observadas para la misma región. Sin embargo, los resultados del estudio anteriormente mencionado deben llevar evidentemente a prever para cada emplazamiento una intensidad máxima superior a la intensidad máxima observada. La validez de los resultados de ese estudio puede verificarse además del siguiente modo:

1. En teoría, la I_{max} no debe variar si se calcula sin tener en cuenta los datos macrosísmicos más recientes; es decir, para dar un orden de magnitud, si no se tienen en cuenta en la encuesta el 10% de los acontecimientos sísmicos catalogados. En efecto, en tal caso, el mapa no refleja más que la actividad sísmica futura y la adición de un nuevo acontecimiento no implica ningún cambio sustancial.
2. Por otra parte, el mapa de I_{max} no debe diferir sensiblemente del mapa de intensidades observadas. Para dar un orden de magnitud, puede considerarse como aceptable una diferencia media de un grado de intensidad.

La primera condición se considera como prueba de la integridad de los datos sismotectónicos, en tanto que la segunda, más difícil de realizar, es el índice de una encuesta histórica por sí misma significativa.

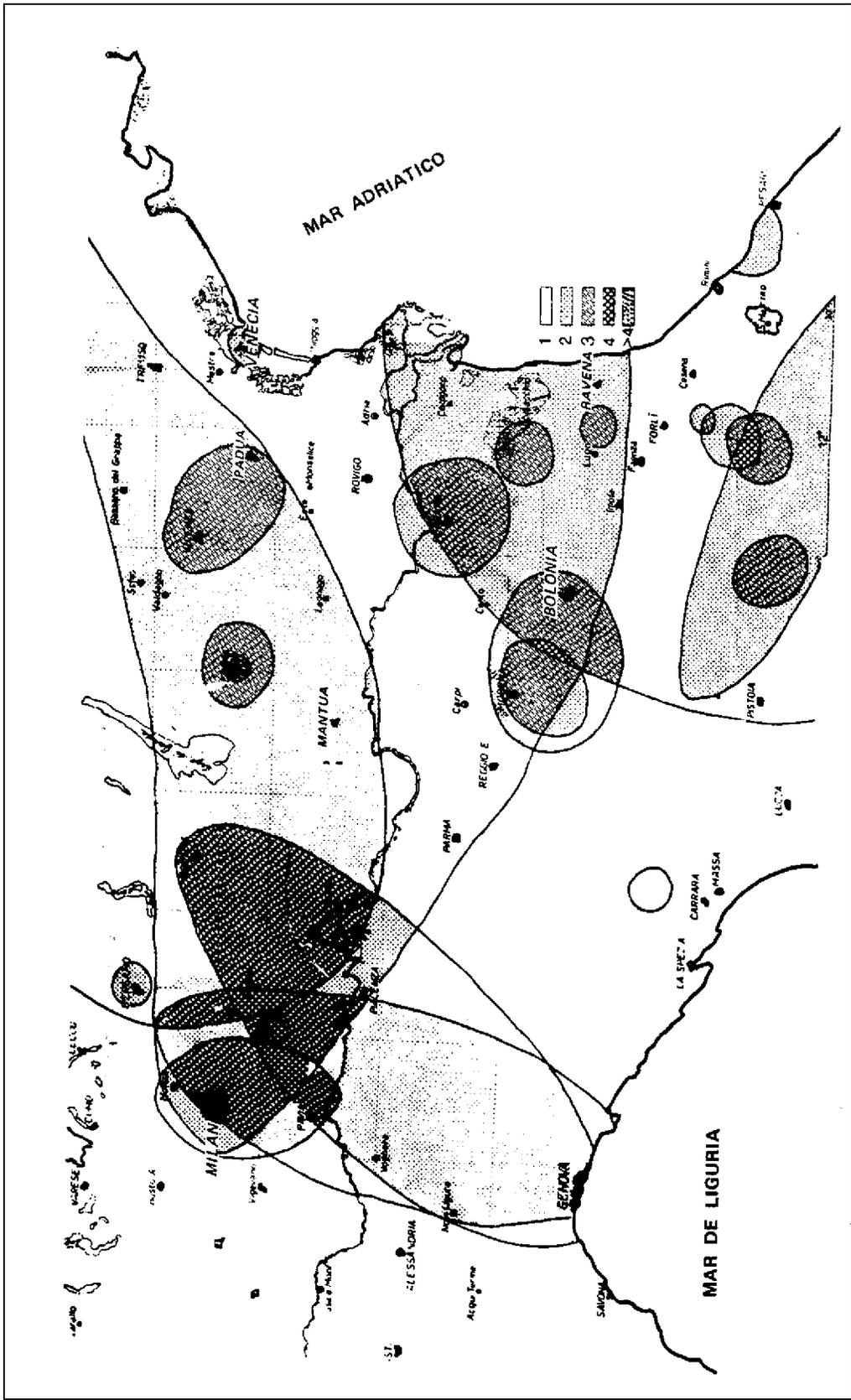


Figura 9-3: Zonas afectadas por terremotos de grado VIII.

