CAPÍTULO 3

SISMOLOGÍA

Carlos Gutiérrez

3.1 INTRODUCCIÓN

El 21 de enero del 2003 se registró un sismo a las 20:06 hora local, (02:06 h GMT), localizado por el Servicio Sismológico Nacional (SSN) en 18.6° N y 104.22° W, frente a las costas de Colima, con una profundidad de 9.3 km.

La magnitud calculada por el SSN, empleando la escala de magnitud de energía, basada en la estimación de la energía liberada empleando registros de la estación CUIG, ubicada en Ciudad Universitaria, fue Me7.6.

El movimiento fue sentido con fuerza, ocasionando daños considerables en construcciones e interrupción de servicios eléctrico y telefónico, principalmente en Colima y parte de los estados vecinos de Michoacán y Jalisco. El movimiento fue sentido claramente en la ciudad de México y, aunque levemente, en localidades alejadas como Orizaba, situada a unos 800 km del epicentro.

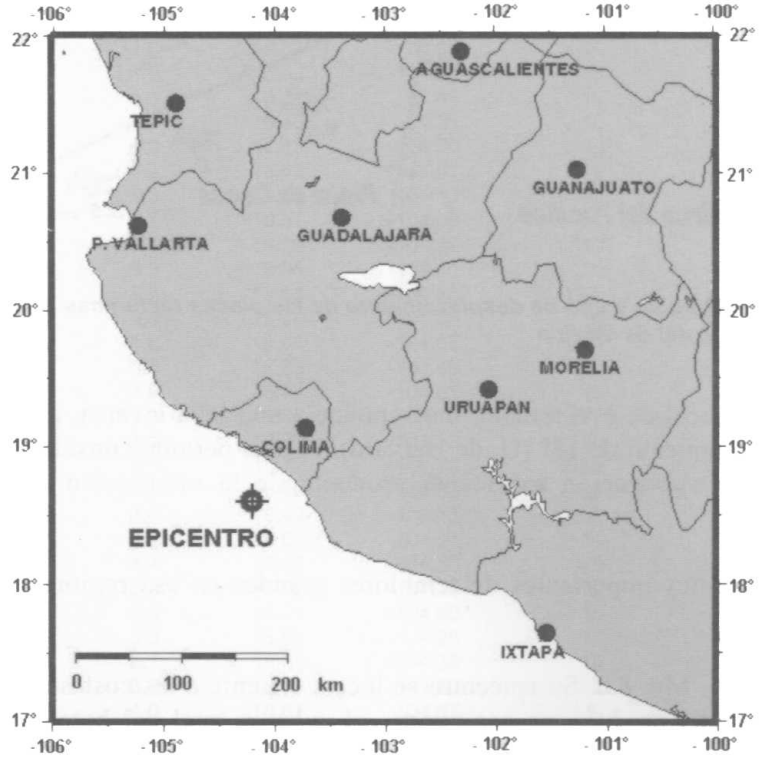

Figura 3.1 Localización del epicentro del sismo del 21 de enero de 2003 M 7.6 (SSN) (Fuente: Servicio Sismológico Nacional)

3.2 EVENTO PRINCIPAL, RÉPLICAS, ACELERACIONES Y VELOCIDADES REGISTRADAS

3.2.1 Marco tectónico de la región epicentral

Este evento, considerado dentro del contexto sismológico de nuestro país como de gran magnitud, se origina en la zona de subducción ubicada a lo largo de la costa del Pacífico, entre los estados de Jalisco y Chiapas donde tiene lugar la mayor parte de la sismicidad de la República Mexicana.

Es muy probable que el epicentro se encuentre próximo a la todavía poco precisa frontera, entre las placas Rivera y Cocos las cuales penetran, en esa región, por debajo de la placa Norteamericana con una velocidad relativa de alrededor de 5 cm/año (Kostoglodov and Bandy, 1995).

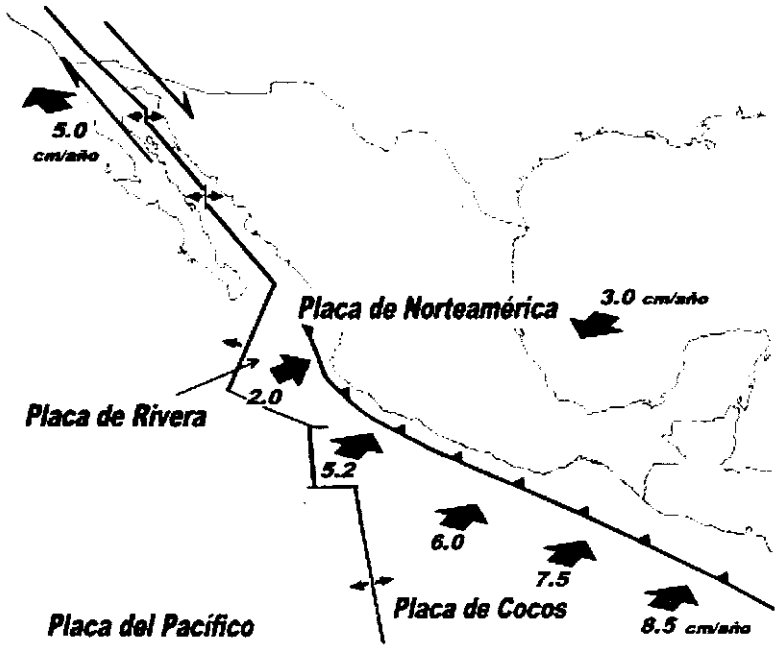

Figura 3.2 Distribución y tipo de desplazamiento de las placas tectónicas a lo largo de la costa occidental de México

El mecanismo focal de este temblor corresponde a una falla inversa, paralela a la trinchera, con un ángulo de buzamiento de 17° (U. de Harvard), lo cual permite considerar este evento como típico de la zona de subducción mexicana, producto de la interacción entre placas (evento interplaca).

