

LA TIERRA EN EL AULA

EL TERREMOTO DE MEXICO

¿Puede ayudarnos el análisis de las catástrofes naturales a tomar decisiones adecuadas de cara al futuro? *

Martin Degg

Department of Geography, Chester College

Trevor Brown y Frank Muggleston

Department of Geography and Geology, Stoke-on-Trent Sixth Form College

GENESIS DE LA IDEA

La capacidad de los alumnos de tomar decisiones ante problemas reales está comenzando a cobrar una importancia creciente en la educación. Los autores apoyan el desarrollo de esta capacidad y son partidarios de una enseñanza basada en el estudio de casos reales. El presente artículo es el resultado de una conferencia dada por uno de sus autores (Degg) a la Agrupación de North Staffordshire de la Asociación Geográfica. Los otros dos autores vieron el interés potencial de este tema para una enseñanza centrada en el análisis de casos reales, y acordaron con el conferenciante la elaboración de este trabajo, que está pensado para alumnos de 16 a 19 años y que debería ocupar entre una y dos semanas de clase.

INTRODUCCION

Mucha gente recordará el terremoto de 1985 en México, aunque sólo sea por el Mundial de Fútbol de 1986. Pero ¿cuántos recuerdan la gravedad de los daños o el número de víctimas?

El 19 de Septiembre de 1985, a las 7.17 de la mañana, un terremoto de magnitud 8.1 en la escala de Richter ocurrió en el Océano Pacífico

muy cerca de la costa de México. Un segundo temblor de magnitud 7.5 ocurrió el 20 de Septiembre a las 7.38 de la tarde. El epicentro de ambos seísmos estaba situado cerca de la pequeña ciudad de Lázaro Cárdenas, en el Estado de Michoacán (figura 1). Los temblores se sintieron en la mayor parte del Oeste del país, pero la mayoría de las pérdidas de vidas humanas se produjeron en Ciudad de México. Se estima que

** La versión original de este artículo, reproducido aquí con permiso de la Earth Science Teachers' Association de Gran Bretaña, apareció en el volumen 13-4 de la revista Geology Teaching, publicada por aquella Asociación. Traducción de Francisco Anguita.*

en la catástrofe murieron 10.000 personas, 50.000 resultaron heridas, y unas 250.000 quedaron sin hogar. Una gran parte de los daños, que se calcularon en 4.000 millones de dólares, tuvo lugar también en Ciudad de México.

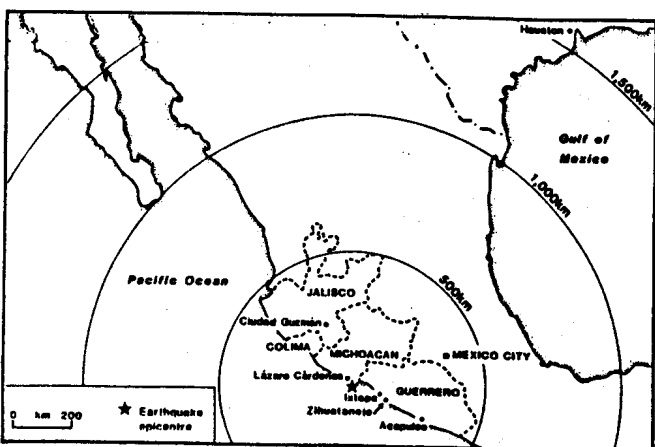


Fig. 1 Zonas afectadas por el terremoto de México de 1985.

MARCO REGIONAL

A. Demografía

México, situado entre el Océano Pacífico y el Golfo de México, fronterizo con Estados Unidos por el Norte y con Guatemala y Belice por el Sur, tiene una superficie de 2.000.000 km². En 1987, su población era de 81.9 millones, con una tasa de crecimiento anual de 2.5%. Más del 20% de esta población (unos 18 millones en 1987) vive en la capital, Ciudad de México, donde está concentrada en sólo el 0.1% del área del país. Esta cifra continúa incrementándose entre 500.000 y 600.000 personas cada año; la ciudad está rodeada por barrios de chabolas y es un perfecto ejemplo de los problemas que acarrea el crecimiento incontrolado.

N del Ed. Lamentamos no poder ofrecer traducidos los rótulos de las figuras: delicias de la informática.

B. Geología: ¿Por qué México es una zona sísmica?

Desde antiguo, México ha sido conocido como una zona de alto riesgo sísmico, una parte del llamado cinturón de fuego del Pacífico. Desde el punto de vista tectónico, México está influido por la interacción de varias grandes placas litosféricas (figura 2).

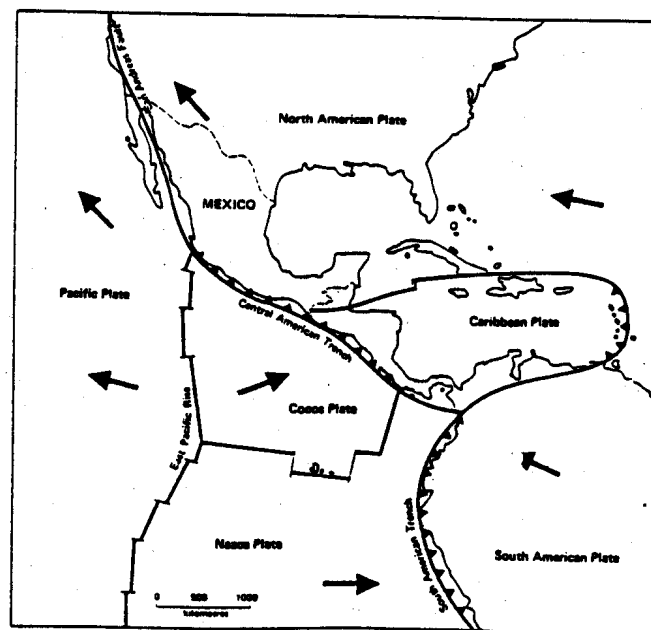


Fig. 2 Placas litosféricas en el área centroamericana.

El límite entre la placa de Cocos y las del Caribe y Norte América es uno de los bordes de placa más activos del mundo. En él, la placa de Cocos, una parte del fondo del Océano pacífico, se mueve hacia el Nordeste a una velocidad de entre 5 y 8 cm/año. En contraste, la placa norteamericana transporta a México en dirección Noroeste. La figura 3 ilustra la zona de interacción entre estas placas, marcada por una profunda trinchera oceánica (la trinchera centroamericana), que se prolonga en una de las llamadas zonas de subducción, en la que la litosfera oceánica relativamente densa de la placa de Cocos es empujada debajo de la litosfera continental, menos densa, de la placa norteamericana. El límite entre ambas placas es

una zona sísmicamente activa llamada zona de Wadati-Benioff. La súbita liberación de energía acumulada, y el movimiento resultante en esta zona, generan trenes de ondas que conocemos como terremotos.

