

**UNIVERSIDAD PARA TODOS**

**Curso elemental**

# **SISMOLOGÍA**

**PARTE 2**

**Precio: 1.00**

ISBN 978-959-270-185-4



9 789592 701854

# ÍNDICE

## Parte 1

**PRESENTACIÓN / 2**

**INTRODUCCIÓN / 2**

**¿QUÉ SON LOS TERREMOTOS? / 3**

Peculiaridades de un terremoto como fenómeno natural / 3

Comparación ilustrativa: terremoto-ciclón / 3

**PÉRDIDAS CAUSADAS POR TERREMOTOS / 3**

**SISMOLOGÍA: UNA CIENCIA TEÓRICA Y APLICADA / 4**

Divisiones de la sismología / 4

**EVOLUCIÓN DE LAS HIPÓTESIS SOBRE EL ORIGEN DE LOS TERREMOTOS / 5**

Modelo del rebote elástico / 5

Principios de la elasticidad / 6

Comportamiento elástico y plástico de los cuerpos / 6

Esfuerzo y deformación. Ley de Hooke / 6

La fuente sísmica / 7

Fuentes sísmicas puntuales y de dimensiones finitas / 7

Tipos de fuentes sísmicas / 7

**ONDAS SÍSMICAS / 8**

Tipos de ondas sísmicas / 8

Los sismogramas / 8

**ESTRUCTURA INTERNA DE LA TIERRA / 9**

**INSTRUMENTACIÓN SISMOLÓGICA / 9**

Desarrollo histórico de la instrumentación sismológica / 10

Nuevos sensores sismológicos / 11

Redes de estaciones sismológicas / 11

Desarrollo de las observaciones sismológicas en Cuba / 11

**MEDICIÓN DE LOS TERREMOTOS / 12**

Magnitud / 12

Intensidad / 13

Mapas de isosistas de terremotos / 13

Escala de intensidades basada en los efectos inducidos por los terremotos en el entorno natural / 14

Catálogo de terremotos de Cuba / 14

**SISMICIDAD Y TECTÓNICA DE PLACAS / 15**

## Parte 2

**SISMICIDAD Y TECTÓNICA DE PLACAS (cont.) / 2**

Tectónica de placas y sismicidad de Cuba y de sus áreas aledañas / 2

Terremotos notables ocurridos en Cuba / 3

**EL RIESGO SÍSMICO Y SUS COMPONENTES / 5**

El peligro sísmico / 6

Métodos determinísticos / 6

Métodos probabilísticos / 6

El peligro sísmico en Cuba / 7

Peligro sísmico a escala urbana: microzonificación sísmica / 8

Ejemplos de microzonificación sísmica en áreas urbanas de Cuba / 8

Peligros geológicos inducidos por los terremotos / 9

La licuación del suelo o licuefacción / 9

Deslizamientos / 9

Tsunamis / 10

**VULNERABILIDAD SÍSMICA / 10**

**EL RIESGO Y LOS DESASTRES DE ORIGEN SÍSMICO / 11**

Importancia de las experiencias pasadas y de la memoria histórica / 11

Los escenarios de daños / 11

El mapa de riesgo sísmico de la provincia Santiago de Cuba / 12

Impacto socioeconómico de los desastres de origen sísmico / 12

**PREDICCIÓN DE TERREMOTOS / 12**

Predicción a largo plazo / 12

Gaps o brechas sísmicas / 12

Migración de terremotos / 13

Predicción a mediano y corto plazos / 13

Sismos premonitores o preeventos / 13

Zonas de quietud. Patrones de sismicidad / 13

Otros premonitores sismológicos / 14

Premonitores no sismológicos / 14

Aspectos sociales de la predicción de terremotos / 14

**QUÉ HACER ANTES, DURANTE Y DESPUÉS DE UN TERREMOTO / 15**

**BIBLIOGRAFÍA / 15**

**ANEXOS / 15**

### COORDINADOR

**Dr. José Leonardo Álvarez Gómez**, J´Dpto. Sismología, Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas (CENAIIS)

### COLECTIVO DE AUTORES

Dra. Bertha Elena González Raynal, Investigadora Titular (CENAIIS)

Lic. Manuel Alonso Serrano Herrera, Especialista Superior en Tecnología y Equipamiento (CENAIIS)

Dr. Tomás Jacinto Chuy Rodríguez, Investigador Titular (CENAIIS)

Dr. Julio Antonio García Peláez, Investigador Agregado (CENAIIS)

Luis David Pérez Lara, Técnico Superior (CENAIIS)

Emelina Fernández Soler, Técnico Superior (CENAIIS)

### COLABORADORES

Dr. José Alejandro Zapata Balanqué, Investigador Auxiliar (CENAIIS)

Dr. José Leonardo Álvarez Gómez, J´Dpto. Sismología (CENAIIS)

Dr. Fernando Guasch Hechavarría, Investigador Auxiliar (CENAIIS)

Dr. Bladimir Moreno Toirán, Director (CENAIIS)

Ing. Grisel Morejón Blanco, Vicedirectora Científica (CENAIIS)

### GRUPO DE EDICIÓN EDITORIAL ACADEMIA



Edición y corrección editorial: Lic. Dulce María García Medina

Diseño y tratamiento de imágenes: Marlene Sardiña Prado

ISBN: 978-959-270-185-4 (Parte 2)

2010, «Aniversario 51 del Triunfo de la Revolución»

## SISMICIDAD Y TECTÓNICA DE PLACAS (Cont.)

### Tectónica de placas y sismicidad de Cuba y de sus áreas aledañas

Cuba pertenece a la región del Caribe, una región compleja desde el punto de vista geológico y tectónico. Ello ha dado lugar a controvertidas opiniones sobre su evolución geológica. La sismicidad pronunciada de la región suroriental de su territorio se debe a la interacción entre la mesoplaca del Caribe y la macroplaca de América del Norte.

El límite o frontera de placas en esta región coincide con una falla de tipo transcurrente con movimiento lateral izquierdo, conocida como Falla Oriente o Bartlett-Caimán.

La falla de Bartlett-Caimán no sólo afecta al territorio de Cuba sino al de otras islas caribeñas como Jamaica, Islas Caimán, Puerto Rico y La Española. En la parte nororiental de esta última se han registrado los terremotos de mayor magnitud de la región, como el ocurrido en agosto de 1947 con una magnitud de 7,9. Este importante terremoto generó un tsunami que causó gran destrucción y pérdidas de vidas en esa isla.

La sismicidad de Cuba es de dos tipos: «de entre placas» y «de interior de placas» (Fig. 27). La sismicidad de entre placas, relacionada con la falla Oriente se caracteriza por mayor frecuencia de ocurrencia de terremotos. Estos pueden alcanzar magnitudes relativamente grandes ( $M > 7,0$ ) en la escala de Richter y profundidades mayores de 20 km.

De los 28 terremotos de gran intensidad reportados en Cuba, 22 se asocian al límite de las placas del Caribe y América del Norte. Los seis terremotos restantes se asocian a fallas geológicas activas que afectan el territorio insular de Cuba como Pinar, La Trocha y Cauto Nipe, entre otras (Tabla 3). Estos terremotos llamados de interior de placas, son menos frecuentes y de menor magnitud que los de la zona de entreplacas. Sin embargo, debido a que son en su mayoría terremotos de foco somero ( $h \leq 15$  km) han producido daños en las edificaciones.

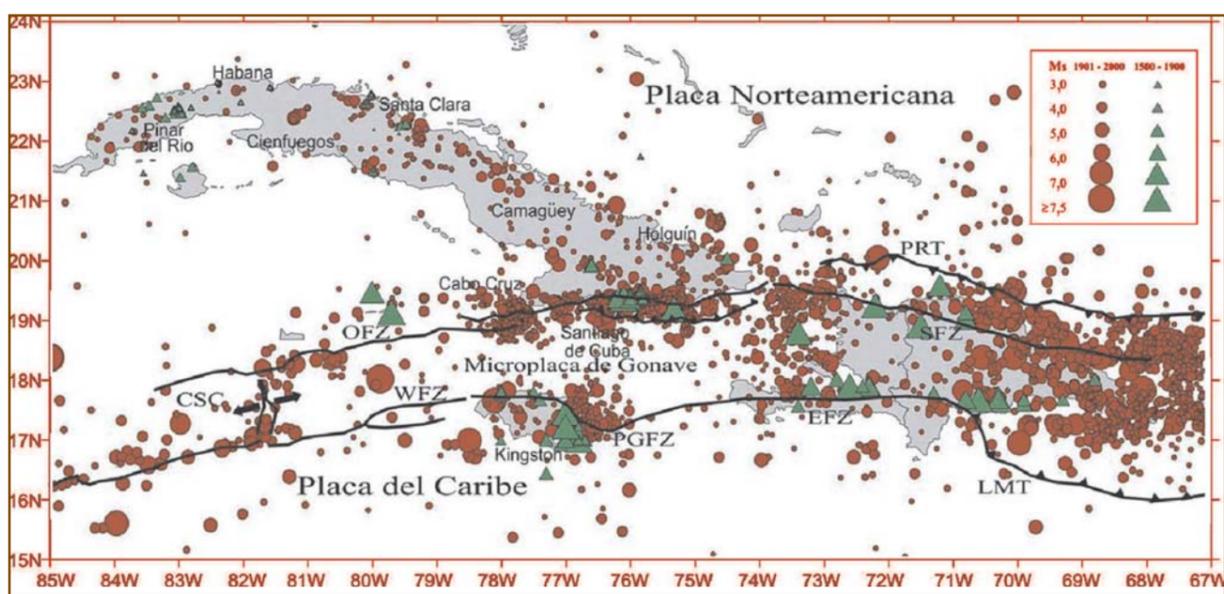


Fig. 27. Sismicidad de Cuba y regiones aledañas.

Tabla 3. Terremotos más fuertes reportados en Cuba ( $I > VII$  MSK)

| AÑO  | MES | DIA | HORA  | Lat. N. | Lon. W. | Ms   | H  | I    | LOCALIDAD           |
|------|-----|-----|-------|---------|---------|------|----|------|---------------------|
| 1551 |     |     | -     | 20,40   | 76,60   | 5,8  | 15 | VIII | Bayamo              |
| 1578 | AGO |     | -     | 19,90   | 76,00   | 6,8  | 30 | VIII | Santiago de Cuba    |
| 1580 |     |     | -     | 19,90   | 76,00   | 5,8  | 30 | VII  | Santiago de Cuba    |
| 1624 | OCT |     | -     | 20,40   | 76,00   | 5,2  | 15 | VII  | Bayamo              |
| 1675 | FEB | 11  | -     | 19,90   | 76,00   | 5,8  | 30 | VII  | Santiago de Cuba    |
| 1678 | FEB | 11  | 14:59 | 19,90   | 76,00   | 6,8  | 30 | VIII | Santiago de Cuba    |
| 1682 |     |     | -     | 19,90   | 76,00   | 5,8  | 30 | VII  | Santiago de Cuba    |
| 1752 | OCT |     | -     | 19,90   | 76,00   | 5,8  | 30 | VII  | Santiago de Cuba    |
| 1760 | JUL | 11  | -     | 19,90   | 76,00   | 6,8  | 30 | VIII | Santiago de Cuba    |
| 1766 | JUN | 12  | 05:14 | 19,80   | 76,10   | 7,6  | 35 | IX   | Santiago de Cuba    |
| 1775 | FEB | 11  | -     | 19,90   | 76,00   | 5,8  | 30 | VII  | Santiago de Cuba    |
| 1826 | SEP | 18  | 09:29 | 19,90   | 76,00   | 5,8  | 30 | VII  | Santiago de Cuba    |
| 1842 | JUL | 07  | -     | 19,90   | 76,00   | 6,0  | 30 | VII  | Santiago de Cuba    |
| 1852 | AGO | 20  | 14:05 | 19,77   | 75,35   | 7,3  | 30 | IX   | Santiago de Cuba    |
| 1852 | NOV | 26  | 08:44 | 19,50   | 76,25   | 7,0  | 35 | VIII | Santiago de Cuba    |
| 1858 | ENE | 28  | 22:04 | 19,90   | 76,00   | 6,5  | 30 | VII  | Santiago de Cuba    |
| 1880 | ENE | 23  | 04:39 | 22,70   | 83,00   | 6,0  | 15 | VIII | San Cristóbal       |
| 1903 | SEP | 22  | 08:09 | 19,90   | 76,00   | 5,7  | 30 | VII  | Santiago de Cuba    |
| 1906 | JUN | 22  | 07:09 | 19,65   | 76,25   | 6,2  | 30 | VII  | Santiago de Cuba    |
| 1914 | FEB | 28  | 05:19 | 21,22   | 76,17   | 6,2  | 32 | VII  | Gibara              |
| 1914 | DIC | 25  | 05:19 | 19,45   | 76,30   | 6,7  | 30 | VII  | Santiago de Cuba    |
| 1926 | AGO | 03  | 11:30 | 20,30   | 77,10   | 5,4  | 15 | VII  | Manzanillo          |
| 1930 | ENE | 17  | 12:00 | 19,90   | 76,00   | 5,8  | 25 | VII  | Santiago de Cuba    |
| 1932 | FEB | 03  | 06:15 | 19,80   | 75,80   | 6,75 | -  | VIII | Santiago de Cuba    |
| 1939 | AGO | 15  | 03:52 | 22,50   | 79,25   | 5,6  | -  | VII  | Remedios -Caibarién |
| 1947 | AGO | 07  | 00:40 | 19,90   | 75,30   | 6,75 | 50 | VII  | Santiago de Cuba    |
| 1976 | FEB | 19  | 13:59 | 19,87   | 76,87   | 5,7  | 15 | VIII | Pilón               |
| 1992 | MAY | 25  | 16:55 | 19,62   | 77,70   | 7,0  | 30 | VII  | Cabo Cruz           |

**Terremotos notables ocurridos en Cuba**

Con el objetivo de crear conciencia en la población cubana sobre la importancia de los terremotos como una amenaza potencial para el territorio nacional, se describen los efectos producidos por algunos de ellos relevantes, en diferentes regiones del país.

Santiago de Cuba, 12 de junio de 1766: uno de los terremotos más fuertes ocurridos en Cuba ( $M = 7,6$ ;  $I_0 = IX$  grados MSK). Destruyó la mayoría de las edificaciones de la Villa de Santiago de Cuba como la capilla mayor de la Catedral, el Convento de San Francisco, el Hospital, los muros construidos para el Palacio Real, la Audiencia, la Sala de Justicia y las iglesias de Dolores, el Carmen y Santa Lucía, entre otras. Se reportaron alrededor de 120 muertos y 700 heridos. El terremoto produjo muchas réplicas, las cuales, también produjeron daños. Se percibió con fuerza en varias localidades de la región oriental como Bayamo y Holguín.

Santiago de Cuba, 20 de agosto de 1852: terremoto muy fuerte ( $M = 7,3$ ;  $I_0 = IX$ ). Provocó la ruina de las iglesias de Dolores, Trinidad, del

Carmen, Santa Lucía, Santa Ana, Belén, Belencito y el Cristo. Sufrieron daños considerables la Casa de Gobierno, la Casa Arzobispal, el Seminario, la Intendencia, la Aduana y el hospital. Se agrietaron las naves y el campanario de la Catedral. Se reportaron daños en más de 1000 viviendas, dos personas muertas y varios heridos. Produjo gran número de réplicas, algunas de ellas perceptibles. Se sintió en varias localidades del oriente del país como Baracoa, Gibara y Holguín, entre otras.

Santiago de Cuba, 3 de febrero de 1932: terremoto muy fuerte ( $M = 6,8$ ;  $I_0 = VIII$ ). Se afectó el 80% de las edificaciones de la ciudad (Fig. 28). El 5% de las edificaciones quedaron totalmente destruidas. Fue acompañado de un fuerte ruido subterráneo. Se reportaron 14 muertos y alrededor de 300 heridos. El número reducido de víctimas fatales se debió a que el evento tuvo varios sismos premonitores el día anterior, por lo que la población atemorizada se encontraba fuera de las viviendas. Se reportaron también efectos sobre el terreno como alteraciones en el curso del arroyo de Songo, desecación de los manantiales de Guaicanamar, aumento de la temperatura y del caudal de los manantiales de El Cedrón, aumento del rendimiento de los pozos del Acueducto de San Juan en Santiago de Cuba, alteración en el caudal de los ríos Cañas y Cauto, alteraciones batimétricas considerables en la costa, al este y oeste de la Bahía, entre otros. El terremoto produjo gran cantidad de réplicas, algunas de intensidades moderadas ( $I_0 = VI$ ). Se sintió en numerosas localidades de la región oriental y Camagüey.

Pilón, 19 de febrero de 1976: terremoto muy fuerte ( $M = 5,9$ ;  $I_0 = VIII$ ). Se sintió en la mayor parte de la región oriental. Produjo daños en 80% de las viviendas del poblado y severos daños en el centro comercial y el centro escolar como grietas grandes y roturas en las paredes y pedazos de placas (Fig. 29). Se reportan otros daños como deformaciones en los raíles del puente que conduce al embarcadero. Se produjeron afectaciones en numerosas localidades de la actual provincia de Granma como Punta de Hicacos, Camarón Grande, Mota, Las Mercedes, Cienguilla, Marea del Portillo, Ocuja, Pozo Redondo, Baire y Veguitas. Estuvo acompañado por numerosas réplicas, y se reportaron deslizamientos en las pendientes naturales y grietas en el terreno.