Como antecedentes importantes de temblores grandes en esa región, se pueden citar los siguientes:

Octubre 9, 1995. Mw 8.0. Su epicentro se localizó frente a las costas de Colima, cercano a Manzanillo. Este evento produjo, en ese puerto, el colapso total del hotel Costa Real y daños importantes en vivienda y otros hoteles de la localidad. Asimismo, produce daños menores en la planta termoeléctrica y licuación de arenas (Tena, A., 1997). Como efecto adicional, se tiene reportada la ocurrencia de un tsunami con olas hasta de 5 m de altura, entre Manzanillo y Chamela, Jalisco.

Enero 30, 1973. Ms 7.6. Epicentro en la región costera de Michoacán. Los daños mayores, principalmente es estructuras no ingenieriles, se concentraron en el estado de Colima, la parte suroeste de Michoacán y sur de Jalisco. Provoca un tsunami con olas de 1.1 m en Manzanillo

Junio 3, 1932. Ms 8.2. El evento está catalogado como el más grande del siglo pasado. Ocasionó graves daños principalmente en el estado de Jalisco, donde se alcanzaron intensidades de IX y X en la escala Modificada de Mercalli (MM). En el estado de Colima se tuvo un nivel de daño menor, caracterizado por el grado VIII de MM (Singh et al. 1985). Como consecuencia de este temblor, también se registró un tsunami en Manzanillo, con altura máxima de 2.0 m.

Cabe mencionar que el sismo del día 3, tuvo repeticiones importantes el 18 y 22 de junio, con magnitudes 7.8 y 6.9, respectivamente. El evento del día 22 produjo un tsunami con olas hasta de 10 m en Cuyutlán, penetrando hasta un kilómetro sobre el continente.

3.2.2 Réplicas

De acuerdo con los reportes del SSN, el mayor número de réplicas se registró del 21 al 24 de enero Las de mayor magnitud ocurrieron el día 22, con 5.3 y 5.7 En la tabla 3.1 se muestran las réplicas reportadas hasta el día 5 de febrero.

Tabla 3.1 Réplicas reportadas por el SSN, del 21 de enero hasta el 5 de febrero de 2003

Fecha	Hora	Mag	Lat °n	Lon °o	Prof (km)	Region
21/01/03	20:26 45	4 0	18.67	-104.27	10	Costa de Colima
21/01/03	20:29 02	4.5	18.62	-104.39	10	Costa de Colima
21/01/03	22:17 20	4.0	18 47	-104 49	10	Costa de Colima
21/01/03	22:34 15	4.0	18 45	-104 21	10	Costa de Colima
21/01/03	22:50 44	4.0	18.49	-104 20	10	Costa de Colima
21/01/03	23:09:26	4.4	18 42	-104 61	10	Costa de Colima
21/01/03	23:45.09	4.3	18 74	-104 18	10	Costa de Colima
21/01/03	23 52:43	4 2	18 51	-104 35	10	Costa de Colima
22/01/03	00 04:45	4 3	18 95	-104 22	10	Costa de Colima
22/01/03	03 42:01	3 9	19 05	-104 11	15	Costa de Colima
22/01/03	09 12:17	3 9	18 54	-104 23	7	Costa de Colima
22/01/03	13 41 40	5.8	18 64	-104.58	10	Costa de Colima
22/01/03	13 58.04	4 0	18 61	-104 65	21	Costa de Colima
22/01/03	14 15 38	5 3	18 83	-104 49	10	Costa de Colima
22/01/03	17 09 51	4 0	18.71	-104 81	13	Costa de Colima
22/01/03	19 30 01	4.0	18.60	-104.76	10	Costa de Colima
22/01/03	22 46 13	4 1	18.93	-104.58	10	Costa de Colima
23/01/03	00.26.44	4 0	18.72	-104.73	12	Costa de Colima
23/01/03	02 25 27	4 1	18.45	-104.33	22	Costa de Colima
23/01/03	04 54.59	4 7	18.49	-104.48	7	Costa de Colima
23/01/03	11.54.37	4 3	18.66	-104.34	15	Costa de Colima
23/01/03	13 08 42	4.4	18 47	-104.33	19	Costa de Colima
24/01/03	00 40 17	3 8	18 66	-104.15	6	Costa de Colima
24/01/03	01:49 09	4 0	18 71	-104 60	16	Costa de Colima
24/01/03	03:29.40	3.9	18 80	-104.28	10	Costa de Colima
24/01/03	04:33 11	3.7	18 56	-104 38	16	Costa de Colima
24/01/03	05.19 17	3.7	18 69	-104 50	17	Costa de Colima
26/01/03	02:46 48	4.0	18 67	-104 67	5	Costa de Colima
28/01/03	05:29 06	4.2	18 47	-104 16	22	Costa de Colima
29/01/03	13:38 07	3.9	18 38	-104 32	10	Costa de Colima
03/02/03	21:34 09	4.4	18.64	-104 18	10	Costa de Colima
04/02/03	10 29.51	4 3	18 59	-104 24	14	Costa de Colima
05/02/03	21 44 11	3 8	18.54	-104 09	16	Costa de Colima

