Riesgo de MAREMOTOS

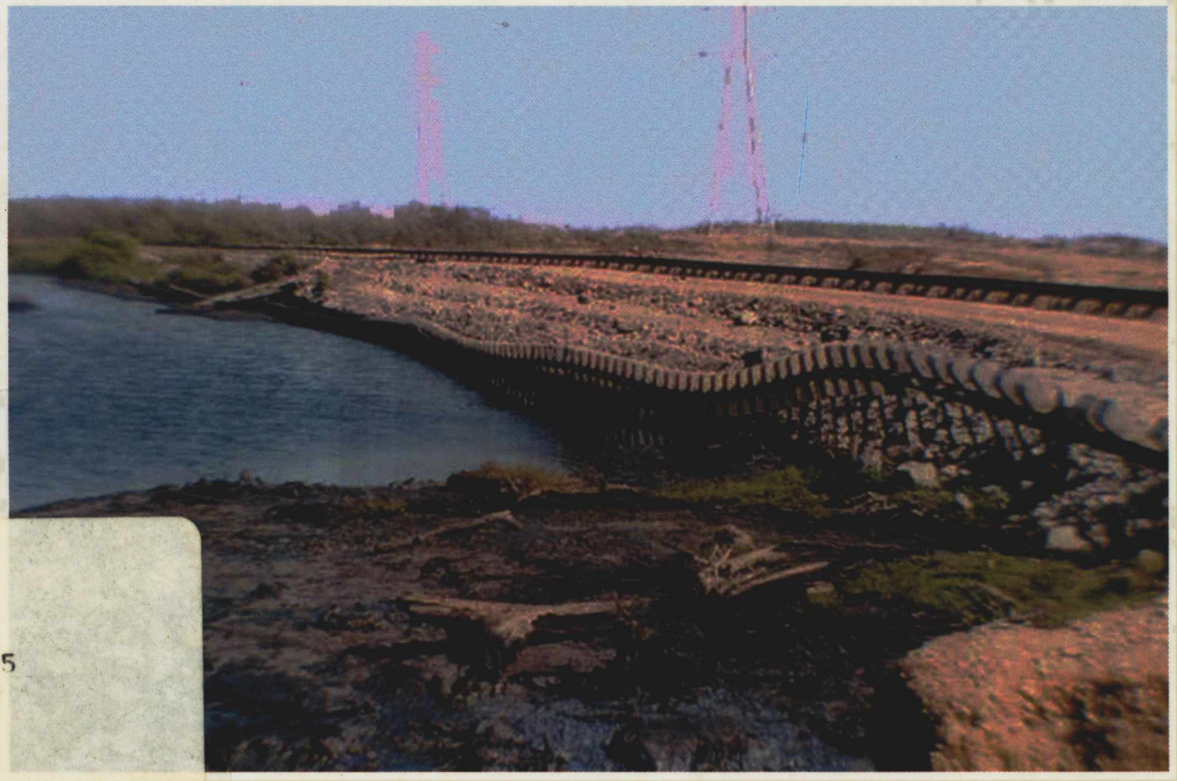
en Ciudad Lázaro Cárdenas, Michoacán

MEDIDAS DE PREVENCIÓN

Salvador Farreras S.

Modesto Ortiz F.

Graciela Alcalá



551.55
F385r

RIESGO DE MAREMOTOS EN CIUDAD LÁZARO CÁRDENAS, MICHOACÁN

Medidas de prevención

RIESGO DE MAREMOTOS EN CIUDAD LÁZARO CÁRDENAS, MICHOACÁN

Medidas de prevención

Salvador Farreras S.
Modesto Ortiz F.
Graciela Alcalá

El Colegio de México

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

El Colegio de Michoacán

551.47024 Farreras S., Salvador.
F37 Riesgo de maremotos en Ciudad Lázaro Cárdenas, Michoacán. Medidas de prevención/Salvador Farreras S., Modesto Ortiz F., Graciela Alcalá.– México: El Colegio de México: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada: El Colegio de Michoacán, 2003.

1. Geomorfología-Lázaro Cárdenas, Mich.-Investigaciones.
2. Maremotos-Lázaro Cárdenas, Mich.
3. Desastres naturales-Michoacán-Medidas de prevención.
4. Costas michoacanas-Fenómenos naturales.
I. Ortiz F., Modesto, coaut.
II. Alcalá, Graciela, coaut.

GC220.M6

Serie: Linderos de la costa

Portada: Fotografía de Salvador Farreras S.

Diseño: Natalia Rojas Nieto

Primera edición, 2003

© El Colegio de México
© Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada
© El Colegio de Michoacán

ISBN: 970-679-111-6

Hecho en México
Printed in Mexico

La serie *Linderos de la costa* es producto de la labor de un grupo de investigadores de diferentes disciplinas que estamos convencidos de la necesidad de trabajar juntos para mostrar cómo las actividades portuarias, pesqueras y turísticas están inextricablemente relacionadas entre sí debido a que las tres operan de manera simultánea en los mismos espacios costeros, y que su planificación por parte de las autoridades gubernamentales debería tomar en cuenta este hecho y no abordarlas independientemente, como ha sucedido hasta la fecha. De aquí se deriva nuestra obligación de dar cuenta tanto de las condiciones del espacio costero y de algunos fenómenos naturales que en él se presentan, como de las políticas del gobierno que han hecho posible el desarrollo de estas actividades.

Así pues, y con el ánimo de ampliar las fronteras de los estudios multidisciplinarios efectuados hasta ahora, ponemos a la consideración de los colegas y del público en general los aportes de nuestro trabajo para la comprensión de la situación actual de las costas del Occidente de México y de algunos de sus más paradigmáticos habitantes.

Esta investigación ha sido posible gracias a la colaboración interinstitucional de El Colegio de México, el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada y El Colegio de Michoacán, así como al apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Graciela Alcalá
coordinadora de la serie

Contenido

9 Agradecimientos

11 Introducción

13 Conceptos básicos

CAPÍTULO I

Antecedentes

17 Ciudad y puerto de Lázaro Cárdenas: entorno, geomorfología y desarrollo

31 Escenario de riesgo y vulnerabilidad ante maremotos en la costa occidental de México y en Ciudad Lázaro Cárdenas

41 El maremoto del 19 de septiembre de 1985 en Ciudad Lázaro Cárdenas

41 Descripción y efectos

44 Tipos de daño: clasificación y recuento

CAPÍTULO II

Estudio del riesgo y vulnerabilidad ante maremotos en Ciudad Lázaro Cárdenas

49 Metodología

51 Información: topografía, batimetría, aerofotogrametría y prospecciones

51 Información topográfica, urbana y portuaria

51 Información batimétrica

52 Información aerofotogramétrica

52 Prospecciones de campo

55 Modelación numérica TIME

61 Selección de sismo-maremoto prototipo

63 Aplicación, resultados y análisis

CAPÍTULO III

Recomendaciones para la reducción de la vulnerabilidad

75 Recomendaciones generales

77 Políticas de ordenamiento territorial y de ocupación de la franja costera

79 Características de las rutas de evacuación y de los refugios

81 Recomendaciones específicas para el sector portuario-industrial de Ciudad Lázaro Cárdenas

87 Obras de protección alternativas

89 Recomendaciones a la población: antes, durante y después de ocurrir un maremoto

89 Prevención: mucho antes de que ocurra un maremoto

90 Durante el maremoto

92 Después del maremoto

93 Educación pública, difusión y ejercicios

95 Conclusiones y proyección futura

99 Bibliografía

Agradecimientos

- *Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, que financió parcialmente este estudio mediante el apoyo al programa denominado "Transformación y Perspectivas de las Actividades Portuarias, Pesqueras y Turísticas en el Litoral Occidental Mexicano", y mediante el contrato de Estancia Sabática del investigador responsable.*

- *Al arquitecto Héctor F. Vásquez P., Jefe del Departamento de Planeación Urbana del H. Ayuntamiento de Lázaro Cárdenas, por la importante información cartográfica y de imágenes que nos proporcionó y por su apoyo en el procesamiento.*

- *Al licenciado Sergio Omar García R., Director del Departamento de Educación, Cultura y Deportes del H. Ayuntamiento de Lázaro Cárdenas, por su invaluable ayuda en la organización de conferencias en las instituciones locales de educación media y superior y para el público en general, y por establecer los contactos con los funcionarios del gobierno y con empresarios de la localidad.*

- *Al licenciado Jaime González M., Subgerente de Promoción de la Administración Portuaria Integral de Lázaro Cárdenas, S.A. de C.V., por su participación en la visita y prospección de campo efectuada en septiembre de 2000, así como por su gentileza en facilitarnos información sobre la zona industrial-portuaria.*

- *Al profesor Gabriel Conde, Director, y a la señora Leticia Estrada, Presidenta del Patronato, de la Casa de la Cultura del H. Ayuntamiento de Lázaro Cárdenas, por su valiosa cooperación para hacer contacto con los directores y maestros de las escuelas primarias, secundarias y preparatorias de la localidad, y por organizar la ceremonia de distribución de los libros infantiles sobre prevención de tsunamis, en enero de 2002.*

Introducción

El Colegio de México, el Colegio de Michoacán y el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) firmaron el 13 de noviembre de 1999 un convenio de colaboración para desarrollar un programa de investigaciones interdisciplinarias pesqueras, portuarias y turísticas en la zona marítimo-terrestre del litoral de los estados de Michoacán, Colima y Jalisco. Los primeros proyectos de este programa iniciaron sus trabajos en el año 2000, en el litoral de Michoacán.

En diciembre de 2000, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) otorgó su apoyo financiero para el periodo 2001-2005 a las tres instituciones participantes para la ejecución de este programa, titulado "Transformación y Perspectivas de las Actividades Portuarias, Pesqueras y Turísticas en el Litoral Occidental Mexicano".

Uno de los temas de trabajo del programa es el estudio del riesgo y la prevención de desastres socioeconómicos provocados por la ocurrencia de fenómenos naturales, directamente relacionados con el grado de vulnerabilidad de los desarrollos urbanos, comunitarios, portuarios e industriales adyacentes a la costa. El proyecto "Riesgo-Vulnerabilidad a Tsunamis, y Planeación para su Prevención, en Ciudad Lázaro Cárdenas, Michoacán", del cual deriva el presente libro, está dentro de ese contexto. Sus trabajos comenzaron en el segundo semestre de 2000, aun cuando los antecedentes del estudio –realizado por los mismos investigadores– del maremoto que afectó a Ciudad Lázaro Cárdenas el 19 de septiembre de 1985 datan de ese entonces.

El objetivo general del programa "Transformación y Perspectivas..." es estudiar de manera sistemática –y, en la medida de lo posible, integral– la región costera del occidente de México. Para ello se describirán y analizarán la transformación y las perspectivas de desarrollo de las actividades estrictamente litorales y marítimas que se realizan en las costas de los estados de Michoacán, Colima y Jalisco, es decir de las actividades portuarias (mercantes y militares), pesqueras (de pequeña y mediana escala) y turísti-

cas (de playa, pesca deportiva y navegación a vela), considerando que los grupos humanos que las practican configuran culturas particulares que es preciso conocer para determinar el peso específico que deberían tener en la planificación de un desarrollo hoy denominado "sustentable" o "sostenible" (Alcalá, 2000).

A su vez, el objetivo del proyecto "Riesgo-Vulnerabilidad..." es proporcionar información científica que permita disminuir la vulnerabilidad de la población, de las obras materiales y de los servicios públicos de la ciudad y puerto de Lázaro Cárdenas frente a posibles maremotos destructivos, evaluando las extensiones y las alturas de inundación que podrían causar. En particular, se confeccionan mapas que muestran la delimitación de las zonas de control de riesgo según las extensiones horizontales de inundación y la distribución espacial de las alturas de ola probables. Se pretende también aportar información a las autoridades del sector industrial, tanto público como privado, sobre patrones de uso del suelo, redistribución de población, estructuras y servicios, y señalamiento de las rutas de evacuación y de las zonas de refugio que ayuden a organizar los planes de prevención y de contingencia para reducir los efectos de futuros maremotos.

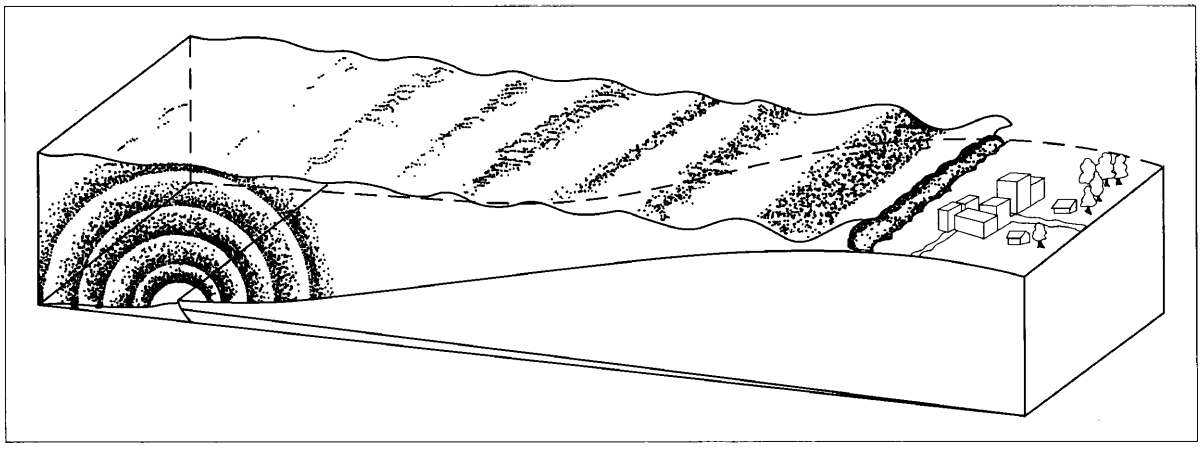
Como objetivo colateral, se intenta crear conciencia entre la población de Lázaro Cárdenas sobre el riesgo y la vulnerabilidad de su comunidad frente a los maremotos, así como sobre los métodos preventivos, a fin de que desarrollen una "cultura de autoprotección", siguiendo los lineamientos del Sistema Nacional de Protección Civil. Se pone especial énfasis en la población joven del sector educacional básico, medio y superior. Es tarea de las autoridades locales y de las empresas públicas y privadas extender esta labor educativa a la numerosa población flotante de trabajadores migratorios de la zona industrial-portuaria que desconocen el impacto de estos fenómenos (cifras oficiales prevén que en los próximos cinco años, el 85% de los nuevos empleos que se generen en Lázaro Cárdenas serán eventuales).

Conceptos básicos

Un maremoto es una secuencia de olas que se producen cuando ocurre un sismo cerca del océano o en el fondo del mismo, y que pueden arribar con gran altura a las costas y tener efectos destructivos, ocasionando pérdida de vidas y daños materiales. La gran mayoría de los maremotos se originan por sismos que suceden en el contorno costero del océano Pacífico, en las zonas de hundimiento (subducción) de los bordes de las placas tectónicas que forman la corteza del fondo marino. Otros agentes causales menos frecuentes son las erupciones de volcanes sumergidos, el impacto de meteoritos, los deslizamientos submarinos y las explosiones nucleares. Para México, el mayor riesgo son los maremotos generados por sismos en la Fosa Mesoamericana, que es la zona de hundimiento de las placas de Cocos y de Rivera bajo la placa de Norteamérica, adyacente al litoral suroccidental del Pacífico.