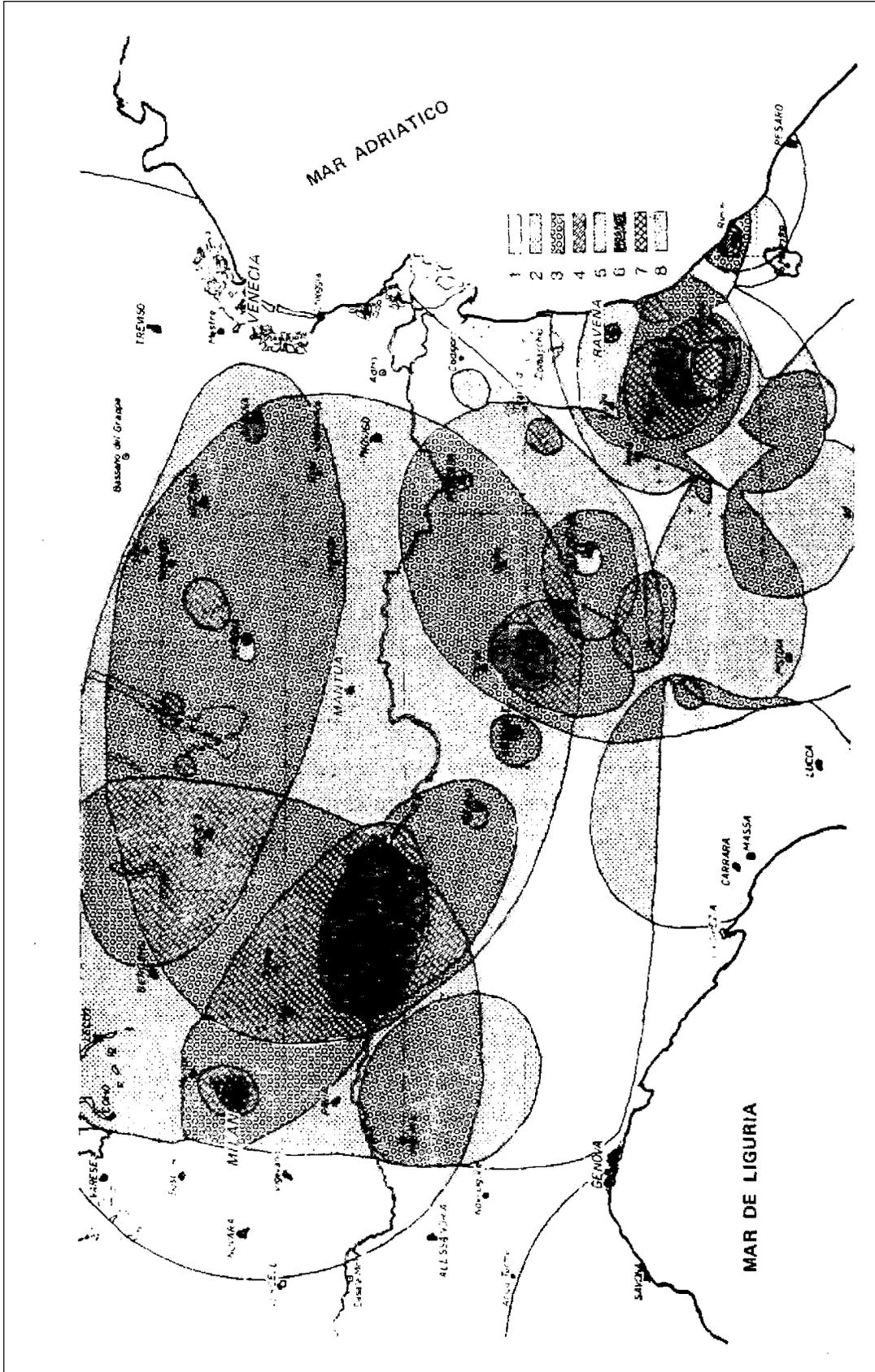


Figura 9-4: Zonas afectadas por terremotos de grado VII.

En el ejemplo citado, el punto tomado como "lugar" tiene una I_{max} igual a IX. Por el contrario, la intensidad máxima observada es igual a VIII. Si no se tienen en cuenta los datos de los últimos cincuenta años, la I_{max} sigue siendo igual a IX, mientras que la intensidad máxima observada permanece igual a VIII, a pesar de haber eliminado de los datos un seísmo ocurrido en 1951 cuyo epicentro, entre todos los acontecimientos registrados, era el más próximo al emplazamiento considerado.

9.3 Microzonificación en el marco de un lugar caracterizado por condiciones de subsuelo variables

Con ocasión del terremoto de San Francisco de 1906 se llegó por primera vez a reunir varios registros de la aceleración del terreno en lugares poco distantes entre sí en relación con la distancia al epicentro y caracterizados por condiciones de subsuelo diferentes.

Los datos obtenidos mostraron diferencias sensibles tanto en lo referente a la aceleración máxima del suelo como a las frecuencias. A este respecto, se observará en particular la figura 9-5, que representa un corte de la configuración estratográfica que caracterizaba a cuatro de esos puntos de registro.

A partir de los datos sobre aceleraciones del suelo, se determina el espectro de respuestas (véase el anexo I) y el valor de la aceleración máxima del suelo. Ese diagrama y otros parecidos elaborados ulteriormente (sobre todo con ocasión del seísmo de San Fernando, en 1971) se prestan a diversas observaciones, de las que deben señalarse aquí por lo menos dos:

- a) en los lugares en que el basamento rocoso aflora a la superficie, el seísmo se caracterizó por aceleraciones del terreno mayores (diagrama central de la figura 9-5) y una frecuencia más elevada de las componentes dominantes (el