Cabo Cruz, 25 de mayo de 1992: terremoto fuerte ( $M = 6,9$ ;  $I_0 = VII$ ). Es el de mayor magnitud de los registrados instrumentalmente en el país. Sin

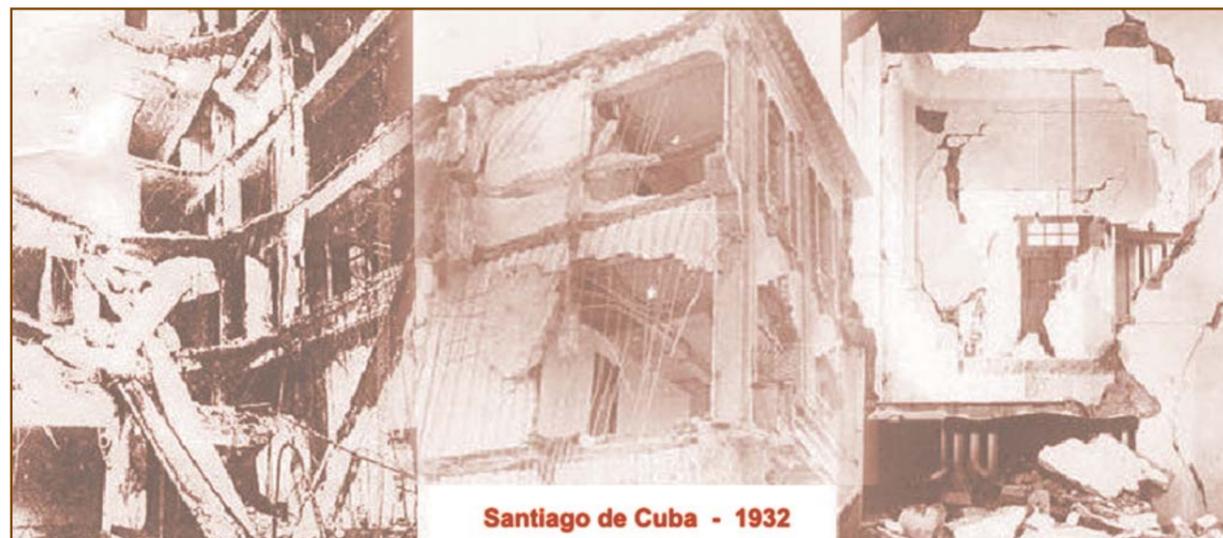


Fig. 28. Algunos daños ocasionados por el terremoto de 1932 en Santiago de Cuba.

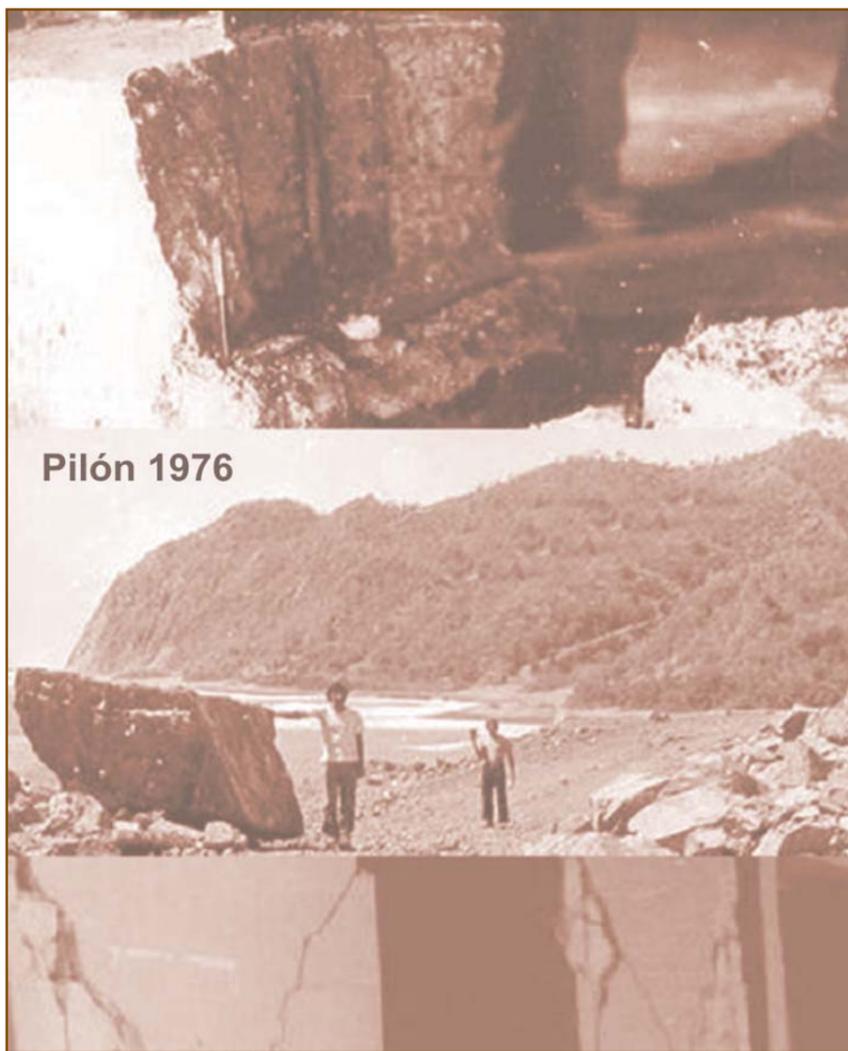


Fig. 29. Efectos del terremoto de Pilón de 1976.

embargo, las afectaciones producidas no fueron mayores por tratarse de una zona poco poblada y debido a su profundidad relativamente grande. La intensidad máxima ( $I_0 = VII$ ) se reportó sólo en un área pequeña, bordeando la costa meridional de la provincia de Granma, entre las localidades de Cabo Cruz y Pilón (Fig. 30).

Cabo Cruz, 4 de febrero de 2007: terremoto sentido en gran parte del territorio de las provincias orientales y Camagüey ( $M = 6,1$ ;  $I_0 = V-VI$ ). Fue también perceptible en Jamaica, Haití y República Dominicana. El terremoto estuvo acompañado por numerosas réplicas algunas de ellas perceptibles. En la Fig. 31 a) y b), se muestran el epicentro del terremoto principal y la distribución espacial de las réplicas registradas hasta el 7 de febrero por la Red del Servicio Sismológico Nacional.

San Cristóbal-Candelaria, 23 de enero de 1880: terremoto fuerte ( $M = 6,0$ ;  $I_0 = VIII$ ). Produjo daños en las edifi-

caciones de los poblados de San Cristóbal y Candelaria. Específicamente, se afectaron 447 viviendas en San Cristóbal y 54 en Candelaria. También se reportaron daños en las viviendas de varias localidades de Pinar del Río como Consolación del Sur, Mangas, Pinar del Río y Bahía Honda, entre otras. Su área de perceptibilidad se extendió hasta Cienfuegos. Fue sentido en la península de la Florida, en Cayo Hueso y algunos observadores aseguran que también fue perceptible en la Península de Yucatán. Produjo ligeras afectaciones en algunas edificaciones de la entonces Villa de San Cristóbal de La Habana.

Remedios-Caibarién, 14 de agosto de 1939: terremoto fuerte ( $M = 5,6$ ;  $I_0 = VII$ ). Fue sentido en toda la región central de Cuba. En Remedios 90% de las viviendas sufrió daños, algunos de consideración. Igualmente sufrieron afectaciones importantes numerosas viviendas en Caibarién; el Hospital Civil quedó inutilizado. En Sagua la Grande sufrió daños la planta hidroquímica y se agrietaron muchas edificaciones. En Santa Clara se rompieron los cristales de muchas viviendas. El terremoto estuvo acompañado por eventos premonitores y réplicas.

Gibara, 28 de febrero de 1914: temblor muy fuerte ( $M = 6,2$ ;  $I_0 = VII$ ). Se agrietaron las paredes y el revestimiento de algunas edificaciones. Se reportaron daños de consideración en un edificio. También se sintió en varias localidades de la región oriental.

En el año 2010 se situó a la población de la región oriental y en particular a las provincias de Santiago de Cuba y Guantánamo en estado cercano a la alarma permanente, por la posible ocurrencia de terremoto fuerte con epicentro en esa zona. Esta alarma se produjo fundamentalmente por la ocurrencia el 12 de enero a las 4:53 p.m. (hora local de Cuba) de un terremoto fuerte en la falla Enriquillo, en la parte sur de la vecina isla de Haití, con una magnitud Richter de 7,3. Produjo miles de víctimas y considerables pérdidas económicas, fundamentalmente por las condiciones en que se encontraba la zona del epicentro (Fig. 32). Este sismo fuerte fue sentido en prácticamente toda la región oriental, aunque con intensidades bajas por la distancia en que se encuentra nuestro territorio de la zona del epicentro, lo cual se validó con los resultados de los recorridos de campo que se realizaron para evaluar las intensidades que se habían reportado.

En esta serie de sismos perceptibles se destacan los ocurridos en los días 15 y 20 de marzo con magnitudes de 4,2 y 5,5 Richter respectivamente, que incidieron considerablemente en la alarma de la población de este territorio (Fig. 33). A pesar de que no se descarta la posibilidad de ocurrencia de un sismo fuerte, lo cual es una realidad por las características sismotectónica de la región, no es posible con el nivel de conocimiento actual decir cuándo podrá ocurrir, y no tiene necesariamente que estar vinculado a una serie en particular.

Muchas de estas series se han olvidado por la población, ya que ocurrieron en diferentes períodos. Las más recientes se señalan en octubre-noviembre del 2009 en esta misma región, o bien la ocurrida el 24 de enero del 2008, cuando se registraron en ese sólo día 46 sismos, de ellos seis perceptibles con intensidades EMS entre III-IV (Fig. 34). Otros sismos perceptibles ocurridos en este período se reportaron en Imías (Guantánamo), La Pua (Las Tunas) y en Artemisa (La Habana).

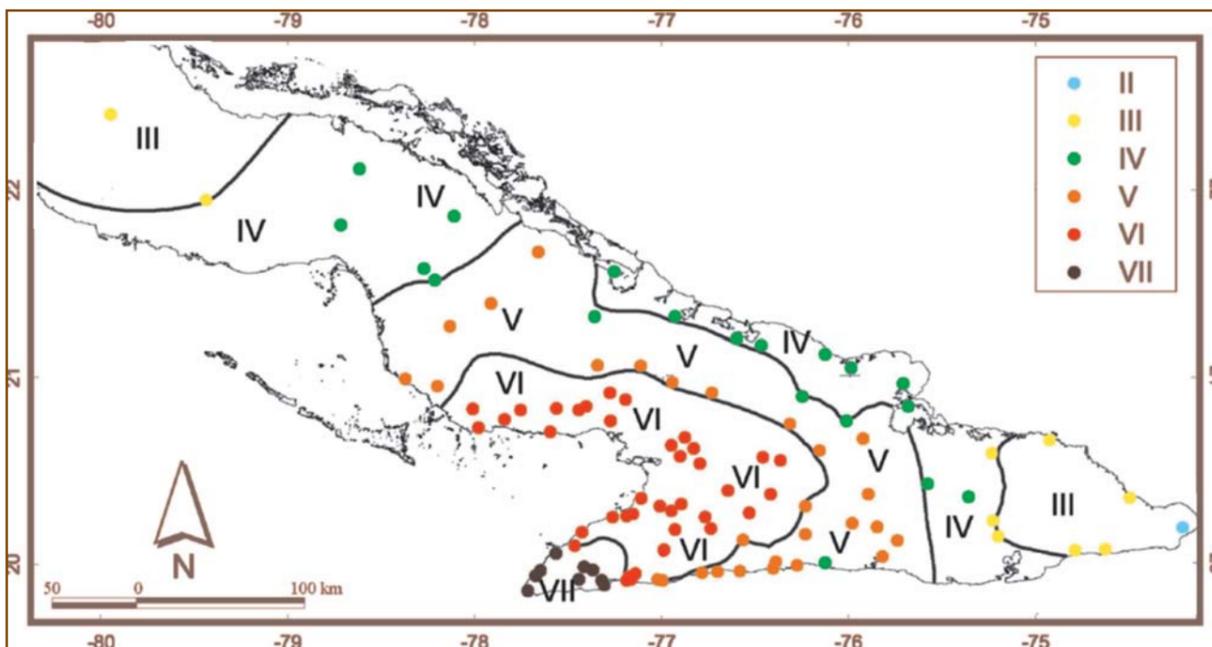


Fig. 30. Mapa de isosistas del terremoto de Cabo Cruz de 1992.

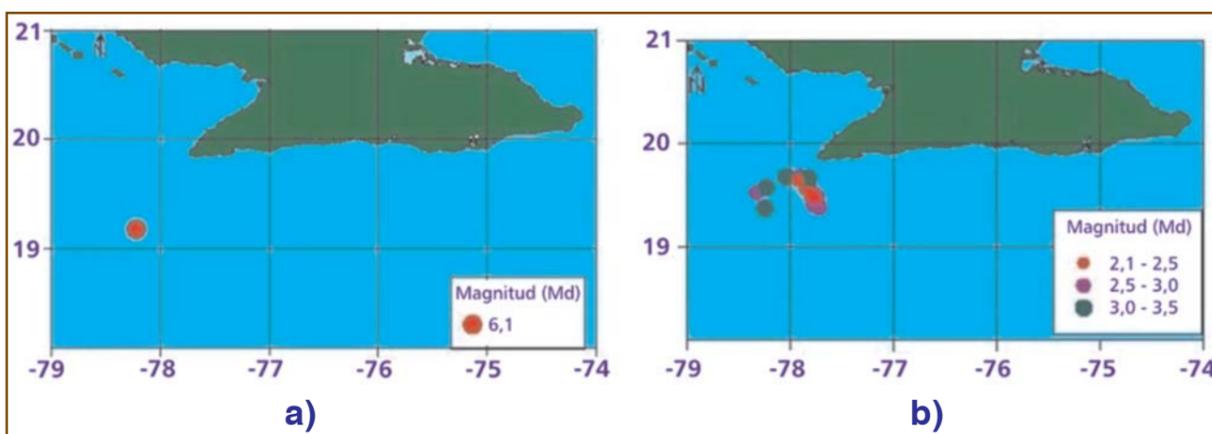


Fig. 31. Terremoto del 2 de febrero de 2007. (a) terremoto principal (b) réplicas hasta el 7/02/007.

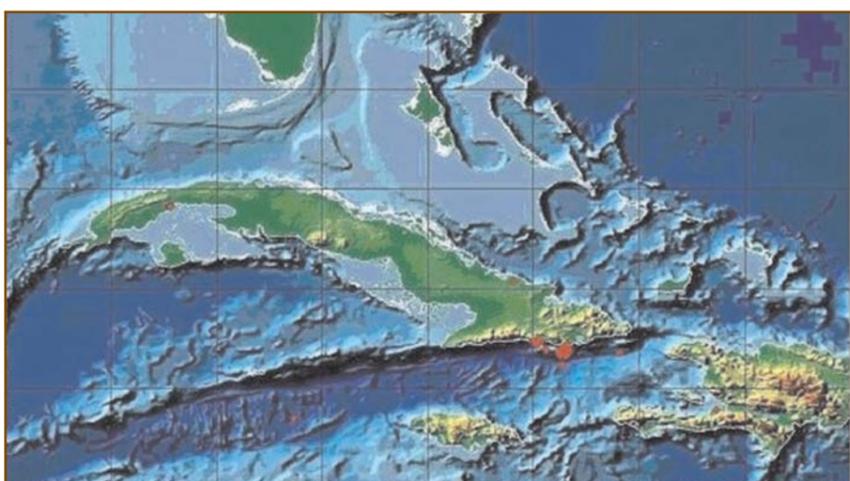
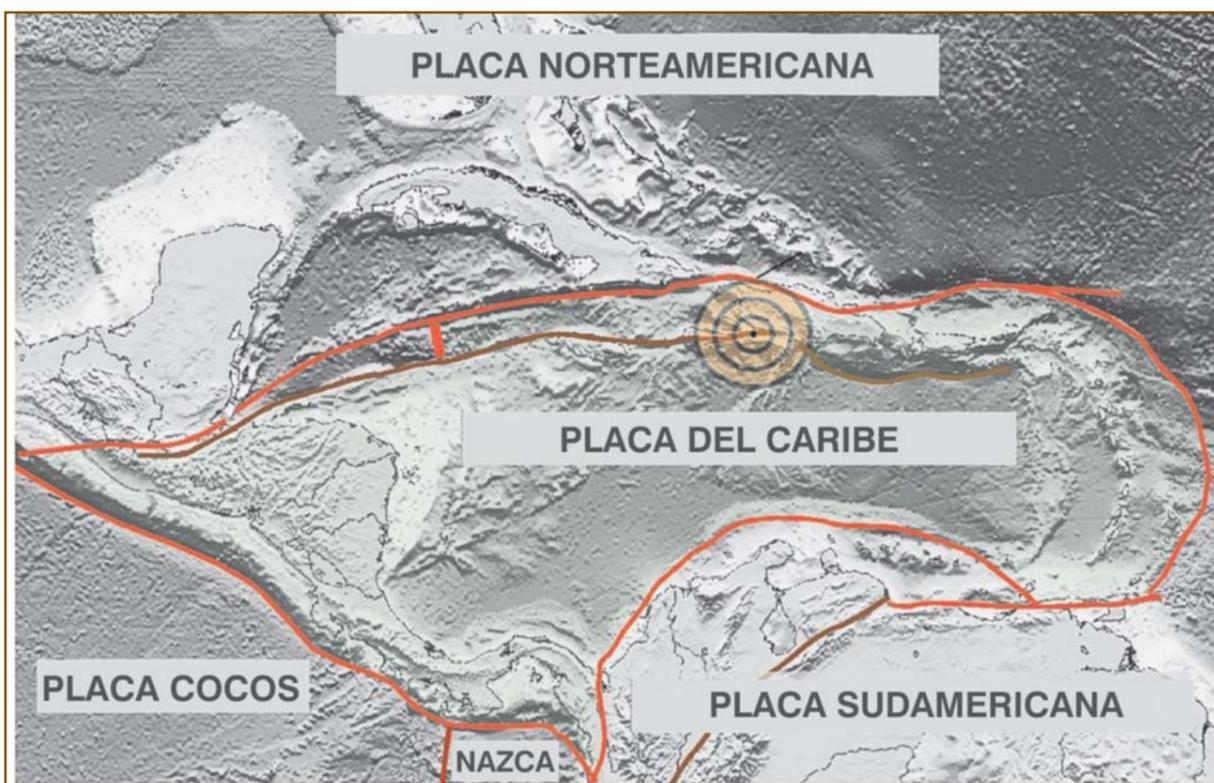


Fig. 32. El terremoto de Haití del 12 de enero de 2010. Ubicación geográfica e imágenes de los daños producidos en Port au Prince.