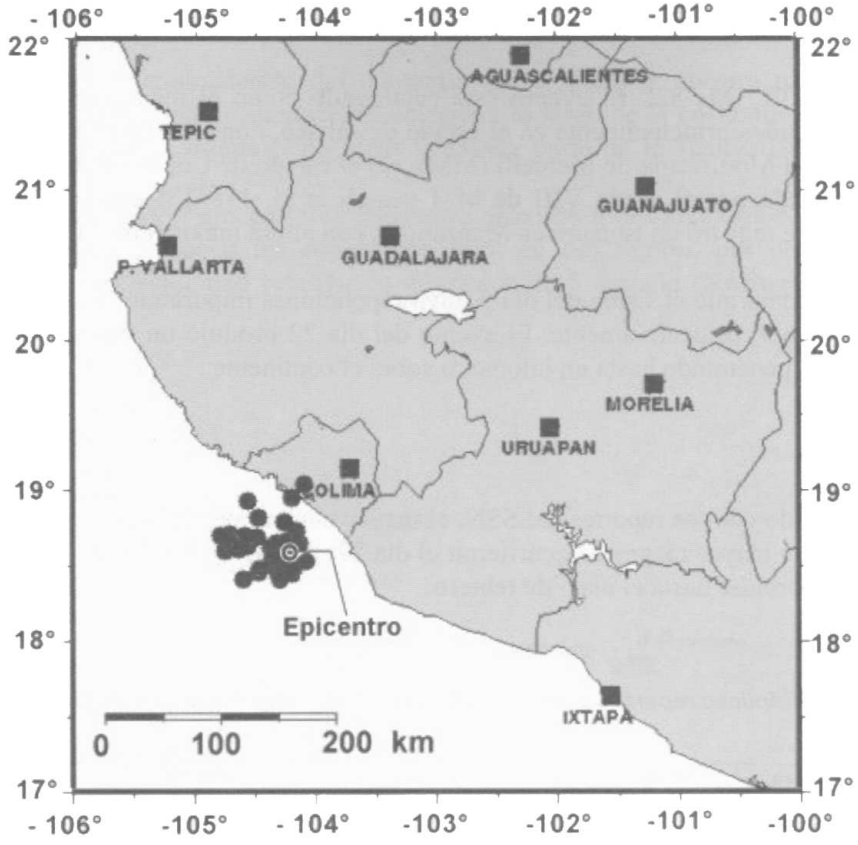

Figura 3.3 Epicentros del evento principal y de las réplicas hasta el día 5 de febrero (Fuente: Servicio Sismológico Nacional)

3.2.3 Aceleraciones del terreno

De acuerdo con un registro obtenido por el Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES) en una zona de terreno blando dentro de la planta termoeléctrica de Manzanillo, la aceleración máxima ($A_{máx}$) alcanzó un valor de 323 gal para componente horizontal.

Por otra parte, el SSN cuenta con una estación de banda ancha, ubicada cerca de la ciudad de Colima, con la que se registraron aceleraciones del terreno aunque sólo para los primeros 10 segundos del temblor, debido a una falla instrumental. Los valores máximos ($A_{máx}$), que corresponden esencialmente a ondas P, son 47.8, 70.5 y 72.1 gal, para los componentes NS, EO y vertical, respectivamente. Es probable que en la ciudad de Colima, tomando en cuenta el nivel de daño observado, las aceleraciones máximas hayan alcanzado niveles similares al reportado para Manzanillo.

El sismo también fue registrado por acelerógrafos del CENAPRED, siete en el D.F. y las estaciones de Cuernavaca y Acapulco, así como por estaciones de banda ancha del SSN y acelerógrafos operados por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (ver tabla 3.2).

Tabla 3.2 ***Aceleraciones máximas, en cm/s^2, registradas por acelerógrafos del CENAPRED (1), Instituto de Ingeniería de la UNAM-U. de Nevada (2) y Servicio Sismológico Nacional (3). * Corresponden a ondas P, por lo que las aceleraciones para la fase más intensa se estiman por encima de esos valores***

Estación	Norte Sur	Este Oeste	Vertical
CENAPRED (1)	4 31	-4 57	-2.70
COYOACÁN (1)	-6 57	5.19	2.05
IMP (1)	6.6	5 9	1.9
TLACOTAL (1)	-16 65	-13 89	4.46
ZARAGOZA (1)	19.5	14.2	4.5
U KENNEDY (1)	11.6	13 2	3 0
ROMA C (1)	20.02	-15.82	4.46
CHAPULTEPEC(1)	-4.42	-3.91	3.35
ESTANZUELA (1)	-2.05	-2.04	1 25
ACAPULCO (1)	1.96	1 54	1 29
CUERNAVACA (1)	-6.94	-8.20	-4 57
CALETA CAMPOS (2)	28.1	27.8	14.7
VILLITA (2)	10 4	11.1	6.8
UNION (2)	12.3	8.2	8 9
PETATLAN (2)	3.7	3 6	3.7
COYUCA (2)	4.9	3 4	3.7
COLIMA(3)	>47.8 *	>70 5 *	>72.1*
CHAMELA (3)	38.8	6.2	15 9
ZIHUATANEJO (3)	5.4	5,4	3.7
CAYACO (3)	1.4	1 5	1.2
ZACATECAS (3)	1 6	2.0	2.6
IGUALA (3)	7 8	3.4	4.0
CU – D.F. (3)	4.2	4.2	2.0
YAUTEPEC (3)	3.2	2 2	2.1
MAZATLAN (3)	0.65	0 41	0.39
TEHUACAN (3)	4 2	2.3	3.0
PINOTEPA (3)	0.99	0.41	0 97
OAXACA (3)	3.6	2 3	2 0
MATIAS ROMERO (3)	1.2	0 42	0.62
COMITAN (3)	0 64	0.37	0.44

3.2.4 Aceleraciones del terreno en la Ciudad de México

El CIRES publicó datos de aceleraciones registradas mediante la Red Acelerográfica de la Ciudad de México (RACM), que cuenta con 64 estaciones de superficie, cubriendo las zonas de lago, transicion y terreno firme.