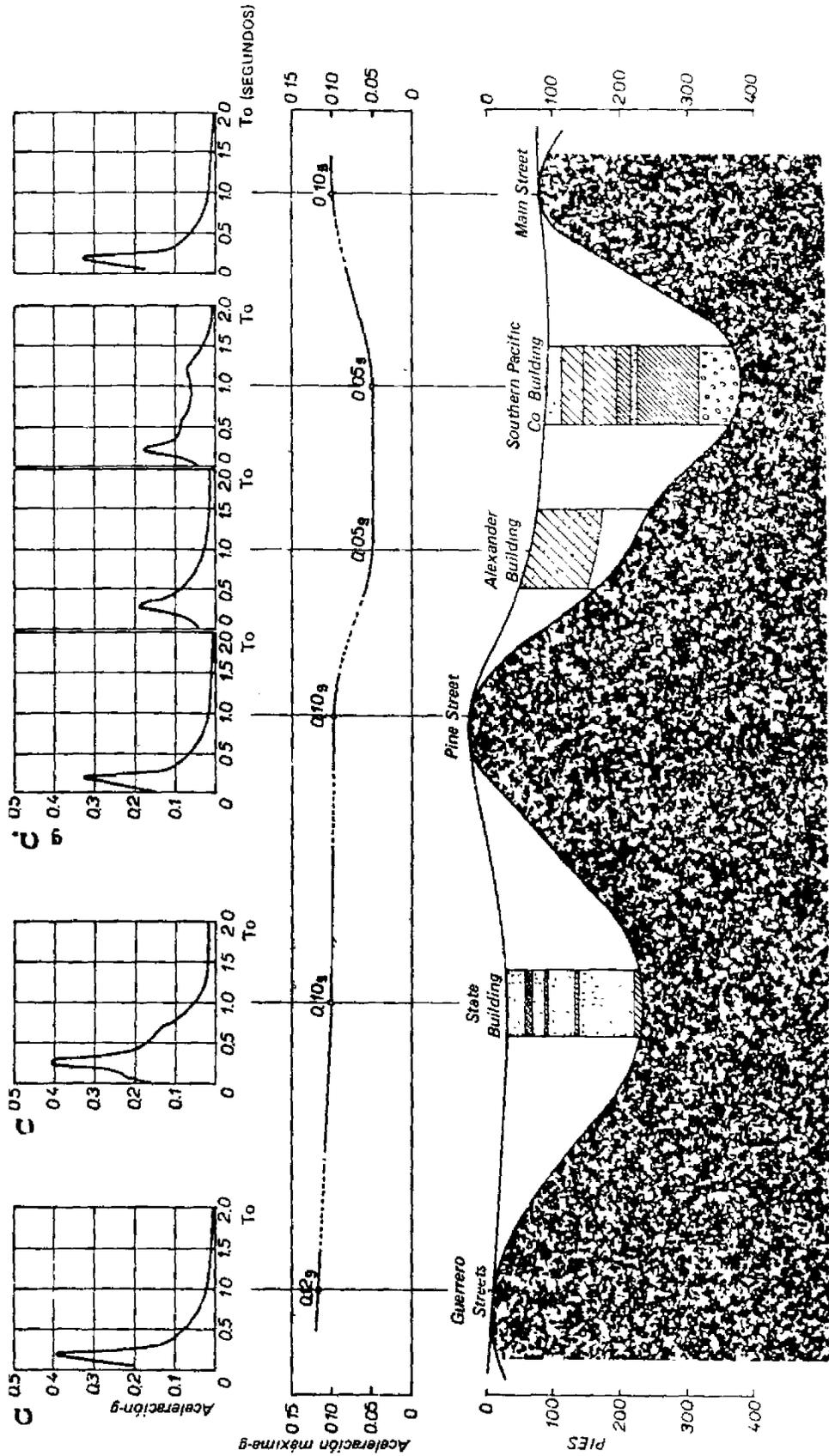


Figura 9-5: Aceleración máxima y espectro de respuestas, en relación con la aceleración de la gravedad, obtenidos a partir de registros efectuados en seis lugares diferentes durante el seísmo de San Francisco de 1906.

máximo de los gráficos se desplaza hacia los períodos T cortos), lo que denota un riesgo mayor para la mayoría de las viviendas privadas o los inmuebles para oficinas de pocas plantas. Hay que observar que esos resultados no son generales para todos los emplazamientos;

- b) en los lugares en que existen depósitos de aluvión de un centenar de metros de profundidad, el seísmo puede engendrar aceleraciones más graves para las estructuras muy altas y esbeltas, rascacielos de varias plantas (en el gráfico C, los valores de las ordenadas son más altos para T \gg ls precisamente sobre los depósitos de aluvión).

El hecho de que las capas superficiales y, más especialmente, las características geológicas locales pueden tener gran influencia en los efectos destructores de un seísmo se puso ya de relieve cuando se estudiaron los daños sufridos por edificios idénticos, pero construidos en terrenos diferentes, con ocasión del seísmo de San Francisco (1906) y del gran terremoto de Tokio (1923).

Posteriormente, innumerables observaciones hechas con ocasión de seísmos ocurridos en diversas partes del globo han permitido determinar que puede existir una correlación muy estrecha entre la presencia de capas superficiales de terrenos blandos y la amplitud local de las oscilaciones sísmicas.