Fig. 33. Mapa de sismos perceptibles en Cuba en los meses de enero a mayo de 2010.

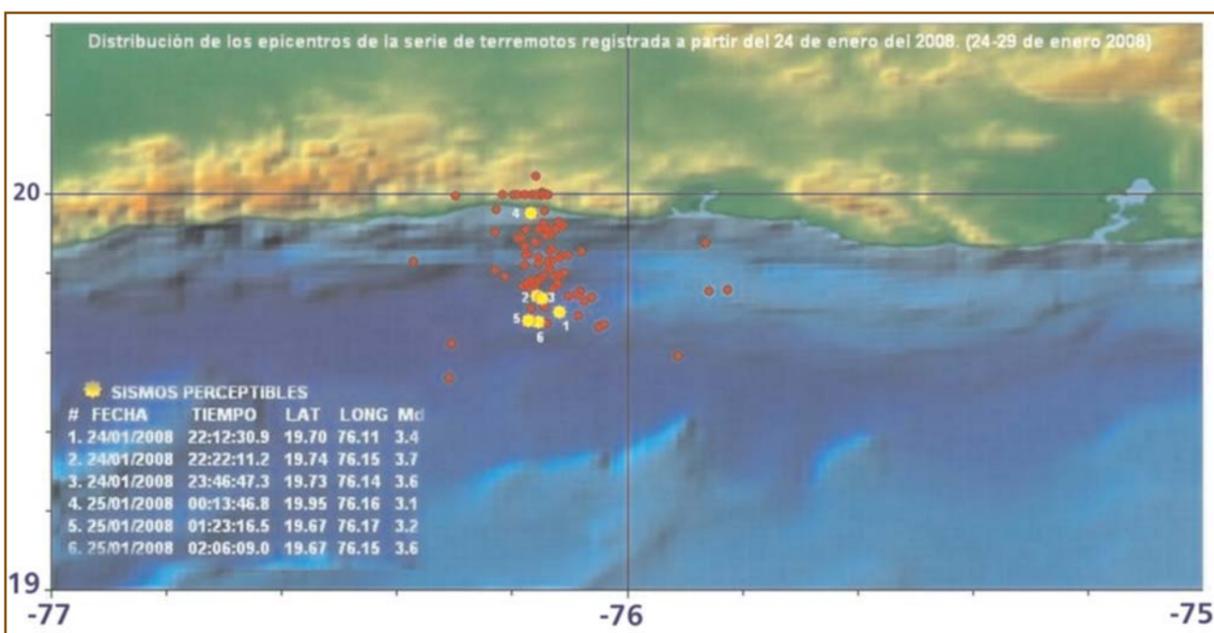


Fig. 34. Serie de terremotos de enero de 2008 en la zona de Chivirico, provincia de Santiago de Cuba.

### EL RIESGO SÍSMICO Y SUS COMPONENTES

El riesgo sísmico consta de dos aspectos básicos: uno de carácter científico y otro de carácter económico. En el científico se identifican dos partes, la que concierne directamente al sísmólogo y la que se relaciona más con los ingenieros y arquitectos que diseñan, calculan y construyen los edificios. Aunque el rol de cada grupo de especialistas está bien definido, se requiere de un trabajo mancomunado para lograr el resultado deseado: la mitigación de las pérdidas directas e indirectas ocasionadas por estos eventos.

La UNESCO propuso en 1980 relacionar los diferentes aspectos de este problema mediante la siguiente expresión:

$$\text{Riesgo Sísmico} = \text{Peligro} \times \text{Vulnerabilidad} \times \text{Costo de los elementos expuestos}$$

El sentido de esta expresión es el siguiente: son tres los factores que determinan lo que se llamará riesgo sísmico, a saber: el peligro en sí de que el evento no deseado ocurra es decir, el terremoto. Indiscutiblemente, este primer factor de la definición se expresa probabilísticamente. Como el terremoto no es un ente abstracto, sino que ocurre en un lugar determinado con características más o menos favorables para soportarlo exitosamente, aparece el segundo factor: la capacidad de la región para soportar el embate del evento sísmico. Este factor se mide en una escala definida entre 0 y 1. Finalmente, el tercer factor de carácter económico permite tener una idea de las pérdidas potenciales que el terremoto pudiera ocasionar. Se mide en términos monetarios o en pérdidas humanas.

De acuerdo con su definición para reducir el riesgo sísmico es necesario influir activamente sobre la vulnerabilidad de los elementos como las personas y las estructuras construidas por el hombre (viviendas, hospitales, edificaciones de uso social, industrias, líneas vitales, etc.).

También se puede accionar para reducir la llamada vulnerabilidad global de los asentamientos poblacionales sometidos a este tipo de amenaza geológica. El término vulnerabilidad global abarca el sistema en su conjunto, es decir la interacción de la vida humana con el sistema geológico en que se asienta. Por esta razón consta de factores físicos, ambientales, económicos y sociales.

En el caso de los sismos, poco o nada se puede hacer para disminuir el peligro como ocurre con otros fenómenos naturales destructivos, en los que de alguna manera, interviene la acción del hombre como los deslizamientos de tierra, las inundaciones, entre otros.

Es importante retomar la definición de riesgo. Varias conclusiones útiles se derivan de esta expresión: como el peligro y la vulnerabilidad son variables independientes, se puede dar el caso de una zona de alta peligrosidad donde los elementos expuestos sean escasos. El siguiente ejemplo es muy ilustrativo. Una zona poco urbanizada y poco poblada. En esta zona el riesgo será bajo, aunque el peligro sea alto. Por el contrario, puede existir una zona donde el peligro sea relativamente bajo, pero la vulnerabilidad sea muy alta; por ejemplo una gran ciudad densamente urbanizada con alto grado de hacinamiento y un alto porcentaje de las viviendas no capaces de soportar un terremoto.

Por otra parte, la vulnerabilidad y el costo de los elementos sometidos a riesgos aumentan considerablemente cuando se trata de zonas industrializadas o con edificaciones de alto valor patrimonial cuya pérdida sería irreparable.

### El peligro sísmico

Los sismólogos estudian los eventos sísmicos históricos y recientes con el objetivo de estimar la probabilidad de ocurrencia de futuros terremotos de determinada magnitud o intensidad en una región. Sus resultados se presentan por lo general en forma de mapas de zonas con diferentes niveles de peligro. Los ingenieros y arquitectos utilizan como información básica para el cálculo y diseño de edificios resistentes a los terremotos, las estimaciones del peligro realizadas por los sismólogos.

La peligrosidad sísmica de un área o región se define como la probabilidad de que el parámetro utilizado para medir el movimiento del terreno producido por un terremoto (intensidad, aceleración, velocidad o desplazamiento), sobrepase un determinado nivel umbral durante un periodo de tiempo dado. Es muy importante destacar la referencia a un período de tiempo en el que el evento sísmico puede ocurrir con una determinada probabilidad.

Existen dos métodos para estimar el peligro sísmico: el determinístico y el probabilístico. En ambos casos se puede considerar o no la existencia de zonas sismogénicas, que son aquellas con una mayor probabilidad de generar terremotos fuertes. Si se supone la existencia de estas zonas, el método recibe el nombre de zonificado.

### Métodos determinísticos

Estos métodos se basan en la hipótesis, que la ocurrencia de los terremotos en el futuro será similar a la del pasado, es decir se supone que lo ocurrido en el pasado determina lo que ocurrirá en el futuro. Ello implica que en el futuro no se deberán producir terremotos, cuyos efectos en el área de interés sobrepasen los efectos de los ya ocurridos. Los métodos determinísticos proporcionan solo el valor máximo de la variable elegida para medir el movimiento en la superficie del terreno. Su mayor limitación radica en admitir que el mayor terremoto registrado en el catálogo de una región no se deberá sobrepasar en el futuro. Sin embargo, esto no tiene que ser necesariamente cierto, ni aún en las regiones que cuentan con una larga historia sísmica. La experiencia demuestra que en muchas zonas de baja y moderada sismicidad, el umbral estimado ha sobrepasado los terremotos recientes. Ejemplo: los terremotos de Gazli de 1976 en la República de Uzbekistán y del terremoto de Kobe de 1995 en Japón.

La aplicación de los métodos determinísticos requiere de gran precisión en la localización de los epicentros de los terremotos cuando el método es no zonificado. Si se aplica el método zonificado, el trazado de los límites y la determinación de las dimensiones de las zonas sismogénicas deben ser precisos.

### Métodos probabilísticos

Los métodos probabilísticos consideran la sismicidad como un proceso aleatorio, cuyo tratamiento utiliza técnicas de análisis estadístico.

Tratan de describir matemáticamente la ocurrencia de fenómenos, que con las posibilidades actuales la Sismología no puede pronosticar.

La hipótesis fundamental de estos métodos no determinísticos considera que la información contenida en el catálogo de terremotos de una región es suficiente para deducir las leyes estadísticas a las que se ajusta el fenómeno sísmico.

Estos métodos tienen la ventaja con relación a los determinísticos de proporcionar la probabilidad asociada a diferentes niveles de riesgo. Además, cuando se trata de estimar el peligro a que está sometida una edificación particular, el ingeniero puede seleccionar el nivel de riesgo más adecuado para esta, en función de su importancia o impacto negativo que su destrucción pudiera representar para el medio ambiente. Los métodos determinísticos descritos no permitían esto.

La desventaja fundamental del método probabilístico consiste en que no siempre el tamaño de la muestra disponible, por ejemplo el número de terremotos en un periodo determinado es el adecuado para deducir las leyes estadísticas de cada zona. Los errores cometidos pueden ser importantes cuando los resultados son extrapolados a periodos de retorno mucho mayores que la longitud de la muestra seleccionada. Por ejemplo, los datos de un catálogo que abarque un periodo de 500 años como el de Cuba pueden resultar insuficientes cuando se pretende obtener las intensidades correspondientes a periodos de retorno de 10 000 años para el diseño de una central nuclear.

Los estimados del peligro obtenidos por métodos probabilísticos se expresan comúnmente como probabilidades anuales o periodos de retorno de un cierto nivel de intensidad (o aceleración) del movimiento del terreno. Por ejemplo, si en una zona del mapa un determinado nivel de intensidad tiene un periodo de retorno de 100 años, ello no significa que cada 100 años deba ocurrir en la zona un terremoto de esa intensidad. Esto constituiría una lectura errónea de los resultados del modelo.

Las estimaciones del peligro sísmico comprenden varias etapas:

- 1) Caracterización de la sismicidad y del régimen sísmico de la región.
- 2) Identificación de las zonas sismogénicas y la determinación de la magnitud del terremoto máximo potencial que pueden generar las mismas ( $M_{max}$ ).
- 3) Determinación de las funciones de atenuación de las ondas sísmicas.
- 4) Aplicación del algoritmo matemático seleccionado para el cálculo del peligro.

La caracterización de la sismicidad se realiza a partir de los datos del catálogo de terremotos de la respectiva región. Se pueden confeccionar algunos mapas básicos de gran utilidad como los de epicentros, densidad de epicentros, actividad sísmica y otros, así como gráficos de magnitud-frecuencia, cuya pendiente e intercepto constituyen parámetros fundamentales para los estudios del régimen sísmico de una región y de una zona sismogénica en particular.

La identificación y el trazado de las zonas sismogénicas (zonas donde con mayor probabilidad deberán ocurrir los terremotos), consiste en el análisis conjunto de información geológica, geomorfológica, geodésica, geofísica y sismológica.

Para determinar las funciones de atenuación se pueden utilizar algunos de los modelos existentes así como formulaciones generales. No obstante, estas determinaciones son más realistas si se cuenta con mapas de isosistas de terremotos ocurridos en el pasado y se estudian las características propias de la atenuación en la región objeto de estudio.

Por ejemplo, en Cuba se utilizó un procedimiento específico para el análisis de los datos macrosísmico basado en el estudio de los patrones de isosistas de los terremotos de las Antillas Mayores: Cuba, Jamaica, Haití y República Dominicana.

Los mapas de zonificación del peligro sísmico pueden ser de varios tipos, en función de sus objetivos y escala. Los mapas regionales que incluyen territorios extensos (países), se confeccionan a escalas entre 1:2 500 000–1:250 000. Estos mapas permiten una planificación correcta y racional de las nuevas inversiones en el ámbito nacional, y constituyen la base fundamental de los documentos normativos que regulan la construcción en las zonas sísmicas de edificios destinados a viviendas y otras instalaciones que no posean requerimientos especiales.

Existen otras edificaciones que por su tamaño, función, área de servicio o singularidad, pueden ocasionar daños corporales o afectar actividades vitales si sus servicios son repentinamente interrumpidos. Estas edificaciones reciben el nombre de instalaciones críticas. Algunos ejemplos de este tipo de instalación son las industrias que almacenan sustancias radioactivas, tóxicas, corrosivas e inflamables; los hospitales y otros centros de salud que deben mantener su operatividad en casos de emergencias; las líneas de suministro de agua, gas y electricidad; las instalaciones de seguridad pública y defensa que tienen como objetivos mantener el orden y la seguridad ciudadanas y las edificaciones de alta densidad de ocupación como los hoteles, teatros, cines, comercios, etc.

Los mapas de zonificación sísmica a escala regional, no permiten obtener estimados del peligro específico para las instalaciones críticas. En las áreas de futuro emplazamiento de estas estructuras se debe realizar una evaluación detallada del peligro sísmico que en ocasiones incluye investigaciones de microzonificación sísmica para determinar los efectos locales de amplificación de las ondas sísmicas, en función de las características geológicas del sitio de emplazamiento. Esto implica que el diseño y construcción de obras de gran envergadura como el metro de una ciudad, una central termoeléctrica, una zona portuaria, etc., conlleva la realización de un estudio sismológico de gran complejidad.

Luego de estimar el peligro sísmico de un territorio, es necesario establecer un inventario de los edificios, previendo la manera en que cada uno de ellos soportará el movimiento sísmico de acuerdo con su estructura y los materiales utilizados para su construcción. Estas evaluaciones las realizan los ingenieros y arquitectos, y forman parte de los estudios de vulnerabilidad sísmica. También sirven de base para determinar el riesgo sísmico que se expresa, en función de las pérdidas materiales o de vidas humanas que ocasiona un terremoto de determinada intensidad.

**El peligro sísmico en Cuba**

Desde finales de la década del 60 hasta el presente la peligrosidad sísmica en Cuba se viene estudiando sistemáticamente. Como resultado de ello, es el conjunto de mapas que no solamente tienen valor científico, sino también práctico para los trabajos de ingeniería. A continuación se presenta un resumen con los aspectos más importantes de estas investigaciones.

El primer mapa de zonificación sísmica de Cuba se publicó en 1970 en el Atlas Nacional de Cuba con el nombre de «Mapa de Intensidades Sísmicas de Cuba». En ausencia de una red sismológica este mapa contenía datos históricos de terremotos perceptibles ocurridos en el territorio nacional desde el siglo XVI hasta finales de la década del 60.

Más tarde, entre 1980 y 1983 se confeccionó un nuevo mapa en el que se incluyeron nuevos datos de terremotos perceptibles y fuertes ocurridos en el país, así como alguna información geológica y tectónica adicional. Para obtener esta primera generación de mapas no se delimitaron zonas sismogénicas ni se realizaron estimados cuantitativos del peligro sísmico. La información geológica y tectónica se utilizó sólo para delimitar las fronteras de las zonas de diferentes intensidades representadas en ellos. El mapa concluido en 1983, sirvió de base a la Norma Cubana para la Construcción en Zonas Sísmicas publicada en 1985. Para confeccionar los mapas se usó una metodología esencialmente determinística, basada en la ocurrencia histórica de fenómenos extremos.