Empleando conjuntamente los valores de aceleraciones máximas ($A_{máx}$) reportados por CIRES y aquellos obtenidos por CENAPRED, se construyó un mapa de aceleraciones máximas para la ciudad de México (Fig. 3.4).

El nivel más alto de aceleración se registró en la estación Xochimilco (CIRES) con 48 4 gal.

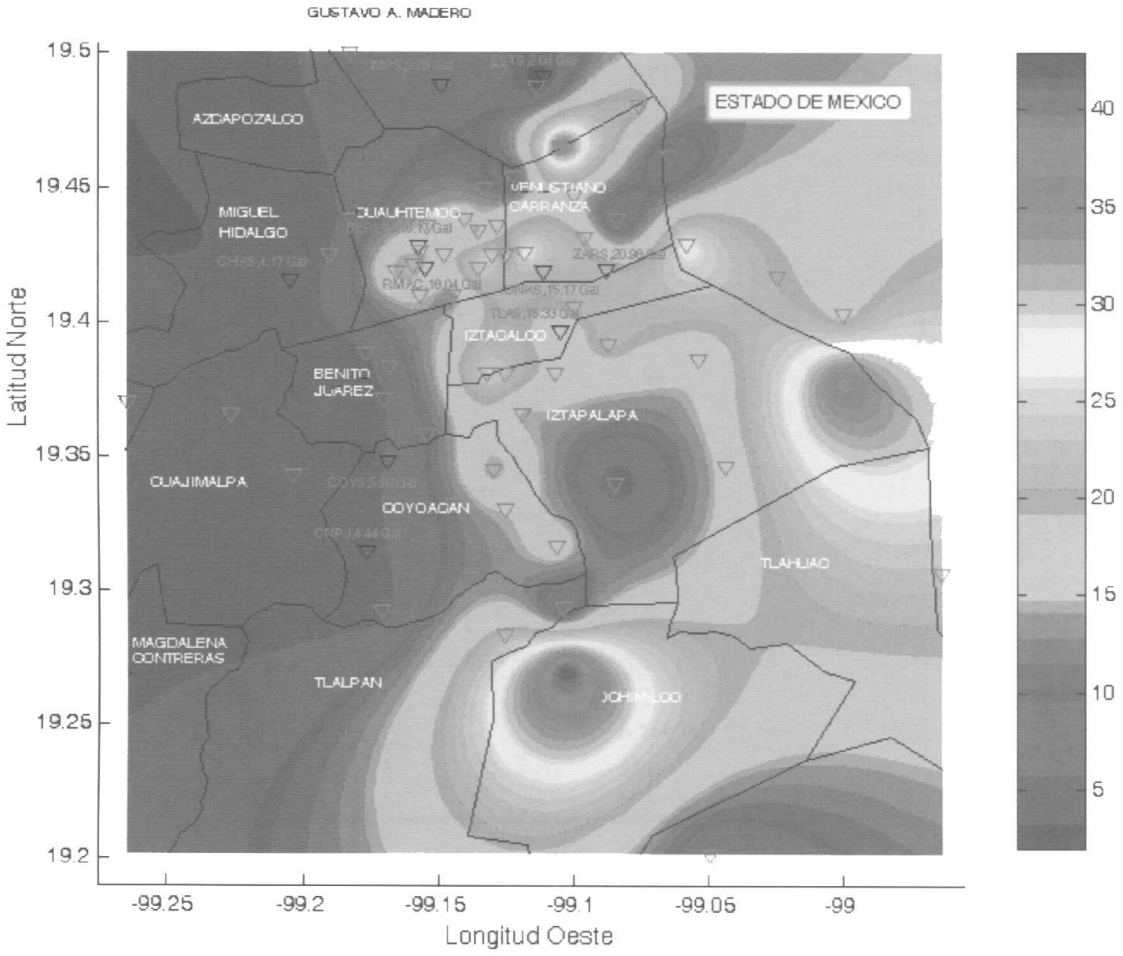

Figura 3.4 Distribución de aceleraciones máximas en la Ciudad de México con base en datos de estaciones de CIRES Y CENAPRED

3.2.5 Mapa de intensidades sísmicas

Para la construcción del mapa de intensidades, con base en la Escala Modificada de Mercalli, se consideraron las descripciones de daños y efectos en el terreno por parte del personal del CENAPRED que visitó las zonas de mayor afectación, los reportes generados por autoridades federales y estatales de Protección Civil, consultas telefónicas y notas periodísticas.