En el área donde se producen, y mientras viajan por aguas profundas mar afuera, las olas de los maremotos son de gran longitud (cientos de kilómetros) y exigua altura (centímetros), lo que los hace inobservables desde embarcaciones o aviones, y se propagan a una enorme velocidad (cientos de kilómetros por hora). Los maremotos no deben ser confundidos con las cortas olas de tormentas, marejadas o huracanes generadas por el viento, que llegan usualmente a las costas, ni con las ondas mucho más extensas de las mareas que arriban una o dos veces todos los días. Un maremoto no es una sola ola, sino una secuencia de olas que se suceden cada 15 a 40 minutos durante un lapso de medio día, un día, o más. Por lo común, no son ni la primera ni la segunda olas las de mayor altura y potencial destructivo.

Al acercarse un maremoto a la costa, a medida que disminuye la profundidad del lecho marino se reduce su velocidad y se acortan las longitudes de sus olas. En consecuencia, su energía se concentra, aumentando su altura, y las olas así resultantes pueden llegar a tener características destructivas al arribar a la costa (véase el esquema 1).



ESQUEMA 1. Generación, propagación y arribo a las costas de un maremoto.

Los conocimientos científicos sobre sismología no permiten aún predecir cuándo ocurrirá un sismo ni tampoco si éste producirá o no un maremoto, ni de qué "tamaño" (magnitud, intensidad o altura de las olas). Tradicionalmente se usó como indicador de la certeza de generación de un maremoto el que la magnitud del sismo fuera mayor de 7.5; sin embargo, este no es un indicador confiable para sismos no muy fuertes pero sí de larga duración. En efecto, han ocurrido sismos de magnitud menor que 7.0, pero de una duración mayor de 20 segundos, que han producido maremotos desusadamente grandes.

Debido a que los maremotos no suelen repetirse en un mismo lugar con tanta frecuencia como los huracanes y otro tipo de desastres naturales, sino que tienen una recurrencia que a veces es de varias decenas de años, comparable a la vida humana, las medidas para su prevención prácticamente quedan en el olvido de generación en generación. Pero los sismos en el entorno del océano Pacífico, particularmente en la Fosa Mesoamericana, continuarán ocurriendo, y podemos esperar que tarde o temprano los maremotos visitarán nuevamente las costas de México. No podemos predecir cuándo ocurrirá el próximo, pero sí podemos disminuir y mitigar sus efectos con medidas preventivas y de autoprotección. Para mayores detalles sobre los maremotos, los interesados pueden consultar Farreras (1997), entre otros.

Capítulo I

ANTECEDENTES

Ciudad y puerto de Lázaro Cárdenas: entorno, geomorfología y desarrollo

La región del delta del río Balsas (17° 55' N, 102° 10.5' W), donde se encuentra actualmente la ciudad y puerto de Lázaro Cárdenas, fue seleccionada hace cuatro décadas por políticos y planificadores gubernamentales para desarrollar ahí un megacomplejo portuario-industrial-acerero. Algunas de las ventajas consideradas para su ubicación fueron su proximidad a las fuentes de materia prima (minas de hierro), abundante agua dulce para soportar las necesidades industriales y urbanas, potencial de generación de electricidad con la construcción de presas hidroeléctricas y plantas termoeléctricas, vastas extensiones de tierra en las planicies del delta –disponibles mediante expropiaciones–, frente marítimo y amplias áreas de navegación interna, enclave geográfico accesible desde el Estado de México, Distrito Federal, Guerrero, Morelos, Querétaro y Michoacán (que cuentan con el 33% de la población del país y generan el 42% del producto interno bruto), y rutas de navegación con acceso directo a los mercados de la cuenca del Pacífico. El puerto de Lázaro Cárdenas fue creado con el propósito de que se constituyera en un complejo industrial y marítimo de excelencia sobre la costa oeste de México. Se trató de posicionarlo como centro alimentador del puerto de Los Ángeles/Long Beach y núcleo concentrador de cargas nacionales dentro del corredor Japón-EUA (InfoPort, S.A. de C.V., 2000).

En el delta del río Balsas, en una faja paralela a la playa de unos seis kilómetros de ancho, la topografía es plana, con terrazas a distintos niveles; los arroyos desembocan en lagunas costeras de aguas en general poco profundas y tranquilas que rompen estacionalmente las barras de arena de sus bocas, intercambiando sus aguas con las del mar. El delta está integrado por los brazos estuarinos derecho e izquierdo del río Balsas, por los canales interiores, por las bocas de comunicación al océano (originalmente tres), y por las islas e isletas de nivel muy bajo, en relación con el nivel medio del mar, conformadas por material sedimentario, y en las que abundan diversos cuerpos de agua costeros, como esteros, pantanos, humedales y manglares.

Los trabajos de habilitación de la infraestructura del puerto industrial requirieron la construcción de presas, la rectificación y canalización de los meandros del río, el cerramiento de al menos una boca de comunicación al océano, la apertura y dragado de dársenas y canales de navegación, el relleno masivo y nivelación de varios manglares, esteros y pantanos, y la construcción de espigones y escolleras en el litoral. Este modo de concebir el desarrollo regional ha dado por resultado una serie de desequilibrios ambientales, económicos y sociales que son patentes en el delta y que han sido analizados en estudios recientes (Toledo, 2000).

Las etapas cronológicas que han marcado el desarrollo de este megacomplejo han sido, a grandes rasgos, las siguientes:

- 1964-1968. Construcción e inicio de operaciones de presas hidroeléctricas en La Villita y El Infiernillo.
- A finales de la década de los sesentas: inicio del dragado del primer canal de acceso portuario.
- 1971. Comienzo de la construcción de la siderúrgica Las Truchas y de su muelle para metales y minerales.
- 1974. Inauguración de las primeras instalaciones portuarias.
- 1976. Inauguración e inicio de operaciones del complejo siderúrgico.
- 1979-1992. Fase de acondicionamiento, habilitación, construcción e instalación del megacomplejo portuario e industrial, que incluyó:
  - Vías interiores de navegación, bocas, dársenas de ciaboga y canales.
  - Muelles y terminales para contenedores, para usos múltiples y para carga y descarga de granos, de combustibles y de compuestos químicos, además de sus instalaciones para tráfico y bodegas.
  - Plantas para elaboración de fertilizantes, fabricación de tubos de acero y manufactura de turbinas; silos para almacenamiento de granos, tanques de almacenamiento de combustibles y segunda y tercera fases del complejo siderúrgico.
  - Espigones y escolleras en la costa exterior para protección contra el oleaje costero y para el control del transporte litoral, de la erosión y del depósito de sedimentos.
  - Zona naval.
- 1990. Construcción y operación de la planta termoeléctrica en Petacalco.

- 1994. Inicio de operaciones de la nueva Administración Portuaria Integral.
- 1995. Habilitación de los nuevos muelles para carga y descarga de productos derivados del petróleo e instalaciones para su distribución y almacenamiento.
- 1997. Inicio de la construcción de la terminal de descarga de carbón, de los patios de almacenamiento de carbón y cenizas y de la banda transportadora de carbón que atraviesa el brazo izquierdo del río.
- 1999. Inauguración de las nuevas instalaciones de la base naval.

Este complejo portuario-industrial-naval abarca un área aproximada de 4 800 hectáreas, 3 000 de las cuales ya están ocupadas, con un poco más de 20 kilómetros de frentes de agua construidos o susceptibles de construir, y canales de navegación dragados de 14.0 a 16.5 metros de profundidad. En los últimos ocho años la tasa de crecimiento de sus desarrollos ha sido de 15% anual, en promedio. Este complejo es el principal productor de acero del país (4.4 millones de toneladas en 1998); fue el mayor productor de fertilizantes de América Latina (2.9 millones de toneladas en 1998) antes del cierre de la planta de fertilizantes FERTINAL; es el más importante generador de energía eléctrica del país (2 340 megawatts, sumando la producción de las plantas termoeléctrica e hidroeléctricas); tiene las instalaciones de mayor capacidad de almacenamiento de granos en el Pacífico (80 000 toneladas); es el segundo mayor centro y terminal de abastecimiento de combustibles del país, y ocupa el primer lugar en manejo de cargas comerciales nacionales (25% del mercado), de exportaciones (22%), de cabotaje (24%) y de graneles (50%) (información tomada de InfoPort, S.A. de C.V., 2000, que cita como fuente a "Los puertos mexicanos en cifras: 1993-1999" de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y la Coordinación General de Puertos y Marina Mercante).

Paralelamente al complejo portuario-industrial se desarrolló la infraestructura de comunicaciones (carreteras, vías y terminales férreas) y de servicios (distribución de energía eléctrica, agua potable, drenaje, etc.).

De manera simultánea, en el lugar donde se asentaba el pueblo de Melchor Ocampo del Balsas, con una población original de 660 habitantes en 1937 según datos oficiales, se estableció y desarrolló Ciudad Lázaro Cárdenas, junto con sus zonas urbanas satélites de Guacamayas, La Mira y Buenos Aires, que experimentaron una considerable explosión demográfica documentada por los censos poblacionales, que fue de 9 200 a cerca de

200 000 habitantes en los veinticinco años transcurridos de 1970 a 1995; se calcula que su población actual está cerca de los 250 000 habitantes. El área urbana de la ciudad se ha cuadruplicado en ese mismo periodo. La situación puede calificarse de trágica en cuanto al problema urbano. Rodríguez (1976) apunta que: "Con Ciudad Lázaro Cárdenas nos encontramos ante el fenómeno de una urbanización espontánea, incontrolada, asentada en terrenos no aptos o destinados a otros usos, con un desarrollo acelerado producto de la migración y de un alto índice de natalidad. Esto lleva consigo al correlato de insalubridad, inseguridad, déficit habitacional, fuertes deficiencias en el equipamiento urbano (drenajes, electricidad, agua potable y pavimentación), carencia de empleos que absorban una mano de obra cesante o subocupada, todo lo cual genera una alta tensión social, violencia, vicio y crimen". Por su parte, Minello (1982) menciona que: "Este es un resultado no deseado. Los primeros documentos de SITSA y del Fideicomiso proponen la creación de una ciudad nueva, un asentamiento urbano controlado, voluntario y planeado. Sus habitantes dispondrían de áreas verdes, campos recreativos, mercados, zonas peatonales alrededor de sus viviendas y servicios de transporte a corta distancia de las casas. Todo ello se previó y comenzó a realizarse; sin embargo, la realidad desbordó a los planificadores y junto a esa nueva ciudad se alzaron desordenadas, abruptamente, otras construcciones de pobreza, hacinadas y carentes de los servicios indispensables".

Las figuras 1a, 1b y 1c (reconstrucción de mosaicos aerofotogramétricos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática –INEGI– de los vuelos efectuados en marzo de 1975, noviembre de 1990 y enero de 1996) ilustran en forma directa y comparativamente este crecimiento. Son notorias, entre otras cosas, la cuadruplicación del área urbana de la ciudad, la desaparición de extensas zonas agrícolas en la isla del Cayacal como resultado de las expropiaciones, la desaparición de meandros, manglares y esteros a causa de las obras de relleno y de canalización con construcción de bordos en los brazos del río, el cierre de la Boca de Burras para habilitar la zona portuaria, la apertura y el dragado de dársenas y canales de navegación, la ocupación total de la isla de Enmedio y de la franja costera de la isla del Cayacal por las instalaciones industriales, y la construcción de la planta termoeléctrica en Petacalco, con sus canales para toma y evacuación de agua desde el río y hacia el mar, respectivamente.

Numerosos cuerpos de agua costeros (figura 2) fueron rellenados para habilitar la zona portuaria e industrial. A pesar de esto, su nivelación quedó a alturas sólo ligeramen-

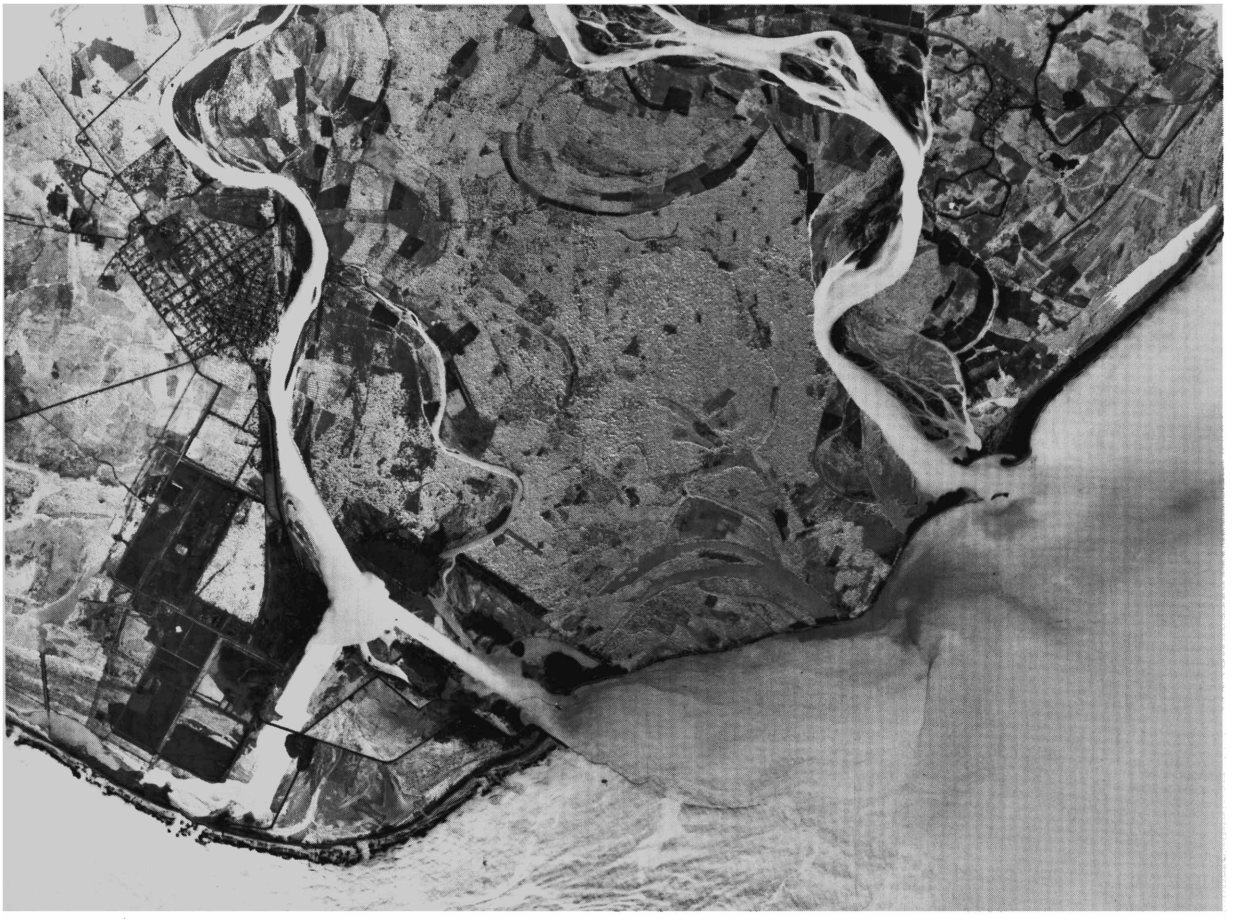


FIGURA 1a. Delta del río Balsas, fotografía aérea del INEGI tomada en marzo de 1975. Escala del original: 1:50 000.

te superiores (de menos de 2 a máximo 4 metros) por sobre el nivel medio del mar, como lo muestra la cartografía de la Base Topográfica Nacional Digital del INEGI (figura 3). Esta franja costera baja y desprotegida del mar es susceptible de sufrir los efectos de fenómenos oceánicos y meteorológicos diversos, entre ellos el apilamiento de agua y el impacto de olas generadas por marejadas de tormentas y huracanes, la inundación por maremotos, y la erosión y el depósito de sedimentos por corrientes litorales. *Las instalaciones que ocupan esta zona, sus vías de comunicación, sus servicios y su población residente, ya sea permanente u ocasional, son por ende vulnerables frente a estos fenómenos.*