Se ha calculado que durante el terremoto de 1985 en México, la placa de Cocos penetró más de tres metros bajo algunas zonas de la trinchera centroamericana. El análisis sísmico ha revelado que el proceso de ruptura fue complejo: se produjeron varios saltos, separados por cortos intervalos de tiempo. Esta fue la razón principal por la que el seísmo resultó tan excepcionalmente largo: en algunas zonas costeras el movimiento del suelo duró más de cinco minutos.

C. Distribución de los daños

El terremoto se sintió en un área de unos 800.000 km². Las ondas hicieron mecerse rascacielos tan alejados como los de Houston, en Estados Unidos (a 1.500 km del epicentro, ver la figura 1), y generaron un pequeño tsunami que afectó a zonas de las costas mexicanas y salvadoreñas. Se produjeron daños en seis de los 36 estados de México, siendo los más afectados los de Jalisco, Colima, Michoacán y Guerrero (figura 1), aunque los daños fueron relativamente ligeros a pesar de su proximidad al epicentro: un brutal contraste con Ciudad de México, que experimentó fuertes sacudidas y registró un alto número de víctimas mortales, a pesar de estar situada a más de 400 km del epicentro.

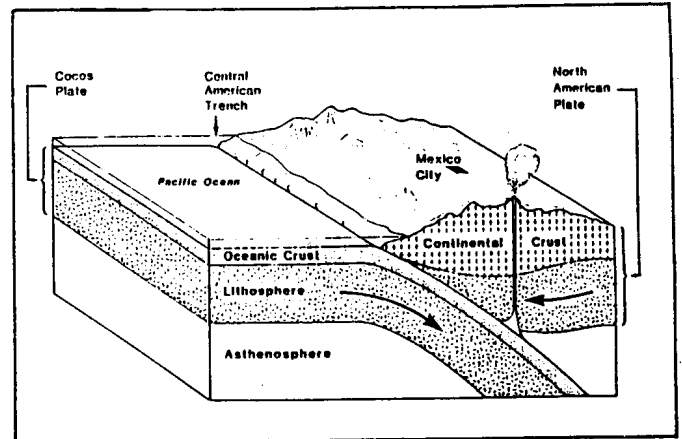


Fig. 3 Diagrama esquemático de la zona de subducción frente a la costa pacífica de México.

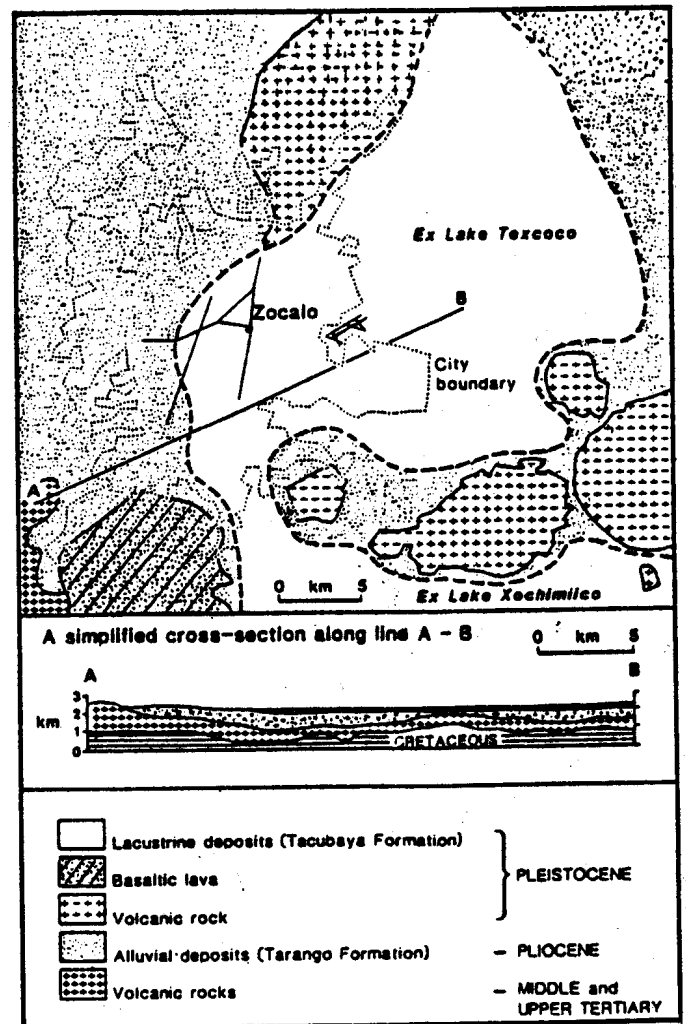


Fig. 4 Mapa geológico simplificado del área de Ciudad de México.

Análisis por los alumnos de los daños del terremoto en Ciudad de México

1. La geología de Ciudad de México

Ciudad de México está situada a 2.250 m de altitud en la ladera Oeste del Valle de México. El valle es una cuenca de 65 x 80 km flanqueada por montañas volcánicas que alcanzan altitudes de hasta 5.000 m. La mayoría de los volcanes tiene edades que van del Terciario Medio a Superior, aunque algunos son pleistocenos. Varios de los volcanes, como el Popocatepetl, al Sureste de Ciudad de México, todavía son activos. La ciudad fue fundada por los españoles sobre la gran ciudad azteca de Tenochtitlán. En la época de la conquista española, en 1521, Tenochtitlán estaba situada en el centro de un gran lago (Texcoco) que era uno de los varios que cubrían el valle de México. Con el transcurso del tiempo, la mayor parte del lago ha sido desecada, de forma que hoy sólo queda de él un pequeño residuo al Este de la ciudad.

Estudia la figura 4, que muestra la geología de los alrededores de Ciudad de México. Usa una cuadrícula para calcular (en km²) el área total de la ciudad.

a) ¿Qué porcentajes de la ciudad están edificados sobre cada tipo de roca?

b) ¿Qué porcentaje está edificado sobre el antiguo fondo del Lago Texcoco?

En la figura 4 puede verse que buena parte de la moderna ciudad de México se yergue sobre el fondo del antiguo Lago Texcoco. Este fondo está formado por gruesos niveles de arcilla, la Formación Tacubaya. La arcilla está constituida sobre todo por montmorillonita e illita, derivadas de la ceniza volcánica depositada en el lago (Marsal y Mazari, 1959). La potencia de la arcilla

es variable, pero en general está comprendida entre 7 y 37 m.