Los mapas de peligro sísmico de segunda generación se comenzaron a confeccionar a partir de 1985. Para calcular los estimados del peligro se utilizaron diferentes algoritmos probabilísticos, y por primera vez se utilizó el llamado método zonificado. Este esfuerzo derivó en mapas de intensidades para diferentes períodos de recurrencia y mapas de probabilidades de no excedencia de ciertos valores de intensidad (o aceleración) de los movimientos del terreno para diferentes tiempos de espera. Dos versiones de este tipo de mapas aparecieron publicadas en 1989, en el Nuevo Atlas Nacional de Cuba con el nombre de «Intensidades para períodos de recurrencia de 100 y 1000 años».

En 1995 se confeccionó una nueva versión del mapa de zonificación sísmica del territorio nacional, expresado en términos de la aceleración pico horizontal del movimiento del terreno (Fig. 35). Este mapa sirvió de base a la Norma Cubana para la Construcción en Zonas Sísmicas publicada en 1996 (Fig. 36). Este documento rige actualmente la construcción en las zonas sísmicas del país.

En el año 2002 se comenzó a obtener una tercera generación de mapas probabilísticos del peligro sísmico con los correspondientes errores asociados. Para ello se utilizaron tanto métodos zonificados como no zonificados, y algoritmos de cálculo muy sofisticados, en concordancia con los enormes avances experimentados por los métodos computacionales a finales del siglo XX. Esto ha posibilitado que se cuente en la actualidad con estimados más confiables del peligro sísmico, y un mapa de zonificación sísmica del territorio nacional. Un ejemplo de mapas de peligro sísmico perteneciente a la tercera generación, que utilizan el

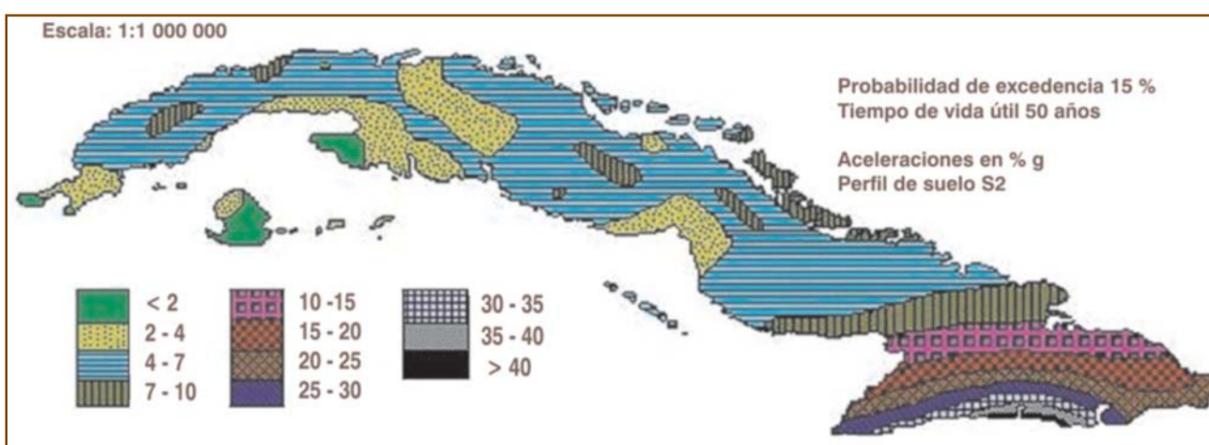


Fig. 35. Mapa de peligro sísmico que sirvió de base para la norma sísmica.



Fig. 36. Mapa de la norma sísmica vigente.

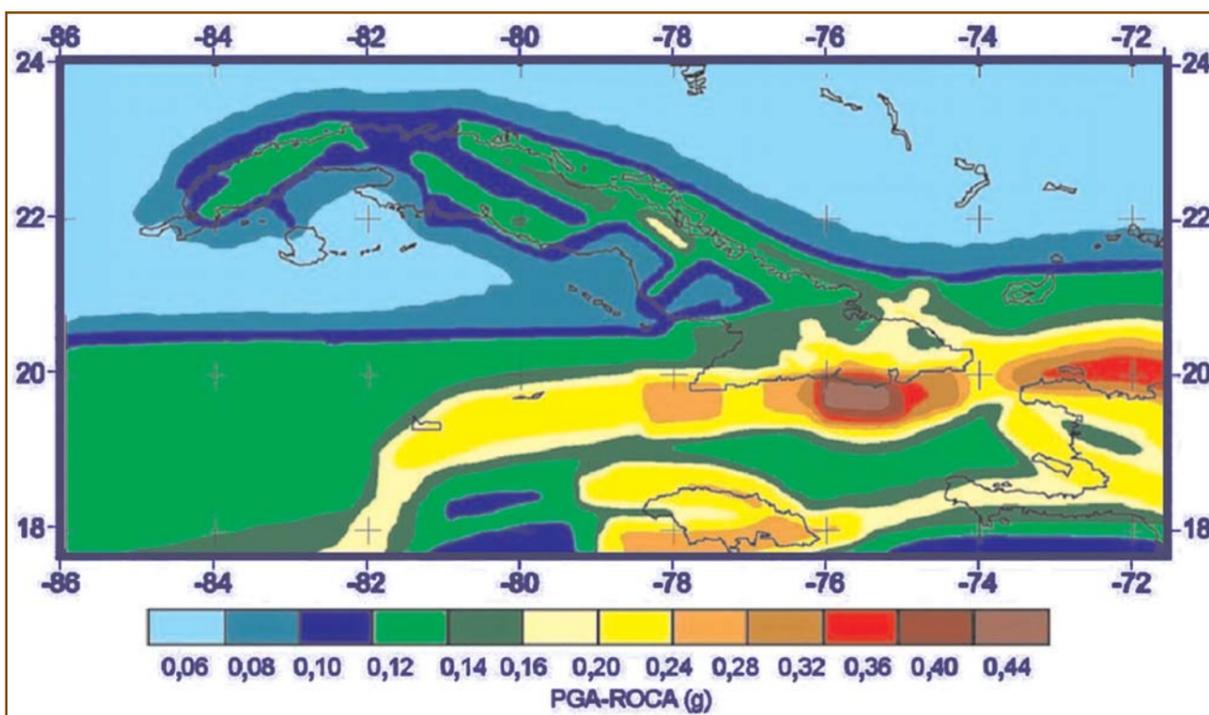


Fig. 37. Estimados probabilísticos del peligro sísmico para Cuba. Aceleración pico esperada con período de retorno de 475 años.

método zonificado, se muestra en las Figs. 37-39.

Paralelamente a los estudios de peligro sísmico a escala nacional, se obtuvieron algunos estimados de peligro sísmico detallado,

específicamente para la Ciudad de Santiago de Cuba. De igual forma se han realizado estudios muy rigurosos en las áreas de emplazamiento de algunas obras de importancia capital e instalaciones críticas en diversas partes del país.

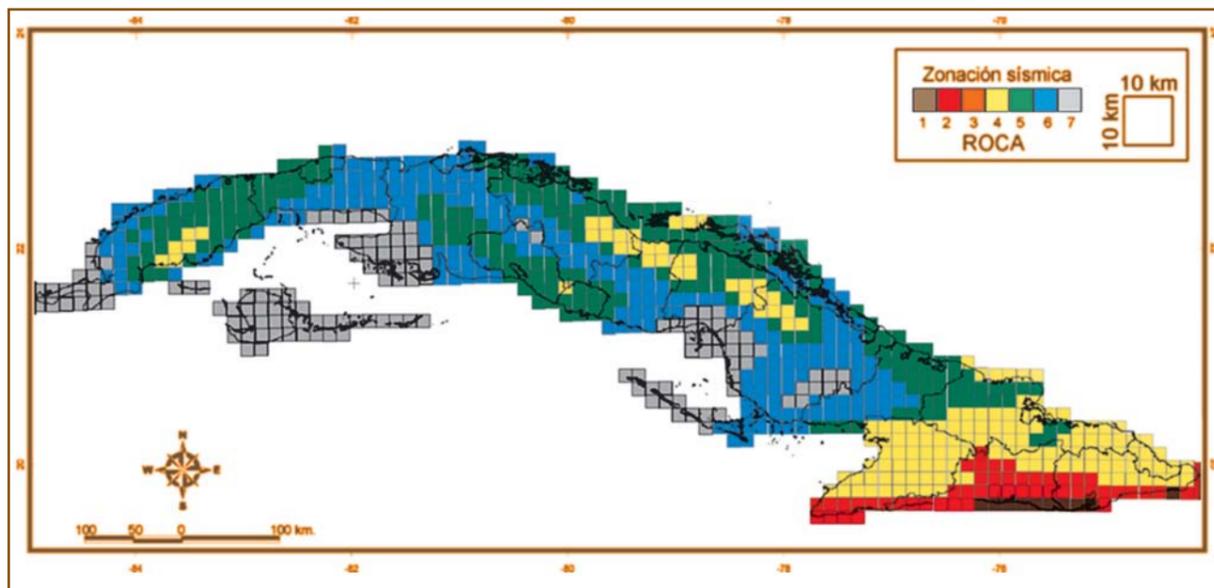


Fig. 38. Zonación sísmica de Cuba. Se muestra el territorio nacional dividido en 7 zonas con comportamiento similar del peligro sísmico.

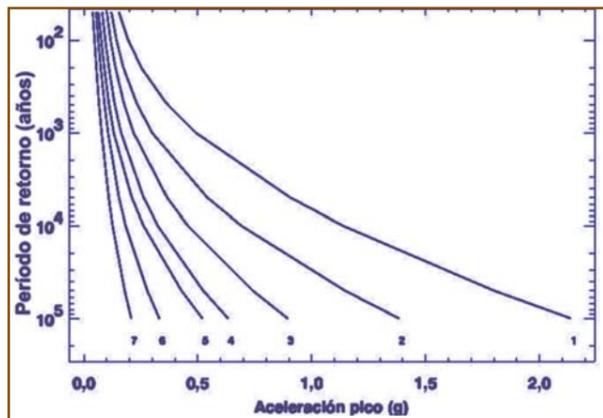


Fig. 39. Curvas de peligro (período de retorno vs. aceleración pico) para cada zona presentada en la figura anterior. Los números dentro de la figura corresponden a la zona indicada en dicha figura.

#### Peligro sísmico a escala urbana: microzonificación sísmica

La intensidad y la aceleración de los movimientos sísmicos en la superficie del terreno y los daños en las edificaciones disminuyen con la distancia al epicentro del sismo. Sin embargo, aún en áreas muy pequeñas, donde las distancias epicentrales son prácticamente iguales, existen variaciones considerables en los efectos de estos fenómenos naturales. Estas diferencias se deben a la variabilidad en las condiciones locales de los suelos. Aunque se pudiera pensar en un comportamiento homogéneo de los efectos del sismo en una ciudad, cuyas dimensiones son muy pequeñas en relación con la distancia al epicentro, en realidad no es así. Las características geológicas del área donde está enclavado cada grupo de edificaciones tienen una enorme influencia. Por eso una foto aérea de una zona de desastre muestra diferencias asombrosas. Esto hace que se le preste especial atención al estudio detallado de los posibles efectos de un terremoto en un área urbana determinada. Todo ello contribuye de forma notable a la disminución de la vulnerabilidad de las edificaciones, así como del riesgo urbano.

La zonificación del peligro sísmico a escalas muy detalladas (1:25 000-1:5 000), donde se tiene en cuenta el efecto de la geología superficial en los movimientos sísmicos recibe el nombre de microzonificación sísmica. Mediante estudios de este tipo, se delimitan zonas dentro de un asentamiento urbano en las que se pronostican efectos diferentes (mayores o menores) como

consecuencia de un terremoto de gran intensidad.

Para realizar las investigaciones de microzonificación sísmica se utilizan métodos directos e indirectos. Los métodos directos consisten en la comparación de los registros de terremotos reales, obtenidos en una zona determinada que se toma como referencia con los registros en otras zonas con condiciones geológicas diferentes.

Los métodos indirectos consisten en la comparación de las condiciones geotécnicas de las diferentes partes del área de estudio, en la comparación de los registros de microsismos o explosiones en diferentes condiciones geológicas, y en la modelación de las ondas sísmicas.

El mejor procedimiento para obtener la respuesta del suelo a los terremotos en un sitio particular, se obtiene mediante las observaciones de los movimientos del terreno durante un terremoto real. Sin embargo, para obtener información suficiente, representativa de todas las fuentes sísmicas que influyen en el peligro de un asentamiento urbano, este procedimiento sólo se justificaría en zonas con alta sismicidad, como algunas regiones de Japón o del oeste de los Estados Unidos.

En Cuba, por tratarse de un país de sismicidad moderada en su zona oriental y baja en el resto del territorio, y donde la potencialidad de ocurrencia de un terremoto fuerte es significativa, se utilizan mayormente los métodos indirectos de forma combinada. La selección del complejo de métodos a utilizar, depende de la estructura geológica y de las condiciones geotécnicas específicas del área urbana. Está claro que todo está en dependencia de la disponibilidad de información fiable.

En el mundo moderno, los mapas de microzonificación sísmica son fundamentales en el planeamiento urbano, dirigido a la reducción del riesgo en el cálculo y diseño de las nuevas es-

tructuras y en el reforzamiento de las edificaciones existentes para hacerlas menos vulnerables a los terremotos. Es inimaginable toda la actividad económica que gira alrededor de las construcciones industriales o de las llamadas inmobiliarias, incluida la actividad de seguros, sin tener en cuenta riesgos como el sísmico.

Los resultados de los estudios de microzonificación sísmica pueden brindar criterios que permitan, en la fase de prevención, priorizar la intervención en las edificaciones en dependencia de su tipología constructiva, estado técnico y características del sitio donde se encuentran ubicadas.

#### Ejemplos de microzonificación sísmica en áreas urbanas de Cuba

Los estudios de microzonificación sísmica comenzaron de forma sistemática, a finales de la década del 70 en la provincia de Santiago de Cuba, sin dudas la de mayor riesgo sísmico del país. Posteriormente, estos estudios se extendieron a otros asentamientos urbanos de la región oriental como Guantánamo, Palma Soriano, San Luis y Bayamo.

Por sus características específicas y alto nivel de vulnerabilidad de los asentamientos, se realizan actualmente investigaciones similares en las zonas más densamente urbanizadas y pobladas de Ciudad de La Habana (municipios Centro Habana, Habana Vieja, Cerro, 10 de Octubre y Playa). Los estudios realizados consisten fundamentalmente, en el análisis y comparación de la geología superficial y de las características ingeniero-geológicas e hidrogeológicas de los suelos y rocas en las diferentes partes del área urbana. Paralelamente, se han realizado mediciones de microsismos de período corto para evaluar la respuesta de los suelos a los diferentes tipos de sismos con posibilidad de afectar estas áreas.

En la última década, se han introducido métodos teóricos de modelación de las ondas sísmicas en las investigaciones de microzonificación. Ello ha permitido validar y perfeccionar los resultados anteriores, mediante métodos experimentales en Santiago de Cuba. Las Figs. 40 y 41 muestran ejemplos de los mapas de microzonificación.

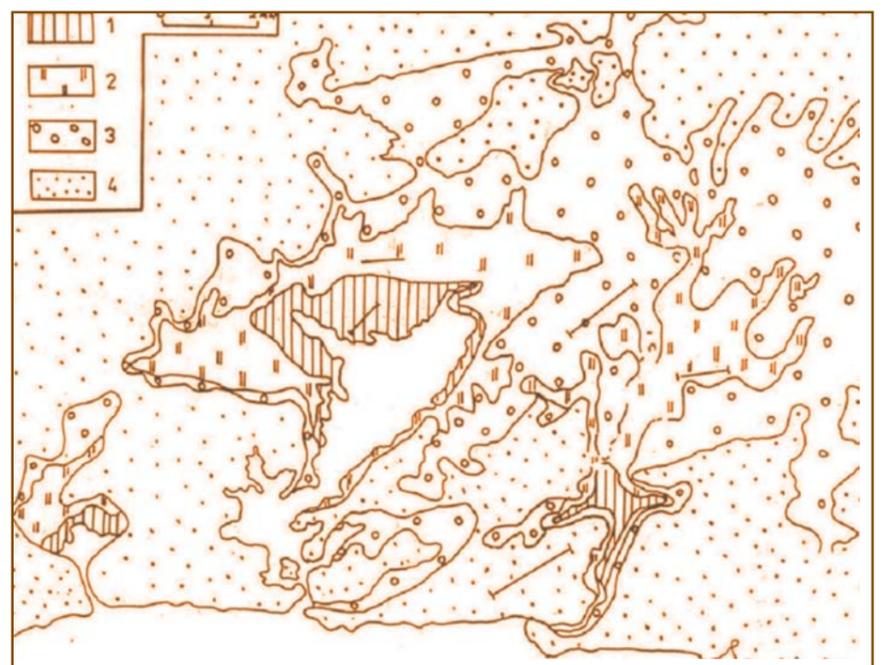


Fig. 40. Mapa de microzonificación sísmica de Santiago de Cuba: (1) zona muy desfavorable; (2) zona desfavorable; (3) zona con suelo promedio; (4) zona favorable.

