

OFICINA DEL COORDINADOR DE LAS NACIONES UNIDAS
PARA EL SOCORRO EN CASOS DE DESASTRE
Ginebra

Prevención y mitigación de desastres

Compendio de los conocimientos actuales

Volumen 3

ASPECTOS SISMOLÓGICOS



NACIONES UNIDAS
Nueva York, 1978

PROLOGO

La Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en Casos de Desastre (UNDRO) presenta el tercero volumen de la serie titulada "Prevención y Mitigación de Desastres". Estos volúmenes tienen por objeto ofrecer a la comunidad internacional una visión global de los conocimientos actuales sobre las causas, las características y, en particular, las medidas preventivas que cabe adoptar para reducir o eliminar los efectos de los fenómenos naturales en los países propensos a los desastres.

Estos volúmenes se han preparado en cumplimiento de la resolución 2816 (XXVI) de la Asamblea General, en la que se pide a la Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en Casos de Desastre que promueva el estudio, la prevención, el control y la predicción de los desastres naturales, incluidas la reunión y la difusión de información relativa a la evolución tecnológica.

El objeto de estos estudios es, en primer lugar, determinar los conocimientos y la experiencia actuales que cabe aplicar directamente a la prevención de los desastres naturales, especialmente en los países en desarrollo, y, en segundo lugar, determinar cuáles son las lagunas de esos conocimientos que requieren la acción concertada de la comunidad internacional.

Durante los últimos decenios, la comunidad internacional ha sentido una alarma creciente ante desastres que, por afectar a concentraciones cada vez mayores de población, han tendido a ser cada vez más destructivos. Aunque la respuesta de la comunidad internacional ha estado fundamentalmente orientada hacia las medidas de socorro, se ha llegado ya a la conclusión de que las consecuencias reales y potenciales de los desastres están adquiriendo tal gravedad y un alcance tal que en lo sucesivo habrá que prestar más atención a las actividades de planificación y de prevención. Los efectos de los fenómenos naturales deben enfocarse no sólo desde el punto de vista humanitario y social general, sino también, y primordialmente, desde el punto de vista económico. Los desastres naturales constituyen un formidable obstáculo para el desarrollo económico y social. Por otra parte, las pérdidas causadas por los desastres en los países en desarrollo propensos a los mismos pueden provocar una reducción del producto nacional bruto que anule prácticamente todo progreso económico real. De ahí la conciencia creciente de los gobiernos de la necesidad de prestar más atención a las actividades de preparación y prevención de los desastres y del hecho de que la prevención de los desastres y la planificación anterior a los mismos deben formar parte integrante de la política general de desarrollo.

La "Estrategia Internacional para la Prevención de Desastres", propuesta por la UNDRR y aprobada por la Asamblea General en sus vigésimo noveno y trigésimo períodos de

sesiones, servirá de pauta para todas las medidas nacionales e internacionales que puedan adoptarse para la prevención y mitigación de los desastres naturales. Esa estrategia permitirá aprovechar los recursos humanos y materiales del mundo para eliminar la plaga que representan los desastres naturales para muchos países en desarrollo propensos a ellos y esta serie sobre "Prevención y Mitigación de Desastres" constituirá uno de los elementos para su formulación.

El presente volumen, Aspectos sismológicos, trata esencialmente de los métodos de estudio de los seísmos y de las medidas que pueden adoptarse para mitigar o prevenir sus efectos desastrosos. Trata también de los diferentes métodos elaborados con ese fin y define las esferas en que todavía se requieren investigaciones.

Todas las publicaciones de la serie "Prevención y Mitigación de Desastres" están dirigidas a una amplia gama de usuarios, que comprende altos funcionarios y administradores, expertos técnicos y especialistas en los distintos sectores de la prevención de desastres. Están también destinadas a orientar a los administradores a formular, en el plano nacional y regional, políticas para la adopción de medidas preventivas contra los tipos de fenómenos naturales que afectan a su región.

La Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en Casos de Desastre invita a los usuarios del presente volumen, Aspectos Sismológicos, a comunicar a las Naciones Unidas sus observaciones y sugerencias.