Las zonas Oeste y Noroeste de la ciudad, que caen fuera del perímetro del antiguo lago, reposan sobre las arenas y los limos (Formación Tarango) erosionados durante el Plioceno Superior y Pleistoceno Inferior de los conos volcánicos que rodean el valle de México, y depositados formando abanicos aluviales. En la antigua línea de costa del Lago Texcoco, esta formación, que tiene un espesor de unos 600 m, forma una serie de colinas que se elevan de 30 a 60 m sobre el fondo plano del lago.

Muchos edificios altos construidos sobre el fondo del lago están cimentados sobre pilotes, que pasan a través de las blandas arcillas de la Formación Tacubaya, hasta descansar en los niveles de la Formación Tarango, más compactos. A causa de su compacidad, los niveles situados cerca del techo de la Formación Tarango se suelen utilizar como cimientos: son los denominados Primer y Segundo Nivel Duro, situados respectivamente a 31 y 41 m de profundidad en la zona central de Ciudad de México.

La parte Sur de la ciudad está edificada sobre coladas de lava, de las que las más recientes datan de hace 2.400 años.

2. La distribución de los edificios dañados

Estudia, en la figura 5, la situación de las zonas de Ciudad de México donde se produjeron los mayores daños en los terremotos de 1957 y 1985. Usa una cuadrícula para estimar en km² la superficie de esta zona en 1985. Comparando con

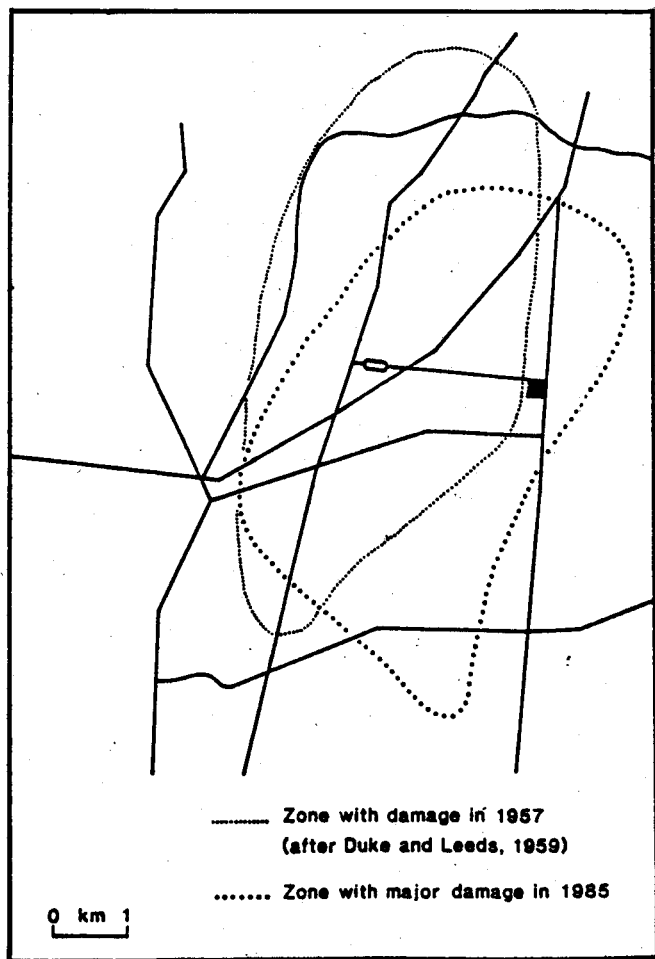


Fig. 5. Situación de las zonas con daños en los terremotos de 1957 y 1985.

los resultados de la sección 1, calcula qué porcentaje del área total de Ciudad de México representa esto.

Comparando las figuras 4 y 5, determina la unidad geológica en la que se concentró la mayor parte del daño producido por el terremoto de 1985 (usa las calles marcadas en las dos figuras para precisar la comparación).

a) ¿Fue afectada gravemente toda la zona de la ciudad construida sobre esta unidad?

b) Esta distribución general del daño en relación con la geología de superficie ¿fue igual a la experimentada en el terremoto de 1957?

c) En caso afirmativo ¿cuál es la significación más probable de este hecho?

3. Naturaleza de las ondas sísmicas que afectaron a Ciudad de México

Normalmente, en la región epicentral de un terremoto se presentan ondas sísmicas de un amplio rango de frecuencias (o sea, tanto de energía sísmica de baja como de alta frecuencia). A medida que aumenta la distancia al epicentro, las ondas de alta frecuencia son atenuadas, por lo que quedan predominantemente ondas de bajas frecuencias de vibración. Esto se debe a que, a diferencia de las de baja frecuencia, las ondas de alta frecuencia son incapaces de viajar grandes distancias a través de la corteza terrestre. La figura 6 muestra los acelerogramas registrados por dos instrumentos durante el terremoto de 1985. El instrumento *a* estaba cerca de Lázaro Cárdenas (figura 1), o sea en la región epicentral del terremoto. El instrumento *b* estaba situado en un afloramiento de roca basáltica, en el Sur de Ciudad de México.

a) Compara los dos acelerogramas. Intenta evaluar las características de la energía sísmica registrada en las dos estaciones (p.ej., en términos de frecuencia y amplificación; tener en cuenta que las escalas *x* e *y* de los dos gráficos no son comparables directamente).

b) ¿En qué estación fue más violento el movimiento del suelo?

4. Los daños sísmicos y el subsuelo de Ciudad de México

Desde los puntos de vista de la construcción y la ingeniería, y tomando como base las propiedades del subsuelo, el área de Ciudad de México y sus alrededores ha sido dividida en tres zonas (figura 7).