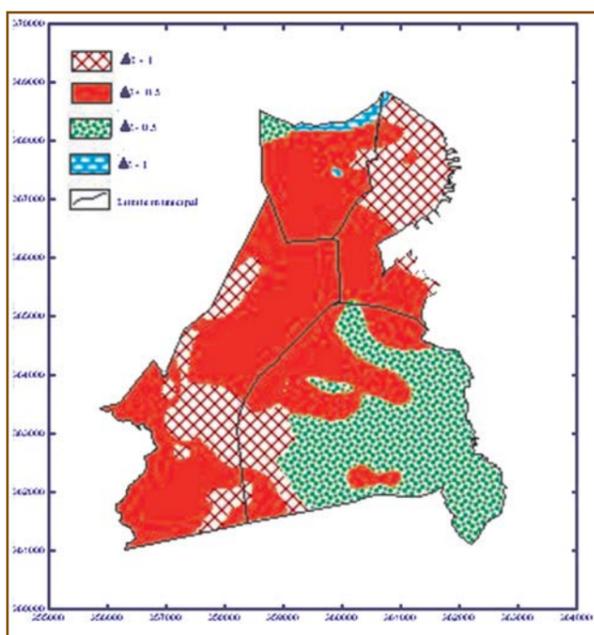


Fig. 41. Mapa de microzonificación sísmica de municipios de Ciudad de La Habana.

**Peligros geológicos inducidos por los terremotos**

La ocurrencia de desastres de gran magnitud tiene la característica muy negativa de generar nuevas situaciones desastrosas. En este aspecto los terremotos no constituyen una excepción. Los sismos pueden inducir o servir de disparador de otros peligros geológicos de gran poder destructivo como:

1. El fallamiento superficial o apertura del material en la superficie terrestre en forma de grietas gigantescas.
2. Las fallas en los taludes naturales o artificiales debidas a las sacudidas del terreno en áreas inestables o con una topografía relativamente escarpada.
3. La licuación del material no consolidado debida al sacudimiento del suelo.
4. La subsidencia o depresión de la superficie del terreno como resultado del asentamiento de los sedimentos blandos.
5. Los tsunamis generados por la actividad sísmica submarina.

**La licuación del suelo o licuefacción**

La licuación es el proceso mediante el cual el suelo pierde su resistencia y se convierte en un fluido viscoso. Esto ocurre debido al exceso de presión del agua contenida en los poros de las rocas, generado por las deformaciones cíclicas durante la ocurrencia de terremotos de gran intensidad (Fig. 42).

La licuación de los suelos está determinada por la combinación de dos tipos de factores: internos y externos.

Los factores internos son los que caracterizan la tendencia (susceptibilidad) del suelo a licuarse: constitución litológica, tamaño de los granos, edad geológica, relieve y profundidad de las aguas subterráneas.

El factor externo es el sismo, que debe poseer una energía mínima para servir de efecto disparador del fenómeno.

Las secuencias geológicas más susceptibles a sufrir los fenómenos de licuación son las más jóvenes, es decir aquellas formadas por sedimentos aluviales, lacustres, litorales y por materiales de relleno saturados. Aunque originalmente se creyó que estos fenómenos se producían sola-



a)



b)

Fig. 42. Afectaciones debidas al fenómeno de licuación del suelo: a) terremoto de Northridge, California, Estados Unidos (1989), b) terremoto de Santiago de Cuba (1932).

mente en suelos arenosos, se comprobó que se producían también en otros tipos de suelos. Ello hizo que aumentara su importancia en la ingeniería sísmica y especialmente, en la ingeniería de cimentaciones. El tema es también importante en la construcción de ferrocarriles subterráneos de ciudades (metros) en los que, en algunos casos, el fenómeno de la licuación puede generar situaciones muy dramáticas como fue en el metro de Leningrado (hoy San Petesburgo), felizmente resuelto.

La licuación del suelo produce diferentes tipos de daños en las estructuras constructivas por la pérdida de la capacidad portante de los suelos de cimentación, lo que conlleva a su asentamiento, basculamiento y vuelco. Durante los terremotos del 16 de junio de 1964 (M = 7,5) en la ciudad de Niigata, Japón y del 27 de marzo de 1964 (M=8,6) en Anchorage, Alaska se observaron evidentes manifestaciones del efecto destructivo de la licuación de los suelos.

Importantes daños en los cimientos de las edificaciones y en las redes técnicas ocurren también debido al desplazamiento lateral del suelo, forma particular de manifestarse el fenómeno de la licuación.

Es esencial evaluar la máxima extensión del efecto de licuación, o sea la distancia máxima,

medida desde el epicentro del terremoto a la cual se puede manifestar este fenómeno. La evaluación se realiza a partir de los datos de las observaciones de campo realizadas después de la ocurrencia de los terremotos. Del análisis estadístico de estas observaciones se concluye que la licuación en áreas susceptibles se puede producir por terremotos de magnitudes mayores o iguales que 6,0 en la escala de Richter, e intensidades mayores que VII en las escalas M.S.K. o de Mercalli Modificada (MM).

En Cuba, el fenómeno de la licuación no es frecuente ni significativo, ya que las condiciones particulares para que se produzca no se dan comúnmente. Sin embargo, estudios realizados recientemente en la Ciudad de Santiago de Cuba con vistas a obtener el mapa de riesgo sísmico de su territorio, muestran que en algunas zonas de la ciudad, específicamente en la zonas de la Alameda y De Desembarque del Muelle, se pudo haber desencadenado este fenómeno como consecuencia del fuerte terremoto del 3 de febrero de 1932 (M = 6,8; I<sub>0</sub>=VII) (Fig. 42b).

**Deslizamientos**

Las fallas de taludes durante los terremotos (deslizamientos, desprendimientos de rocas, etc.) han ocasionado muchas pérdidas de vidas y causado importantes daños en las estructuras e instalaciones construidas sobre o muy cerca de las pendientes. La magnitud de los deslizamientos en las pendientes naturales puede ser tan grande que devastaría pueblos enteros.

La inestabilidad de los taludes depende de dos factores fundamentales: la presencia de una fuerza externa motriz, y la resistencia de los materiales al movimiento. La fuerza externa está compuesta por la gravedad y la fuerza sísmica, mientras que la resistencia del material está determinada por las condiciones geomorfológicas, geológicas y geotécnicas imperantes.

Es importante, al igual que en la licuación, conocer la extensión o distancia epicentral máxima del sismo hasta la que se puede manifestar el fenómeno. Para ello se utilizan también los criterios de magnitud-distancia e intensidad-distancia, basados en información de terremotos pasados. El fenómeno ocurrirá sólo en una zona donde concurren los factores de susceptibilidad: relieve, litología, agrietamiento, humedad, etc.

Sobre la base de numerosas observaciones, se ha determinado que la magnitud mínima a partir de la cual los sismos pueden constituir factores desencadenantes de los deslizamientos de terreno es de 5,5. La distancia máxima (o extensión máxima) depende de la magnitud. Por ejemplo en un gran terremoto de magnitud M = 8,0 esta distancia puede sobrepasar 200 km. La intensidad mínima en las escalas M.S.K. o Mercalli Modificada para la que pueden ocurrir deslizamientos es de V grados.

En Cuba, el principal factor causante de los deslizamientos de terreno es la lluvia que se manifiesta con mayor frecuencia como factor desencadenante que los terremotos de gran intensidad. Es notorio el efecto muy marcado que en algunas zonas de la Sierra Maestra, tuvieron las grandes inundaciones provocadas por el paso del huracán Flora (1963). Sin embargo, en esta misma zona también se han observado deslizamientos de terreno asociados a los fuertes terremotos de Pílon del 19 de febrero de 1976

(M = 5,9; lo = VIII) y de Cabo Cruz del 25 de mayo de 1992 (M = 6,9; lo = VIII).

### Tsunamis

Los tsunamis son olas marinas que se generan por el movimiento vertical súbito del lecho oceánico como consecuencia de un terremoto, una erupción volcánica submarina o un deslizamiento de tierra. Para que se genere un tsunami es necesario que se produzca una perturbación en el fondo del océano que sea capaz de desplazar verticalmente una gran masa de agua, del orden de los kilómetros cúbicos, de su posición de equilibrio. La descripción geométrica de un fenómeno de este tipo es relativamente muy simple, lo que ha permitido reproducirlos en laboratorios hidráulicos especializados, controlados con ayuda de la computación, de manera que se tiene una idea muy aproximada de sus consecuencias.

Las olas del tsunami viajan a una velocidad que depende de la profundidad del agua. A gran profundidad en el océano abierto, su velocidad puede alcanzar 700 km/h o más. Cuando la profundidad del agua disminuye el tsunami comienza a trasladarse más lentamente.

El flujo de energía de un tsunami, que depende tanto de su velocidad como de su altura, permanece aproximadamente constante. Como consecuencia, cuando la velocidad disminuye al viajar por aguas poco profundas su altura aumenta. Por ello, un tsunami que resulta imperceptible mar adentro puede crecer en altura varios metros o más en las zonas costeras.

Al igual que otros tipos de olas los tsunamis comienzan a perder energía al penetrar tierra adentro. Esto se debe a que una parte de la energía de la onda se refleja, mientras que la otra parte se disipa por la fricción del fondo y la turbulencia. A pesar de estas pérdidas los tsunamis llegan a la costa con una enorme cantidad de energía.

Estos fenómenos de naturaleza geológica poseen, entre otras características, un gran potencial erosionante. La arena de las playas que tarda años en acumularse, así como los árboles y la vegetación costera, pueden ser totalmente arrasados.

Las inundaciones se pueden extender cientos de metros de distancia tierra adentro. Como consecuencia, el rápido movimiento del agua puede destruir viviendas y otras instalaciones costeras y acabar con la vida de cientos o miles de personas.

Los tsunamis pueden alcanzar una altura vertical sobre el nivel del mar (run-up height) hasta 30 m y propagarse distancias enormes en pocas horas.

De acuerdo con la altura de la ola y la magnitud de sus efectos, los tsunamis se clasifican en seis categorías a las que les corresponden intensidades (categorías) entre I y VI, respectivamente (Anexo 2).

El terremoto de Chile de 1960, el mayor de los registrados instrumentalmente, con una magnitud de 9,5, generó un tsunami que atravesó todo el Océano Pacífico, ocasionando la muerte de 200 personas en Japón a casi 17 000 km de distancia de la fuente generadora.

Otro gran terremoto que ocasionó un tsunami en la costa pacífica de América del Norte, fue el de Anchorage, Alaska de 1964. Este terremoto también tuvo una magnitud superior a 9,0. Los daños materiales ocasionados por el tsunami

fueron cuantiosos, aunque las pérdidas de vidas fueron menores por lo escasamente poblada que se encuentra esta zona.

Los terremotos que generan tsunamis se denominan tsunamigénicos. El mecanismo de generación es el siguiente: la columna de agua se disloca por el ascenso o la subsidencia del fondo oceánico. Este ascenso súbito de una gran masa de agua, provoca un desequilibrio que es el generador del tsunami. Además, los deslizamientos de tierra submarinos que con frecuencia acompañan a los grandes terremotos, así como el colapso de las estructuras volcánicas, pueden también modificar la columna de agua suprayacente. En este caso, los sedimentos y rocas caen pendiente abajo y son redistribuidos en el fondo oceánico.

Los tsunamis generados por grandes terremotos, como los de los océanos Pacífico e Índico, suelen afectar líneas costeras muy distantes de la fuente del sismo. Por ello, estos eventos reciben el nombre de tsunamis globales o teletsunamis.

Tras un desastroso tsunami que ocurrió en 1946 en el océano Pacífico, con un enorme impacto en la opinión pública mundial, y por acuerdo de varias naciones como Estados Unidos y Japón, se creó un sistema de alerta temprana que desde el primer momento abarcó la totalidad del Pacífico. Se partió del presupuesto de que era la zona más proclive a sufrir este tipo de embate. Desafortunadamente, se subestimaron las vulnerabilidades a sufrir este tipo de evento desastroso de otras zonas, como el Océano Índico y la Cuenca del Mar Caribe. La idea básica sobre la que se desarrolló el sistema de alerta temprana, con el que hoy se cuenta en el Pacífico es la siguiente: los sismógrafos instalados en los observatorios sismológicos de la región y los detectores de tsunamis, dan la alerta en cuanto observan signos premonitorios. La información recogida se transmite al observatorio central en Honolulu, Hawai, que se encarga de evaluar la amenaza y lanzar las señales de alerta en caso necesario.

Sin embargo, tras el devastador tsunami de diciembre del 2005 del Océano Índico, que cobró 300 000 víctimas fatales, se comenzó a extender también el sistema de alerta temprana a esta zona geográfica.

En la región del Caribe han ocurrido tsunamis regionales de menor envergadura que los del Pacífico, causados por terremotos ocurridos en el Arco de las Antillas Menores, Haití, el noreste de República Dominicana, Puerto Rico y Jamaica. A pesar de que ocurrieron afectaciones importantes en las costas cercanas a la fuente de estos sismos, en Cuba hasta el momento no se han reportado daños ocasionados por ellos.

Sin embargo, el gran terremoto de Lisboa de 1755 generó un teletsunami que al parecer, produjo algunas afectaciones en la región suroriental de Cuba. Además, existen reportes de un fuerte oleaje en las playas del litoral norte del centro y occidente del país, como consecuencia del terremoto del 4 de agosto de 1946 que tuvo su epicentro al noreste de República Dominicana. Este sismo fue el de mayor magnitud de los registrados instrumentalmente en la región del Caribe (M = 7,9).

La zona sismogénica principal de Cuba que afecta su región sudoriental, es una falla

transcurrente con movimiento lateral izquierdo, es decir que por su desplazamiento geométrico no favorece la generación de un tsunami.

La mayoría de los tsunamis se asocian a los desplazamientos producidos por fallas inversas como las de las márgenes de placas convergentes (zonas de subducción). Este tipo de fallas afecta significativamente la costa occidental de América del Norte, América Central y América de Sur. En la Fig. 43 se muestran dos ejemplos de los impactos de un tsunami sobre zonas costeras.

### VULNERABILIDAD SÍSMICA

La vulnerabilidad sísmica se define como la susceptibilidad de un elemento (o grupo de elementos expuestos), a sufrir daños ante un determinado nivel de la amenaza sísmica. Los elementos expuestos son las personas, las edificaciones, las instalaciones críticas, las redes técnicas, etc. La vulnerabilidad sísmica se define por lo general en términos probabilísticos. Alternativamente, la vulnerabilidad también se puede definir en función de los daños materiales, pérdidas de vidas humanas o personas lesionadas como consecuencia de un nivel específico de la amenaza o peligro.

Los daños en las edificaciones por los efectos de un sismo, se deben a las fuerzas de inercia que se aplican sobre ellas. También se pueden deber a fallas en los cimientos como consecuencia de los peligros inducidos por los movimientos sísmicos o a la interacción destructiva de unas edificaciones con otras.

La vulnerabilidad de las edificaciones recibe el nombre de vulnerabilidad física. Esta a su vez se subdivide en vulnerabilidad estructural, no estructural y funcional.

Los elementos estructurales de una edificación son aquellos que deben soportar las cargas para las cuales se diseñaron: el peso, las cargas de viento y las cargas sísmicas. Estos elementos son las vigas y las columnas y en ocasiones, los paneles y el relleno de mampostería. Por otra parte, los elementos no estructurales de un edificio son las ventanas, los falsos techos, los aditamentos ligeros y los parapetos o pretilas. Con frecuencia, los paneles y el relleno de mampostería se consideran elementos no estructurales.

Los elementos no estructurales pueden sufrir daños debido al movimiento de la armazón o estructura a la que se encuentran anclados, a las fuerzas de inercia o a una combinación de ambos factores. Su comportamiento es importante no sólo por su función específica y costo de reposición, sino también por el daño que puede ocasionar su caída. Además, pueden bloquear las rutas de escape, que son esenciales para la supervivencia después del terremoto. Sin embargo, la mayor amenaza para la vida está determinada por el colapso estructural y en menor medida, por los elementos no estructurales.

El contenido de los edificios se puede dañar también como consecuencia de un terremoto. Este puede poseer un valor tan alto o incluso mayor que el del propio edificio como los bancos, los laboratorios, los centros de cálculo, los hospitales, las galerías de arte, y museos que en ocasiones atesoran obras de inestimable valor, las cuales no se podrían reponer.

Una causa frecuente de daños se debe a la interacción mutua entre edificios cuando la se-



Fig. 43. Impactos ambientales de los tsunamis. El contraste es elocuente: a la izquierda una zona de un marcado verdor donde la vida transcurre felizmente, a la derecha tierra arrasada.

de madera que se han comportado satisfactoriamente ante los embates de los terremotos.

La antigua casa del Gobernador Diego Velásquez en Santiago de Cuba, considerada como la más antigua del país, ha soportado muy bien los efectos de varios terremotos de gran intensidad que afectaron a esta ciudad desde el siglo XVI. Esto se debe a su diseño estructural y a los materiales utilizados en su construcción.