Por otra parte, es interesante señalar que en algunos de los más importantes seísmos destructores recientes (Nigata 1964, Anchorage 1964, Caracas 1967, San Fernando 1971), ocurridos, pues, en una época en que existía ya la ingeniería antisísmica, los daños más considerables sufridos por estructuras antisísmicas fueron provocados por el comportamiento dinámico anormal de formaciones geológicas superficiales, que presentaban a veces una extensión muy reducida. Sobre

todo, se han apreciado diferencias increíbles en los daños estructurales observados en puntos muy próximos entre sí. Por ello, en el mundo entero, la ingeniería antisísmica orienta una gran parte de sus investigaciones actuales hacia la definición cuantitativa de los efectos de las formaciones superficiales en las ondas sísmicas provenientes del basamento rocoso.

No siempre se puede establecer una relación entre esas observaciones y los datos locales sobre la aceleración del suelo. Los aparatos registradores de fuertes aceleraciones sólo existen desde 1930 y el único aparato de esa clase que había en Caracas durante el seísmo de 1967 no funcionó...porque sus baterías estaban descargadas. La observación de los daños fue sin embargo ejemplar: ningún daño apreciable en los edificios en casi toda la ciudad, cinco edificios de 10 a 15 plantas destruidos, uno derruido a medias y numerosos daños en una zona muy limitada de la ciudad, caracterizada precisamente por condiciones geológicas particulares. Hay que observar además que los cinco edificios que se derrumbaron (causando 300 muertos) habían sido construidos de conformidad con la las normas modernas de la ingeniería antisísmica y que nadie ha puesto en duda la calidad de la construcción ni de los materiales utilizados.

Esto obliga a hablar del estudio de los efectos de las condiciones geológicas locales y de la manera en que, aunque todavía en estado experimental y considerado con precauciones, tal estudio proporciona informaciones útiles para la planificación y el desarrollo urbanos en diversas partes del mundo.

La expresión general de "microzonificación sísmica" (MZ), que se emplea a menudo para designar esa clase de estudios puede, en realidad, abarcar diferentes aspectos del problema, que van desde el puramente sismológico de la definición de las intensidades locales hasta el típicamente dinámico del análisis de la propagación de las ondas en las capas de características dadas.

En la Unión Soviética, por ejemplo, las investigaciones en materia de microzonificación sísmica se han orientado ante a todo a definir para una zona determinada (ejemplo típico, el territorio de una ciudad) los valores "normativos" de intensidad "tipo" que se registrarían en un terreno duro (roca). Los resultados se llevan generalmente a mapas de escala 1/10.000 ó 1/15.000, en los que se indican también los demás valores sísmicos significativos, como por ejemplo los períodos predominantes de oscilación de las capas superficiales. En la Unión Soviética hay normas precisas para los estudios de microzonificación sísmica.

En el Japón, después de una amplia campaña de observaciones realizada por el Instituto de Investigaciones Sismológicas de Tokio, se clasificaron los diferentes tipos de solares, teniendo en cuenta la determinación de los períodos predominantes de ruido microsísmico local.

En otros países con zonas de fuerte sismicidad, como los Estados Unidos y México, la expresión "microzonificación sísmica" se aplica comúnmente a todas las investigaciones relativas a la respuesta sísmica de las capas superficiales del suelo.

9.4 Técnicas de microzonificación sísmica

La experiencia de los 40 últimos años ha mostrado que los datos más útiles para la ingeniería antisísmica han sido los suministrados por los registros de las aceleraciones producidas durante seísmos violentos. es decir, del orden de 0,1 g. o superiores. De ello resulta que las técnicas de microzonificación sísmica más útiles deberían basarse en la instalación de redes locales de acelerómetros lo más densas posibles. Es relativamente raro que esta condición, se dé especialmente por el costo bastante elevado de los acelerógrafos. El caso más notable ha sido hasta ahora el del seísmo californiano de San Fernando, del 9 de febrero de 1971, para el que se obtuvieron no menos de 241 acelerógramas, de ellos 175 a distancias, con respecto al epicentro, inferiores a 50 km (zona de Los Angeles). Más adelante se examinará este caso particular y algunas de sus consecuencias.