La composición acuífera de los suelos rellenados los hace susceptibles de licuefacción y hundimiento ocasionados por movimientos sísmicos fuertes, que son habituales

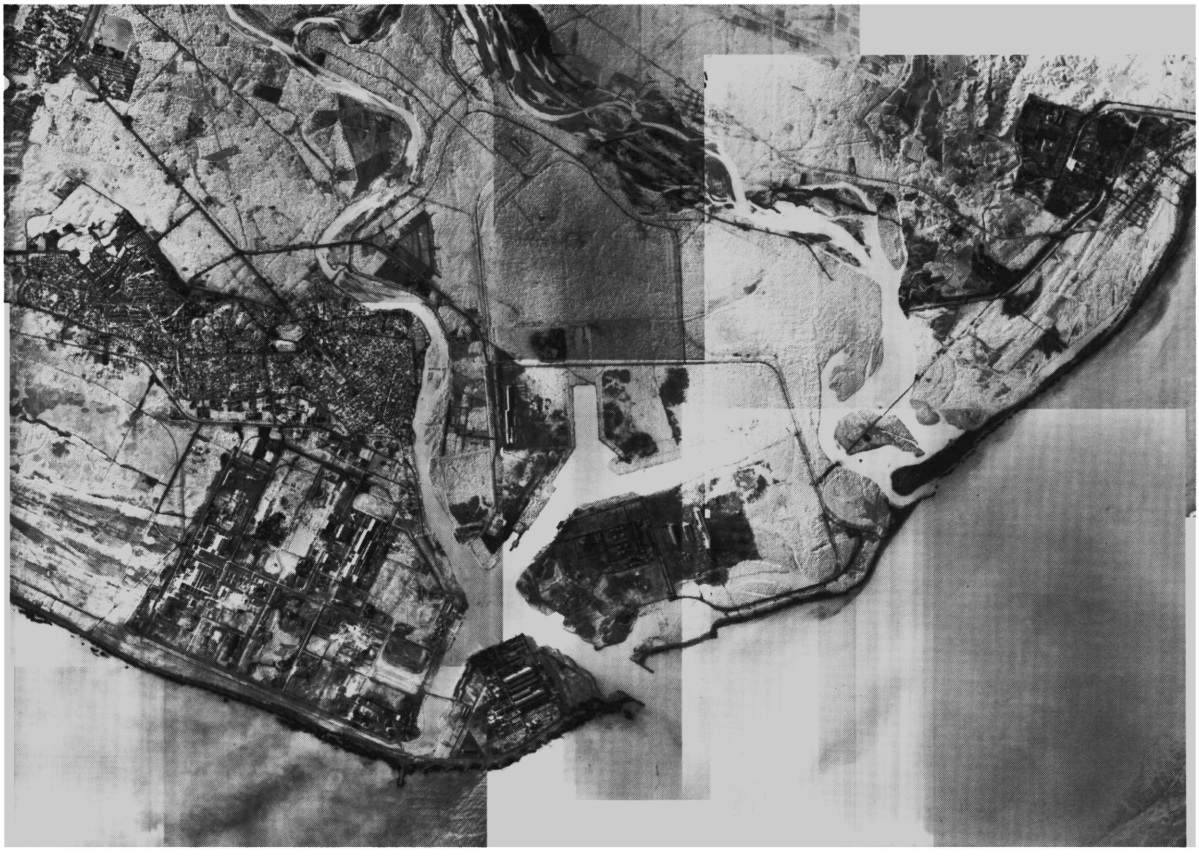


FIGURA 1b. Delta del río Balsas, fotografía aérea del INEGI tomada en noviembre de 1990. Escala del original: 1:25 000.

en esta región localizada cerca del borde de la Fosa Mesoamericana. El hundimiento en 60 centímetros, por licuefacción de la arena, del piso de concreto de la terminal portuaria de usos múltiples ubicada en la isla de Enmedio, por efecto del sismo del 19 de septiembre de 1985 (figura 9b), ilustra esta situación (Farreras y Sánchez, 1988).

El proyecto de la zona industrial-portuaria en terrenos que el gobierno federal constituyó como fideicomiso del Fondo Nacional para los Desarrollos Portuarios (FONDEPORT) consideraba los espacios para la instalación de:

- La siderúrgica SICARTSA.
- La planta de fertilizantes FERTIMEX.
- La terminal de usos múltiples (TUM).
- El muelle de metales y minerales.

FIGURA 1c. Delta del río Balsas, fotografía aérea del INEGI tomada en enero de 1996. Escala del original: 1:75 000.

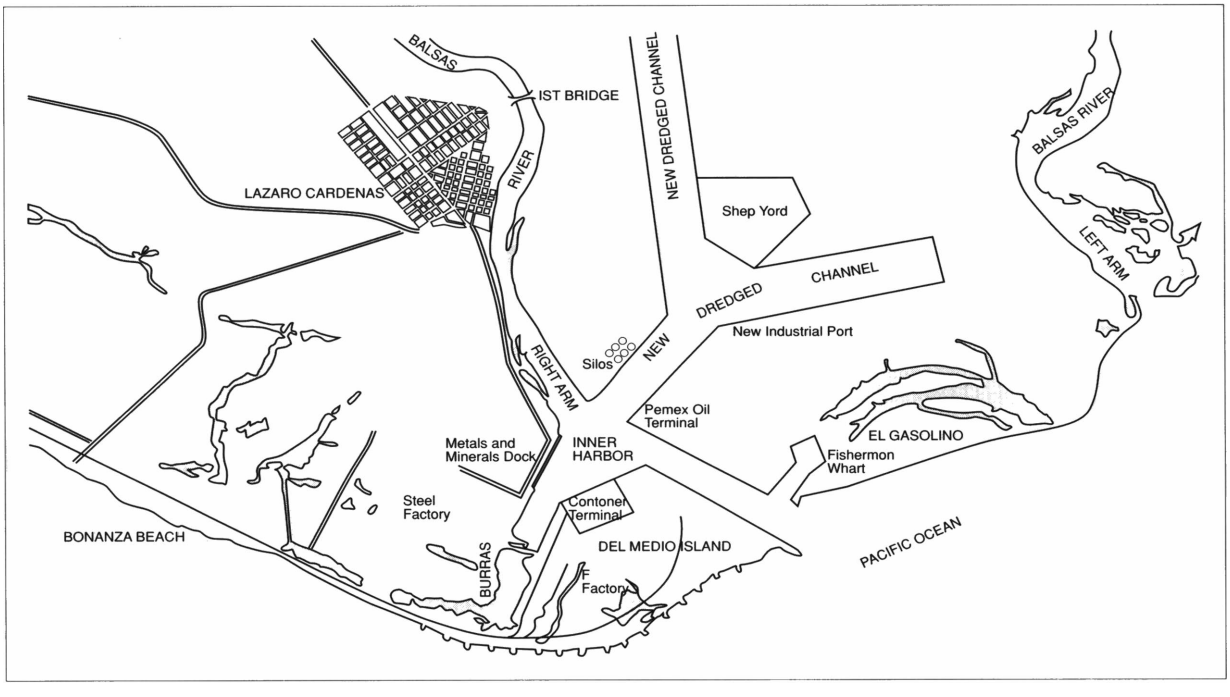


FIGURA 2. Algunos de los cuerpos de agua costeros en el delta del río Balsas antes de su relleno (fuente: Urban Regional Research, 1988).

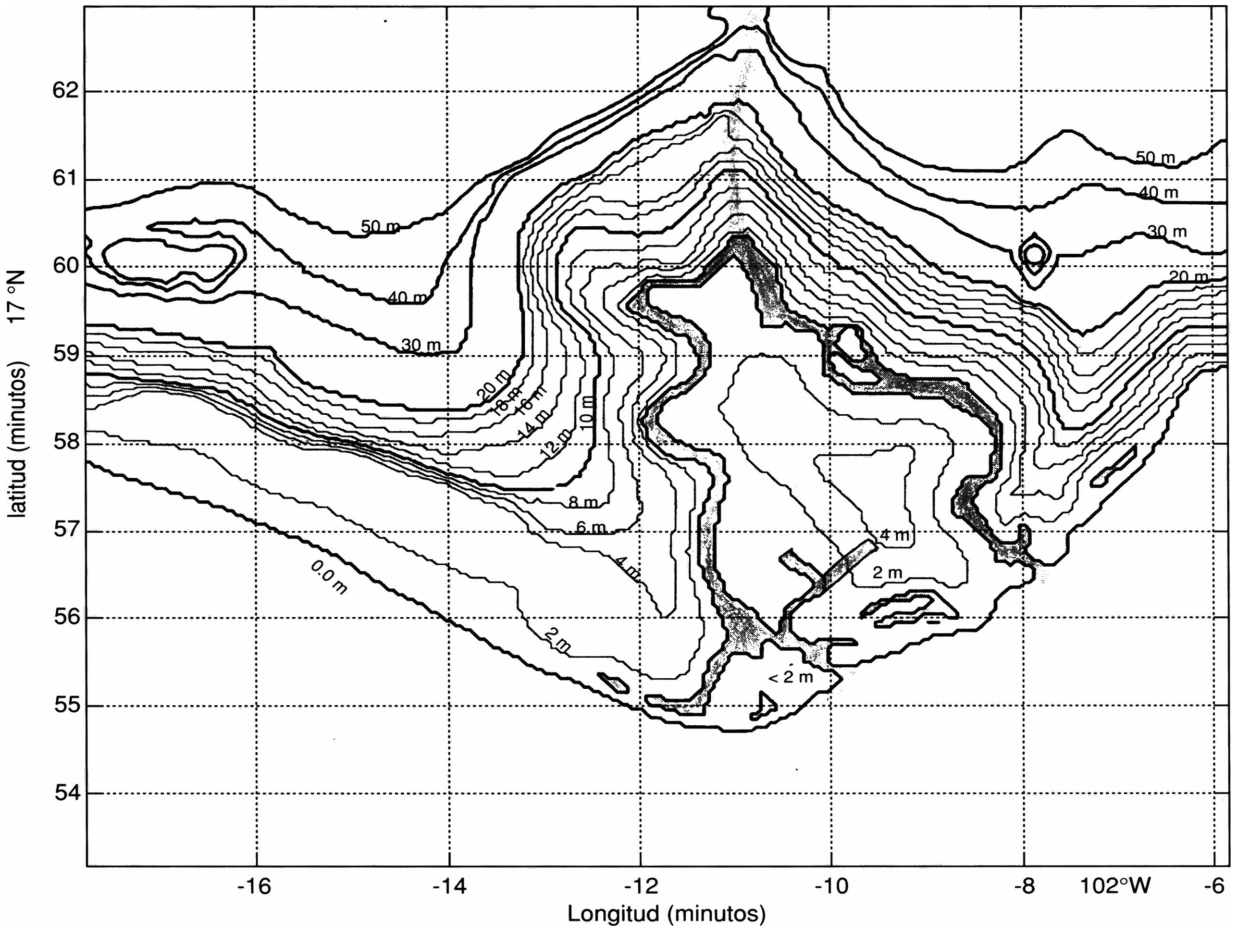


FIGURA 3. Topografía del delta del río Balsas (fuente: Base Digital Topográfica del INEGI).

- El muelle comercial y el de contenedores.
- El muelle de granos.
- El centro de almacenamiento de combustibles de PEMEX.
- La planta constructora de turbinas de NKS.
- Los silos para granos de CONASUPO.
- La zona naval de la Secretaría de Marina.
- La productora mexicana de tubería (PMT).
- El Centro de Capacitación Marítimo Pesquero.
- Astilleros Mexicanos.
- Concretera Nacional.

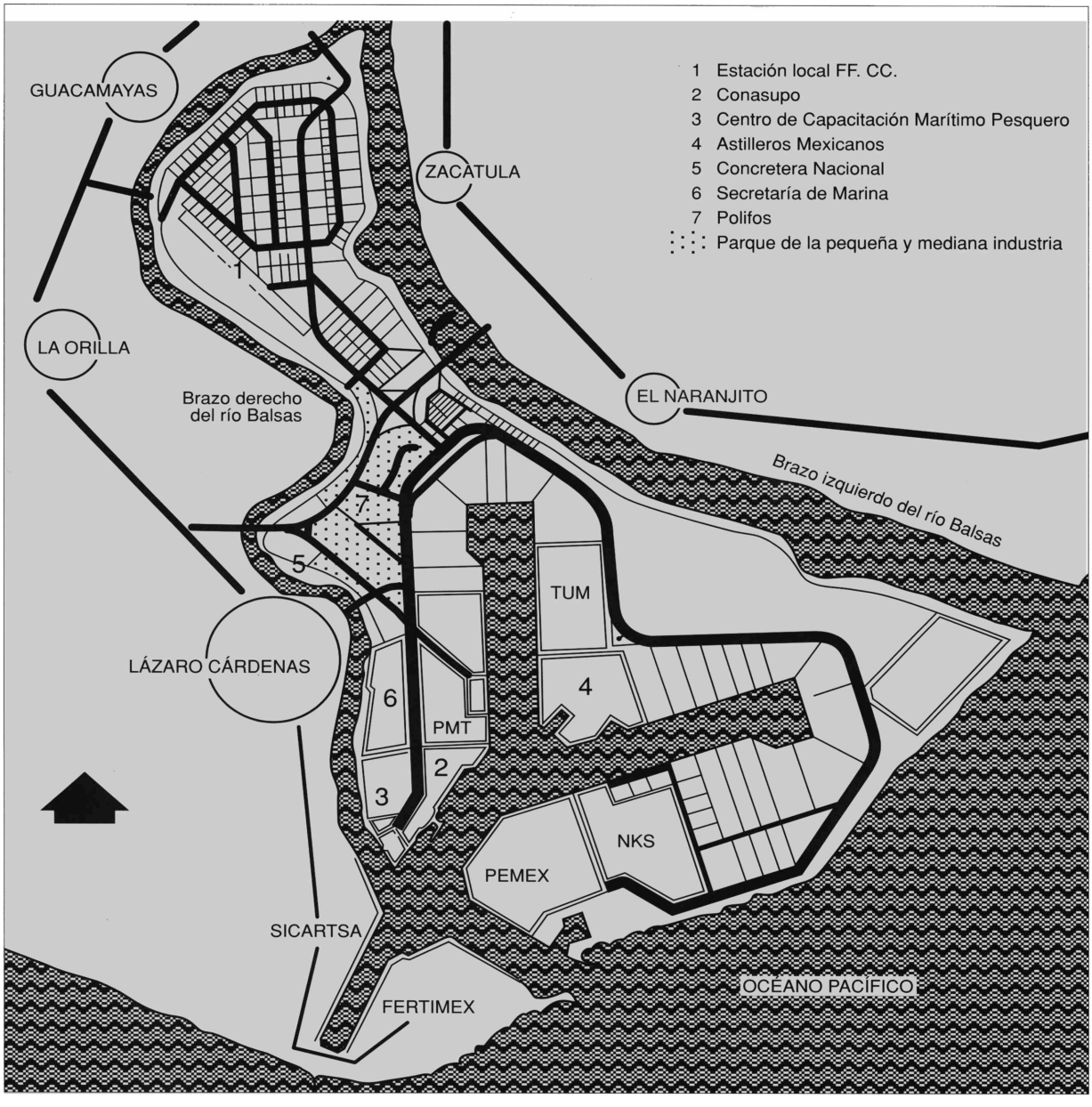


FIGURA 4. Zona portuaria-industrial según el proyecto del Fondo Nacional para los Desarrollos Portuarios (fuente: FONDEPORT, 1983).