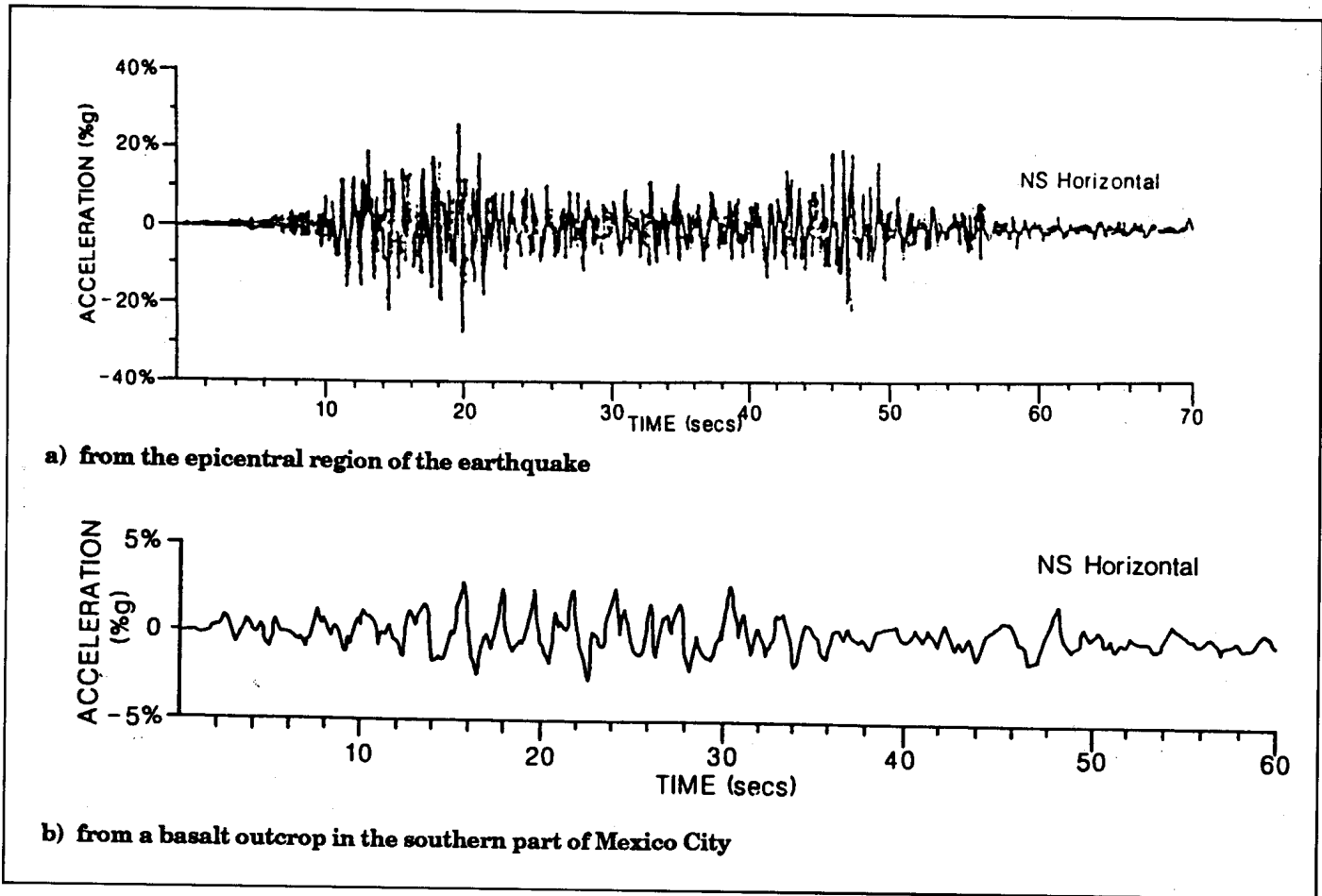


Fig. 6. Acclerogramas registrados durante el terremoto de México de 1985 (Booth et al., 1986, según Prince *et al.*, 1985)

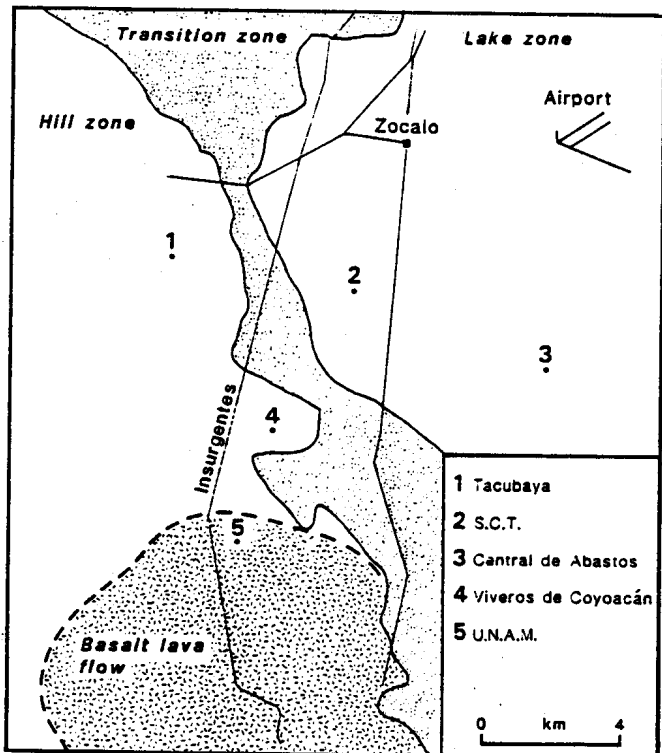


Fig. 7. Situación de los acelerógrafos digitales en Ciudad de México

I) La zona del Lago

Es el área que en un tiempo estuvo ocupada por el Lago Texcoco (figura 4). Aquí, los depósitos de arcilla tienen un contenido en agua muy alto y son muy compresibles. Esto ha causado que muchos edificios pesados del centro de la ciudad se hundan. Esta subsidencia se ha agravado por la extracción excesiva de agua para usos tanto industriales como domésticos. Se ha calculado que el hundimiento producido durante el periodo 1891-1970 fue de entre 5.5 y 8.5 m.

II) La zona de transición

Representa la antigua orilla del Lago Texcoco. El espesor y el contenido de agua de la arcilla son, por lo tanto, reducidos.

III) La zona de las colinas

Está formada por áreas volcánicas de relieve accidentado o bien áreas arenosas y limosas. El material es denso y tiene mucha menos agua que los depósitos de la zona del lago.

¿Cómo reaccionaron estas diferentes zonas al paso de las ondas sísmicas? La figura 7 muestra la distribución en la ciudad de los instrumentos que miden sacudidas fuertes del suelo. La Universidad Nacional Autónoma de México (U.N.A.M.) está edificada en una zona de