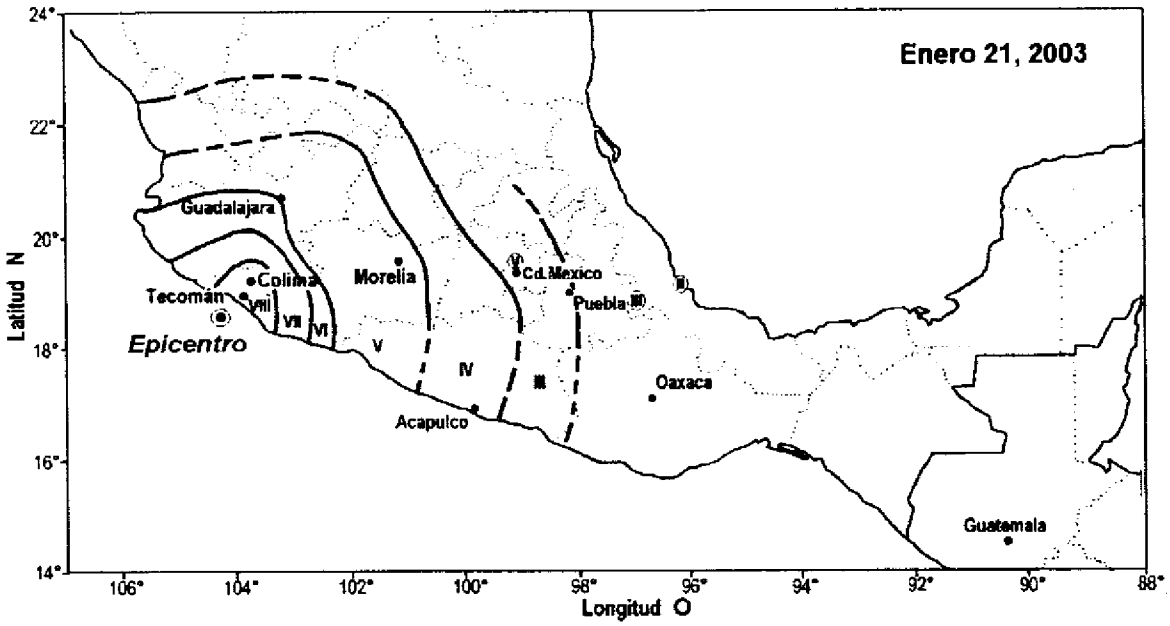

Figura 3.5 Mapa de intensidades Sísmicas

Los máximos niveles de intensidad, VII y VIII, se asignaron en el estado de Colima y parte de los estados vecinos, Michoacán y Jalisco.

Las isosistas muestran una elongación en sentido Norte-Noreste, lo que sugiere un efecto de directividad en la salida de la energía de la fuente sísmica. Dicho efecto de directividad fue verificado por Singh et al., 2003, de manera analítica, resultando una trayectoria con un ángulo N38°. Lo anterior puede explicar el que los mayores daños se hayan concentrado en poblaciones como Tecomán, Armería y la ciudad de Colima, mientras que el nivel de daño en Manzanillo fue relativamente menor.

La tendencia a la elongación de las isosistas, correspondiendo a un efecto de directividad, ha sido observada anteriormente, como es el caso del sismo de Tehuacán, ocurrido el 15 de junio de 1999, Mw 7.0, (Singh, et al., 1999).

Para conocer la frecuencia con que se han presentado daños severos, a partir de 1900, en las ciudades de Colima y Manzanillo como consecuencia de grandes sismos con epicentro cercano al estado de Colima, se muestra la Tabla 3.3. Se observa que, para ese periodo, intensidades de VII o mayores han ocurrido siete veces para Colima y al menos, seis para Manzanillo. Lo anterior implica, de manera general, que en la región se han tenido daños severos en promedio cada 15 años.

Tabla 3.3 Frecuencia de daños en las ciudades de Colima y Manzanillo a partir de 1900

Fecha	Magnitud	Manzanillo	Ciudad de Colima
Enero 20, 1900	M 7.4	-	VIII
Junio 3, 1932	Ms 8.2	VIII	VIII
Junio 18, 1932	Ms 7.8	VIII-IX	IX
Abril 15, 1941	Ms 7.6	VIII	X
Enero 30, 1973	Mw 7.6	VIII	VIII
Octubre 8, 1995	Mw 8.0	VIII-IX	VII
Enero 22, 2003	Mw 7.4	VII-VIII	VIII

3.2.6 Estudios previos en la Ciudad de Colima

Como parte de una estrategia a nivel nacional, el CENAPRED realiza estudios de microzonificación sísmica en ciudades ubicadas en zonas de alta sismicidad y que, al mismo tiempo, poseen una infraestructura creciente.

En 1996 se publicaron los resultados de una campaña de microzonificación sísmica en la ciudad de Colima que incluyen, entre otros, las frecuencia dominante en algunos sitios, con base en sismos de magnitud moderada, y dos perfiles de velocidades de ondas de corte en dos sitios característicos de la zona urbana (Gutiérrez et al., 1996).

3.2.7 Geología superficial

El terreno sobre el que se asienta la zona urbana está constituido por (Fig 3.6):

Conglomerados, principalmente en la parte Este de la ciudad

Intercalaciones de arenas y conglomerados predominantes en la parte Oeste del área urbana

Aluviones, producto básicamente del acarreo de ríos, depositados en el sur de la ciudad utilizados principalmente con fines agrícolas

Brecha volcánica andesítica sobre la que se han desarrollado la mayor parte de las obras civiles y se concentra más del 50% de la población; se extiende principalmente en la parte norte. El espesor total de los depósitos de avalancha volcánica debajo de la ciudad puede llegar a ser hasta de 700 m según estudios geológicos (Navarro, Cortés, Universidad de Colima, comunicación personal) y geofísicos, (López y Gutiérrez, 1977).