- Un parque para la pequeña y mediana industria, de 700 hectáreas de extensión, que albergaría a numerosas industrias acereras (trefiladoras de alambre, galvanizadoras, pailerías, fundiciones de piezas, etc.) y no acereras (fábricas de calzado y ropa industrial, fábrica de sacos de propileno, planta de sal refinada, empacadoras de frutas, hornos de calcinación para dolomita-caliza, etc.).
- En la isla de la Palma –actualmente unida a la parte norte de la isla del Cayacal–, la estación de ferrocarril y un parque industrial estatal (véase figura 4).

El gobierno federal estableció una serie de estímulos y alicientes fiscales para el desarrollo de esta zona, en cuanto a la inversión y compra de equipo, al empleo generado y ocupado en turnos adicionales, a las tarifas del consumo de electricidad, gas, combustóleo y productos petroquímicos básicos, y créditos a tasas de interés menores a las del mercado. El gobierno del estado de Michoacán, por su parte, proporcionó a los interesados, a bajo costo, asistencia legal, fiscal y contable para instalar sus empresas, información, datos estadísticos y metodología para la evaluación de los proyectos, capacitación a empresarios y adiestramiento a trabajadores, y asesoría en la búsqueda de canales de comercialización para los productos resultantes.

A pesar de todos estos incentivos, debido a las crisis financieras sexenales y a la falta de interés de diversos inversionistas, no pudieron concretarse algunas obras de infraestructura importantes, como el dragado y la construcción del Canal y la Dársena Norte, ni la habilitación, de acuerdo con los planes originales, de grandes zonas de la isla del Cayacal ni de la isla de la Palma, para desarrollar ahí el parque industrial estatal y habilitar completamente la zona destinada al parque para la pequeña y mediana industria. Esto ocasionó que:

- La terminal de usos múltiples no se pudiera construir en su sitio original en la Dársena Norte, y que se instalara junto con el muelle comercial y los de contenedores en la costa interior de la isla de Enmedio, adyacente a la planta de FERTINAL, congestionando el reducido espacio de la zona portuaria del Canal de Burras.
- No se construyeran los Astilleros Mexicanos, la Concretera Nacional y el Centro de Capacitación Marítimo Pesquero, ni muchas de las industrias y fábricas proyectadas para el parque de la pequeña y mediana industria ni para el parque industrial estatal. Sin embargo, surgieron nuevos desarrollos no considerados en el plan original, como:

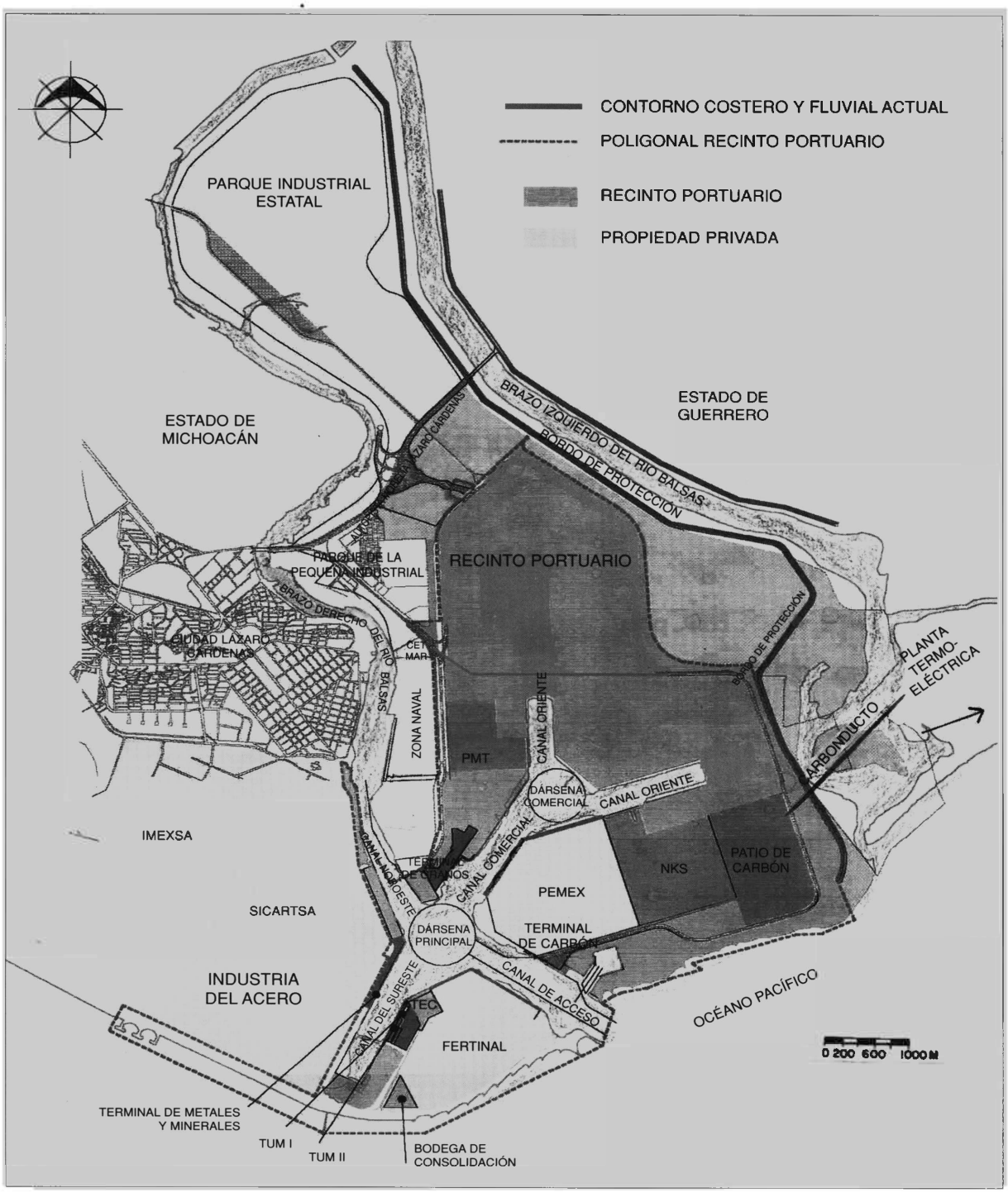


FIGURA 5. Distribución y ubicación de las instalaciones portuario-industriales en la ciudad y puerto de Lázaro Cárdenas (fuente: APILAC, S.A. de C.V., actualizada a noviembre de 2000).

- Las instalaciones del Centro de Estudios Tecnológicos del Mar (CETMAR), de la Secretaría de Educación Pública, en la costa de la isla del Cayacal adyacente al brazo derecho del río.
- La terminal de descarga de carbón y el patio de almacenamiento de carbón y de cenizas en la zona costera de la isla del Cayacal, así como la banda transportadora de estos materiales a través del brazo izquierdo del río, concesionadas a CARBONSER, S.A. de C.V., por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para la operación de su central termoeléctrica en Petacalco.

Asimismo, se proyecta la ejecución de al menos dos nuevas iniciativas que ya estaban incluidas en el plan de desarrollo original:

FIGURA 5a. Puerto de Lázaro Cárdenas. En primer plano, la terminal de carbón de CARBONSER. Al fondo, tanques de almacenamiento de PEMEX (fuente: InfoPort, S.A. de C.V., 2000).

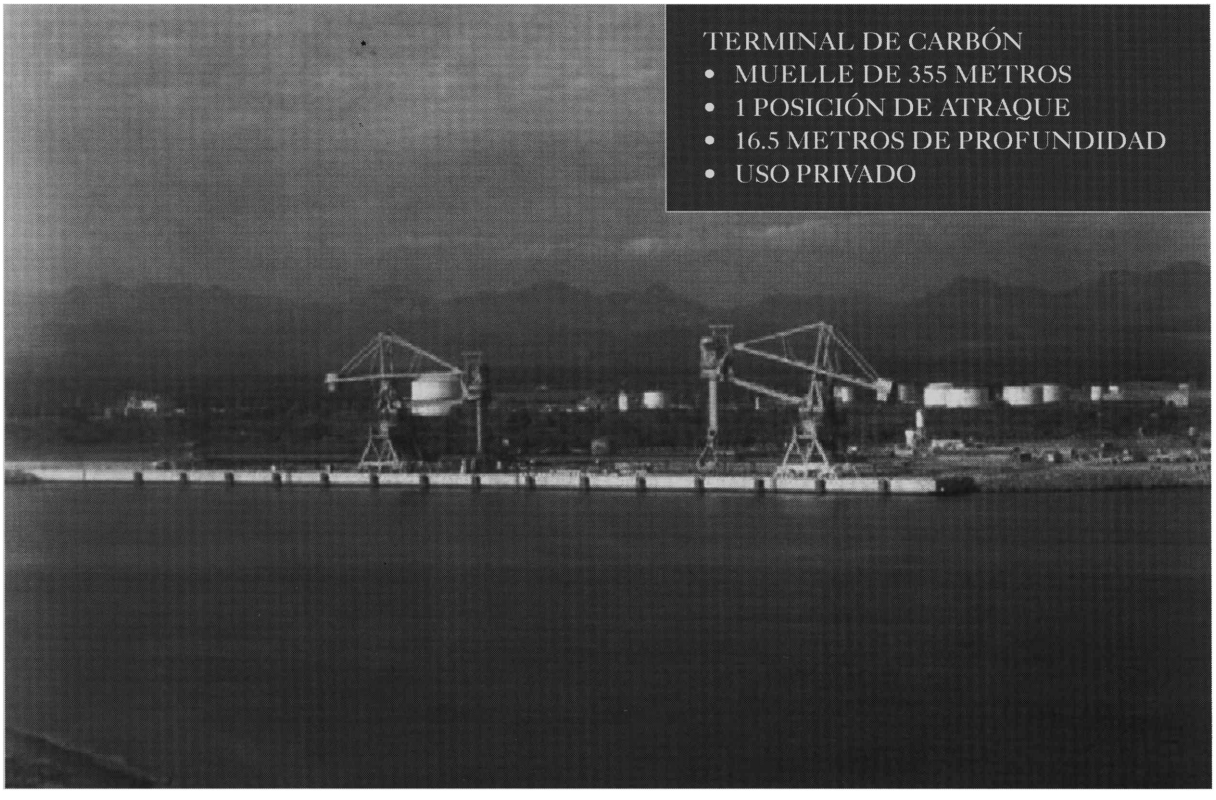


FIGURA 5b. Puerto de Lázaro Cárdenas. En primer plano, terminales de contenedores y de usos múltiples, planta de FERTINAL y patio de consolidación. Al fondo, silos graneleros de ABSA, muelles de descarga y tanques de almacenamiento de PEMEX. A la izquierda, extremo del muelle de metales y minerales (fuente: InfoPort, S.A. de C.V., 2000).

- La instalación de los astilleros.
- El establecimiento de una industria para la fabricación de cemento usando como materia prima las cenizas del carbón.

El plano de la Administración Portuaria Integral de Lázaro Cárdenas, S.A. de C.V., modificado de acuerdo con la realidad (figura 5), indica la distribución y ubicación actual de las diversas instalaciones del complejo portuario-industrial-naval en el delta del río y en la zona costera, así como las principales vías de comunicación (véanse las figuras 5a y 5b).

Escenario de riesgo y vulnerabilidad ante maremotos en la costa occidental de México y en Ciudad Lázaro Cárdenas

Como se mencionó anteriormente, en México la mayoría de los maremotos locales son de origen sísmico y se generan en la zona de subsidencia de la Fosa Mesoamericana, situada en el océano y adyacente a menos de 80 kilómetros de la costa occidental de los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas. Aparentemente, una minoría de estos maremotos, muy destructivos, podrían eventualmente ser provocados por deslizamientos submarinos de sedimentos en las plataformas marinas costeras de los deltas estuarinos (por ejemplo de los ríos Colorado, Tecomán, Balsas, etc.).

La zona de subsidencia de la Fosa Mesoamericana es una de las regiones sísmicas más activas del hemisferio occidental. En esta zona de México se produjeron aproximadamente 35 sismos con magnitud mayor de 7 en los primeros 75 años del siglo XX. En comparación, el estado de California experimentó solamente cinco sismos mayores a esa magnitud en su falla de San Andrés durante el mismo periodo (Singh *et al.*, 1981 y 1984). Nishenko y Singh (1987) estiman entre 30 y 75 años el tiempo de repetición de sismos grandes para cualquier región en la zona de subsidencia mexicana. Los sismos en esta zona han generado consistentemente, a lo largo de la historia, maremotos destructivos, con olas de 2.0 a 11.0 metros de altura, como se observa en la tabla I.

Las zonas costeras de los estados de Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas son también las más vulnerables a estos fenómenos, por ser asiento de áreas urbanas densamente pobladas, incluyendo desarrollos turísticos y comunidades pesqueras, e importantes instalaciones portuarias, navales, industriales y de almacenamiento de combustible, como es el caso de la ciudad y puerto de Lázaro Cárdenas.

La estadística de 55 maremotos que arribaron a México en 250 años (Sánchez y Farreras, 1993) muestra las siguientes cuatro categorías de acuerdo con el rango de alturas de ola máxima registradas y con sus tiempos de recurrencia aproximados:

Categoría	*Rango de alturas máximas de ola*	*Tiempo aproximado de recurrencia*
O	0 m < Hmax ≤ 1 m	Cada 5 años
A	1 m < Hmax ≤ 3 m	Cada 25 años
B	3 m < Hmax ≤ 5 m	Cada 50 años
C	5 m < Hmax ≤ 10 m	Muy remotamente

Debe hacerse notar que los tiempos de recurrencia se refieren a la probabilidad de que estos eventos se repitan en *cualquier lugar* de las costas de *toda la zona* de subducción (Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas), y no necesaria ni específicamente una repetición *en el puerto de Lázaro Cárdenas* en esos periodos.

Aproximadamente la mitad de los maremotos que aparecen en el cuadro 1 causaron una destrucción considerable. Los dos más destructivos, tipo C, con olas de alrededor de 10 metros de altura, probablemente generados por deslizamientos submarinos, fueron el del 16 de noviembre de 1925 en Zihuatanejo, Guerrero, y el del 22 de junio de 1932 en Cuyutlán, Colima.

Los más recientes fueron los del 19 y 21 de septiembre de 1985 (tipo A), que afectaron al puerto de Lázaro Cárdenas, con alturas máximas de ola de 2.5 metros (Farreras y Sánchez, 1987), y el del 9 de octubre de 1995 (tipo B) que afectó a localidades costeras de Jalisco y Colima, con alturas máximas de ola de 5.0 metros (Borrero *et al.*, 1997).