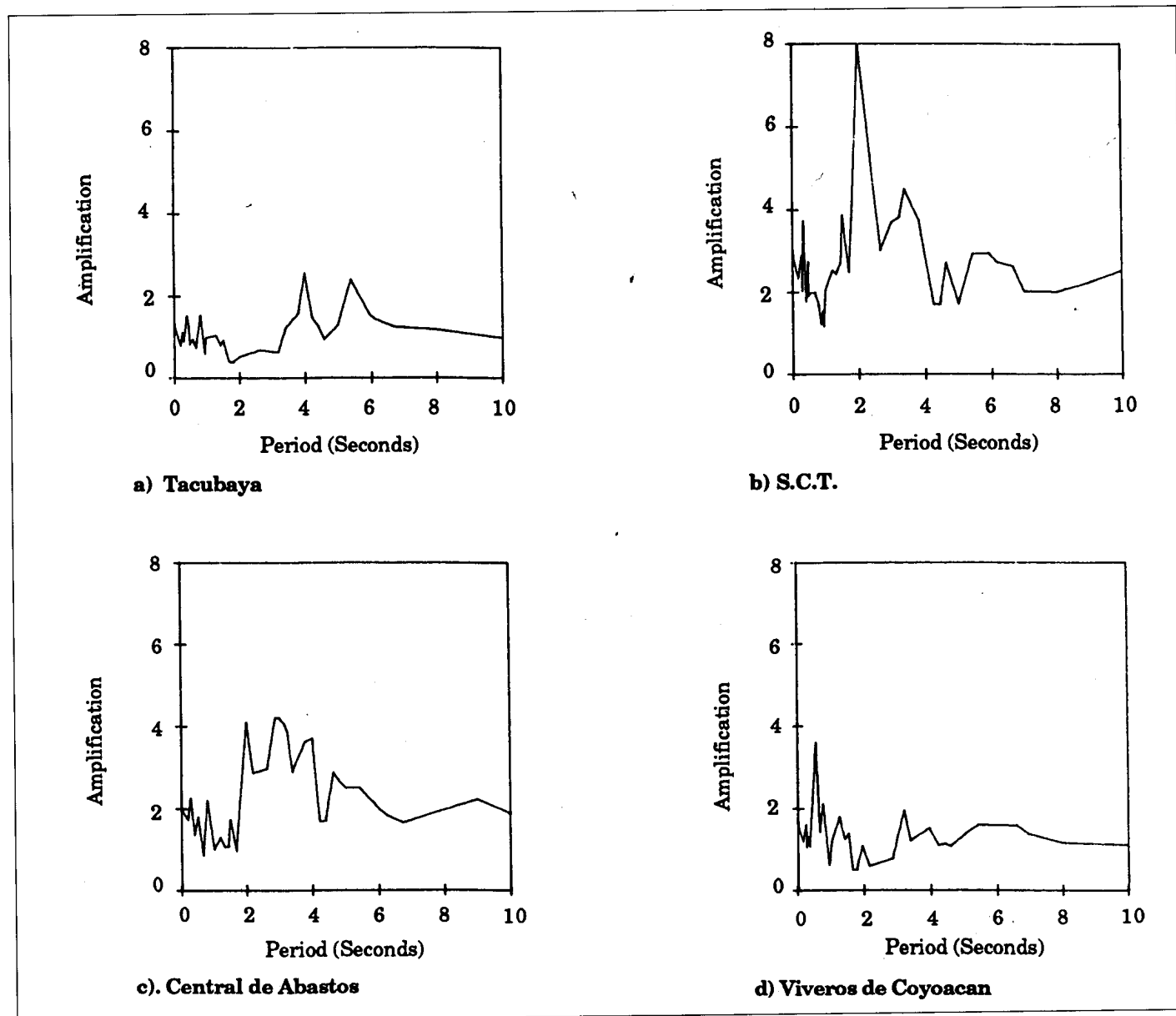


Fig. 8. Amplificación del movimiento del suelo en varios lugares de Ciudad de México, relativos al movimiento del suelo en la UNAM (ver figura 7). Según Prince *et al.* (1985).

coladas de lava basáltica. El acelerograma de la figura 6b se registró en esta estación. Las figuras 8 a, b, c y d ilustran las muy distintas tasas de

amplificación producidas en las distintas estaciones sísmicas, en comparación con el acelerograma de la UNAM, que se toma como referencia.

Compara los picos de amplificación.

a) ¿En qué estaciones se registró la mayor amplificación de las ondas sísmicas?

b) ¿Cuántas veces fueron amplificadas las ondas en cada estación, en comparación con el registro de la estación de la UNAM?

c) ¿Qué ondas sísmicas fueron más amplificadas? Expresa tu respuesta en términos de periodicidad y frecuencia de las ondas, este último definido en la Sección 3.

d) Explica las variaciones anteriores en función de las unidades cartográficas de la figura 7.

e) Busca una relación lógica entre los efectos mostrados en la figura 8 y la localización (figura 5) de las zonas de mayor daño sísmico.

f) La figura 9 muestra la distribución de los edificios más gravemente afectados en la zona de máximos daños, así como curvas de igual espesor (isopacas) de la arcilla de la zona del lago. ¿Por qué crees que el espesor de la arcilla varía?

g) Parece existir una clara correlación entre el espesor de la arcilla y la situación de los edificios colapsados. ¿Cómo la explicarías?

Para comprobar si existe una relación, proyecta en un gráfico los datos de la tabla 1, y dibuja la línea que mejor se ajuste a los puntos.