Esta publicación ha sido elaborada por la Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en Casos de Desastre con la colaboración de Alberto Castellani y de Jean Rothé. La realización de esta publicación, como la de los demás estudios de esta serie, ha sido posible gracias al apoyo y a la cooperación activa del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

INDICE

Sección		Página
I	INTRODUCCION	1
II	OBSERVACIONES GENERALES SOBRE LOS SEISMOS	8
	2.1 Las ondas sísmicas	8
	2.2 Sacudidas premonitorias y réplicas	10
	2.3 Seísmos artificiales	12
	2.4 Efectos de los terremotos	14
III	ESTUDIO MICROSISMICO DE LOS TERREMOTOS	17
	3.1 Determinación de los parámetros de un foco sísmico : coordenadas geográficas del epicentro, profundidad del hipocentro	18
	3.2 Magnitud	22
IV	ESTUDIO MACROSISMICO DE LOS TERREMOTOS	25
	4.1 Escalas de intensidades	26
	4.2 Mapas de isosistas	29
	4.3 Relaciones intensidad-aceleración e intensidad-velocidad	31
	4.4 Relaciones intensidad-magnitud.....	33
V	MEDIDA DE LA ACELERACION - ESPECTRO DE RESPUESTAS.	34
VI	LA SISMICIDAD DEL GLOBO	36
	6.1 Las principales zonas sísmicas	36
VII	PREVISION DE LOS SEISMOS	42
	7.1 Previsión regional (previsión a largo plazo).	43
	7.2 Previsión a corto plazo	46
VIII	LA PROTECCION PARASISMICA	51
	8.1 Introducción	51
	8.2 Programa general para la elaboración de mapas sísmicos	51
	8.3 Recomendaciones para el mejoramiento de la protección antisísmica	56

Sección		Página
IX	PAPEL DE LA SISMOLOGIA EN LA ORDENACION DEL TERRITORIO Y EL URBANISMO	61
	9.1 Introducción	61
	9.2 Técnica de la macrozonificación	65
	9.3 Microzonificación en el marco de un lugar caracterizado por condiciones de subsuelo variables	74
	9.4 Técnicas de microzonificación sísmica	78
X	CONSECUENCIAS ECONOMICAS DE LA ACTIVIDAD SISMICA	85
	10.1 Introducción	85
	10.2 Espíritu de las normas de construcción en zonas sísmicas	87
	10.3 Análisis de costo-utilidad	91
	10.4 El problema técnico	92
	10.5 Evaluación de los costos	96
ANEXO I		
	ELEMENTOS BASICOS PARA EL CALCULO DE ESTRUCTURAS	103
	1. - Introducción	103
	2. - Espectro de respuestas	103
	3. Coeficiente sísmico	104
	4. Duración del seísmo	104
	5. Desplazamiento de las fallas	105
	6. Determinación del espectro de respuestas ..	106
	7. Espectro de respuestas teórico	111
ANEXO II		
	LOS TSUNAMIS	116
	1. Observaciones generales	116
	2. Medidas de protección	117
	3. Sistema de alerta	119
	BIBLIOGRAFIA	126

I. INTRODUCCION

Balance sismológico

Desde la antigüedad, el hombre ha considerado siempre los terremotos como uno de los azotes naturales más temibles para su vida y sus bienes. La rapidez de su aparición sin que nada indique su inminencia, el ruido que a menudo los acompaña, la violencia de las sacudidas que, en unos segundos, transforman una ciudad próspera en un montón de ruinas y los efectos que producen sobre el terreno - hundimientos, fallas, derrumbamientos de laderas, nubes de polvo - constituyen para el hombre otros tantos factores de temor y de impotencia.

Se calcula que, desde el año 1000, más de cinco millones de personas han perecido en catástrofes sísmicas. En realidad, las evaluaciones cuantitativas que pueden intentarse resultan muy variables según el período de que se trate. Para el cuarto de siglo comprendido entre 1926 y 1950, Montadon (1959) indica un total algo superior a 350.000 víctimas, es decir, unas 15.200 víctimas anuales. Para un período reciente - de 1949 a 1968 - las cifras son menores: 75.000, o sea, menos de 4.000 anuales. Puede recordarse el resultado del reciente seísmo del Perú (31 de mayo de 1970): 54.000 muertos, 150.000 heridos y 1.700.000 personas sin hogar. En el seísmo de Tokio (1° de septiembre de 1923) hubo 140.000 muertos y 575.000 viviendas quedaron destruidas o incendiadas y otras 126.000 resultaron con daños. El seísmo de Tachkent (25 de abril de 1966), aunque sólo supuso la muerte de diez personas, produjo 1.000 heridos y destruyó 28.000 viviendas, dejando a 250.000 personas sin hogar. Los ejemplos podrían multiplicarse.