Respecto del puerto de Lázaro Cárdenas, Rascón y Villarreal (1975), a solicitud y financiados por la Siderúrgica Lázaro Cárdenas-Las Truchas, S.A., en construcción por esa época, efectuaron un estudio sobre el riesgo de maremotos. Dicho estudio es un ejercicio teórico matemático-estadístico muy completo y riguroso; sin embargo, y como ellos mismos lo exponen, debido a que hay muy pocos datos de maremotos en la costa de México (ninguno documentado hasta ese entonces en Lázaro Cárdenas y solamente veintiuno en el resto de la costa), supusieron que la costa de México se podría comportar en forma parecida a la de California o a la de Hawaii, e hicieron sus cálculos con datos de esas localidades, considerando que los resultados serían similares para Lázaro Cárdenas. Esta suposición, y por ende sus conclusiones, no son válidas. También adujeron que los maremotos con olas de 10 metros de altura de 1909 y 1925 eran exageracio-

CUADRO 1. Maremotos destructivos en la costa occidental de México

Fecha	*Lugar de máximo daño*	*Altura máxima de ola (m) registrada u observada*
25 febrero 1732	Acapulco	3.0
1 septiembre 1754	Acapulco-San Marcos	4.0
28 marzo 1787	Acapulco-Igualapa	3.0
4 mayo 1820	Acapulco	2.0
14 marzo 1834	Acapulco	No disponible
7 abril 1845	Acapulco	No disponible
12 agosto 1868	Acapulco	No disponible
24 febrero 1875	Manzanillo	No disponible
14 abril 1907	Acapulco-Ometepec	2.0
30 julio 1909	Acapulco-San Marcos	9.0
16 noviembre 1925	Zihuatanejo	11.0
16 junio 1928	Puerto Ángel	6.0
22 junio 1932	Cuyutlán-San Blas	10.0
28 julio 1957	Acapulco	2.6
22 mayo 1960	Zihuatanejo	3.0
29 noviembre 1978	Salina Cruz-Puerto Escondido	2.0
19 septiembre 1985	Lázaro Cárdenas	2.5
9 octubre 1995	Barra de Navidad	5.0

nes visuales, lo que está en contradicción con evidencias históricas bien documentadas. Igualmente, debido a que nunca se habían reportado maremotos en la zona de la siderúrgica en construcción, o bien que los que pudieron haber llegado en esos últimos cincuenta años tendrían menos de 0.5 metros de altura y habrían pasado inadvertidos, los autores concluyeron que nunca llegarían maremotos grandes a esa zona. Esta conclusión, basada en la falta de información histórica previa, no es aceptable ni válida. Minello (1982) explica que en el caso de Las Truchas, una de las grandes dificultades para reconstruir su historia es la escasa densidad y actividad humanas en esa pequeña región, que conde-

na de antemano a disponer de muy pocos referentes. Aun cuando el asentamiento de Zacatula, en el cual Hernán Cortés instaló un puerto y un astillero, estavo habitado desde tiempos prehispánicos, su ubicación varios kilómetros río arriba en el Balsas no permitió la observación de la llegada de maremotos. La franja costera de las isletas del delta del río Balsas permaneció casi deshabitada antes y durante gran parte del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX, y la población prehispánica o no dejó evidencias escritas o estas evidencias fueron destruidas por los españoles. Sin embargo, en el vecino puerto de Acapulco está documentada la llegada de tres maremotos en la época colonial, de cinco en el siglo XIX, y de veintidós en el siglo XX, de los cuales los diecinueve más recientes fueron registrados por el mareógrafo del puerto, lo que permite suponer razonablemente que un número similar de maremotos arribó a las márgenes oceánicas del delta del río Balsas, aunque hayan pasado inadvertidos. La obtención de datos del arribo de maremotos a Lázaro Cárdenas se dificulta aún más porque, a excepción de doce meses (noviembre de 1968 a octubre de 1969) en que la UNAM operó un mareógrafo, nunca se había instalado ni mantenido permanentemente un instrumento que registrara las fluctuaciones del nivel del mar en ese puerto, hasta la colocación de uno, en 2002, por parte de la Secretaría de Marina.

El estudio de Rascón y Villarreal se efectuó en 1974, durante el periodo en que Hiernaux (1993) identifica como un hecho que las preocupaciones del gobierno federal giraban antes que todo en torno de la pronta terminación de la planta, a pesar de que había argumentos en contra por parte de varios miembros del gabinete: debido a la insoslayable crisis económica que se avecinaba, la demanda de acero seguía creciendo, y el capricho presidencial exigía inaugurar la planta antes del cambio de poderes. De ahí que fuera necesario y urgente minimizar el posible impacto adverso que pudieran tener algunos fenómenos naturales destructivos sobre las obras programadas.

El maremoto del 19 de septiembre de 1985, que tuvo alturas máximas de ola de 2.5 metros en Lázaro Cárdenas, ocasionando daños menores en la zona portuaria –documentados y fotografiados (Farreras y Sánchez, 1987 y 1988)–, fue suficiente para demostrar que las conclusiones de los estudios teóricos anteriores eran ajenas a la realidad.

Según el Servicio Mareográfico Nacional de la UNAM y la Dirección General de Oceanografía Naval de la Secretaría de Marina (1999), la marea en el puerto de Lázaro Cárdenas es de tipo mixto semidiurno, siendo sus niveles de:

Pleamar máxima	0.922 metros
Pleamar media superior	0.257 metros
Pleamar media	0.201 metros
Nivel medio del mar	0.000 metros
Bajamar media	-0.180 metros
Bajamar media inferior	-0.277 metros
Bajamar mínima	-0.724 metros

El 23 de septiembre del 2000 hicimos mediciones de la altura del piso en los muelles de metales y minerales y en las terminales de usos múltiples y de contenedores. La figura 6a muestra la curva de niveles de marea para el mes de septiembre de 2000 en el puer-

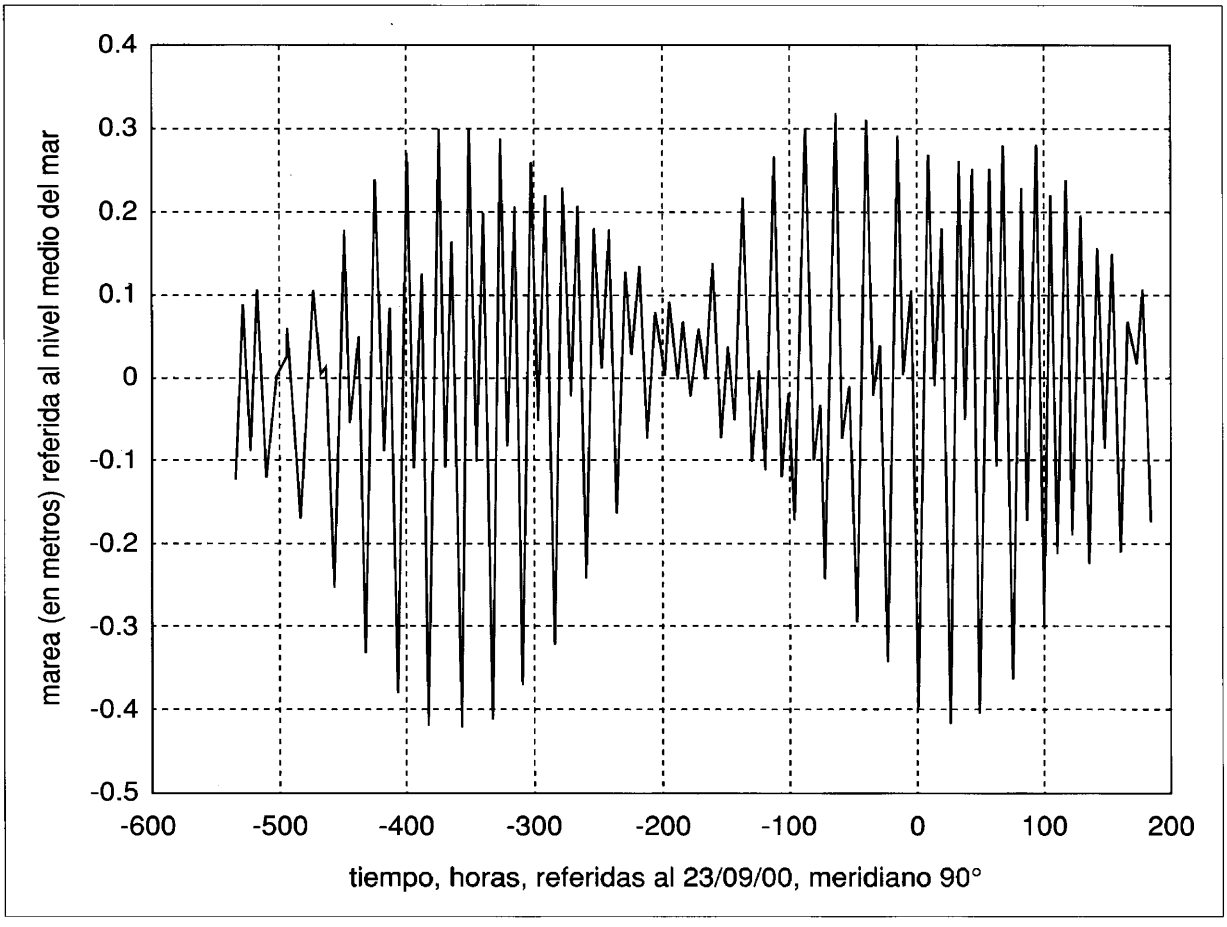


FIGURA 6a. Niveles de marea en septiembre de 2000, en el puerto de Lázaro Cárdenas.

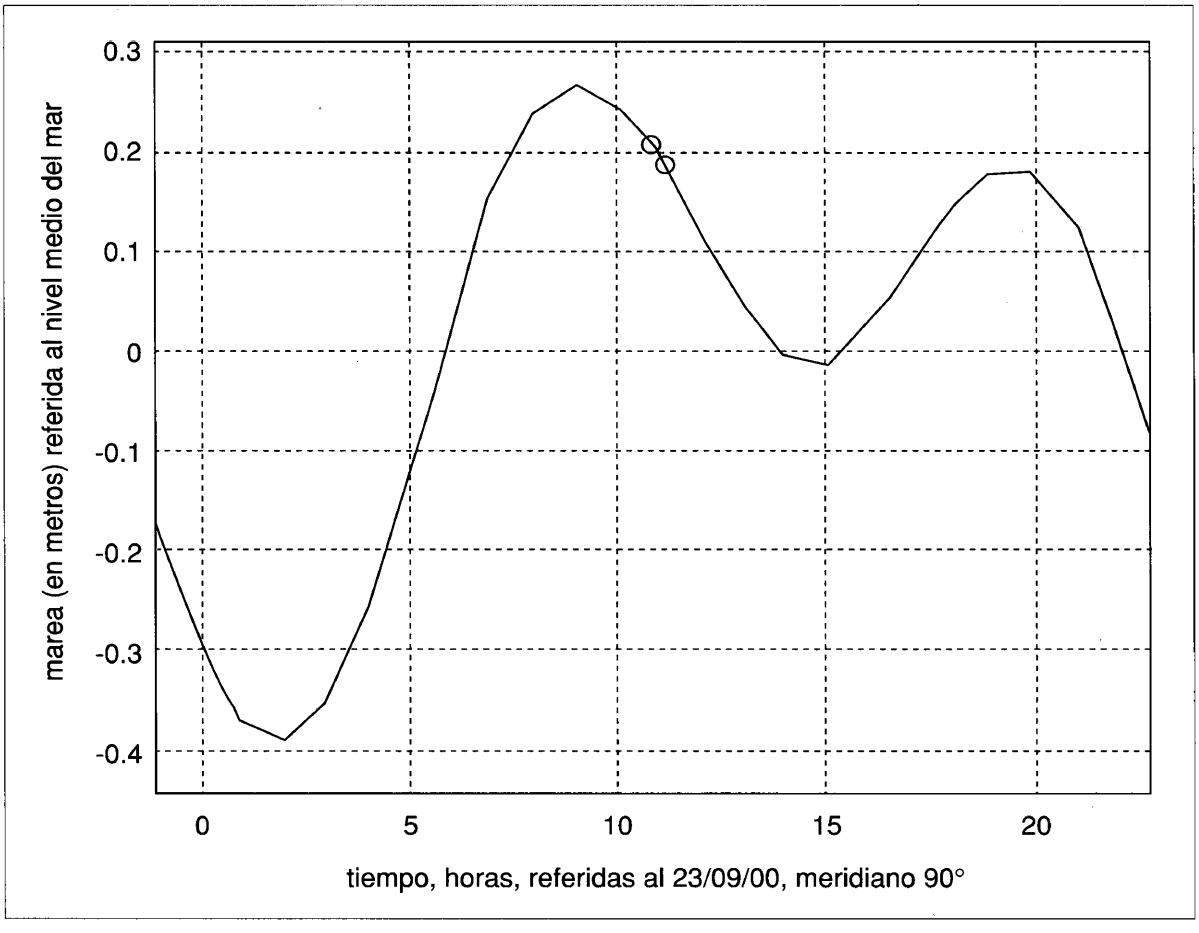


FIGURA 6b. Niveles de marea el 23 de septiembre de 2000, en el puerto de Lázaro Cárdenas.

to de Lázaro Cárdenas, calculada con base en los valores de las constantes armónicas determinadas por el Instituto de Geofísica de la UNAM. Se observan las típicas variaciones diurnas y semidiurnas y las quincenales de sicigia (viva) a cuadratura (muerta). La figura 6b, ampliación de la anterior, muestra la curva de mareas para el día 23 de septiembre de 2000, indicando su nivel a las 10:50 a.m. y a las 11:10 a.m., tiempo en que se efectuaron las mediciones en los muelles.

La figura 7 bosqueja la distribución y ubicación de las diversas instalaciones de la zona portuaria-industrial en el plano de cotas topográficas de altura sobre el nivel medio del mar, mostrando el nivel en el que se encuentran. Su observación permite hacer el siguiente análisis general y preliminar sobre su posible riesgo de inundación por maremotos:

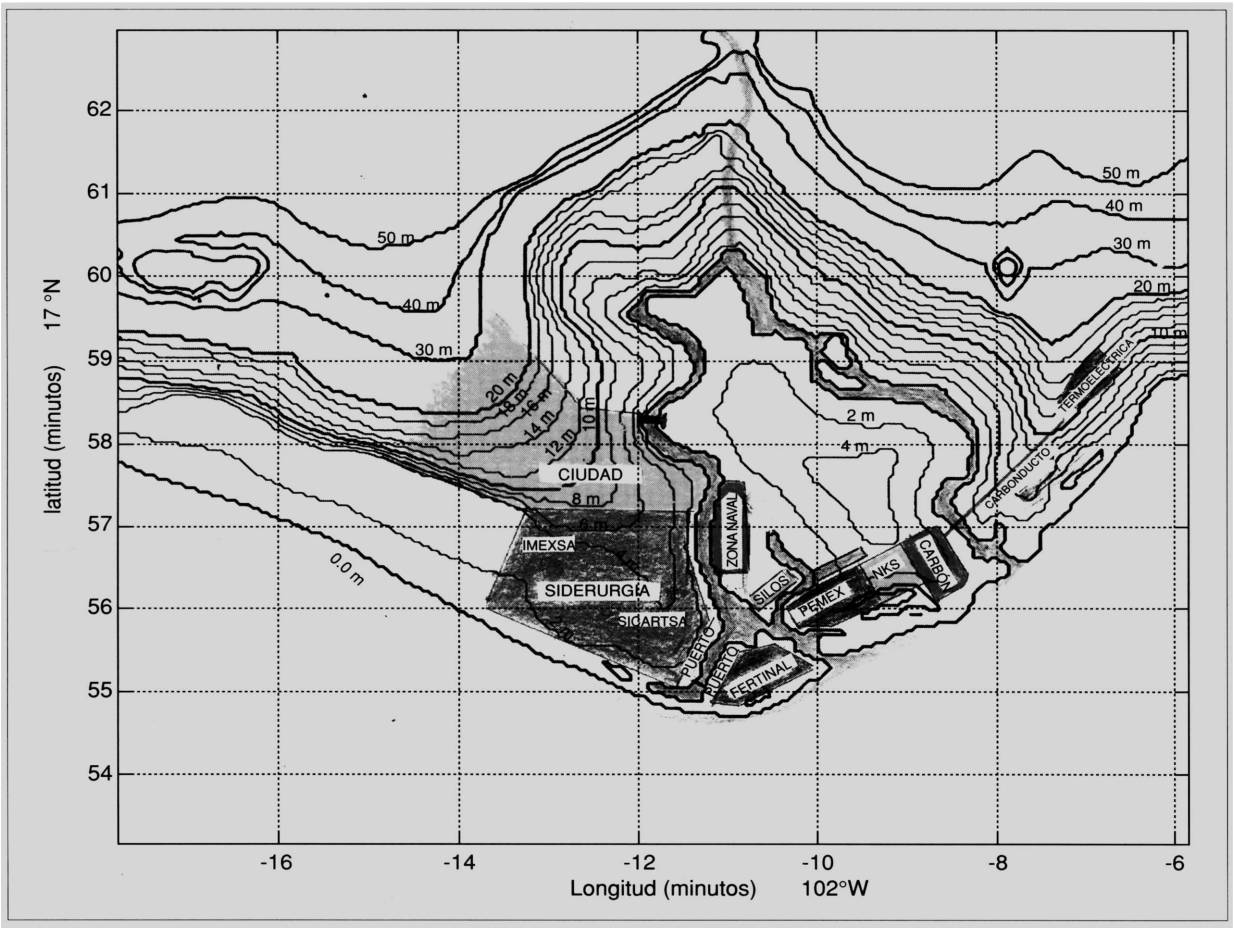


FIGURA 7. Altura de las instalaciones con respecto al nivel medio del mar.