### EL RIESGO Y LOS DESASTRES DE ORIGEN SÍSMICO

El riesgo es producto de la interacción de los factores de amenaza y de vulnerabilidad. Es un parámetro dinámico y cambiante como lo son también sus componentes. No se puede describir un escenario en riesgo como algo estático, sino como un proceso en

transformación. Además, el riesgo es diferenciado y posee un carácter eminentemente social,

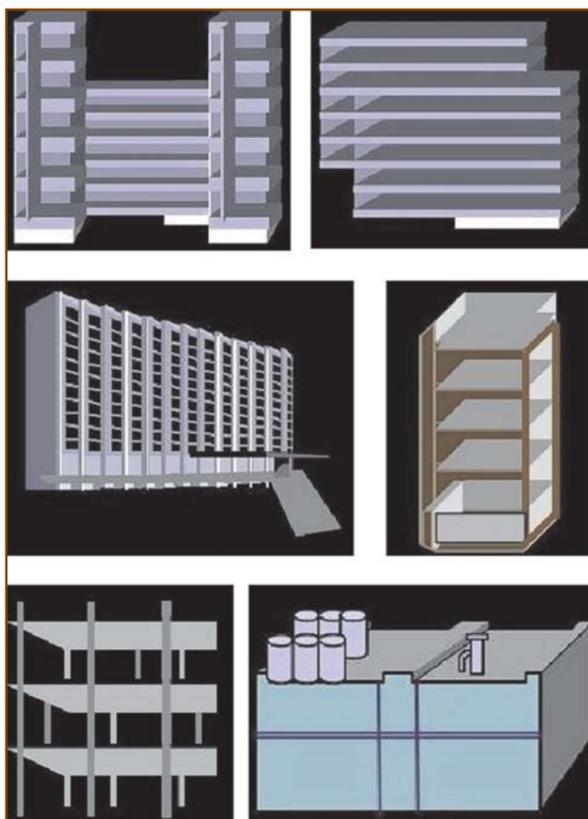


Fig. 44. Edificaciones no recomendables en las zonas sísmicas.

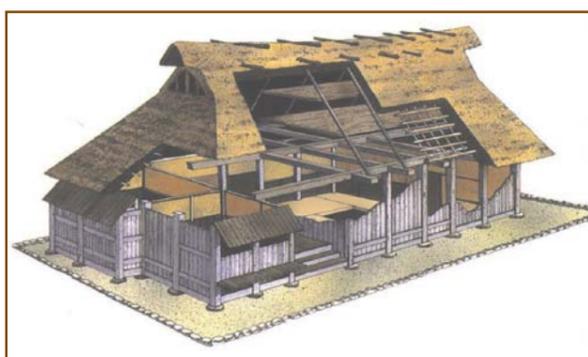


Fig. 45. Casa tradicional japonesa.

paración entre ellos es insuficiente. La diferencia de altura entre las edificaciones colindantes puede conducir a un comportamiento dinámico indeseable que constituye también causa frecuente de daños.

Las irregularidades en los edificios, tanto en planta como en elevación, son la causa de un pobre comportamiento dinámico que trae como consecuencia daños graves. En particular, los apéndices en los techos como tanques, parapetos, etc. poseen un mal comportamiento en casos de terremotos. En las estructuras diseñadas con excentricidades en la distribución de su masa o rigidez se pueden generar grandes fuerzas de torsión. Algunas configuraciones en planta poco resistentes a las fuerzas de torsión son en «H, L y U». Por esta razón, no se recomiendan en las zonas sísmicas.

En la Fig. 44 se muestran algunos edificios con una configuración irregular, cambios abruptos en su rigidez lateral o de forma inusual, presentando un mal comportamiento en las zonas sísmicas.

El hombre desde los albores de la civilización, ha diseñado y construido sus viviendas con ciertos elementos que las hacen más resistentes a los terremotos. Por ejemplo en Japón, país con alta sismicidad, las casas tradicionales se construían de madera (Fig. 45). Poseían por lo general, un techo bajo y una estructura especialmente flexible, gracias a la utilización del bambú y el papel de cáscara de arroz en las paredes interiores. La elasticidad conferida por estos elementos limitaba los daños causados por los terremotos y el viento. Lamentablemente, los efectos indirectos del gran terremoto de Tokio de 1923, como un incendio de grandes proporciones, provocaron la destrucción de gran parte de las viviendas de madera que existían en la ciudad.

En algunos países de América Central y del Sur vulnerables a los terremotos se han construido viviendas de adobe con elementos flexibles

no afecta por igual a todas las personas, ni a todos los municipios y comunidades. El riesgo surge del proceso de interacción continua y permanente de la comunidad con su entorno. Otro aspecto importante es la percepción del riesgo que tengan las diferentes capas sociales. El triste ejemplo del desastre de New Orleans con las inundaciones producidas por el huracán Katrina, muestra que no todos los miembros de la comunidad de una nación, provincia o municipio poseen la misma percepción del riesgo. El desarrollo de una buena percepción del riesgo por parte de una comunidad es un factor esencial.

Para estimar el riesgo sísmico de un territorio se requiere de un enfoque multidisciplinario, cuyo alcance depende de la disponibilidad de información sobre el peligro a que está sometido y de la vulnerabilidad de sus diferentes elementos. Las actividades relacionadas con la estimación y gestión del riesgo deben estar estrechamente ligadas al planeamiento del uso del suelo, es decir a la forma en que se distribuyen las edificaciones en el área disponible. Todo ello, para implementar prácticas de mitigación en el nivel fundamental o básico de desarrollo. Solamente a este nivel el proceso de mitigación es realmente efectivo.

### Importancia de las experiencias pasadas y de la memoria histórica

Los registros previos de los desastres de origen sísmico son imprescindibles en los procesos de evaluación, mitigación y gestión del riesgo de un territorio. Se deben conservar en forma de bases de datos accesibles para todos los profesionales involucrados en estos estudios. La información que deberá conformar la base de datos puede proceder de fuentes diferentes: periódicos, revistas, fotografías, fotos aéreas, mapas temáticos u otros materiales.

Una valiosa fuente de información son las evaluaciones de los daños directos producidos por los terremotos históricos y recientes. La única limitante que presentan estas evaluaciones, principalmente las fuentes históricas, se relaciona con los cambios a lo largo del tiempo de las tipologías constructivas. Significa que los datos sobre los daños en los edificios de mampostería de una o dos plantas no pueden brindar información sobre el comportamiento de edificios altos modernos fabricados con estructuras de acero.

Cuando ocurrió el terremoto del 3 de febrero de 1932 en Santiago de Cuba, no existían los edificios de las tipologías constructivas IMS, Gran Panel, E14, Girón, etc., que hoy tienen una significativa presencia en el territorio de la ciudad. Algunas de estas tipologías como la IMS, importada de la antigua Yugoslavia se diseñaron para resistir sin colapsar, terremotos de intensidades de VII-VIII grados, MSK. Lamentablemente, en Cuba no existe información sobre el comportamiento de estos edificios ante terremotos de gran intensidad. Igualmente ocurre con los edificios del Sistema Gran Panel Soviético.

### Los escenarios de daños

Los estudios de escenarios muestran una visión general de todos los aspectos para un potencial desastre, y permiten a los planificadores y decisores prever los posibles problemas que se pudieran presentar en su área de acción, cuando esta se afecte por un terremoto de gran in-

tensidad. Sin embargo, la complejidad del medio construido moderno es tal, que si se destruyen los sistemas de comunicación, si las calles se bloquean debido al colapso de los edificios y los incendios arrasaban con todo lo que encuentran, es difícil de predecir con exactitud su comportamiento futuro.

Los estudios de escenario constituyen proyectos multidisciplinarios muy especializados que se pueden ejecutar con diferentes niveles de precisión. Las salidas de estos proyectos pueden ser de diversos tipos: geográficas (mapas), estadísticas o financieras. El período analizado se puede extender a lo largo de las diferentes etapas del ciclo de los desastres: previa, posterior y de recuperación.

La gestión del riesgo incorpora una serie de medidas de prevención y preparación que están diseñadas para su reducción mediante la disminución de las diferentes vulnerabilidades que se han identificado previamente.

#### El mapa de riesgo sísmico de la provincia Santiago de Cuba

En la provincia Santiago de Cuba se han realizado numerosos estudios científicos con el propósito de prevenir y mitigar el riesgo sísmico de su territorio. Para ello se confeccionó el mapa de riesgo sísmico de la ciudad y sus alrededores, donde están representadas a nivel de manzanas, las pérdidas totales en las viviendas, expresadas en miles de pesos como resultado de un sismo de gran intensidad. Los estimados se obtuvieron teniendo en cuenta el costo de reposición de las edificaciones.

#### Impacto socioeconómico de los desastres de origen sísmico

Los desastres de origen sísmico han producido impactos socioeconómicos muy negativos a lo largo de la historia. Han atentado y atentan contra el desarrollo sostenible de muchas naciones, particularmente las subdesarrolladas.

Las consecuencias de los desastres de origen sísmico conducen a la necesidad urgente de cambiar los paradigmas vigentes, con un mayor énfasis en la prevención y la mitigación.

Estos cambios se relacionan con la creación de una cultura de prevención y reducción del riesgo, en contraposición con el enfrentamiento al desastre. En el caso de los sismos es vital por ser eventos que ocurren de forma súbita e inesperada. Es fundamental realizarle a las nuevas edificaciones un diseño y construcción adecuados, resistentes a los sismos para no invertir tanto en la reparación después de su ocurrencia. Se debe educar y preparar a la población que habita en las zonas vulnerables a estas amenazas naturales; además, prepararla en la gestión del riesgo que tiene como fin, reducir al mínimo la probabilidad de ocurrencia de un futuro desastre.

Los terremotos conllevan un riesgo y pueden generar grandes desastres si no se realizan acciones previas para reducir su vulnerabilidad. Aunque sean provocados por un fenómeno natural los desastres son esencialmente humanos, ya que el hombre es quien contribuye a incrementar su impacto.

En los sismos es prácticamente imposible reducir la amenaza. Sin embargo, el riesgo se puede minimizar con una adecuada planificación y políticas dirigidas a prevenir y reducir la vulnerabilidad.

El riesgo sísmico se puede incrementar de forma sensible con el tiempo, debido a la rápida y descontrolada urbanización, a la proliferación de construcciones mal diseñadas y construidas en lugares inapropiados, a las prácticas ambientales inadecuadas y a una insuficiente infraestructura, entre otras causas.

La frecuencia de los desastres y la magnitud de las pérdidas humanas y materiales han aumentado, llegando estas últimas a quintuplicarse en los últimos cincuenta años. Se estima que anualmente se producen pérdidas superiores a los 2000 millones de dólares y a las 4000 muertes, como consecuencia de los desastres ocasionados por fenómenos naturales en América Latina y el Caribe.

El único aspecto positivo de un desastre es la enseñanza que aporta, ya que permite corregir los errores cometidos en el pasado y prepararse mejor para afrontar el futuro. Por ello, en la etapa de recuperación post-desastre se debe realizar una planificación racional y eficiente de los recursos, de manera que lo que se haga no conduzca a la repetición del estado de vulnerabilidad previa al desastre. Se debe modificar o transformar el escenario bajo riesgo para hacerlo menos vulnerable ante un nuevo fenómeno sísmico.

### PREDICCIÓN DE TERREMOTOS

El gran reto propuesto por los sismólogos de todo el mundo, es y será predecir los terremotos de gran intensidad. Sin embargo, lamentablemente este sueño aún dista mucho de convertirse en realidad. El término predicción no siempre se utiliza de forma precisa y con el rigor requerido. Por esta razón, es conveniente dar una definición formal, sencilla y rigurosa.

Predicción sísmica es la especificación anticipada, dentro de ciertos márgenes pequeños de error de la magnitud, localización del epicentro y momento de ocurrencia de un terremoto específico.

Se realiza una predicción a largo plazo cuando el intervalo de tiempo en que se anticipa la ocurrencia de un terremoto es del orden de las decenas de años.

La predicción se considera a mediano plazo cuando este intervalo temporal es de semanas hasta algunos años, y a corto plazo cuando el intervalo es de horas a semanas.

Para que una predicción se pueda considerar como seria, los márgenes de error aceptables deben ser relativamente pequeños. Por ejemplo, afirmar que en algún lugar de la falla Oriente o Bartlett Caimán, principal zona sismogénica de Cuba va a ocurrir en el futuro un sismo de magnitud entre 5 y 7 resulta una afirmación trivial. Las estadísticas de la zona indican que con seguridad ocurrirá un evento de esas características en el futuro. Se trataría entonces de afirmar algo que es conocido, la segura ocurrencia de un terremoto de tal magnitud.

Por otra parte, para dar estimaciones del error se requiere de técnicas estadísticas, y esto hace que una predicción se exprese probabilísticamente.

En los apartados siguientes se presentarán algunos métodos de pronóstico que se investigan y validan en la actualidad. No todos poseen el mismo grado de confiabilidad. Son muy pocos los éxitos en el campo del pronóstico de terremotos. El más famoso es la predicción exitosa

del terremoto ocurrido en 1975 en Haicheng, República Popular China. La evacuación oportuna de esta ciudad logró salvar cientos de miles de vidas. Sin embargo, técnicas similares a las empleadas no dieron resultados positivos en otros casos, lo que presupone la enorme dificultad que entraña esta tarea. Aproximadamente un año después, el fallido pronóstico del momento de ocurrencia del terremoto de Tangshan provocó más de un cuarto de millón de víctimas fatales y destruyó casi totalmente la ciudad. El aviso de la evacuación no llegó a tiempo, pues los cálculos arrojaron como fecha para la ocurrencia del terremoto, una fecha posterior a la que en realidad ocurrió.

#### Predicción a largo plazo

La predicción a largo plazo consiste en las observaciones realizadas en áreas extensas e intervalos largos de tiempo. Se puede realizar solamente con ayuda del análisis estadístico o mediante la modelación física.

Existen dos modelos que se utilizan actualmente en la predicción a largo plazo (Fig. 46):

1. modelo del tiempo predecible
2. modelo del corrimiento predecible.

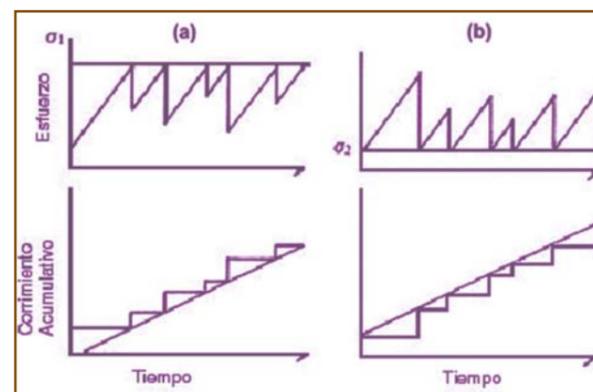


Fig. 46. (a) Modelo de tiempo predecible; (b) Modelo de corrimiento predecible.

El modelo del tiempo predecible plantea que los terremotos ocurren cuando los esfuerzos alcanzan un valor determinado. Por consiguiente, si se conoce ese valor o nivel y se sabe cuál fue la caída de esfuerzos producida por el terremoto anterior, y la velocidad con que se acumulan los esfuerzos, se podrá predecir cuándo ocurrirá el próximo terremoto, pero no su magnitud (o lo grande que será).

El modelo del corrimiento predecible plantea que cada vez que ocurre un sismo el nivel de esfuerzos en la falla disminuye hasta un valor determinado, para lo cual el corrimiento en la falla de un sismo dado, debe ser tal que reponga la deficiencia de corrimiento que ocasiona el esfuerzo. En este caso, se puede anticipar lo grande que será el terremoto, pero no cuando ocurrirá.

Los modelos descritos, a pesar de ser aparentemente simples, llevan implícito gran incertidumbre por la cantidad de suposiciones y condiciones que se imponen. Sin embargo, pueden constituir un adecuado punto de partida para elaborar modelos más sofisticados y realistas.

#### Gaps o brechas sísmicas

Se ha observado que los terremotos ocurren muchas veces cerca de donde ya se han producido otros. También se ha comprobado que sus áreas de ruptura son semejantes a las de los terremotos ocurridos previamente. De esto se deriva, que los terremotos recurren en los mis-

mos lugares y que el tiempo entre dos eventos con características similares constituye el periodo de recurrencia.

Las áreas de ruptura de los grandes terremotos prácticamente no se solapan con las adyacentes. En general, las áreas de ruptura cosísmica nunca se solapan. Sólo se constata algún solapamiento en las áreas definidas por las réplicas, durante un intervalo de tiempo largo (semanas o meses) después del evento sísmico principal.

Un área situada dentro de una zona sísmica, donde haya ocurrido anteriormente al menos un gran terremoto, y en la que hace mucho tiempo no ha ocurrido otro, se puede considerar como una zona de acumulación de energía elástica. En esta zona, conocida como gap o brecha sísmica se puede producir un sismo semejante a los anteriores. Si el tiempo transcurrido desde el último sismo es comparable o mayor que el periodo de recurrencia, se dice que el gap ha alcanzado su estado de madurez.

Se han observado relaciones de dependencia entre las dimensiones de las fallas y los momentos y magnitudes de los sismos que estas producen. Estas permiten fijar límites máximos a los sismos que puede generar un gap determinado, ya que pueden ocurrir también sismos de menor magnitud que lo rompan sólo parcialmente.

Por ejemplo, en México y América Central los grandes eventos sísmicos se caracterizan por rupturas máximas de 100 a 200 km de largo. Son relativamente cortas si se les compara con las rupturas del orden de 500 km observadas en Chile y las Islas Aleutianas. Estas dimensiones máximas indican que en México es poco probable la ocurrencia de sismos muchos mayores que el de Michoacán de 1985 con una magnitud  $M = 7,5$  en la escala de Richter.

Para poder determinar no sólo el tamaño, sino la existencia misma de los gaps, se requiere un conocimiento muy detallado de la sismicidad de la región. Esto sólo se logra si se cuenta con una densa red de sismógrafos. La insuficiencia de datos conllevaría a que no se le preste la debida importancia a un gap maduro, o que se desperdicien esfuerzos y recursos investigando una región donde no estén creadas las condiciones para la preparación de un terremoto fuerte.