Se puede considerar que, desde comienzos del siglo XX, la cifra media anual de víctimas es de unas 24.000. Sin embargo, desde 1975 el balance sísmológico ha sido especialmente grave: terremotos destructores han afectado a zonas densamente pobladas de Guatemala, Indonesia, Italia, Turquía, Rumania y, sobre todo, China (más de 650.000 muertos).

Para algunas catástrofes sísmicas históricas se han dado cifras muy elevadas:

1556	Chansi	(China)	830.000 muertos
1693	Sicilia	(Italia)	60.000 muertos
1730	Hokkaido	(Japón)	137.000 muertos
1737	Calcuta	(India)	300.000 muertos
1755	Lisboa	(Portugal)	60.000 muertos
1783	Calabria	(Italia)	50.000 muertos
1797	Perú y Ecuador		40.000 muertos
1868	Perú y Ecuador		40.000 muertos
1908	Mesina	(Italia)	83.000 muertos
1920	Kansu	(China)	100.000 muertos
1923	Tokio	(Japón)	140.000 muertos
1970	Chimbote	(Perú)	54.000 muertos
1976	Tangshan	(China) más de	650.000 muertos
1976	Guatemala		22.778 muertos
1977	Bucarest	(Rumania)	1.570 muertos

En un mismo país, la distribución cronológica de los desastres es a menudo muy irregular. El caso de Italia resulta particularmente característico: en los 25 años comprendidos entre 1905 y 1930 se produjeron cuatro catástrofes, que causaron en total 120.000 víctimas; desde 1930, en cambio, no se produjo ninguna sacudida importante hasta la catástrofe de Friuli en 1976. Además, en varios países expuestos a seísmos (Yugoslavia, Marruecos, etc.) sólo se ha

producido en el siglo XX un desastre grave, y en Rumania se han registrado dos catástrofes. Esa irregularidad pone de relieve la necesidad de estudiar el peligro sísmico considerando períodos tan largos como sea posible, que abarquen varios siglos. Algunos autores estiman necesario un período de 1000 años (véase Organismo Internacional de Energía Atómica, Earthquake Guidelines for Reactor Siting, Viena, 1973). Un estudio de esa clase requiere investigaciones históricas largas y difíciles.

Las pérdidas materiales debidas a seísmos resultan difíciles de calcular exactamente, a falta de estadísticas precisas. La variación de los tipos de cambio, la inflación y la diversidad de niveles de vida hacen difícil comparar las evaluaciones realizadas para los diferentes desastres. Pueden recordarse algunas de las cifras publicadas con motivo de catástrofes recientes:

26 de julio de 1963	Skopje (Yugoslavia)	500 millones de dólares			
28 de marzo de 1964	Alaska (EE.UU)	538	"	"	"
29 de julio de 1967	Caracas (Venezuela)	50	"	"	"
13 de agosto de 1967	Arette (Francia)	4	"	"	"
15 de enero de 1968	Sicilia (Italia)	320	"	"	"
29 de septiembre de 1969	Sudáfrica	24	"	"	"
31 de mayo de 1970	Perú	507	"	"	"
9 de febrero de 1971	California (EE.UU.)	553	"	"	"
23 de diciembre de 1972	Managua (Nicaragua)	800	"	"	"

La comparación de esas cifras resulta difícil : una apreciación más exacta de la importancia de los daños se obtendría, por ejemplo, evaluando la cuantía de los estragos en porcentajes del producto nacional bruto. Tales evaluaciones son todavía muy raras.

Baste recordar que, desde este punto de vista, los seísmos de mayo de 1960 en Chile, el de Skopje de 1963 en Yugoslavia, el del 31 de mayo de 1970 en el Perú y, sobre todo, el de febrero de 1976 en Guatemala fueron verdaderas catástrofes nacionales que gravaron pesadamente los presupuestos de los países afectados. El efecto repetido de sacudidas relativamente débiles pero numerosas puede ser igualmente importante: los daños causados por las 2.500 sacudidas registradas entre enero y junio de 1972 en la región de Ancona (Italia) se evaluaron en 300 millones de dólares.