Aunque los países en que seísmos de magnitud 6 ó 7 afecten a centros habitados son poco numerosos, es evidente que hace falta cierto número de años para establecer una red instrumental suficientemente densa. Se puede afirmar con certeza que hoy existen países que reúnen parcialmente esas condiciones: los Estados Unidos y el Japón, y otras regiones, como la zona de México, en donde se han instalado 12 estaciones acelerométricas en un radio máximo de 80 km.

Al principio, los especialistas en microzonificación sísmica de diferentes países consideraron más fácil reunir datos estudiando los acontecimientos de intensidad media o débil que se reproducen con cierta frecuencia, incluso en los países de sismicidad media. En rigor, sería conveniente analizar los microseísmos que, como se sabe, son vibraciones del subsuelo de amplitudes muy débiles (del orden de 1μ) que se observan permanentemente en todas partes. Entre muchos estudios hechos de seísmos de débil intensidad pueden citarse el de Gutenberg para la zona de Pasadena en California y los del grupo de microzonificación sísmica del Instituto de Geofísica de Moscú para las diversas ciudades de la Unión Soviética. Los aparatos empleados por Gutenberg eran sismógrafos de período corto del tipo Wood-Anderson. Basándose en las amplitudes registradas en terrenos diferentes para un mismo acontecimiento, Gutenberg propuso algunos principios generales de microzonificación sísmica. Es interesante observar que en las estaciones utilizadas por Gutenberg se instalaron luego aparatos registradores de gran aceleración que proporcionaron una serie de datos especialmente importantes durante el seísmo de San Fernando.

Hudson ha hecho recientemente un análisis comparativo de los datos de Gutenberg para los pequeños seísmos ($M = 3$ a 4 en la escala de Richter) y de los reunidos durante el seísmo de San Fernando ($M=6,6$).

La principal observación de Hudson es que la posición del epicentro en relación con la zona considerada y los efectos de la propagación de las ondas en las oscilaciones locales pueden haber sido muy diferentes en las observaciones de Gutenberg y en las realizadas durante el violento seísmo de San Fernando.

A este respecto, Hudson terminaba diciendo: "Parece evidente que la distribución de las oscilaciones del suelo predicha sobre la base de registros simultáneos en lugares diferentes para seísmos pequeños puede no reflejar fielmente la distribución efectiva que se observaría en el caso de un seísmo destructor..."; y agregaba: "Sólo cuando se disponga de un gran volumen de datos semejantes a los recogidos durante el seísmo de San Fernando se podrá comenzar a pensar seriamente en la elaboración de mapas detallados de riesgos sísmicos".

Sin embargo, el punto de vista pesimista de Hudson no es compartido por otros especialistas. Hay que observar que hoy existen registradores portátiles de fuertes aceleraciones que permiten, desde que se sienten en un lugar sacudidas premonitorias, obtener muchos datos sobre la sacudida principal y las réplicas. Esa técnica se aplicó en 1972 en Ancona, Italia en donde se registraron 19 acelerógramas, algunos de los cuales indicaron aceleraciones máximas del orden de 0,5 g., en tres lugares distintos de la ciudad.

Otra posibilidad, por último, es el estudio de los microseísmos, para el que es necesario tratar de manera detallada una serie de cuestiones teóricas y prácticas bastante complejas. Para un estudio más exhaustivo de ese problema puede acudir a las fuentes bibliográficas más autorizadas. A la luz de las amplias investigaciones realizadas en el Japón por Kanai y sus colaboradores, el argumento más importante en favor de ese método parece ser que las frecuencias predominantes y ciertas características espectrales de los microseísmos registrados en capas de aluvión superficiales coinciden a menudo con las de los seísmos registrado en el mismo lugar. También se ha podido hacer en muchos casos una comparación con seísmos destructores.