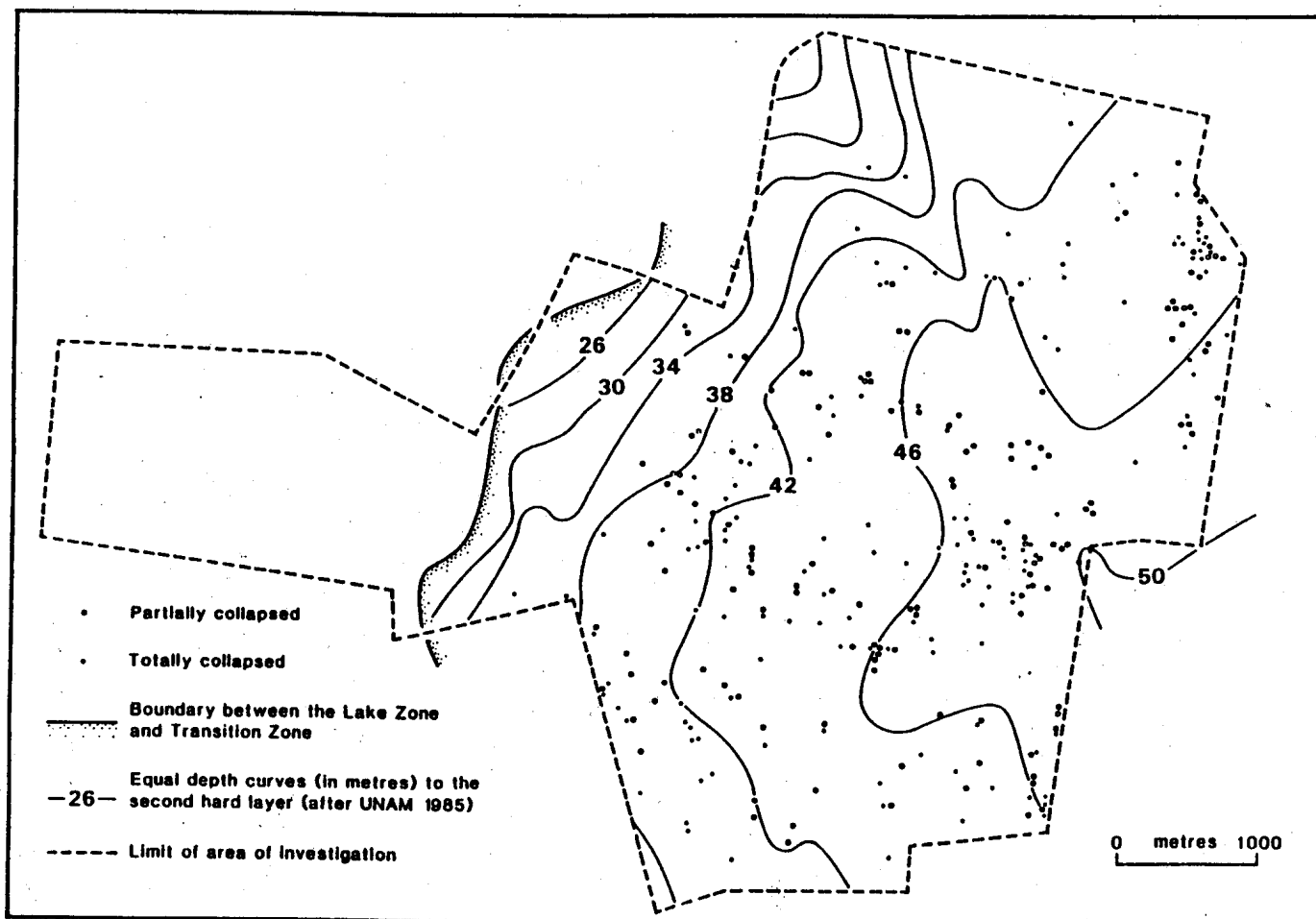


Fig. 9. Situación de los edificios total o parcialmente colapsados en relación con la profundidad de los depósitos compactados.

TABLA 1
Edificios dañados en la zona del lago

Número promedio de edificios dañados por km ²	Espesor de arcillas de la zona del lago (m)
0	22
19	26
24	30
47	34
65	38
80	42
84	46

h) Analiza los resultados. ¿Concuerdan con la impresión que obtuviste de la figura 9?

Todo lo anterior parece sugerir que las arcillas de la zona del lago fueron responsables de una gran amplificación de las ondas sísmicas. Ello se debió a su baja frecuencia de vibración, que determinó una respuesta intensa a las ondas sísmicas que atravesaron el subsuelo de Ciudad de México durante el terremoto, y que eran sobre todo de baja frecuencia. En cambio, los sedimentos más densos y las rocas de las zonas de transición y de las colinas tienen frecuencias de vibración más altas, por lo que no respondieron tan intensamente al paso de las ondas sísmicas. Dentro de la zona de máximo daño en el antiguo fondo del lago, la amplificación de las ondas sísmicas parece haber sido proporcional al espesor de la arcilla Tacubaya.

5. ¿Qué edificios eran más peligrosos en la zona del lago?

En Ciudad de México predominan tres tipos de construcciones:

I/ Edificios de estructura de cemento reforzado, en general con muros formados de ladrillos o losas de cemento. Las fachadas están

con frecuencia revestidas de cristal. El diseño y la construcción son esencialmente flexibles.

II/ Edificios con muros de carga de ladrillo: tanto ladrillo cocido como adobe (ladrillo de barro) se han usado en la construcción de algunos de los edificios de peor calidad. En no pocos de estos edificios, el piso bajo sirve como tienda, y por ello está abierto a la calle. Este tipo de construcción es el usado más comúnmente en edificios bajos. Los niveles de mantenimiento son en general deficientes. En términos de rigidez, estos edificios son intermedios entre los tipos I y III.

III/ Edificios de mampostería. Muchos de los edificios de oficinas construidos a principios de siglo emplearon este sólido sistema de construcción, al igual que la mayoría de los monumentos nacionales y antiguos edificios coloniales. Estas construcciones son muy rígidas.

a) ¿Qué métodos emplearías para obtener información sobre los edificios dañados, suponiendo que no tuvieses tiempo para inspeccionarlos todos?

b) En la tabla 2 se presenta información relativa a los edificios de la zona del lago. Completa la tabla calculando el porcentaje de edificios de cada clase que resultó dañado.

		TABLA 2 Edificios dañados clasificados por alturas y tipos de construcción							
Tipo de construcción		Número de plazas							
		< 3	3 a 5	6 a 8	9 a 11	12 a 14	15 a 17	18 a 20	> 20
Estructura de cemento	Observados	75	143	93	36	26	18	8	3
	Dañados % dañados	10	25	37	28	20	13	5	0
Muros de carga de ladrillo	Observados	214	108						
	Dañados % dañados	18	9	--	--	--	--	--	--
Mampostería	Observados	21	28	1					
	Dañados % dañados	1	2	0	--	--	--	--	--

c) Usa los porcentajes obtenidos en la tabla 2 para completar el gráfico de la figura 10. Describe por escrito lo que el gráfico refleja sobre los daños experimentados por las construcciones en función de:

- el tipo de construcción
- la altura de los edificios

d) ¿Qué tipo de edificio parece haber sido más vulnerable a las sacudidas?

Esta vulnerabilidad parece deberse a que el periodo máximo de vibración de las arcillas de la parte Oeste del lago (unos dos segundos, como puede verse en la figura 8c) coincidió con los periodos vibratorios naturales de los edificios de altura media a elevada, lo que sirvió para prolongar y reforzar la vibración en estos edificios por medio del fenómeno de resonancia.

De la figura 10 se desprende también que el máximo daño no se repartió homogéneamente por toda la zona del antiguo Lago Texcoco. Para intentar explicar por qué, en la figura 11 se muestran tres zonas del área más castigada por el seísmo, y cuyos edificios tenían diferentes alturas medias. En cada una de ellas se ha calculado el porcentaje de edificios de más de seis pisos, a fin de proporcionar una indicación de la vulnerabilidad relativa de cada

zona a las sacudidas. Puede verse que el máximo daño está confinado sobre todo a las zonas I y II, donde el porcentaje de edificios altos es mayor, y en cambio es muy limitado en la zona III, donde el 98.5% de los edificios son de menos de seis pisos. Por desgracia, no hay datos disponibles de los daños en el resto de la zona del lago, aunque se sabe que más allá de la zona III la mayoría de los edificios son bajos. Esto parece sugerir que la distribución del máximo daño en la zona del lago fue controlada por la distribución de los vulnerables edificios de altura media a elevada.