A los daños materiales hay que añadir las consecuencias económicas directas e indirectas: abandono de ciudades o aldeas, desempleo forzoso, pérdidas de producción, cargas suplementarias para los servicios de sanidad y otros servicios sociales. Resulta mucho más difícil evaluar esas pérdidas económicas, pero no cabe duda que son a menudo superiores a los daños materiales en porcentaje del producto nacional.

Las pérdidas humanas y económicas son hoy día especialmente graves en los países en desarrollo. El aumento de la población y la tendencia a la concentración urbana pueden contribuir a un incremento del balance de los futuros seísmos cuando los hipocentros se hallen cerca de las grandes ciudades, como ha ocurrido recientemente en China, Guatemala, Turquía y Rumania. El mapa de hipocentros (o focos) sísmicos es muy diferente del que refleja los efectos de los terremotos en la humanidad. La distribución demográfica tiende a concentrar las pérdidas humanas en la cuenca mediterránea, el Oriente Medio y a lo largo de la costa del Pacífico (figura 1-1).

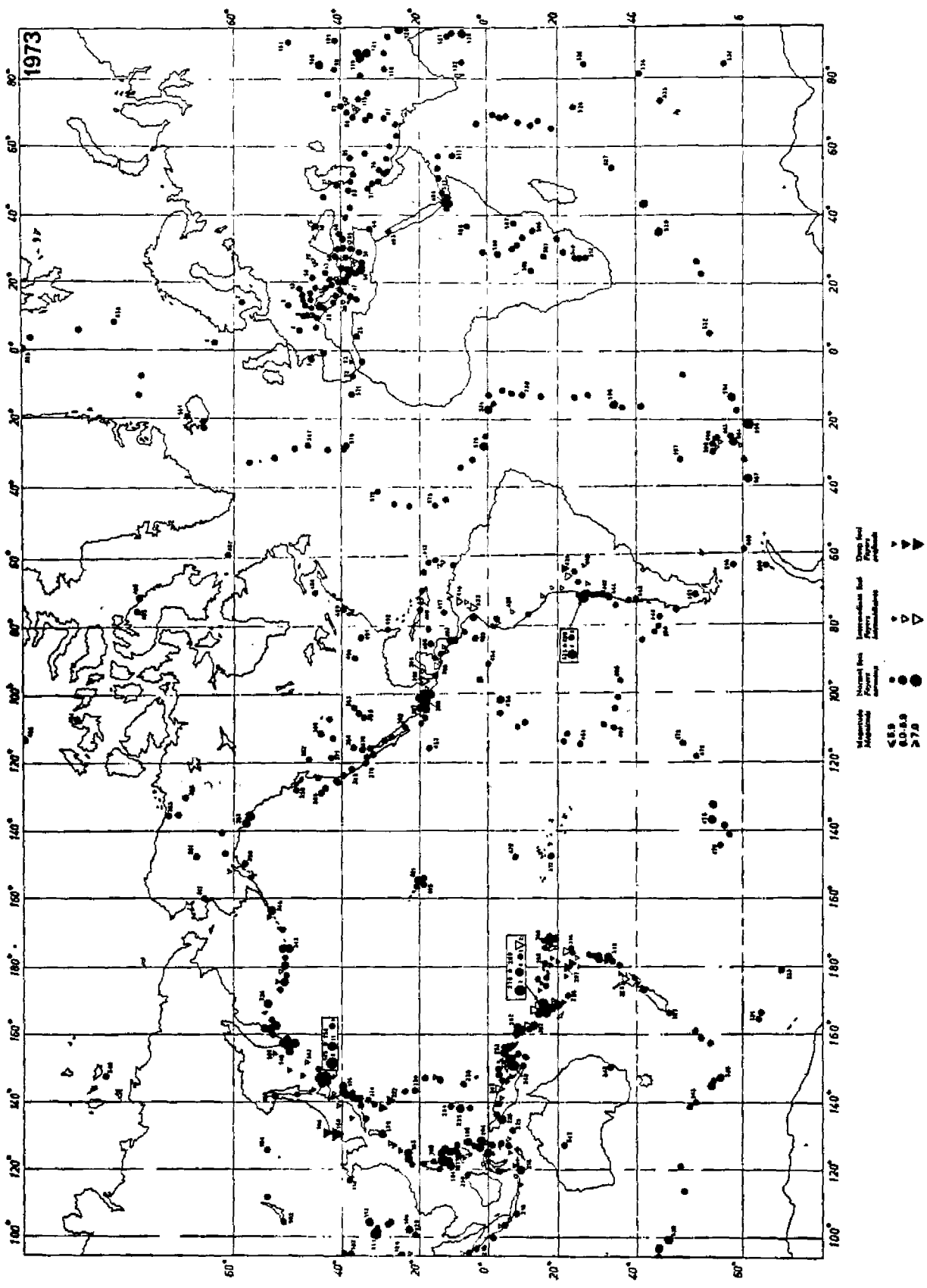


Fig. 1-1 : Mapa de los epicentros (terremotos de 1973).