- En la isla de Enmedio la cota máxima es ligeramente superior a 2 metros sobre el nivel medio del mar. Las mediciones de altura del piso de los muelles de las terminales de usos múltiples y de contenedores, corregidas por el nivel de la marea a esa hora, indican que los pisos de éstos se encuentran a 2.80 metros sobre el nivel medio del mar, que presumiblemente es la cota de altura de todas las instalaciones en la isla de Enmedio, a saber: la planta de FERTINAL, las terminales TUM I y II, la Terminal de Contenedores y la Bodega de Consolidación. Nótese que el nivel de pleamar máxima es de 0.92 metros, de modo que basta que el arribo de un maremoto moderado con olas de 1.90 metros de altura ocurra a la hora de esa pleamar para que se inunde por lo menos el piso de todas las instalaciones de la isla de Enmedio. Esta es la

zona de mayor riesgo de inundación de todo el complejo portuario-industrial, pues se encuentra adyacente al océano abierto y a una cota de nivel muy baja.

- Las siderúrgicas IMEXA y SICARTSA tienen instalaciones en la franja costera entre 2 y 4 metros sobre el nivel medio del mar, e instalaciones interiores y adyacentes a la zona urbana entre 4 y 8 metros sobre el nivel medio del mar. Por el mismo procedimiento de mediciones y correcciones señalado anteriormente, se determinó la cota de 3.70 metros sobre el nivel medio del mar para los muelles de la Terminal de Metales y Minerales. El riesgo de inundación para las instalaciones cercanas a la costa y para los muelles es menor que en el caso de la isla de Enmedio, y mucho menor, o prácticamente nulo, para las instalaciones interiores y adyacentes a la zona urbana.
- En la franja costera de la isla del Cayacal: la terminal de descarga de carbón de la CFE y el centro de almacenamiento de combustible de PEMEX están a alturas menores de 2.0 metros sobre el nivel medio del mar; la planta constructora de turbinas de NKS y el patio de almacenamiento de carbón y cenizas de CARBONSER-CFE se encuentran entre los 2.0 y los 4.0 metros sobre el nivel medio del mar. No se hicieron mediciones de niveles del piso de los muelles en estos recintos porque su acceso estaba restringido. El grado de riesgo de inundación de las diversas instalaciónes de esta zona depende de su cercanía a la costa del océano o a las riberas del río y de los canales de navegación.
- En las riberas interiores de la isla del Cayacal: los silos de granos de ABSA, la zona naval de la Secretaría de Marina, el centro de estudios CETMAR de la SEP y la Productora Mexicana de Tubería están a alturas menores de 2.0 metros sobre el nivel medio del mar, pero su riesgo de inundación es menor, o nulo, en comparación con los otros casos, por encontrarse en aguas interiores, distantes de la costa abierta al océano.
- En la zona urbana de Ciudad Lázaro Cárdenas: el primer sector (Centro) se ubica entre 0 y 10 metros sobre el nivel medio del mar, el segundo sector entre 10 y 20 metros sobre el mismo nivel, y así sucesivamente a alturas mayores los siguientes sectores. El riesgo de inundación en todos estos sectores urbanos es prácticamente nulo porque están situados a orillas de una zona del río muy aguas arriba y alejada de la costa del océano.

El conteo del precenso de población efectuado por el ayuntamiento de Lázaro Cárdenas en 1999 indica que la población de la ciudad es, en cifras redondas, de 145 000

habitantes, a los que se suman 85 000 en Guacamayas, totalizando 230 000 en estas dos áreas urbanas adyacentes a la zona portuaria-industrial y vinculadas a sus actividades. InfoPort, S.A. de C.V. (2000) calcula que un poco más de la cuarta parte (27%) de esta población, esto es 62 000 habitantes, es económicamente activa. Sólo una fracción de estos últimos trabajan directamente (es decir, están físicamente presentes) en la zona portuaria-industrial expuesta al impacto de maremotos, mientras que el resto desarrollan actividades comerciales y de servicios diversos en la ciudad o están desempleados. Datos anteriores a la privatización de SICARTSA señalan que esta planta, principal empleadora del municipio, ocupaba alrededor de 12 000 personas, incluyendo a los trabajadores de la residencia, a los de operación de la planta y a los asalariados ocupados en los servicios. IMEXSA da empleo actualmente a cerca de 2 500 trabajadores. FERTINAL empleaba una cantidad similar. La Secretaría de Marina estima de 2 700 a 15 000 el crecimiento para los próximos años de sus efectivos presentes en la nueva base naval. No disponiendo en esta etapa del estudio con cifras más completas de las demás fuentes de ocupación, podemos calcular que la población que trabaja en la totalidad de la zona portuaria-industrial-naval, incluyendo las dos siderúrgicas, FERTINAL, PEMEX, NKS, PMT, SCT, APILAC, etcétera, no excede las 20 000 personas. Si consideramos que estas personas trabajan en turnos separados a lo largo del día y de la noche, o esporádicamente, y que no todos se sitúan en la franja costera susceptible de inundación, podemos concluir razonablemente que un número de no más de 8 000 a 12 000 personas podrían estar expuestas simultáneamente a los efectos del arribo de un maremoto.

El maremoto del 19 de septiembre de 1985 en Ciudad Lázaro Cárdenas

Descripción y efectos

Un sismo de magnitud 8.1, con epicentro en 17.2° N y 102.3° W, y compuesto por dos subeventos separados 80 kilómetros entre sí, que duraron 20 segundos en total, ocurrió a las 7:19 a.m., hora local, del 19 de septiembre de 1985 en la zona de subducción de la Fosa Mesoamericana, al noroeste de Ciudad Lázaro Cárdenas (Anderson *et al.*, 1986). El sismo dislocó un área aproximada de 185 por 75 km del fondo del mar, en la porción noroeste (denominada "vacancia de Michoacán" por Singh *et al.*, 1981) de la placa tectónica de Cocos, generando un maremoto que afectó en México a varias comunidades costeras de los estados de Colima, Michoacán y Guerrero. Acelerógrafos de la UNAM instalados en Caleta de Campos (Michoacán) registraron un movimiento vertical de casi un metro en la corteza terrestre de la costa (Bodin y Klinger, 1985). El maremoto se propagó a través del océano Pacífico y fue registrado en los mareógrafos de las siguientes localidades, con las alturas de ola que se indican:

Localidad	*Alturas máximas de ola (en centímetros)*
Isla Baltra, Galápagos	21
Acajutla, El Salvador	58
La Libertad, Ecuador	60
Rikitea, Polinesia Francesa	7
Papeete, Polinesia Francesa	5
Pago Pago, Samoa	4
Apia, Samoa Occidental	14
Hilo, Hawaii	22
Kahului, Hawaii	24

Un grupo internacional de expertos, formado por investigadores de la Secretaría de Marina de México, del CICESE, de la agencia Urban Regional Research especializada en desarrollo urbano en zonas de desastre, y del Centro Internacional de Información de Tsunamis de la UNESCO, llevó a cabo una prospección de campo para estudiar los efectos del maremoto y evaluar el impacto de los daños materiales ocasionados en las costas de Colima, Michoacán y Guerrero. Los resultados de esa investigación se publicaron parcialmente en Farreras y Sánchez (1987), Pararas-Carayannis (1985 y 1988), y Preuss *et al.* (1986), e *in extenso* en un informe a la National Science Foundation (Urban Regional Research, 1988) que proveyó parte importante del financiamiento para el trabajo. La figura 8, tomada del último informe mencionado, muestra la delimitación de la franja de inundación por el maremoto y resume los efectos de su impacto en la zona portuaria-in-

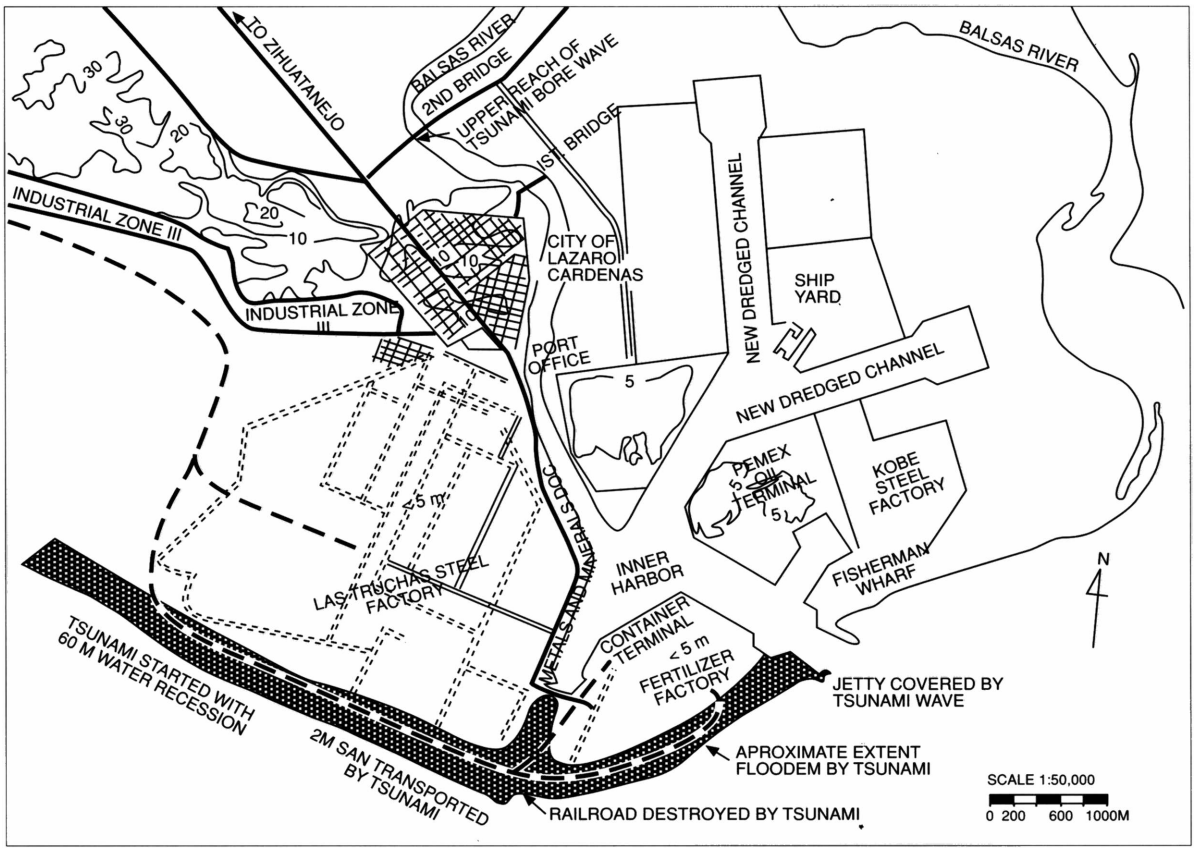


FIGURA 8. Lázaro Cárdenas: delimitación de la franja de inundación por el maremoto del 19 de septiembre de 1985 y efectos de su impacto en la zona portuaria-industrial (fuente: Urban Regional Research, 1988).

dustrial de Lázaro Cárdenas. Nótese que en la figura no se delimita la franja de inundación en la costa de la isla del Cayacal, no porque no la hubiera, sino porque no se efectuó prospección ni mediciones en esa zona.

En Manzanillo (Colima) se observaron olas de 1.0 metros de altura y el maremoto se llevó boyas de demarcación marítima. En Boca de Apiza (Michoacán) las olas tuvieron 1.5 metros de altura y penetraron 150 metros tierra adentro por las márgenes del río Coahuayana. En Faro de Bucerías (Michoacán) las olas alcanzaron los 2.5 metros de altura, inundaron 150 metros tierra adentro y arrastraron embarcaciones y muebles de las viviendas costeras. En Playa Azul (Michoacán) las olas llegaron a los 2.5 metros de altura, inundaron 150 metros tierra adentro, se llevaron sillas y mesas y destruyeron las palapas de los restaurantes playeros, y depositaron en la playa un volumen de arena de aproximadamente 25 metros de ancho por 2 metros de alto y 2.5 kilómetros de largo.

En el puerto de Lázaro Cárdenas se observó que tan sólo medio minuto después de haberse iniciado el movimiento sísmico, el nivel del mar descendió y el agua retrocedió cerca de 100 metros, para volver casi de inmediato con olas de hasta 2.5 metros de altura, inundando una extensión horizontal de hasta 500 metros tierra adentro en algunos lugares. El nivel de la marea a la hora en que ocurrió el maremoto era de 0.64 metros sobre el nivel medio del mar. Las olas cubrieron la corona de la Escollera Sur, situada en la ribera de la isla de Enmedio, en la boca de La Necesidad, cuya cota de altura es de 3.15 metros sobre el nivel medio del mar. Lo anterior confirma que las olas del maremoto tuvieron una altura máxima de 2.5 metros (3.15-0.64=2.51 metros).

En Ixtapa (Guerrero) las olas tuvieron 1.5 metros de altura e inundaron 50 metros tierra adentro. Se observó una secuencia de cuatro a cinco olas, la mayor de ellas sobrepasó una barda de 1.5 metros de altura del hotel Sheraton e inundó la alberca. En Zihuatanejo (Guerrero) el mar se retiró y luego se observaron siete u ocho olas, la mayor de 3.0 metros de altura, que llegó 200 metros tierra adentro, penetrando al centro de la ciudad e inundando el primer piso de varios hoteles y restaurantes situados en la playa. Parte de la arena de la playa fue erosionada y transportada por las olas, desapareciendo. Instalaciones de cultivo de ostiones y de cuidado de tortugas marinas fueron destruidas por el maremoto. Las aguas de la bahía permanecieron oscilando en forma anormal durante nueve horas. El mareógrafo de Acapulco registró una altura máxima de 1.50 metros para la primera ola del maremoto (Sánchez y Farreras, 1993).

El maremoto del 19 de septiembre de 1985, con alturas máximas de ola de 2.5 metros en Lázaro Cárdenas, puede considerarse como un caso promedio dentro de la categoría A, que incluye maremotos con alturas en el rango de 1 a 3 metros.

TIPOS DE DAÑO: CLASIFICACIÓN Y RECUENTO

Los daños materiales producidos por los maremotos se pueden clasificar como:

- *Primarios.* Son aquellos que sufren las estructuras directamente por la acción estática del agua (inundación, presión, flotación) o por su acción dinámica (corrientes, fuerzas de arrastre), y por el rompimiento de las olas o por el rebase de sus aguas en muelles y rompeolas.
- *Secundarios.* Son los causados por el impacto de objetos flotantes o que han sido arrastrados por las aguas (embarcaciones, vehículos, etc.) en estructuras fijas; por incendios o explosiones inducidos por el impacto de estos objetos en tanques de acumulación de combustible o por líneas eléctricas caídas; por el derrumbe de edificios y el colapso de vías de comunicación debido al escurrimiento con el agua del material terrígeno de soporte de sus fundaciones, y por el transporte, la erosión y el depósito de sedimentos, así como por la contaminación provocada por líquidos o gases tóxicos que escapan al romperse los envases que los contienen y derramarse o dispersarse por los cuerpos de agua vecinos.