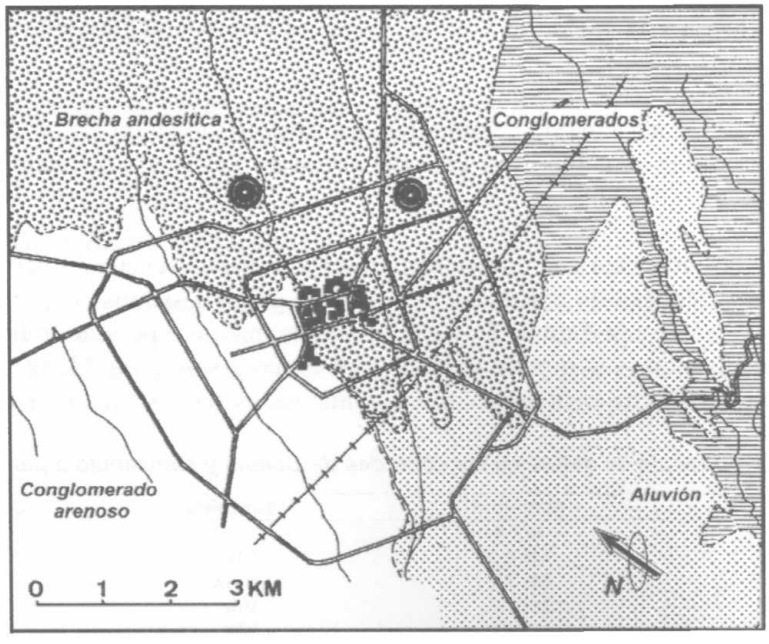

Figura 3.6 ***Geología superficial en la ciudad de Colima. Se señalan, en la zona centro, las áreas con mayores daños como consecuencia del sismo del 21 de enero de 2003 y la ubicación de dos pozos exploratorios con profundidad de 50 m***

3.2.8 Velocidades de ondas sísmicas en pozos del área urbana

Se perforaron dos pozos con profundidad de 50 m, con el fin de conocer las velocidades de ondas P y S en las primeras capas, cuya respuesta ante la excitación sísmica es significativa para las construcciones (Fig. 3.7).

Para ello se utilizó un sistema de sonda suspendida que, a diferencia de otros métodos para la observación de velocidades de ondas sísmicas a diferentes profundidades, alcanza un mayor nivel de precisión debido principalmente a que la fuente y los detectores se encuentran en el mismo cuerpo (Fig. 3.8)

Los pozos se ubicaron sobre brecha volcánica, material donde se encuentra desplantada, gruesamente, poco más de la mitad de las construcciones y sobre el cual tiende a crecer la ciudad, en sentido norte, para alcanzar mayores alturas y, en consecuencia, temperaturas relativamente menores.