La sismicidad del globo se mantiene más o menos constante, pero en los últimos años han convergido dos fenómenos. Por una parte, algunos hipocentros sísmicos se han manifestado en las cercanías de zonas densamente pobladas y, por otra, el crecimiento demográfico de los países en desarrollo ha engendrado una expansión urbana muy rápida y una considerable proliferación de amplias zonas urbanas o semiurbanas cuyo crecimiento no está, en la mayoría de los casos, ni planificado ni controlado. La conjunción de esos dos fenómenos provoca, y seguirá provocando, pérdidas humanas y económicas cada vez más graves. Por ello no basta que el crecimiento urbano sea planificado; es necesario, además, que este proceso de control tenga en cuenta, no solo los riesgos sísmicos, sino también todos los riesgos naturales. El estudio de los riesgos sísmicos en materia de ordenación del territorio y urbanismo se refiere no solo a las normas y métodos de construcción, sino también a los problemas de ubicación de los asentamientos humanos y de la ocupación del suelo. Por lo que se refiere a la planificación y creación de asentamientos humanos completamente nuevos, la cuestión de su ubicación - en lo relativo a los riesgos sísmicos y otros riesgos naturales - es tanto más importante cuanto que influirá en los riesgos de desastre a muy largo plazo. En el mismo orden de ideas, la vida agrícola de una región afectada por un seísmo puede verse también perturbada tanto por el abandono de las tierras como por las modificaciones ocurridas en el paisaje, especialmente, en el caso de un seísmo muy violento, por la desaparición de manantiales o la variación de la profundidad de la capa freática. Así, pues, la reducción de los riesgos sísmicos va estrechamente vinculada a la ordenación del territorio y a la planificación económica.

Desde el punto de vista de la reducción de las pérdidas debidas a los terremotos, hay que tener en cuenta a la vez el conocimiento del fenómeno natural y los medios técnicos que permiten proteger al hombre y sus obras contra el peligro. La actuación estará influida por las condiciones locales, dependiendo a un tiempo del peligro

natural y de los recursos que cada comunidad pueda dedicar a su propia protección. Sin embargo, los problemas locales no pueden considerarse aisladamente : los riesgos que implican los terremotos deben evaluarse en función de las condiciones geológicas y de la actividad tectónica consideradas primero a escala regional. Sólo en una etapa ulterior podrá definirse y utilizarse para fines preventivos la vulnerabilidad de una zona reducida, por ejemplo, a la escala de una ciudad.

En el presente estudio, tras hacer unas breves observaciones generales sobre los terremotos, se recordarán los medios utilizados para la comprensión de ese fenómeno natural. A la luz del conocimiento que se tenga del fenómeno se pueden determinar las posibilidades de mitigación y prevención de los riesgos que los terremotos suponen. Así se llega a examinar en particular la cuestión muy importante - aunque discutida - de la microzonificación sísmica, y sus consecuencias sobre la ordenación del territorio, el urbanismo y la construcción. La Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en Casos de Desastre estima que los progresos realizados en este campo permitirán mejorar apreciablemente las técnicas de análisis de vulnerabilidad y proporcionar a los encargados del desarrollo criterios más seguros para el establecimiento de los diversos tipos de actividades e instalaciones humanas (infraestructura, hábitat, grandes inversiones, etc.).

II. OBSERVACIONES GENERALES SOBRE LOS SEISMOS

2.1 Las ondas sísmicas

Un terremoto es una liberación brutal de la energía acumulada en las rocas por el juego de los procesos de la tectónica global. Cuando las fuerzas de compresión son superiores al límite de resistencia mecánica de las rocas, se produce una fracturación que origina las ondas sísmicas.

2.1.1 Las ondas de volumen

Cuando se produce una perturbación en un cuerpo sólido, se forman ondas elásticas que se propagan en todas direcciones.