**Migración de terremotos**

Algunos estudios sugieren que los epicentros de los terremotos migran, definiendo una trayectoria que puede indicar la dirección y el tiempo aproximado en que ocurrirá el próximo evento sísmico. Esta hipótesis es razonable si se considera que producen concentraciones en las áreas vecinas y a la vez, originan nuevos terremotos.

Sin embargo, la interpretación de estas observaciones parece ser bastante subjetiva y en muchos casos, sólo es efectiva en las predicciones con carácter retrospectivo.

**Predicción a mediano y corto plazos**

Los análisis de la sismicidad de una región muestran que por cada sismo de gran magnitud, ocurren numerosos sismos pequeños. Debido a esto, en el interior o cerca de un gap, vacancia o brecha sísmica, se observan generalmente eventos de pequeña y mediana magnitud.

Siempre que sea posible, tras identificarse una zona anómala, se le deben realizar estudios detallados con el propósito de observar ciertas

características de la sismicidad que permitan hacer predicciones a menudo apoyadas con resultados de tipo de riesgo estadístico a mediano o corto plazo.

Gran número de fenómenos se pueden explicar, al menos tentativamente, por el comportamiento de las rocas ante cambios en los esfuerzos que actúan sobre ellas. Un aumento de los esfuerzos previo al alcance del punto de fractura puede producir dos tipos de efectos. El primero consiste en el cierre de los poros entre los granos componentes de la roca hasta alcanzar el menor volumen posible. A partir de este momento, el incremento de los esfuerzos puede conducir a un aumento del volumen. A este efecto se le conoce desde hace tiempo como: dilatancia.

**Sismos premonitores o preeventos**

Los sismos premonitores o preeventos ocurren en la cercanía inmediata del futuro hipocentro del evento sísmico principal. En ocasiones se les llaman preeventos o premonitores en el sentido estricto.

Los preeventos se asocian al 20% de los terremotos fuertes con profundidades inferiores a 100 km, es decir con hipocentro en la litosfera terrestre.

Su actividad se puede presentar de dos formas diferentes (Fig. 47). En la de tipo discontinuo la sismicidad premonitora comienza, alcanza un máximo y luego disminuye, llegando a anularse totalmente antes del evento principal. La actividad de tipo continuo comienza antes del evento sísmico principal y continúa aumentando hasta la ocurrencia de este. El segundo tipo de actividad sirve sólo para indicar que posiblemente se producirá un terremoto en ese lugar, pero no constituye un indicador del momento de ocurrencia. Por otro lado, la actividad de primer tipo no siempre es premonitora de un terremoto. Por ello, es arriesgado basar las predicciones sólo en las observaciones de supuestos preeventos.

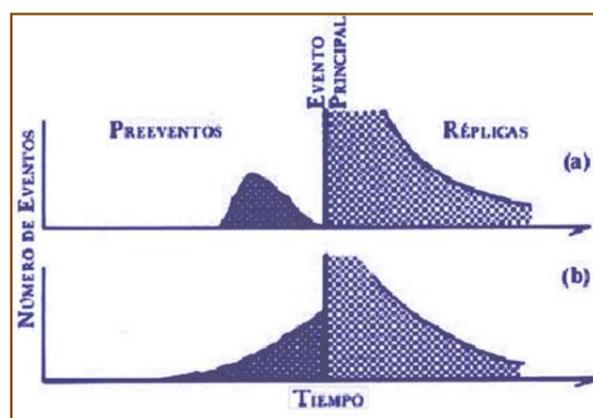


Fig. 47. Dos tipos de actividad de preeventos. La línea gruesa indica el tiempo de ocurrencia del evento principal.

Una característica importante de los preeventos es que en algunos casos se ha observado que ocurren cada vez más cerca del futuro hipocentro del terremoto principal.

**Zonas de quietud. Patrones de sismicidad**

Los cambios en el patrón de esfuerzos de una región están frecuentemente asociados con cambios en la sismicidad. Es posible observar la ocurrencia de sismos pequeños, denominada microsismicidad, mediante redes locales, constituidas por sismógrafos de alta sensibilidad.

Se ha constatado una disminución brusca de la microsismicidad, anterior a la ocurrencia de

grandes terremotos en las zonas de quietud sísmica o gaps del segundo tipo. La quietud previa a la ocurrencia de un gran terremoto parece ser una de las características premonitoras más comunes.

Los episodios de quietud son fáciles de identificar sólo posteriormente; y podemos ver la ocurrencia de otros episodios de quietud que no son seguidos por grandes terremotos. Se pueden obtener distribuciones de sismicidad, suponiendo solamente que pueden ocurrir sismos (que obedezcan a la ley de Poisson), con igual probabilidad a lo largo de toda la falla sismogénica. Por lo tanto, la aplicación de observaciones de este tipo para fines de predicción, se debe apoyar en otros estudios.

La disminución de la sismicidad ante un sismo se denomina a veces etapa  $\alpha$ ; y si ocurren preeventos antes del evento principal se denomina etapa  $\beta$ . La etapa  $\beta$  es común en los lugares donde la estructura es heterogénea.

A menudo ocurre un incremento de la actividad microsísmica en los bordes de la zona de quietud, de manera que si se grafica la actividad a lo largo de la zona en función del tiempo se obtiene un patrón de sismicidad conocido como «patrón de dona» (Fig. 47). También aparecen representadas las réplicas de un evento sísmico anterior ocurrido en la misma área, y otros eventos que ocurren lejos del epicentro, pero que se relacionan con la concentración de esfuerzos, conocidos como preeventos en sentido amplio.

Estudios actuales, muestran que la actividad de terremotos de magnitudes intermedias en las zonas de subducción parece migrar de las regiones profundas, tierra adentro, a las regiones someras cerca de la costa antes de un terremoto de gran magnitud. La detección de estas migraciones puede ayudar a la predicción a corto plazo. El efecto de los sismos pequeños es el de concentrar esfuerzos y no liberarlos, como ocurre en los grandes terremotos, por lo que la migración de la microsismicidad es en principio, distinta a la de los grandes sismos descritos.

Se ha visto también que la relación entre sismos grandes y pequeños, representada por el parámetro  $b$  de la relación de magnitud-frecuencia, se modifica con la actividad de los preeventos.

El análisis de los patrones de microsismicidad es importante para la predicción. Sin embargo, no siempre se observan, o a veces no siguen después de un terremoto. Por lo tanto, es necesario complementar las observaciones sobre la microsismicidad con otro tipo de datos como se verá a continuación.

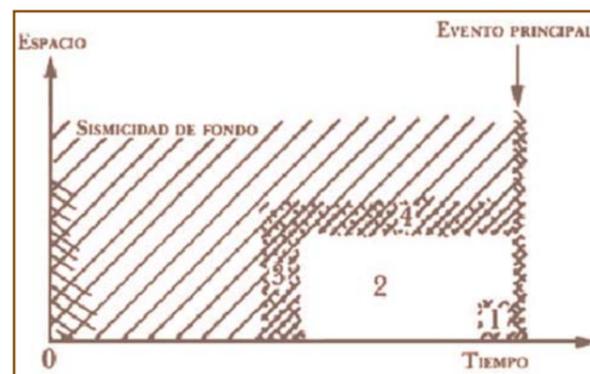


Fig. 48. Patrones espacio temporales de actividades de preeventos. (1) son preeventos en el sentido estricto; (2) es quietud sísmica; (3) corresponde al caso (a) de la figura 42; (4 + 2) es llamada «patrón de dona».

### Otros premonitores sismológicos

El análisis detallado de la historia de la sismicidad de una zona, permite detectar anomalías y predecir la ocurrencia de terremotos.

Se ha observado que el cociente de las velocidades de las ondas sísmicas de volumen  $V_p/V_s$ , disminuye un tiempo antes de la ocurrencia de grandes terremotos, regresando a su valor normal poco antes de esta. La duración  $t$  de la anomalía se relaciona con la magnitud del futuro terremoto por medio de la fórmula:

$$\text{Log } t = 0,68 M - 1,31$$

Este efecto probablemente esté relacionado con los efectos del cambio en el volumen de la roca producidos por los cambios de esfuerzo, y su observación puede depender de la localización de los puntos de observación. El cambio premonitor de la relación  $V_p/V_s$ , se ha observado en los sismos con mecanismos de falla transcurrente y normal, incluyendo los episodios de enjambre; pero existen sismos con estas características para los cuales este efecto no se observó.

Algunos parámetros de las fuentes sísmicas como la caída de esfuerzos aparentes, las frecuencias de esquina espectral, la reorientación de los ejes de esfuerzo, así como combinaciones de estas, se hallan bajo observación al igual que su comportamiento correlacionado con la ocurrencia de terremotos.

### Premonitores no sismológicos

Las observaciones sismológicas son a menudo complementadas por otros tipos de observaciones de parámetros geofísicos que se pueden modificar por las variaciones en el régimen de esfuerzos en la Tierra. Entre ellos se describen:

- Contenido de gas radón (Ra). Los esfuerzos que actúan sobre las rocas pueden abrir o cerrar parcialmente los poros de estas, a través de los cuales, circula el agua subterránea. Una mayor o menor circulación de agua puede conducir a un cambio de la cantidad de radón en el agua o en las rocas, lo que indica cambios en el régimen de esfuerzos. Se ha observado la ocurrencia de sismos después de que el contenido de radón, tras aumentar lenta y paulatinamente durante años, presenta un cambio súbito en unos meses.
- Cambios en el flujo o la temperatura del agua: se deben fundamentalmente, a los cambios en el flujo o la temperatura del agua de manantiales y pozos. Se han estudiado también como posibles precursores de sismos.
- Cambios en la resistividad eléctrica del terreno: pueden constituir otro de los efectos del cambio en la porosidad de las rocas y en el flujo de los líquidos intersticiales. Estos cambios se pueden detectar por estudios de resistividad, aplicando un voltaje al terreno y midiendo la corriente resultante. En la actualidad se realizan experimentos con métodos magneto-telúricos, que miden las corrientes inducidas en la tierra por el campo magnético terrestre.
- Auto-potenciales: efectos piezoeléctricos (generación de voltaje por medio de un cristal sometido a presión) o electroquímicos, debidos a la circulación de líquidos

intersticiales. Se pueden producir también por los grandes esfuerzos que actúan sobre las rocas, y son aparentemente observables como los cambios en el voltaje natural (o «autopotencial») del terreno. Supuestamente, con ellos se pudieran llegar a predecir la posición del epicentro y la magnitud del futuro sismo.

- Efectos geomagnéticos: observaciones antiguas señalan la aparición de variaciones geomagnéticas importantes previas a la ocurrencia de los terremotos. Aparentemente, los cambios observados hasta hace unos años se pueden atribuir mayormente a errores instrumentales por la baja precisión de los instrumentos utilizados. En la actualidad se cuenta con magnetómetros muy precisos, pero se continúa con el problema de eliminar los ruidos electromagnéticos que son comparables con la magnitud de los campos esperados.
- Cambios topográficos: las deformaciones sufridas por las rocas bajo tensión antes de un terremoto se pueden detectar a veces como cambios en la topografía.

Estas deformaciones pueden incluir componentes verticales (medidos por nivelación o por medio de inclinómetros) y horizontales (medidos por triangulación o por «medidores de deformación» (strainmeters). La evaluación de las deformaciones promedio y de la velocidad de deformación, permite evaluar una probabilidad de ruptura en relación con las mayores deformaciones que pueden soportar las rocas (del orden de  $5,3 \times 10$ ).

- Cambios gravimétricos: se han observado cambios en la gravedad antes y después de terremotos en las zonas epicentrales. Al igual que los cambios en la topografía, están relacionados con los volumétricos del terreno. Los cambios observados unas veces son positivos y otras negativos, pero tienden a desaparecer antes de la ocurrencia del terremoto.
- Comportamiento anómalo de algunos animales: serpientes que abandonan su madriguera, peces que saltan fuera del agua, insectos que dejan sus agujeros y se comportan en forma excitada, animales domésticos que actúan nerviosamente y hacen ruido aparentemente sin razón, entre otros casos. Estas conductas se han estudiado principalmente en el Oriente, mediante la observación en el laboratorio y en el campo.

Los experimentos de laboratorio no son conclusivos y las observaciones en el campo requieren de una amplia red de información que permita compilar gran número de observaciones individuales. La respuesta de los animales se podría dar ante sismos demasiados pequeños para ser sentidos por los humanos, o en el caso de cambios en el campo electromagnético. En cualquier caso, son útiles solamente a muy corto plazo.

- Luces, color del cielo: finalmente se mencionan observaciones, ningunas de ellas bien documentadas de efectos asociados (tal vez) con los terremotos, que aunque no tengan relación directa con estos es necesario investigar. Entre ellas están: forma y color de

las nubes, luces misteriosas en el cielo, color y frío, humedad y sequía, percepción extra-sensorial, etc.

### Aspectos sociales de la predicción de terremotos

Aunque, se realiza un gran esfuerzo para lograr predecir los terremotos, todavía la capacidad de hacer predicciones es controvertida, sobre todo cuando existen limitaciones en su confiabilidad y aplicabilidad.

Imaginemos qué pasaría si en un momento dado se avisara que dentro de 3 horas (6 o 24) se produciría un terremoto de magnitud  $M = 7,0$ , similar al de 1932 en las proximidades de la ciudad de Santiago de Cuba. La cantidad de muertes y daños que causarían el éxodo y el pánico probablemente, sería mayor a la que podría causar el sismo. ¿Se debe dar a conocer, en este caso, tal predicción? Por otro lado, un terremoto grande seguramente causaría daños y muertes que se podrían evitar parcialmente si se evacuaran hospitales, escuelas, etc. ¿Es válido entonces no anunciar la predicción? Aun, posponer la toma de una decisión al respecto es ya una decisión, y constituye una enorme responsabilidad para el científico capaz de hacerla. Tal vez no se pueda lograr con suficiente antelación, como para que se pueda estudiar a fondo por un consejo responsable de científicos.

Una predicción hecha con un mayor margen de tiempo por ejemplo, varios días (o semanas), sería indudablemente valiosa. Poder planear una posible evacuación con tiempo y saber cuándo desalojar las viviendas y edificios públicos salvaría gran cantidad de vidas. Sin embargo, evacuar, desalojar y en general, detener la mayor parte de las actividades rutinarias y tomar medidas de emergencia es extremadamente costoso. Cualquier incertidumbre en el plazo predicho elevaría enormemente este costo; además, las actividades de una ciudad no se pueden suspender durante tiempos largos sin producir trastornos en su estabilidad.

Y, qué pasaría si la predicción no se cumpliera o sea, que se diera una falsa alarma. En este caso la sociedad habría soportado una serie de molestias, gastos y pérdidas inútilmente. En el primero, la predicción podría ser la responsable de muertes y daños, que de otra manera no hubieran ocurrido. Además, una o varias falsas alarmas provocarían que se omitiesen las subsecuentes predicciones, que pudieran ser buenas.

Es indispensable hacer públicas sólo las predicciones que tengan un alto grado de confiabilidad, e insistir que no se preste atención a predicciones no avaladas por las autoridades competentes. Además, los medios de información deben compartir la responsabilidad por la información que difunden, y asegurar que sus fuentes sean fidedignas.

Es muy importante definir con anticipación quiénes son las autoridades responsables de organizar los detalles de una posible alerta sísmica y asegurarse que cuenten con todo el apoyo de la comunidad científica. Por otro lado, se debe tener en cuenta que es imposible realizar los estudios necesarios para crear un programa razonable de predicción sísmica, si las autoridades no ofrecen la prioridad y el apoyo necesarios.

Una buena solución parcial sería la implantación de sistemas de alarmas, basados en redes

sísmicas telemétricas computarizadas que operen en las regiones sismogénicas y que podrían determinar, mediante algoritmos de alta redundancia y confiabilidad, la ocurrencia de sismos capaces de producir daños en lugares densamente poblados. Además, se avisaría mediante comunicación por satélite con tiempo suficiente para evacuar edificaciones clave.

Tanto las predicciones como las alarmas, por confiables que sean, son inútiles si no están apoyadas en una preparación e instrucción previas del pueblo y de las autoridades.

### QUÉ HACER ANTES, DURANTE Y DESPUÉS DE UN TERREMOTO

La posibilidad de sobrevivir a un terremoto fuerte, depende básicamente de la preparación que se tenga para adoptar la conducta más adecuada ante una amenaza de inicio repentino. La población debe conocer de antemano una serie de medidas básicas que son necesarias cumplir antes, durante y después de un evento sísmico como:

#### Antes

- Conocer los lugares que ofrecen mayor seguridad dentro y fuera de la casa, escuelas o centros de trabajo antes del sismo.
- Conocer de antemano dónde se desconectan la electricidad, el gas y el agua.
- Distribuir y ubicar convenientemente los muebles y objetos dentro de su vivienda o local de trabajo, evitando colocar los más pesados en lugares altos.
- Mantener las escaleras y otras vías de escape y salida, libres de obstáculos para permitir el acceso de las personas.
- Portar en todo momento el carné de identidad o tarjeta del menor para posibilitar su identificación.
- Tener a mano linternas y radios portátiles si cuenta con ellos.
- Colocar las llaves de su hogar u oficina en algún lugar visible cerca de la puerta de salida para facilitar un rápido desalojo.
- Conocer y practicar dentro de su hogar y centros de trabajo las acciones y normas de conducta a adoptar durante y después de un sismo.
- Acopiar en una mochila alimentos enlatados o que no se descompongan, medicamentos imprescindibles, agua potable, abridores de latas, etc.
- Cumplir y controlar, incluso desde el inicio del proceso inversionista, la aplicación de las normas de diseño y construcción sismorresistente y que las edificaciones se ubiquen en los suelos y sitios más adecuados.