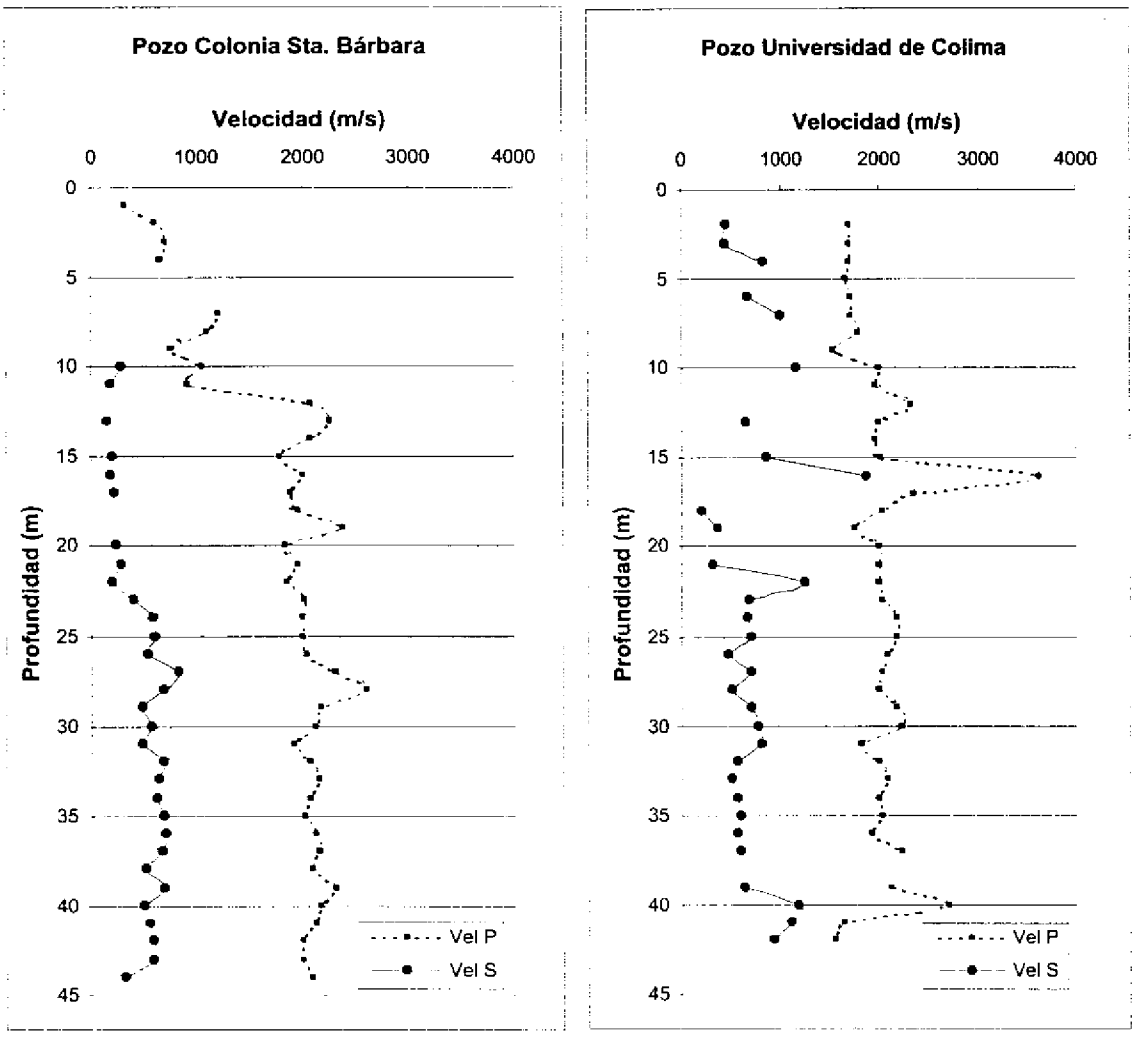

Figura 3.7 Perfiles de velocidades de ondas P y S en pozos en la ciudad de Colima

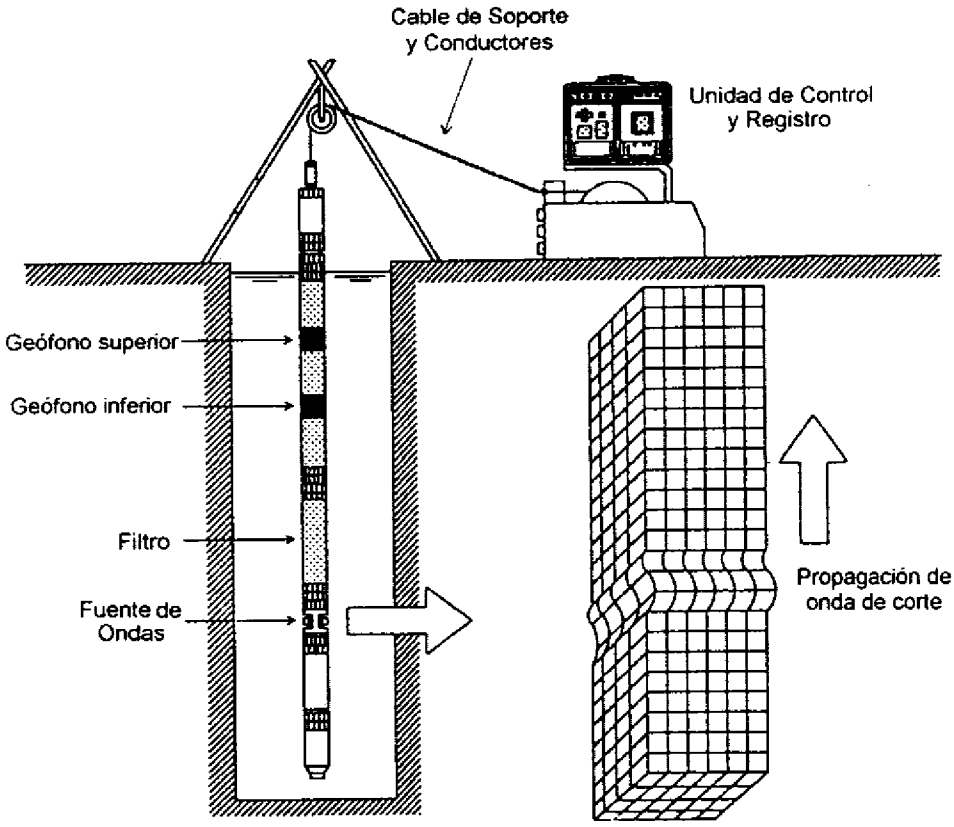

Figura 3.8 Sistema de sonda suspendida empleado para la determinar perfiles de velocidades P y S en pozos

3.2.9 Frecuencia dominante del terreno y amplificación de las ondas

A partir de los perfiles mencionados y de la información geológica a profundidad, se planteó un modelo de capas planas y horizontales (Tabla 3.4), que se utilizó para calcular una función de trasferencia ante incidencia de ondas SH (Santoyo, 1991), que representa las amplificaciones a que se someten las ondas al propagarse por un medio elástico (Fig.3.9).