- las ondas longitudinales (ondas de dilatación), llamadas también ondas primarias u ondas P, en las que las partículas se desplazan en dirección radial con respecto a la fuente, es decir, en la dirección de propagación.
- las ondas transversales (ondas de distorsión), llamadas también ondas secundarias u ondas S, en las que el desplazamiento de las partículas se produce en un plano perpendicular a la dirección de propagación.

Cada onda se desplaza a su propia velocidad (V_p para las P y V_s para las S) que, en un punto dado del medio, depende de la densidad ρ y de los módulos de elasticidad λ y μ , según las ecuaciones:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

Los módulos de elasticidad son función el uno del otro y también del "coeficiente de Poisson" σ .

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\mu + \lambda)}$$

En muchos minerales, λ es sensiblemente igual a μ y el valor de σ se aproxima a $\frac{1}{4}$; en esas condiciones y en una primera aproximación, la relación de velocidades V_p/V_s se acerca a $\sqrt{3}$.

Es importante destacar el estudio de la variación del valor de la relación de velocidades V_p/V_s , se utiliza con fines de predicción (véase el capítulo VII).

2.1.2 Las ondas de superficie

La segunda categoría de ondas sísmicas está constituida por las ondas de superficie, que son las que transmiten mayor cantidad de energía en los terremotos de foco poco profundo.

Los principales tipos son los siguientes:

- las ondas de Rayleigh (u ondas R), que son ondas polarizadas en el plano de propagación: cada partícula describe una órbita elíptica retrógrada; la amplitud del movimiento alcanza su valor más alto en la superficie y decrece exponencialmente en función de la profundidad. En un medio uniforme en el que el coeficiente $\sigma = \frac{1}{4}$, la velocidad de las ondas de Rayleigh es igual a 0,919 V_s .
- las "ondas de Love", que son ondas transversales guiadas (sin componente vertical).

2.2 Sacudidas premonitorias y réplicas

Un gran seísmo no es nunca un fenómeno aislado. Las sacudidas principales, violentas y destructivas, pueden ir precedidas por estremecimientos precursores o sacudidas premonitorias (foreshocks) menos importantes y poco numerosos, pero que interesa estudiar para prever las sacudidas desastrosas e intentar protegerse contra ellas (véase la página 46). A veces, la actividad sísmica de una región crece progresivamente de intensidad hasta llegar al "paroxismo". Luego se producen las réplicas (aftershocks), sacudidas tardías de energía decreciente, cada vez más espaciadas en el tiempo y que hacen pensar que las capas de la corteza terrestre perturbadas, al ser bruscamente descomprimidas, sólo recuperan su equilibrio tras algunos estremecimientos. El estado de agitación del suelo puede durar meses y mantener en la población amenazada un sentimiento de inquietud que, por lo general, la induce a evacuar la región.

Mogi ha estudiado la distribución de las sacudidas premonitorias y de las réplicas, distinguiendo dos tipos principales:

Tipo I : La sacudida más fuerte es la primera, y el número de réplicas y la energía de las sacudidas decrecen exponencialmente a medida que el período contado (por ejemplo, en días) desde la sacudida principal se hace mayor. Sin embargo, la curva de energía liberada en función del tiempo puede presentar irregularidades, ya que algunas réplicas pueden ser más fuertes que las que las preceden inmediatamente.

Tipo II : Se observan muchas sacudidas premonitorias, cuyo número aumenta rápidamente poco antes de que se produzca el temblor principal : la curva de réplicas decrece en general exponencialmente, como en el tipo I. Este tipo II se observa a menudo en el caso de seísmos artificiales debidos al llenado de embalses (véase la página 12).

Puede apreciarse el interés que presentaría la observación de las sacudidas premonitorias para la previsión de un temblor más importante. Por desgracia, la mayoría de los seísmos importantes pertenecen al tipo I.

Dentro de este mismo tipo puede distinguirse también el caso en que una sacudida importante va seguida, en un plazo relativamente breve, por sacudidas aún más importantes. El ejemplo de los seísmos de las islas jónicas es característico : entre el 9 y el 31 de agosto de 1953 se registraron 338 sacudidas procedentes del mismo foco o de focos muy próximos : hubo tres paroxismos de importancia creciente con varios días de intervalo, al liberarse la energía sísmica en varias sacudidas cada vez más violentas (9 de agosto a las 07.41 horas, magnitud 6,3; 11 de agosto a las 03.32 horas, magnitud 6,7; 12 de agosto a las 09.24 horas, magnitud 7,1). En el estado actual de los conocimientos, esos fenómenos son imprevisibles.