Los maremotos tienen también un *impacto social*, al causar: víctimas y heridos; destrucción y daños en vías de comunicación, hospitales y escuelas; interrupción de servicios de utilidad pública (electricidad, teléfonos, etc.) y de las actividades diarias de la población, y pérdida de sus viviendas, con el consecuente desplazamiento y reubicación de asentamientos humanos.

En el puerto de Lázaro Cárdenas, el 19 de septiembre de 1985 no hubo víctimas del maremoto, y la mayor parte de los daños materiales se debieron directamente a la inundación de la zona portuaria-industrial. El agua del mar penetró por sobre el relleno del paso de la ex Boca de Burras, removió el material de soporte de las vías férreas y destruyó aproximadamente 1.5 kilómetros de su extensión (figura 9a). Otros 2 kilómetros de vías férreas fueron destruidas por deformación del suelo debido directamente a las vi-

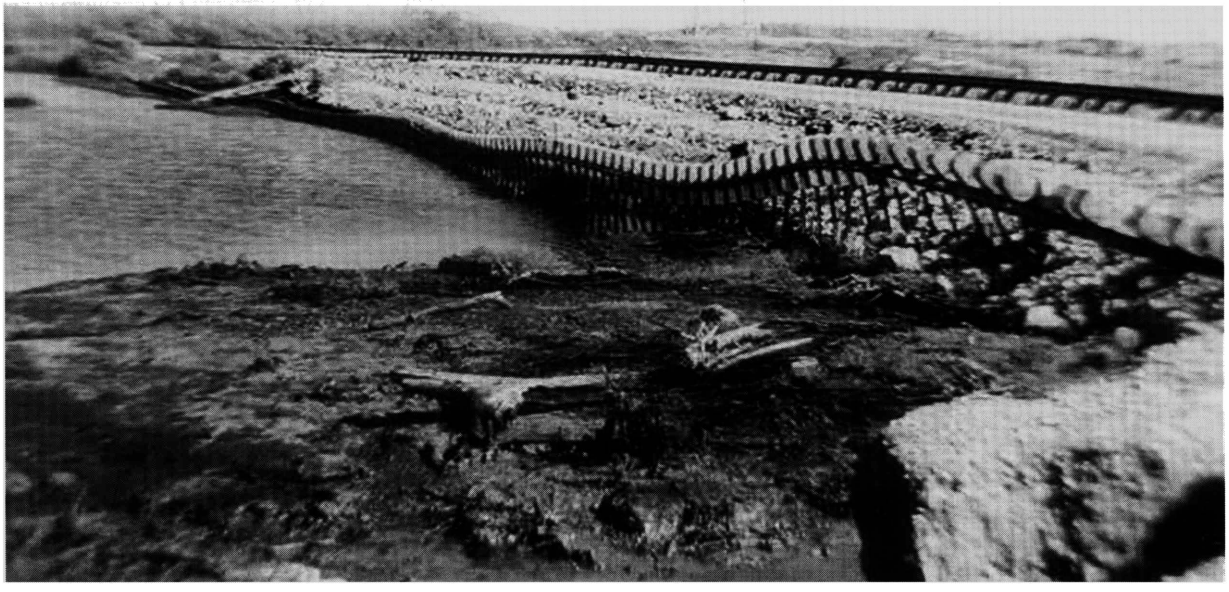


FIGURA 9a. Destrucción de vías férreas en Lázaro Cárdenas por el maremoto del 19 septiembre de 1985.

braciones del sismo. También fue removido por las olas el material de relleno de soporte del puente-dique de acceso a la planta de FERTIMEX, hoy FERTINAL, dejando totalmente aisladas de tierra firme a estas instalaciones y a las restantes de la isla de Enmedio. El agua del mar llegó solamente al nivel del piso en algunos sectores del patio de FERTIMEX, pero no penetró a los edificios o instalaciones. Las vibraciones del sismo produjeron licuefacción de la arena en la zona de relleno de manglares en la isla de Enmedio, causando el hundimiento de 60 centímetros del piso de concreto de las terminales de usos múltiples (figura 9b). Se observaron géiseres de arena debidos a esta licuefacción, brotando del suelo en algunos lugares de las instalaciones de la siderúrgica SICARTSA correspondientes a los sitios de relleno de lagunas naturales. Una ola tipo "bore ondular" (perturbación con frente casi vertical seguida de un tren de pequeñas oscilaciones) avanzó hasta 7.5 kilómetros aguas arriba del río Balsas, observándose su llegada hasta el puente del ferrocarril (Farreras y Sánchez, 1987). Esta ola de "bore" no produjo inundación en las márgenes del río debido a su escasa altura. Asimismo, se detectaron algunos cambios menores en el perfil de las playas adyacentes a la siderúrgica SICARTSA por efecto de transporte de arena.

FIGURA 9b. Licuefacción del suelo y hundimiento del piso en la terminal de usos múltiples en Lázaro Cárdenas, 19 de septiembre de 1985.

Resumiendo, los daños que produjo el maremoto del 19 de septiembre de 1985 en Ciudad Lázaro Cárdenas pueden clasificarse como de carácter:

- *Primario.* Los causados a construcciones de madera, caminos, muelles, puentes y vías férreas, por efecto directo de la inundación, presión y flotación en el agua; y
- *Secundarios.* Los causados a estructuras de concreto y acero, vías férreas y puentes, por escurrimiento con el agua de su material de soporte, y a construcciones de madera y vías de comunicación por erosión y depósito de sedimentos.

La magnitud y el tipo de los daños observados se debe en gran medida a los usos que se le dan a esta costa, sin las debidas protecciones. Algunos daños pudieran haber tenido un efecto magnificador indirecto en sus consecuencias económicas; por ejemplo, la destrucción de vías férreas y puentes pudo haber causado pérdidas indirectas por la interrupción de servicios de transporte de materias primas o elaboradas, combustibles, productos manufacturados, paralización de faenas, etcétera, que exceden el valor de las vías o de los puentes destruidos.

Capítulo II

ESTUDIO DEL RIESGO Y VULNERABILIDAD ANTE MAREMOTOS EN CIUDAD LÁZARO CÁRDENAS

Metodología

La metodología aplicada en este trabajo siguió los lineamientos de Farreras y Sánchez (1991), a saber:

- Identificar las áreas expuestas a riesgo y el carácter y la magnitud de éste.
- Recopilar información histórica, estadística, topográfica, batimétrica, aerofotogramétrica y de otra índole.
- Con la información anterior y haciendo visitas de prospección de campo, identificar en esas áreas la existencia de zonas con infraestructura y población vulnerables, de acuerdo con su desarrollo demográfico, material y socioeconómico presente y futuro.
- Seleccionar maremotos locales prototipo para la región, provocados por sismos o por deslizamientos; determinar las extensiones horizontales de inundación y las alturas máximas de ola previsibles en esas áreas, así como su posible recurrencia, mediante simulación numérica en computadora.
- Confeccionar mapas que delimiten las zonas de control de riesgo según las extensiones horizontales de inundación y la distribución espacial de alturas de ola probables.
- Hacer recomendaciones a los funcionarios locales de los sectores público y privado sobre: el mejoramiento en los patrones de uso del suelo, la redistribución de población, estructuras y servicios, el establecimiento de rutas de evacuación y de zonas de refugio y la elaboración de planes preventivos y de contingencia para reducir el impacto de futuros maremotos. Cooperar en la elaboración de un programa de difusión y educación pública sobre la naturaleza y ocurrencia de los maremotos, que incluya los métodos de prevención y las medidas para actuar durante el fenómeno.
- Diseñar, elaborar y distribuir material educativo impreso y audiovisual, y organizar conferencias y cursos cortos tanto en el ámbito del sistema educativo formal como en el de la capacitación de las autoridades y del personal encargado de aplicar los planes de contingencia. Incluir, en la medida de lo posible, información en los medios de comunicación (radio, televisión, periódicos).

Información: topografía, batimetría, aerofotogrametría y prospecciones

Información topográfica, urbana y portuaria

De la Base Topográfica Nacional Digital del INEGI en CD se extrajo el cuadrante correspondiente a la zona de interés, de aproximadamente 10 por 10 km de extensión, y se elaboró un mapa con curvas de nivel cada 2.0 m desde la cota 0 hasta la de 20 m sobre el nivel del mar (figura 3).

La Administración Portuaria Integral de Lázaro Cárdenas (APILAC, S.A. de C.V.) proporcionó un mapa esquemático muy general de las áreas ocupadas por instalaciones en la zona industrial y portuaria (figura 5).

Información preliminar sobre el detalle y la ubicación de las estructuras contenidas en algunas de las instalaciones se obtuvo de los mapas del Fondo Nacional para los Desarrollos Portuarios (1983) y de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, escala 1:7 500, actualizado hasta 1990.

El Departamento de Desarrollo Urbano del Ayuntamiento de Ciudad Lázaro Cárdenas proporcionó la carta urbana de la ciudad y del megaproyecto de remodelación del malecón ribereño con un nuevo puente sobre el río Balsas (figura 24).

Información batimétrica

Para la zona de generación (Fosa Mesoamericana) y de propagación profunda en mar se usó la base de datos batimétricos digitales ETOPO5.

Para la zona costera se interpoló y digitalizó la batimetría proveniente del portulano núm. 518 "Puerto Lázaro Cárdenas", de la Secretaría de Marina, a escala 1:20 000, edición 1999.

Adicionalmente, el barco oceanográfico *Francisco de Ulloa* del CICESE efectuó dos cruceros frente a la costa michoacana, en noviembre de 2000 y mayo de 2001, llevando a cabo levantamientos batimétricos más detallados que permitieron afinar los resultados.

La información topográfica y batimétrica obtenida satisface plenamente los requisitos de cobertura y de resolución para generar las mallas de integración que se requieren en la simulación numérica en computadora de una inundación por maremotos.

INFORMACIÓN AEROFOTOGRAMÉTRICA

El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática proporcionó un conjunto de mosaicos de la secuencia de vuelos fotogramétricos efectuados en 1975 (escala 1:50 000), 1990 (1:25 000) y 1996 (1:75 000) en la región del delta del río Balsas y de las zonas urbana, portuaria e industrial de Ciudad Lázaro Cárdenas y Petacalco, el cual presenta la distribución de las instalaciones, estructuras, vías de comunicación, redes de servicios, distribución de energía, etcétera. Los mosaicos se escanearon y ensamblaron (figuras 1a, 1b, y 1c), y se elaboraron las cartas base en las que se superpusieron los resultados de inundación proporcionados por el modelo computacional, para poder analizar posteriormente en detalle la vulnerabilidad de la población, los servicios, las vías de comunicación y las diversas instalaciones de la zona industrial-portuaria ante el impacto que provocaría el eventual arribo de maremotos.

PROSPECCIONES DE CAMPO

Se hicieron visitas inspectivas para detectar por prospección visual la ubicación de las estructuras e instalaciones más notorias, su distribución poblacional y el grado de vulnerabilidad por cercanía, nivel y exposición a costa abierta o a riberas estuarinas, así como las cotas de altura de las terminales marítimas. Estas visitas incluyeron las siguientes zonas industriales y portuarias de jurisdicción de APILAC o de los diversos usuarios:

- En la ribera noroeste: el muelle de metales y minerales (cota medida=3.70 m sobre el nivel medio del mar), el puente de paso sobre el Canal de Burras y la franja urbana de la ciudad aledaña al río Balsas.

- En la isla de Enmedio: las terminales de usos múltiples I y II, la terminal de contenedores (cota medida=2.80 m sobre el nivel medio del mar), el exterior del complejo agroindustrial para la elaboración de fertilizantes fosfatados y nitrogenados FERTINAL, el patio-bodega de consolidación y las vías férreas en la zona de playa de acceso al faro.
- En la isla del Cayacal: el puente vial único de acceso desde la ciudad por sobre el brazo derecho del río Balsas, la vialidad única de transporte interno en la isla, la vialidad de acceso en construcción a la nueva autopista Morelia-Lázaro Cárdenas y su puente sobre el brazo izquierdo del río, el área de reserva y los exteriores perimetrales de la planta elaboradora de tubería, el centro de almacenamiento de combustibles de PEMEX, la planta constructora de turbinas NKS, la terminal de descarga de carbón y los patios de almacenamiento de ceniza y carbón de CARBONSER y su banda transportadora de carbón y cenizas sobre la boca deltaica San Francisco del brazo izquierdo del río Balsas, que conduce a la central termoeléctrica de Petacalco de la CFE, y los remanentes del estero El Gasolino.
- En tierra firme: zonas urbanas diversas de la Ciudad Lázaro Cárdenas e interior de la siderúrgica IMEXSA.
- En las márgenes fluvio-costeras al noreste del brazo izquierdo del río (estado de Guerrero): los bordos de protección rectificadores del curso del brazo izquierdo del río y la franja costera adyacente a Petacalco.

No se visitaron, entre otras, en esta etapa de prospección:

- La ribera noreste del brazo derecho del río y el Canal Comercial Nororiente, en cuyas márgenes están las instalaciones del CETMAR, la base naval de la Secretaría de Marina y la bodega y silos de granos de la agroindustria ABSA.
- El puente ferroviario y el patio-estación ferroviario ubicados en la isla de la Palma.
- El interior de la siderúrgica SICARTSA.
- La franja costera adyacente al estero de El Pichi, al noroeste de SICARTSA, donde se construirá el malecón y el desarrollo turístico del megaproyecto.

Modelación numérica TIME

La altura de las olas que alcanzan los maremotos en la costa depende de una multiplicidad de factores (características de las olas en mar abierto, batimetría, pendiente y configuración del contorno costero, etc.), por lo que las alturas máximas de las olas varían considerablemente a lo largo de la costa, aun en rangos de distancia cortos, haciendo que la evaluación de la respuesta local al arribo de un maremoto sea un problema complejo (Farreras, 1997). La alternativa más rigurosa y confiable para efectuar estas determinaciones es la resolución en computadora de las ecuaciones de movimiento (generación, propagación e interacción costera). En este proyecto se efectuó la simulación de inundación por maremotos del puerto de Lázaro Cárdenas mediante la aplicación, en supercomputadora, de uno de los modelos no-lineales más avanzados actualmente, obtenido a través del programa de transferencia tecnológica TIME (Maremoto Inundation Modeling Exchange), una iniciativa patrocinada por la Comisión de Maremotos de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica y el Grupo Coordinador Internacional del Sistema de Alerta de Maremotos del Pacífico.

El modelo consiste en las ecuaciones de movimiento no-lineales para aguas someras, integradas verticalmente (1) y (2), y la ecuación de continuidad (3), sin el término de efecto Coriolis (Goto *et al.*, 1997):

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{M^2}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{MN}{D}\right) + gD\frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}}MQ = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{MN}{D}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{N^2}{D}\right) + gD\frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}}NQ = 0 \qquad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \qquad (3)$$

donde: η = desplazamiento vertical de la superficie del agua por sobre el nivel de reposo

D = profundidad total

M y N = componentes verticalmente integradas del transporte entre unidad de ancho horizontal y vertical (flujo)

g = aceleración de gravedad

$Q=(M^2+N^2)^{1/2}$ = magnitud del transporte, y

$n \sim 10^{-2}$ = coeficiente de fricción de fondo de Manning.