6. Lecciones para el futuro

Imagina que trabajas en una empresa consultora contratada por el gobierno mexicano para diseñar medidas útiles para predecir y minimizar futuros riesgos sísmicos en la capital. Tu informe debería contener los siguientes apartados:

a) Una estimación razonada de la probabilidad de futuros terremotos en México, usando el concepto de *laguna sísmica*. Los tiempos de recurrencia de grandes terremotos en cada sección de la trinchera centroamericana parecen oscilar entre 30 y 50 años. La zona de

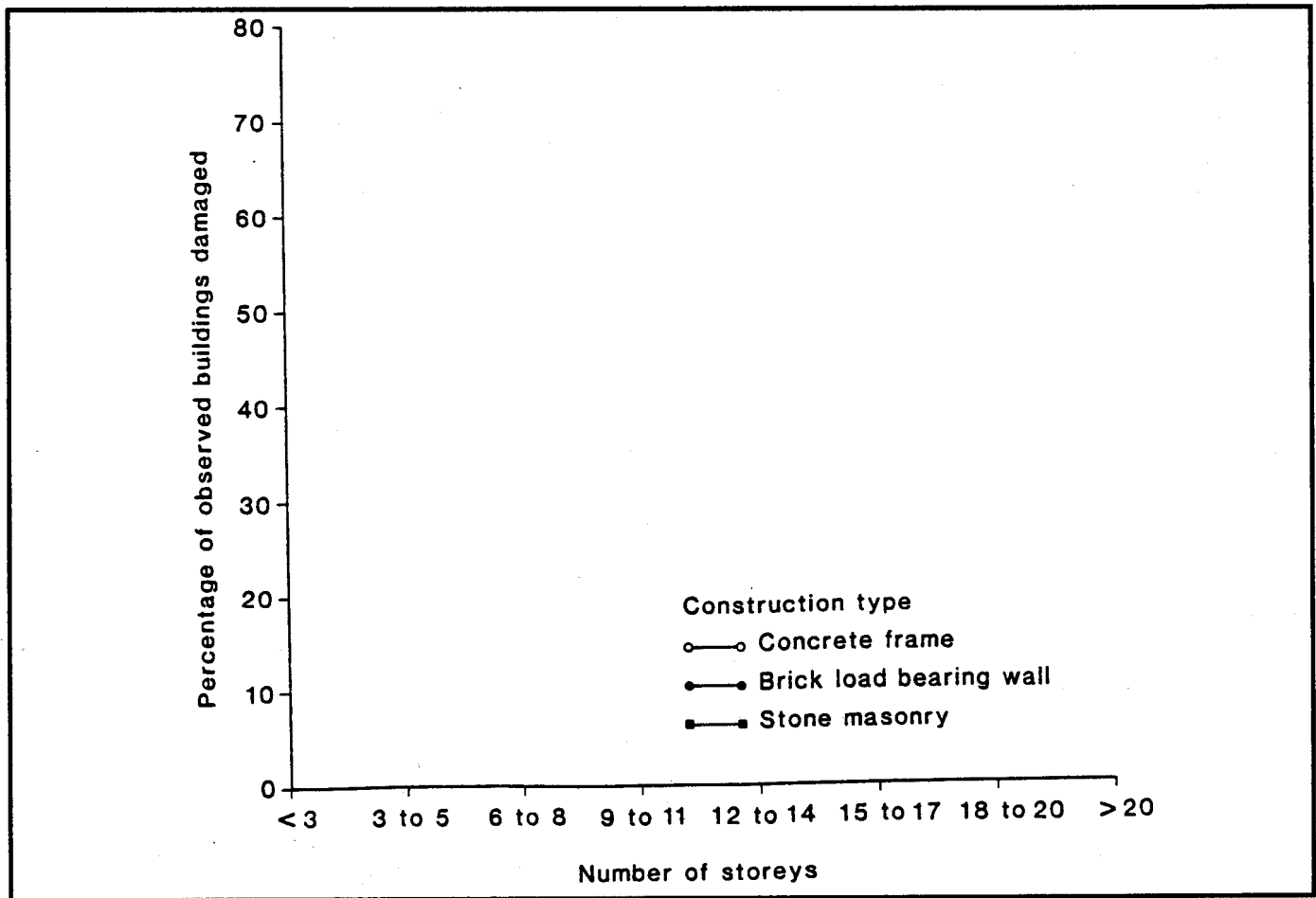


Fig. 10. Porcentajes de edificios dañados de varios tipos, en relación con su número de pisos. Proviene de cinco itinerarios a través de la zona de máximo daño.

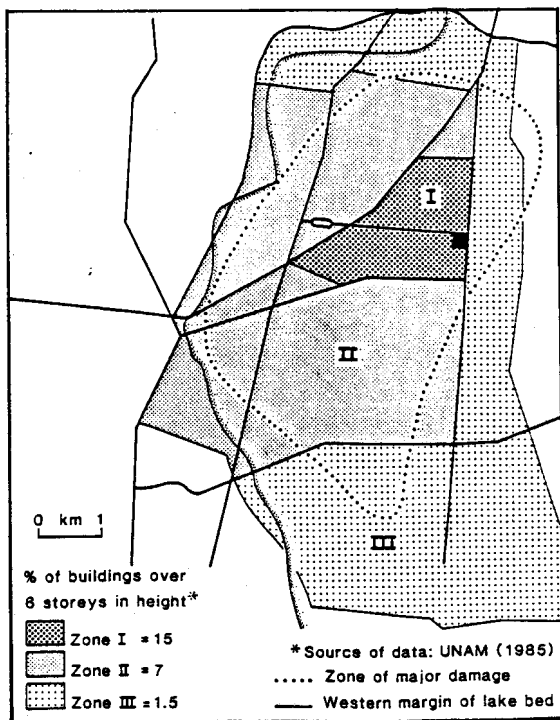


Fig. 11. Zonas con diferentes alturas medias de edificios en relación con la distribución del máximo daño en el terremoto de 1985.

la falla que produjo el terremoto de 1985 es uno de los muchos sectores que no habían experimentado un gran sismo durante un periodo mucho más largo. Estas zonas de un borde de placa se llaman lagunas sísmicas, y se cree que implican un riesgo sísmico especialmente alto porque la tensión causada por el movimiento de las placas ha debido acumularse en ellas durante mucho tiempo sin poder liberarse. ¿Puedes identificar lagunas sísmicas en la figura 12?

b) Una explicación de por qué Ciudad de México fue tan duramente castigada por el terremoto de 1985, considerando:

- I/ la geología regional
- II/ la geología local y del subsuelo
- III/ los tipos y alturas de edificios
- IV/ la densidad de población

c) Recomendaciones razonadas sobre investigaciones geológicas que deberían emprenderse, y normas de construcción que