#### Durante

Bajo techo en su casa o en su centro de estudio o trabajo:

- Conservar la calma y tranquilizar a las personas a su alrededor.
- Salir rápidamente del inmueble si tiene oportunidad y dirigirse a una zona segura.
- No utilizar los elevadores, bajar por las escaleras.
- Si no puede salir del inmueble, se debe alejar de los libreros, vitrinas, estantes u otros muebles que se puedan deslizar o caer, así como de las ventanas, espejos y balcones.

- Si está lejos de la salida colóquese debajo de una mesa o escritorio resistente que no sea de vidrio, y cúbrase la cabeza.
- Colocarse bajo el marco de una puerta o columna, o en una esquina de la casa.
- Al terminar el sismo, abandonar el inmueble sin correr, gritar o empujar.

En la calle:

- Alejarse de los edificios, muros, postes, árboles, cables y otros objetos que se pudieran caer.
- De ser posible diríjase a un área abierta como parque o una plaza.

En lugares con muchas personas:

- Si se encuentra en un cine, tienda o teatro muy congestionado y no puede salir, cúbrase la cabeza con ambas manos colocándola junto a las rodillas.
- Si está junto a una salida, abandone con calma el inmueble.

En un edificio alto:

- Protéjase debajo de una mesa o un escritorio resistente. En su defecto, colóquese debajo del marco de una puerta o junto a una columna o en una esquina.
- No se precipite hacia la salida, ni utilice elevadores.

En un auto o transporte público:

- Detener el vehículo en un lugar abierto y permanecer en él mientras dure el sismo.
- No estacionar el vehículo junto a postes, edificios u otros elementos que constituyan riesgos. No obstruya los señalamientos de seguridad.
- Si maneja por una carretera, aléjese de los puentes o vías elevadas y permanezca dentro de su vehículo mientras dure el sismo.

#### Después

- Después de un terremoto fuerte pueden sobrevenir réplicas, por lo que no se debe retornar a las viviendas hasta que se oriente por las autoridades competentes.
- Sintonizar su radio portátil si lo posee para escuchar las orientaciones de la Defensa Civil.
- Incorporarse a las brigadas organizadas por los consejos de defensa para comenzar en el menor tiempo posible, los trabajos de salvamento y reparación urgente de averías.
- Cumplir con las medidas higiénico-sanitarias orientadas por los órganos de salud.
- Antes de activar las redes de agua, gas y electricidad, comprobar que no existan averías como cortos circuitos, escapes de gas, etc.
- Cumplir con las normas de racionamiento de agua y alimentos, siendo disciplinados durante su distribución.
- Examine su vivienda o edificio y no entre en ella hasta no tener la seguridad de que no está afectado.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. Álvarez L, Chuy T, Cotilla M. Peligrosidad Sísmica de Cuba: una aproximación a la regionalización sísmica del territorio nacional, Rev. Geofísica. 1991 (35): 125-150.
2. Álvarez L, Chuy T, García J et al. An Earthquake Catalogue of Cuba and Neighboring Areas. The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Miramare-Trieste.1999.

3. Chuy, T J. Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación sísmica. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Geofísicas. Fondos del MES y del CENAI.1999.
4. Chuy, T, J., Álvarez L. Mapa de Peligro Sísmico para la Nueva Norma Sismorresistente de la República de Cuba. Ministerio de la Construcción, la Habana, escala 1:1 000 000. 1995.
5. Chuy T, González B, Álvarez L. Sobre la Peligrosidad Sísmica en Cuba, Investigaciones Sismológicas en Cuba. 1983 (4): 37-52.
6. Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil. Normas para la proyección de medidas técnico-ingenieras de Defensa Civil. 2001.
7. García J, Slejko D, Álvarez L, Peruzza L, Rebez A Seismic Hazard Maps for Cuba and Surrounding Areas. Bull. Seis. Soc. Am. 93 No 6. 2003.
8. García J, Arango E, Zapata J, Oliva R, González B, Fernández B, Chuy T, Reyes C. Mapa de Riesgo Sísmico de la Ciudad de Santiago de Cuba. Informe final de proyecto de Investigación, Archivo CENAI. 2002.
9. González B. Research problems concerning seismic microzonation of megacities in Cuba. The cases of Santiago de Cuba and Havana. Research Reports on Earthquake Engineering No 62, Tokyo Institute of Seismology. 1997.
10. González B. The seismic risk project of the City of Havana: Background, aims and expected results. The Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Irikura, Okada and Sasatani (eds.) Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 030 2.1998.
11. Herráiz M. Conceptos Básicos de Sismología para Ingenieros. Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. 1997.
12. Key D. Structures to Withstand Disasters. Institution of Civil Engineers. Published by the Masterford Publications, London, 1995. ISBN 07277 2067 8.
13. Navas A. Terremotos. Editorial Ciencia para Todos, México. 2000.
14. Shedlock K, Pakiser L. Earthquakes. USGS, U.S Government Printing Office, Washington, D.C, 20402. 2003.
15. The Architectural Institute of Japan. Earthquake Motion and Ground Conditions. In commemoration of the 20<sup>th</sup> anniversary of the research subcommittee on earthquake ground motion, Published by the AIJ, Japan. 1993.
16. Udías A, Mezcua J. Fundamentos de Geofísica. Editorial Alambra. España, 1986. ISBN 84-205-1381-4.
17. Udías A, Mezcua J. Fundamentos de Sismología. UCA Editores. 1997. ISBN 84-8504-218-4.
18. Vittori E, Comerci V. The INQUA SACALE. An innovative approach for assessing earthquake intensities based on seismically-induced ground effects in natural environment. Special Paper, Roma. ed. 2004.
19. Wilson J T. Deriva Continental y Tectónica de Placas. V. H. Blume, Madrid. ed. 1976.
20. Zharkov VN. Estructura Interior de la Tierra y de los Planetas. Editorial MIR, Moscú. 1985.
21. Zilbert L. Gestión Local del Riesgo. Material de Apoyo para la Capacitación (SE-SNPMAD, PNUD, COSUDE, TGL/INIFOM. 2001.

#### ANEXOS

##### Anexo 1. Escala de intensidades sísmicas MSK

###### Definiciones generales

###### Efectos que definen los grados de intensidad MSK

- a. Efectos sentidos por las personas.
- b. Daños producidos en las construcciones según sus diversos tipos.
- c. Transformaciones observables en la naturaleza.

###### Tipos de construcciones

- **Tipo A:** Edificios de piedra picada, construcciones rurales, casas de adobe, casas de arcilla.
- **Tipo B:** Edificios de ladrillo corriente, construcciones enmaderadas o de bloques, edificios de piedra natural labrada.
- **Tipo C:** Edificios de hormigón armado prefabricado, construcciones de paneles grandes prefabricados o con estructuras metálicas, construcciones de madera bien fabricadas.

### Términos de cantidad

Los términos de cantidad utilizados en la definición de los grados de intensidad corresponden aproximadamente a los siguientes porcentajes:

|                 |     |
|-----------------|-----|
| Algunos.....    | 5%  |
| Muchos.....     | 20% |
| La mayoría..... | 55% |

### Clasificación de los daños en las construcciones

**Clase 1.** Daños ligeros, grietas finas en la cubierta (repello), caída de pequeños pedazos de repello.

**Clase 2.** Daños moderados, grietas pequeñas en las paredes, caída de tejas, grietas en las chimeneas, caen partes de las chimeneas.

**Clase 3.** Daños considerables. Grietas largas y profundas en las paredes, caída de chimeneas.

**Clase 4.** Destrucción. Rajaduras en las paredes, partes de los edificios son colapsados, partes aisladas de las construcciones pierden su cohesión, las paredes interiores y los marcos son colapsados.

**Clase 5.** Destrucción total. Colapso del edificio.

### Descripción de los grados de intensidad MSK

**Grado I.** Las sacudidas no se perciben por los seres humanos, solo los sismógrafos las detectan y registran.

**Grado II.** Las sacudidas son solo perceptibles por algunas personas en reposo, en particular en los pisos altos de los edificios.

**Grado III.** Las sacudidas son sentidas por algunas personas en el interior de los edificios, y sólo en circunstancias muy favorables en el exterior de estos. La vibración percibida es semejante a la causada por el paso de un camión ligero. Observadores atentos pudieran notar un ligero balanceo de objetos colgados, más acentuado en los pisos altos de los edificios.

**Grado IV.** El sismo es percibido por muchas personas en el interior de los edificios y por algunas en el exterior. Algunas personas que duermen se despiertan, pero nadie se atemoriza. La vibración es comparable a la producida por el paso de un camión pesado con carga. Las ventanas, puertas y vajillas vibran. Los pisos y muros producen chasquidos. El mobiliario comienza a moverse. Los líquidos contenidos en recipientes abiertos se agitan ligeramente. Los objetos colgados se balancean ligeramente.

**Grado V.** a) El sismo es percibido en el interior de los edificios por la mayoría de las personas y por muchas en el exterior. Muchas personas que duermen se despiertan y algunas huyen. Los animales se ponen nerviosos. Las construcciones se agitan con una vibración general. Los objetos colgados se balancean ampliamente. Los cuadros golpean sobre los muros o son lanzados fuera de su emplazamiento. En algunos casos los relojes de péndulo se paran. Los objetos ligeros se desplazan o vuelcan. Las puertas o ventanas abiertas baten con violencia. Se vierten en pequeñas cantidades los líquidos contenidos en recipientes abiertos y llenos. La vibración se siente en la construcción como la producida por un objeto pesado arrastrándose. b) En las construcciones de tipo A son posibles ligeros daños (clase 1). c) En ciertos casos se modifica el caudal de los manantiales.

**Grado VI.** a) Lo siente la mayoría de las personas, tanto dentro como fuera de los edificios. Muchas personas salen a las calles atemorizadas. Algunas llegan a perder el equilibrio. Los animales domésticos huyen de los establos. En ocasiones, la vajilla y la cristalería se rompen, los libros caen de sus estantes, los cuadros se mueven y los objetos inestables se vuelcan. Los muebles pesados se pueden llegar a mover. Las campanas pequeñas de torres y campanarios pueden sonar. b) Se producen daños moderados (clase 2) en algunas construcciones del tipo A. Se producen daños ligeros (clase 1) en algunas construcciones del tipo B y en muchas del tipo A. c) En ciertos casos se pueden abrir grietas hasta un centímetro de ancho en suelos húmedos. Se pueden producir deslizamientos en las montañas. Se observan cambios en el caudal de los manantiales y en el nivel de agua de los pozos.

**Grado VII.** a) La mayoría de las personas se aterrorizan y corren a la calle. Muchas tienen dificultad para mantenerse en pie. Las vibraciones son sentidas por personas que conducen automóviles. Suenan las campanas grandes. b) Muchas construcciones del tipo A sufren daños graves (clase 3) y algunas, incluso destrucción (clase 4). Muchas construcciones del tipo B sufren daños moderados (clase 2). Algunas construcciones del tipo C experimentan daños ligeros (clase 1). c) En algunos casos se producen deslizamientos en las carreteras que transcurren sobre laderas con pendientes acusadas; se producen daños en las juntas de las canalizaciones y aparecen fisuras en muros de piedra. Se aprecia oleaje en las lagunas y el agua se enturbia por remoción del fango. Cambia el nivel del agua de los pozos y el caudal de los manantiales. En algunos casos vuelven a manar manantiales que estaban secos, y se secan otros que manaban. En ocasiones se producen derrames en taludes de arena o de grava.

**Grado VIII.** a) Miedo y pánico general, incluso en las personas que conducen automóviles. Se desgajan las ramas de los árboles. Los muebles, incluso los pesados, se desplazan o vuelcan. Las lámparas colgadas sufren daños parciales. b) Muchas construcciones de tipo A sufren destrucción (clase 4) y algunas colapso (clase 5). Construcciones de tipo B sufren daños graves (clase 3) y algunas destrucciones (clase 4). Muchas construcciones de tipo C sufren daños moderados (clase 2) y algunas graves (clase 3). En ocasiones se produce la rotura de algunas juntas de canalizaciones. Las estatuas y monumentos se mueven y giran. Se derrumban muros de piedra. c) Pequeños deslizamientos en las laderas de los barrancos y en las trincheras y terraplenes con pendientes pronunciadas. Grietas en el suelo de varios centímetros de ancho. Se enturbia el agua de los lagos. Aparecen nuevos manantiales. Vuelven a tener agua pozos secos y se secan pozos existentes. En muchos casos cambia el caudal y el nivel de agua de los manantiales y pozos.

**Grado IX.** a) Pánico general. Daños considerables en el mobiliario. Los animales corren confusamente y emiten sus sonidos peculiares. b) Muchas construcciones de tipo A sufren colapso (clase 5). Construcciones de tipo B sufren destrucción (clase 4) y algunas colapsos (clase 5). Muchas construcciones de tipo C sufren daños graves (clase 3), y algunas destrucciones (clase 4). Caen monumentos y columnas. Daños considerables en depósitos de líquidos. Se rompen parcialmente las canalizaciones subterráneas. Los carriles del ferrocarril se curvan y las carreteras quedan fuera de servicio. c) Con frecuencia se producen extrusiones de agua, arena y fango en los terrenos saturados. Se abren grietas en el terreno de hasta 10 cm de ancho y de más de 10 cm en las laderas y en las márgenes de los ríos. Aparecen además, numerosas grietas pequeñas en el suelo. Desprendimientos de rocas y aludes. Muchos deslizamientos de tierras.

Grandes olas en lagos y embalses. Se renuevan pozos secos y se secan otros existentes.

**Grado X.** b) La mayoría de las construcciones del tipo A sufren colapso (clase 5). Muchas construcciones del tipo B sufren colapso (clase 5). Construcciones de tipo C sufren destrucción (clase 4) y algunas colapso (clase 5). Daños peligrosos en presas; serios daños en puentes. Los carriles de las vías férreas se desvían y a veces se ondulan. Las canalizaciones subterráneas son retorcidas o rotas. El pavimento de las calles y el asfalto forman grandes ondulaciones. c) Grietas en el suelo de algunos decímetros de ancho que pueden llegar a un metro. Se producen anchas grietas paralelamente a los cursos de agua. Deslizamientos de tierras sueltas en las laderas con fuertes pendientes. En los ribazos de los ríos y en laderas escarpadas se producen considerables deslizamientos. Desplazamientos de arenas y fangos en las zonas litorales. Cambio del nivel de agua en los pozos. El agua de canales y ríos es lanzada fuera de su cauce normal. Se forman nuevos lagos.

**Grado XI.** b) Daños importantes en construcciones, incluso en las bien realizadas, en puentes, presas y líneas de ferrocarril. Las carreteras importantes quedan fuera de servicio. Las canalizaciones subterráneas quedan destruidas. c) El terreno queda considerablemente deformado tanto por desplazamientos horizontales como verticales y con anchas grietas. Muchos deslizamientos de terrenos y caídas de rocas. Para determinar la intensidad de las sacudidas sísmicas se precisan investigaciones especiales.

**Grado XII.** b) Prácticamente se destruyen o quedan gravemente dañadas todas las estructuras, incluso las subterráneas. c) La topografía cambia. Grandes grietas en el terreno con importantes desplazamientos horizontales y verticales. Caída de rocas y hundimientos en los escarpes de los valles producidas en vastas extensiones. Se cierran valles y se transforman en lagos. Aparecen cascadas y se desvían los ríos.

### Anexo 2. Escala de intensidades para tsunamis

| Intensidad | Altura de la ola (m) | Clasificación | Descripción  |
|------------|----------------------|---------------|--|
| I          | 0,5                  | Muy ligero    | Las olas son muy débiles, sólo perceptibles en los registros mareográficos   |
| II         | I                    | Ligero        | Las olas son sólo perceptibles para las personas que habitan en la costa y están familiarizadas con el mar   |
| III        | I                    | Algo fuerte   | Generalmente perceptibles. Se presentan inundaciones en las costas suavemente inclinadas. Las embarcaciones menores son desplazadas de la orilla. Pueden ocurrir daños en las estructuras ligeras ubicadas cerca de la costa   |
| IV         | 4                    | Fuerte        | Inundación de la costa hasta cierta profundidad. Ligero socavamiento del relleno. Daños en diques y embalses Daños de cierta consideración en las estructuras ligeras cercanas a la costa Daños ligeros en las estructuras sólidas en la costa. Embarcaciones y pequeños barcos se pueden trasladar al mar o tierra adentro. Presencia de escombros en la costa  |
| V          | 8                    | Muy fuerte    | Inundación general de la costa hasta una determinada profundidad. Se dañan las paredes de los muelles y estructuras sólidas cercanas a la costa. Las estructuras ligeras son destruidas totalmente. Severas afectaciones a los cultivos. Escombros y animales marinos muertos en la zona costera. Todas las embarcaciones desplazadas tierra adentro o mar a fuera con excepción de las de gran tamaño. Personas ahogadas y otros daños graves |
| VI         | 16                   | Desastroso    | Destrucción parcial o total de todas las estructuras construidas por el hombre en la zona costera, e incluso en zonas más distantes. Grandes inundaciones costeras. Barcos grandes severamente dañados. Árboles rotos o arrancados de raíz por las olas. Muchas pérdidas humanas y cuantiosas pérdidas materiales. Pérdida de playas y de cultivos. Tierra arrasada  |