Tabla 3.4 Modelo de capas planas y horizontales propuesto para la zona urbana de Colima

Espesor (m)	Velocidad (m/s)
20	220
780	600
Semiespacio	1700

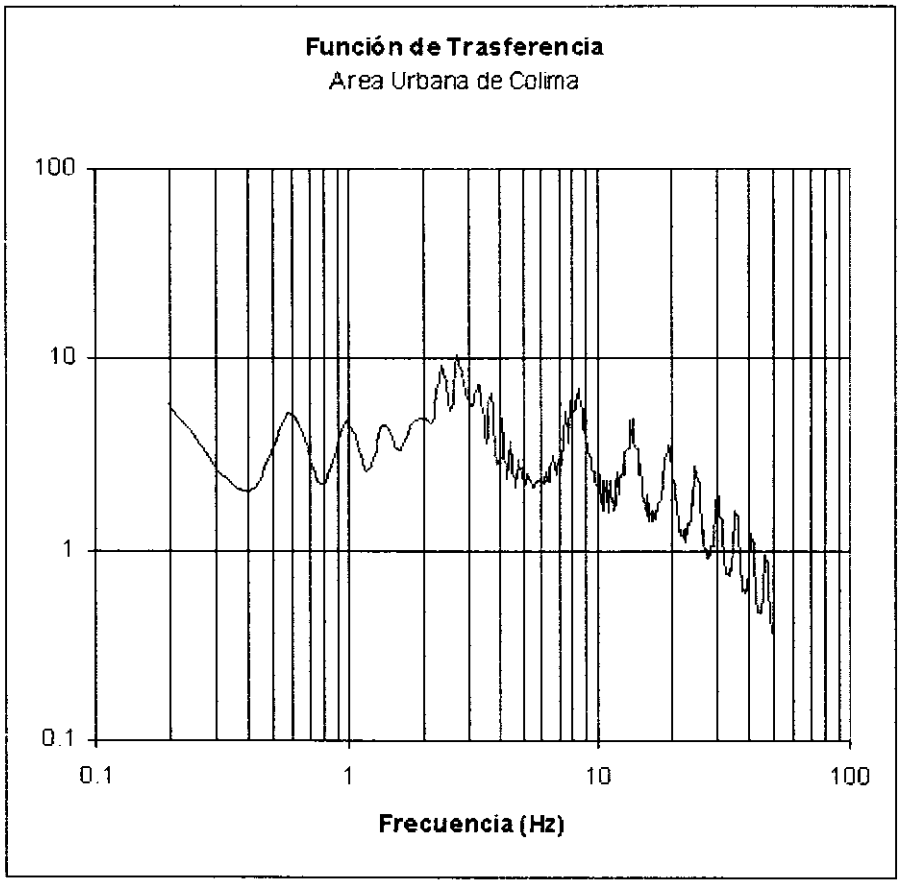

Figura 3.9 Función de trasferencia propuesta para la ciudad de Colima

De la función de trasferencia teórica se desprende que la frecuencia dominante se ubica alrededor de 2.5 Hz, mientras que el grado de amplificación es cercano a 10 veces.

Por otra parte, mediante el cálculo de funciones de trasferencia empíricas, empleando sismos de magnitud moderada (Mc 3.2 a 4.5) registrados en la zona urbana de Colima, se determinó que las frecuencias dominantes en la zona centro de la ciudad y en el campus de la Universidad de Colima se encuentran alrededor de 2.25 y 2.5 Hz, mientras que la amplificación observada, para ondas S, fue hasta de 5 veces (Gutiérrez et al., 1996).

Si bien la función de trasferencia no predice un grado de amplificación como el observado, la frecuencia dominante f = 2.5 Hz (T = 0.4 s) se muestra consistente en el caso teórico así como en las observaciones de campo.

BIBLIOGRAFÍA

Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES), "Colección de Acelerogramas Obtenidos con Estaciones de la Red Acelerográfica de la Ciudad de México Durante el Sismo de Colima Ocurrido el 21 de Enero de 2003".

Gutiérrez, C. , K. Masaki, J. Lermo y J. Cuenca (1996), "Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Colima", Serie Cuadernos de Investigación CENAPRED No. 33.

Harvard University. Central Moment Tensor Catalog. http://www.seismology.harvard.edu/

Kostoglodov, V. and W. Bandy (1995), Seismotectonics constraints on the convergence rate between the Rivera and North American plates, *J. Geophys. Res.* 100, 17977-17989.

López, H. y C. Gutiérrez (1977), "Pseudosecciones Eléctricas e Implicaciones Geohidrológicas en el Valle de Colima", geofísica Internacional, Vol. 17, No. 2.

Santoyo, M. (1991). "Programas para el Cálculo de Funciones de Trasferencia y Sismogramas Sintéticos para un Modelo Unidimensional de Subsuelo, ante la Incidencia de Ondas Tipo SH", Informe del CENAPRED, RG/03/91.

Singh, S.K., L. POnce and P. Nishenko (1985), The great Jalisco, Mexico, earthquakes of 1932: Subduction of the Rivera plate. Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 75, No. 5, pp 1301-1313

Singh, S.K. and G. Suárez (1988), "Regional variation in the number of aftershocks (mb ≥ 5) of large subduction zone earthquake (Mw ≥ 7)", *Bull. seism. Soc. Am.* 78, 230-244.

Singh S.K, J. F Pacheco, L. Alcántara , G. Reyes, M. Ordaz, A. Iglesias, S. Alcocer, C. Gutierrez, C. Valdés, V. Kostoglodov, Carlos Reyes, R. Quaas, J G. Anderson, T. Mikumo. A Preliminary Report on the Tecomán, Mexico Earthquake of 22 January 2003 (Mw7.4) Enviado para su publicación a Seismological Research Letters.

S.K. SIngh, M. Ordaz, J.F. Pacheco, R. Quaas, L. Alcántara, S. Alcocer, C. Gutiérrez, R. Meli and E. Ovando. A Preliminary Report on the Tehuacán, México Earthquake Report of June 15, 1999 (Mw 7 0). Seismological Research Letters Vol. 70, No. 5

Tena, A. (1997), "El Macrosismo de Manzanillo del 9 de Octubre de 1995", Universidad de Colima, Gobierno del Estado de Colima y Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.