La información más importante que se intenta obtener de los microseísmos se refiere al período de oscilación de las capas superficiales, habitualmente fácil de poner en relación con los valores calculables teóricamente por análisis de la propagación de las ondas elástico del suelo en régimen de agitación microsísmica es más que plausible, pero tal hipótesis puede dejar de ser válida cuando se trate de seísmos de cierta intensidad. Además, la diferencia de comportamiento será tanto más marcada cuanto más blanda sea la capa de terreno de que se trate y mayor el contraste, desde el punto de vista sísmico, con las formaciones duras subyacentes. Hoy, los especialistas más calificados estiman que las técnicas de observación microsísmica constituyen un instrumento útil para la microzonificación sísmica cuando se trata de capas superficiales relativamente compactas y cuyo espesor no excede de algunas decenas de metros. A título de ejemplo, pueden citarse los trabajos de microzonificación sísmica efectuados para la ciudad de Skopje, sobre la base del estudio de microseísmos, que permitieron establecer una correlación satisfactoria entre las frecuencias predominantes, el espesor de las capas de aluvión y la distribución de los daños durante el destructor seísmo de 1963. En cambio, esa técnica se desaconseja en los casos de capas superficiales muy blandas sin cohesión y de gran espesor.

Para terminar el presente párrafo, hay que hacer una observación muy importante desde el punto de vista práctico. Cualquiera que sea la técnica instrumental utilizada para la microzonificación sísmica (acelerógrafos "para movimientos fuertes", sismómetros de período corto para pequeños seísmos, observaciones de microseísmos), es indispensable hacer lo siguiente: 1) un trabajo preliminar de prospección geofísica de los lugares para poder interpretar de forma realista los resultados, teniendo en cuenta la geología local; 2) un trabajo de análisis estático y dinámico en laboratorio sobre

muestras del suelo, a fin de obtener los valores plausibles utilizables en modelos matemáticos discretos para simular el comportamiento real in situ bajo el efecto de una excitación sísmica de tipo determinado.

Los ensayos de laboratorio son útiles sobre todo para estudiar el comportamiento dinámico de terrenos superficiales saturados en los que pueden producirse fenómenos de hundimiento instantáneo semejantes a la licuefacción.

El trabajo de prospección de los lugares debe orientarse primordialmente a determinar las velocidades de propagación de las ondas S y el espesor de las capas geológicas superficiales. Además de las técnicas convencionales (redes de geófonos en la superficie) deberán utilizarse también técnicas de medición por perforación que consisten en hacer un sondeo hasta la profundidad deseada, introduciendo un sismómetro de tipo especial que registra a diferentes profundidades la llegada de ondas cuya fuente artificial se encuentra en la proximidad de la boca de la perforación.

Por último, si se dispone de datos muy detallados sobre la estratigrafía local y las propiedades mecánicas del terreno, se pueden elaborar también modelos teórico-numéricos de microzonificación sísmica. En la Universidad de Berkeley (California) muchos investigadores han realizado trabajos en este sentido y han preparado diferentes métodos de cálculo (SHAKE, QUAD 4, LUSH, FLUSH).

La figura 9-6 muestra la variación de la amplitud del espectro de respuestas medida en diferentes puntos de la superficie de una capa de aluvi6n. Los resultados obtenidos por cálculo son, por consiguiente, semejantes a los obtenidos de registros empíricos directos, como en el caso de la figura precedente.