Además de las sacudidas premonitorias y de las réplicas, hay que citar los "enjambres" de sacudidas ("swarms") : en ellos no se respeta la disminución exponencial de la energía y las sacudidas más fuertes se producen en cualquier orden. Es célebre el ejemplo del enjambre de Matsushiro, en el Japón : sólo en el año 1966 se registraron 854.566 sacudidas en el observatorio de Matsushiro; de ellas, 88.258 se sintieron en la región epicentral; sólo algunas de esas sacudidas alcanzaron una intensidad VII).

2.3 Seísmos artificiales

Desde hace algunos años, los sismólogos han observado que, en algunos casos, la actividad humana va acompañada de una actividad sísmica, ya se trate del llenado de algunos embalses, de la inyección de agua en pozos profundos o de la explotación de yacimientos de petróleo o de gas. En Francia se han producido desde 1969 muchos seísmos en el yacimiento petrolífero y gasífero de Lacq.

Los importantes fenómenos sísmicos que acompañaron la inyección de las aguas utilizadas en un pozo excavado hasta 3.700 m de profundidad cerca de Denver (Colorado) indujeron a los científicos a estudiar ese fenómeno en el laboratorio y sobre el terreno. La inyección de fluido en una zona fallada reduce la fricción y, por consiguiente, disminuye las tensiones en el seno de la falla. Esquemáticamente, puede decirse que la inyección de fluido debilita una falla, mientras que el bombeo la refuerza. En el caso de que exista una tensión importante en el interior de una falla, la inyección de líquido "liberará" a ésta, provocando así un seísmo.

Las experiencias realizadas en el campo petrolífero de Rangely (Colorado) mostraron que la inyección de agua en los pozos perforados en el contorno del yacimiento se habían traducido en numerosas sacudidas localizadas en las proximidades de esos pozos. La experiencia mostró también la posibilidad de controlar la actividad sísmica alternando inyección y bombeo. Esos primeros resultados permiten esperar que un día se podrá controlar la actividad sísmica a lo largo de una gran falla, como la de San Andreas en California.

La actividad sísmica observada durante el llenado de algunos grandes embalses ha sido objeto, por otra parte, de publicaciones cada vez más numerosas (véase la bibliografía).

En algunos casos - Hsinfengkiang (China) en 1962, Kariba (Zimbabwe, antigua Rhodesia del Sur) en 1963, Kremasta (Grecia) en 1966, Koyna (India) en 1967 - la magnitud de los seísmos así provocados ha superado la cifra 6 y se han producido daños importantes.

El fenómeno ha parecido lo suficientemente grave como para que la UNESCO crease un grupo de trabajo para estudiarlo.

El peso del agua puede ser a veces suficiente para explicar la brusca liberación de la energía de tensión almacenada. Ese efecto liberador se ve favorecido por la existencia de capas de plasticidad diferente.

Por otra parte, la elevación del nivel del agua en un embalse puede modificar el campo de tensiones efectivas en la masa rocosa, como consecuencia del aumento de las presiones intersticiales, lo que provoca a veces una ruptura. Ese fenómeno se produce en particular a lo largo de juntas, fallas u otras zonas de menor resistencia que dejan paso al fluido intersticial. Como consecuencia del aumento de la presión intersticial, las tensiones efectivas normales disminuyen, lo que puede desencadenar terremotos; en tal caso, la diferencia entre el nivel alcanzado por el agua en el embalse y el de la capa freática natural constituye un factor importante.

La recrudescencia de la sismicidad provocada por el llenado de un embalse puede hacer peligrar a la propia presa, a las poblaciones que viven río abajo y que se ven amenazadas por inundaciones y a las ciudades próximas, cuyos edificios pueden ser dañados.

Una investigación de los lugares con una evaluación correcta del estado de fracturación de las rocas, el inventario de los accidentes tectónicos (fallas) y una mayor vigilancia de la actividad sísmica deben ser inexcusables en las proximidades de los grandes embalses y comenzar mucho antes de su llenado.

El equipo que debe utilizarse para esa vigilancia ha sido descrito en un documento elaborado por el grupo de trabajo de la UNESCO (SF-73/CONF 625/1).