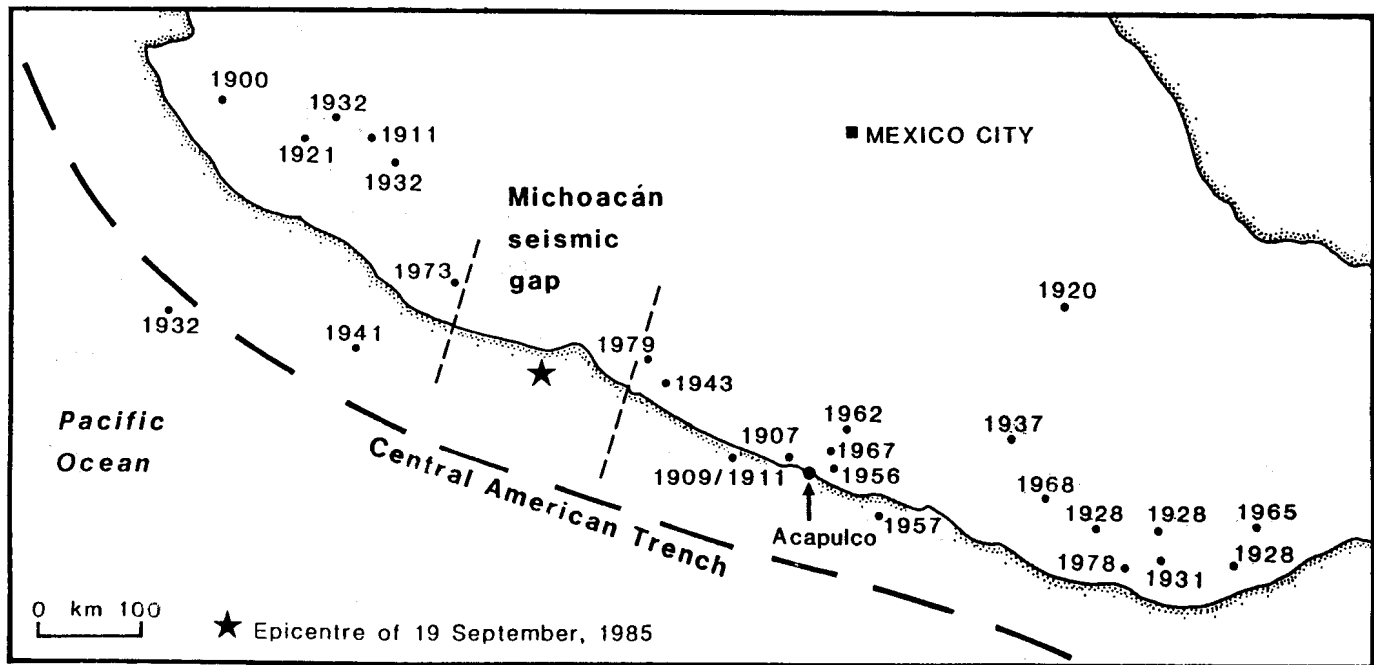


Fig. 12. Epicentros de los terremotos de magnitud mayor de 7,75 registrados en México durante el presente siglo. Según Rinehart *et al.* (1982)

deberían adoptarse antes de permitir el desarrollo futuro de las ciudades mexicanas.

Agradecimientos

Agradecemos a Martin Degg la cesión del material empleado en el artículo, así como el permiso para su uso. Martin Degg agradece a la Asociación de Reaseguros de Londres la subvención de sus investigaciones sobre Riesgos Naturales y Reaseguros. Una descripción detallada del terremoto y de sus efectos figura en Degg (1987).

BIBLIOGRAFIA

- Booth E.D., Pappin J.W., Degg M.R. y Steadman R.S. (1986). The Mexican Earthquake of 19th September, 1985. Informe sobre el terreno por EEFIT, publicado por SECED. Londres, 150 p.
- Degg M.R. (1987). The 1985 Mexican earthquake. *Modern Geology*, 11, 109-131.
- Duke C.M. y Leeds D.J. (1959). Soil conditions and damage in the Mexico earthquake of 28th July, 1957. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 49 (2), 179-191.

Marsal R. J. y Mazari M. (1959). The subsoil of Mexico City. Institute of Engineering, UNAM, Mexico.

Prince J. et al. (1985). Acelerogramas en Ciudad de México del sismo del 19 de Septiembre de 1985. *Informe IPS-IOA a IPS-IOD*, Instituto de Ingeniería de la UNAM, Ciudad de México.

Rinehart W. et al. (1982). Seismicity of Middle America (map). Nat. Geophys. Data Center, *Nat. Earthquake Information Service*, Boulder, Colorado.

UNAM (1985) Effects of the 19th September, 1985 earthquakes in the buildings of Mexico City. *Informe preliminar por el Instituto de Ingeniería*, Ciudad de México, Octubre de 1985, 18 p.

NOTAS DE USO

Este material fue de gran utilidad en un curso de Geología Básica del 1^{er} semestre de la diplomatura en Geología-Ingeniería Geológica de la Facultad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Nuevo León, en México. Algunos conceptos, como frecuencia, amplificación y resonancia fueron aclarados previamente. Las conclusiones que figuran en 4h y en 5d fueron reservadas para la discusión final. Una cuerda gruesa de unos cinco metros, agitada ondulatoriamente en su totalidad, en su mitad y en un extremo sirvió de modelo visual para aclarar por qué los edificios más peligrosos en el seísmo mexicano (y en cualquier otro) no son los más altos sino los de altura intermedia. [Traductor.]

NORMAS PARA LOS AUTORES

Los autores de trabajos para Revista de Enseñanza de las Ciencias de la Tierra deberán remitir a la dirección de la asociación (AEPECT. Departamento de Petrología y Geoquímica. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense. 28040 Madrid) su original grabado en un diskette para PC en cualquier versión del lenguaje Word Perfect o, en su defecto, en MS-DOS, acompañándola de una copia a dos espacios en papel DIN A4 numerada a lápiz.

El trabajo deberá estar precedido de un resumen en español y otro en inglés, y obligatoriamente comenzará con una introducción, en la que se enmarque el trabajo realizado, y acabará con un apartado de conclusiones. La bibliografía seguirá el modelo empleado en el presente número.

Las fotografías pueden ser enviadas en papel o como diapositivas. Los dibujos de línea se prefieren grabados en el mismo diskette que el texto; si no se dispone de un programa de dibujo, se puede enviar una copia en papel siempre que la calidad de la delineación sea profesional.

El Comité Editorial se reserva el derecho de realizar correcciones de estilo sin consultar con los autores. Revista de Enseñanza de las Ciencias de la Tierra renuncia expresamente a copyright sobre los trabajos que publica siempre que éstos sean usados en la práctica docente.