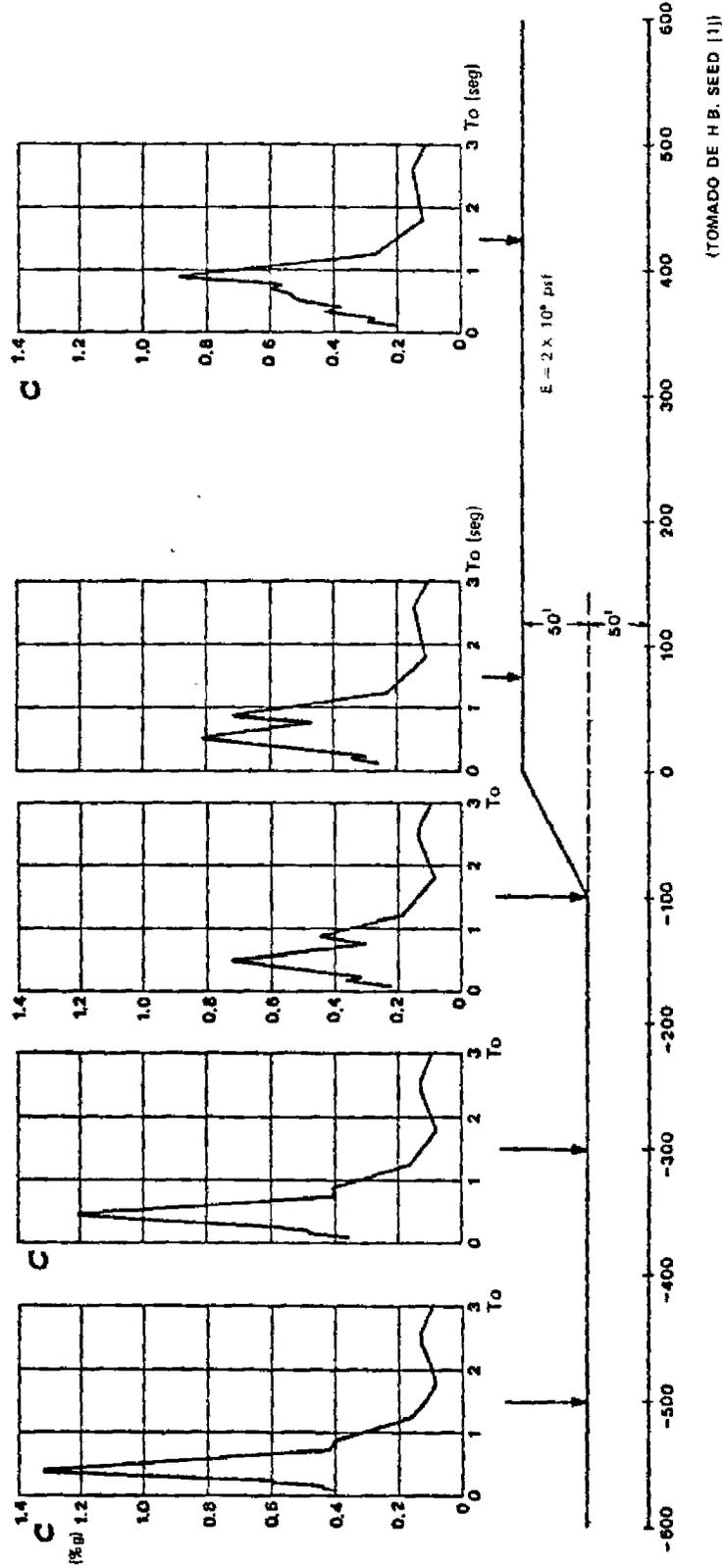


Figura 9-6 : Variaciones (obtenidas por cálculo numérico) del espectro de respuestas en función de la distancia. Se supone que bajo el depósito hay un lecho rocoso.

Hay que observar que el cálculo teórico-numérico no se limita ahora ya a las pequeñas oscilaciones: todos los métodos de cálculo citados admiten los efectos de no linealidad característicos del caso de fuertes oscilaciones. Por consiguiente, ese método parece permitir traspasar los límites de validez mencionados a propósito del estudio de los microseísmos para la microzonificación sísmica.

La UNESCO estudia desde hace algún tiempo ya algunas de las técnicas más arriba examinadas, con vistas a la preparación de manuales de instrucciones. Un manual de esa clase fue presentado por la delegación de la Unión Soviética en la reunión intergubernamental sobre sismología e ingeniería antisísmica celebrada en París en 1964. Se titula "Manuel d'instructions pour le microzonage sismique" (UNESCO/SM/Seism/Rep/R, Paris 1964). En la reciente conferencia intergubernamental sobre la evaluación y la mitigación de los riesgos sísmicos, organizada por la UNESCO en febrero de 1976, en París, se presentaron varios estudios que exponían la situación actual de las técnicas.