2.4 Efectos de los terremotos

El conocimiento y el estudio de los efectos de los terremotos permiten acumular informaciones que sirven para elaborar normas de protección. Por otra parte, en muchos casos es el estudio directo de un seísmo sobre el terreno el que conduce a determinar exactamente la posición del epicentro, con una precisión superior a la que puede esperarse del empleo de métodos basados únicamente en la interpretación de sismogramas.

En todos los casos, cuando las sacudidas tienen intensidad suficiente, sus efectos se traducen en alteraciones más o menos profundas de los terrenos afectados.

2.4.1 Fisuración del sub-suelo y efecto en las fallas

El seísmo de San Francisco del 18 de abril de 1906 rejuveneció la falla de San Andreas en una longitud de 470 km, desnivelando los dos labios entre unos centímetros y un metro, y separando las dos partes entre 25 cm y 7 m. El seísmo de Mino-Avari en el Japón produjo desniveles del orden de 6m y separaciones horizontales de 2 m a lo largo de la falla de Neo que,

a diferencia de la de San Francisco, no es rectilínea sino que está cortada en tramos escalonados. Las consecuencias de esos movimientos del suelo son evidentemente desastrosas para los edificios que se encuentran en las proximidades o en el trayecto de una falla. Por consiguiente, todo programa de ordenación del territorio deberá evitar cuidadosamente las líneas de fallas activas al establecer zonas de viviendas o industriales.

2.4.2 Levantamientos y hundimientos

Cuando el seísmo de Tokyo (septiembre de 1923) en el Japón, la costa de la bahía de Sagami se levantó 2 m, mientras que el fondo de la bahía se elevaba, en el norte, 250 m y se hundía, hacia el centro, entre 100 y 200 m, e incluso 400 m en algunos puntos. Además, en el conjunto de los terrenos que rodean la bahía de Tokio, se comprobaron desplazamientos horizontales de hasta 4 m. Ese terremoto, particularmente mortífero, causó la muerte de 99.331 personas, de las cuales unas 38.000 fueron víctimas del incendio que asoló Tokio después del seísmo. A diferencia de lo que ocurre con las fallas, ese tipo de efecto destructor es mucho más difícil de prever y sólo puede atenuarse, en cierta medida, mediante la adopción de ordenanzas de la construcción orientadas a aumentar la solidez de los edificios.

2.4.3 Producción de fenómenos de transporte de masas de tierra

Los terremotos provocan a veces hundimientos, corrimientos de tierras, desplazamientos horizontales de terrenos comparables a los movimientos de materiales sobre una mesa vibrante, el derrumbamiento de cimas muy erosionadas, aludes y caídas de piedras o de bloques de hielo. Tales fenómenos pueden descubrirse anticipadamente mediante estudios geológicos y geomorfológicos minuciosos que permitan determinar las zonas susceptibles de ser devastadas.

2.4.4 Fenómenos de licuefacción y de asentamiento

Por el efecto de las vibraciones causadas por un terremoto, algunas capas del subsuelo formadas por materiales movedizos de escasa granulometría pueden asentarse, provocando el hundimiento de las capas suprayacentes. Las formaciones arenosas empapadas de agua pueden ser objeto de fenómenos de licuefacción, al aumentar las sacudidas sísmicas la presión intersticial por transferencia de la carga de las intersuperficies granulares hacia el agua capilar, provocando así una disminución brutal de la sustentación. Sólo un inventario previo de todas las capas blandas mediante investigaciones geofísicas y geológicas, permitirá evitar la construcción de edificios en las zonas peligrosas.

2.4.5 Perturbación del régimen de las fuentes

Las alteraciones del subsuelo provocan modificaciones del recorrido de las aguas subterráneas. Ello puede producir variaciones brutales del nivel de la capa freática y el súbito agotamiento de las fuentes superficiales.

2.4.6 Los tsunamis

La palabra japonesa "tsunami" se utiliza para designar las grandes olas, o sistemas de olas, que generan los movimientos del fondo marino relacionados a menudo con terremotos. No se conoce con precisión el mecanismo que los origina, e incluso pueden tener diversos orígenes bruscos: movimientos verticales del fondo marino causados directamente por terremotos, corrimientos de tierras submarinos debidos también terremotos o erupciones volcánicas, etc.

Este fenómeno, lo mismo que los diversos métodos utilizados para combatir sus desastrosos efectos, se estudiará más detenidamente en el anexo (véase la página 116 del anexo).