Para la propagación lejana en el océano abierto se usan las aproximaciones lineales para agua profunda de las ecuaciones de movimiento (4) y (5):

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gD\frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \qquad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + gD\frac{\partial \eta}{\partial y} = 0 \qquad (5)$$

En la costa se utiliza la condición de frontera agua-tierra de Iwasaki y Mano (1979), que considera una descarga entre unidad de ancho no-lineal semiempírica (q) si el nivel del agua entre dos cuadros vecinos de la malla tiene un valor $\Delta > 0$, mayor en el cuadro vers-al océano que en el cuadro vers-a tierra (figura 10) y viceversa, notando que q=0 si $\Delta=0$:

$$q = 0.5\, g^{1/2}\, \Delta^{3/2} \qquad (6)$$

Como condición de frontera externa se supone la radiación libre de ondas hacia el infinito.

La condición inicial, que es un maremoto generado por un sismo bajo el lecho marino, se especifica como una perturbación de la superficie del océano a imagen del desplazamiento temporal del fondo $\partial h/\partial t$, evaluado por la integración de todos los puntos fuente que contribuyen al movimiento vertical, en el plano de la falla (Mansinha y Smylie, 1971):

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \mu U \iint \left[\left(\frac{\partial ui^2}{\partial \xi^2} - \frac{\partial ui^2}{\partial \xi^3}\right)\sin 2\delta - \left(\frac{\partial ui^2}{\partial \xi^2} + \frac{\partial ui^2}{\partial \xi^3}\right)\cos 2\delta\right] d\xi^2 d\xi^3 \qquad (7)$$

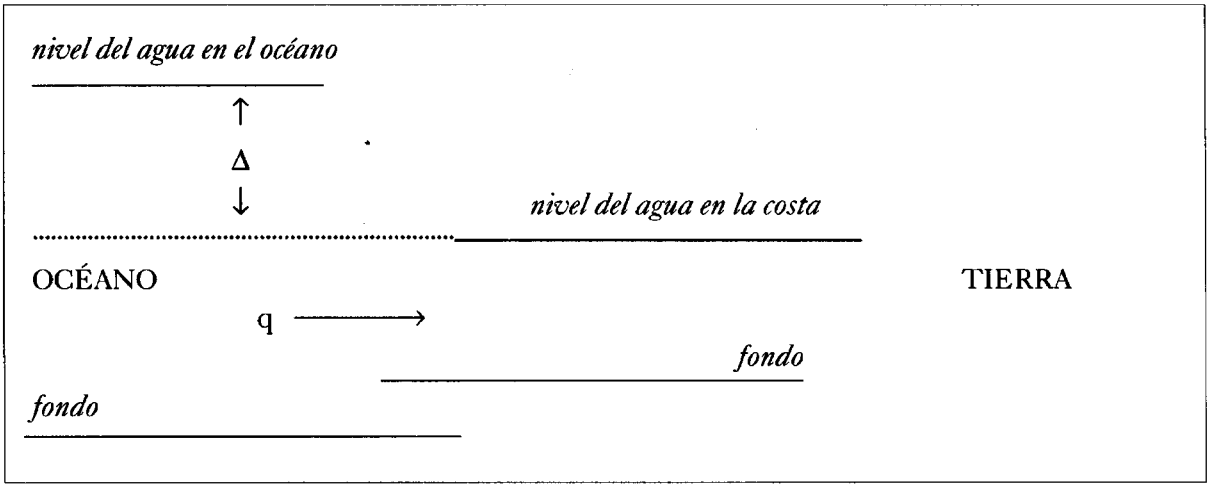


FIGURA 10. Condición de frontera tierra-agua en la costa.

siendo: μ = constante elástica de Lamé $\approx 5x10^{11}$ dynas/cm^2

U = deslizamiento del plano de falla

u_i = componentes de la magnitud de la dislocación

ξ_2 y ξ_3 = coordenadas espaciales horizontales del plano de falla, y

δ = el ángulo de deslizamiento del plano de falla (figura 11).

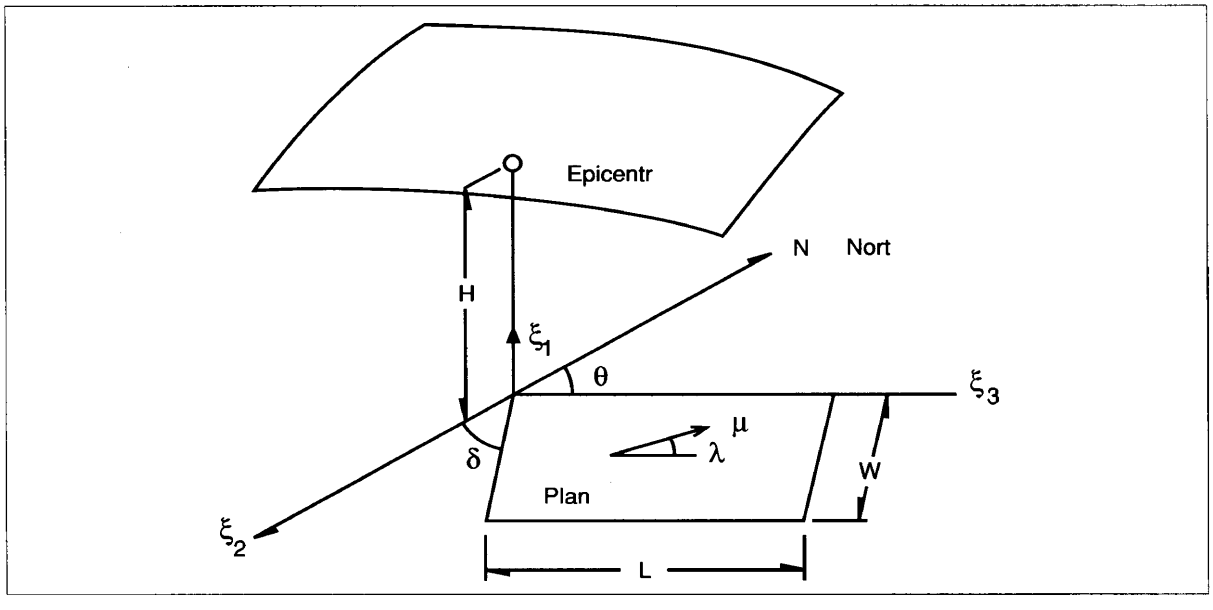


FIGURA 11. Esquema de parámetros sismo-tectónicos para la evaluación de la perturbación inicial del maremoto.

La ecuación de continuidad (3) se discretiza en un esquema de diferencias finitas centrales:

$$\frac{1}{\Delta t}\left[\eta_{i,j}^{k+1}-\eta_{i,j}^{k}\right]+\frac{1}{\Delta x}\left[M_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}}-M_{i-\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}}\right]+\frac{1}{\Delta y}\left[N_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}}-N_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}}\right]=0 \qquad (8)$$

Las ecuaciones de movimiento (1) y (2) se discretizan en la misma forma, pero para poder obtener un esquema estable, las derivadas espaciales en los términos convectivos no-lineales se aproximan ya sea a diferencias finitas en avance o en retroceso (esquema en la dirección del flujo). Las ecuaciones de movimiento deben satisfacer la condición de estabilidad de Courant-Friedrichs-Lewy para la computación numérica:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t}=\sqrt{2gh_{max}} \qquad (9)$$

donde:

Δt y Δx : son las longitudes temporal y espacial de la malla, y

h_{max} : es la máxima profundidad de agua en reposo en una región de computación. Se seleccionaron cuidadosamente las longitudes temporal y espacial de la malla para satisfacer esta condición de estabilidad.

La integración numérica se efectúa mediante el algoritmo a diferencias finitas centrales de "salto de rana" con errores de truncado de segundo orden. Para equilibrar la dispersión numérica, que es consecuencia inevitable del error de truncado del esquema numérico, con la dispersión física de la propagación de la onda, se requiere que el largo de la malla espacial satisfaga también la condición:

$$\frac{\Delta x}{\Delta h}=\sqrt{1-K^2\approx 1} \qquad (10)$$

siendo K el número de Courant=$(gh)^{1/2}\,\Delta t/\Delta x$, donde h es la profundidad media del agua del océano en ese lugar.

Se consideraron mallas de tamaño grueso en el océano profundo, interconectadas con mallas de tamaño fino en la zona costera, con continuidad de la computación en los bordes entre ambas regiones (figura 12). Se usaron secuencialmente tamaños de mallas de 1 350 m, 150 m y 50 m desde el mar profundo a la zona costera.

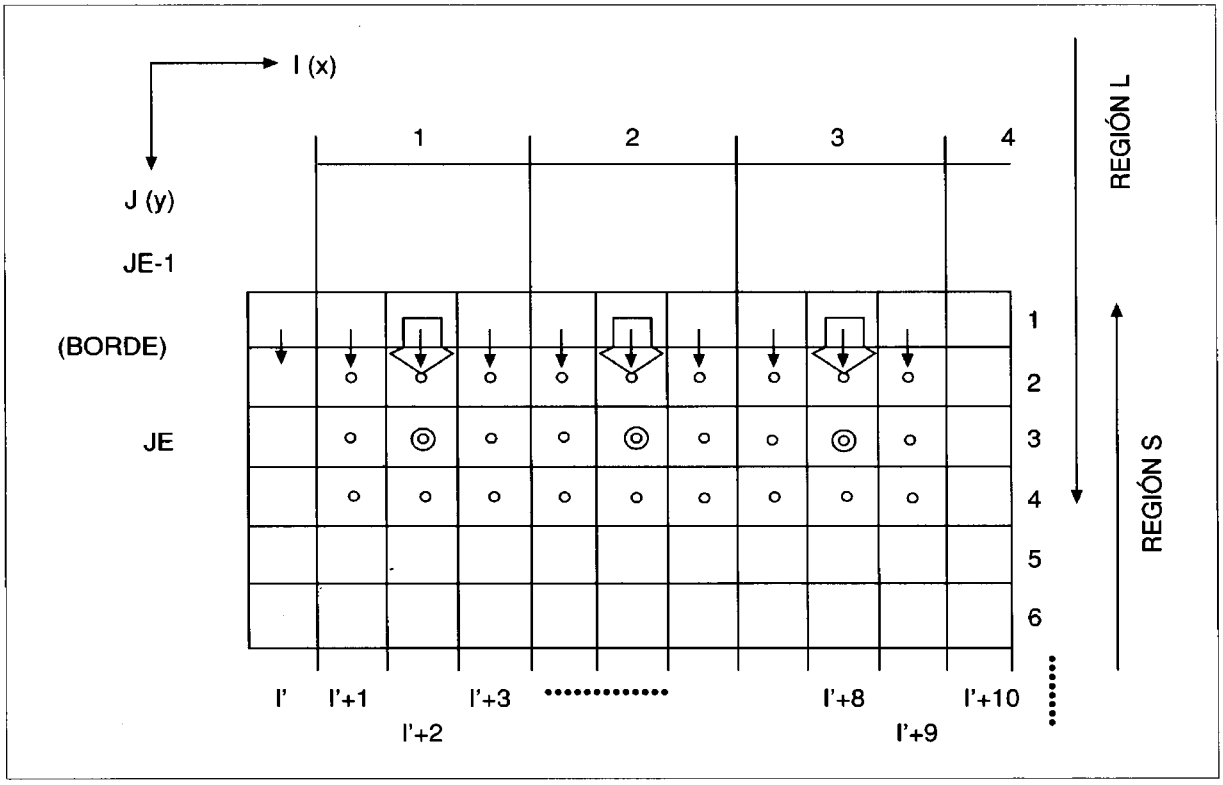


FIGURA 12. Ejemplo gráfico de continuidad en el espacio (x,y,t), entre dos regiones de computación (S y L), con tamaños relativos 1:3 de las mallas.

Selección de sismo-maremoto prototipo

Para la simulación en computadora se seleccionaron dos casos de maremotos semejantes a los que ya han ocurrido en la realidad en las costas de México, y que por lo tanto se puede esperar razonablemente que se repitan en el futuro. Los dos maremotos más recientes acaecidos en México son los del 19 y 21 de septiembre de 1985, que afectaron el puerto de Lázaro Cárdenas, con alturas máximas de ola de 2.5 metros, representativos del tipo A, y el de octubre 9 de 1995, que afectó a localidades costeras de Jalisco y Colima, con alturas máximas de ola de 5.0 metros, representativo del tipo B, de acuerdo con la clasificación ya mencionada:

Tipo	*Rango de altura máxima de ola*
A	$1\ m < Hmax \leq 3\ m$
B	$3\ m < Hmax \leq 5\ m$

El maremoto del 9 de octubre de 1995, con alturas máximas de ola de 5.0 metros, puede considerarse como un caso extremo dentro de la categoría B, que incluye maremotos con alturas en el rango de 3 a 5 metros. Sin embargo, el maremoto del 19 de septiembre de 1985, con alturas máximas de ola de 2.5 metros, puede considerarse solamente como un caso promedio dentro de la categoría A, que incluye maremotos con alturas en el rango de 1 a 3 metros.

Por lo tanto, se eligieron para la simulación en computadora dos casos: un maremoto semejante al del 9 de octubre de 1995 (caso extremo dentro de la categoría B), con alturas máximas de ola de 5.0 metros, y un maremoto ligeramente superior (en 40%) al del 19 de septiembre de 1985 (es decir, ligeramente superior al extremo de la categoría A) con alturas máximas de ola de 3.5 metros.

Un requisito importante para esta selección fue el disponer de abundante información sísmica y mareográfica proveniente de instrumentos modernos y de prospecciones de campo para los eventos de 1985 y 1995.

Los parámetros sismo-tectónicos que se usaron para realizar las simulaciones fueron los siguientes:

Parámetros sismo-tectónicos	*Caso A*	*Caso B*
Dislocación de la falla	4 metros	6 metros
Longitud de la falla	100 kilómetros	120 kilómetos
Ancho de la falla	40 kilómetros	50 kilómetros
Ángulo de echado (dip) de la falla	15 grados	15 grados
Profundidad	5 kilómetros	5 kilómetros
Momento sísmico	0.8×10^{28} dyna-cm	1.2×10^{28} dyna-cm

Aplicación, resultados y análisis

Se aplicó el modelo numérico TIME a la simulación de los dos casos mencionados, suponiendo para ambos la misma ubicación de la zona de ruptura frente a Lázaro Cárdenas, pero con parámetros sísmicos diferentes, según la tabla anterior. La figura 13 muestra los contornos de desplazamiento vertical inicial del fondo marino debido al sismo para ambos casos. La figura 14 muestra la delimitación de las extensiones horizontales máximas de inundación y las alturas máximas de agua para los dos casos. Con la información de las simulaciones anteriores se delimitaron en el mapa topográfico y en el de distribución de instalaciones, las franjas costeras correspondientes a las zonas de riesgo para los casos A y B (figura 15). En la figura 16 se presenta la misma información, copiada en la fotografía aérea del INEGI, actualizada a enero de 1996. Las figuras siguientes son ampliaciones de la fotografía aérea anterior y permiten ver en detalle las instalaciones, estructuras, vías de comunicación y servicios que pudieran resultar afectados por la inundación de maremotos de tipo A o B en las zonas de:

- Las siderúrgicas SICARTSA e IMEXSA (figura 17),
- La isla de Enmedio (figuras 18a y 18b),
- La costa de la isla del Cayacal (figura 19), y
- La costa de Petacalco (figura 20).

En algunas de estas figuras se agregó la delimitación aproximada de la zona inundada por el maremoto del 19 de septiembre de 1985, de acuerdo con los datos de la prospección de campo que se efectuó en ese entonces. Para la isla de Enmedio, por tratarse del caso más crítico, se elaboraron dos figuras separadas (18a y 18b) que muestran las alturas y extensiones de inundación para los casos A y B.

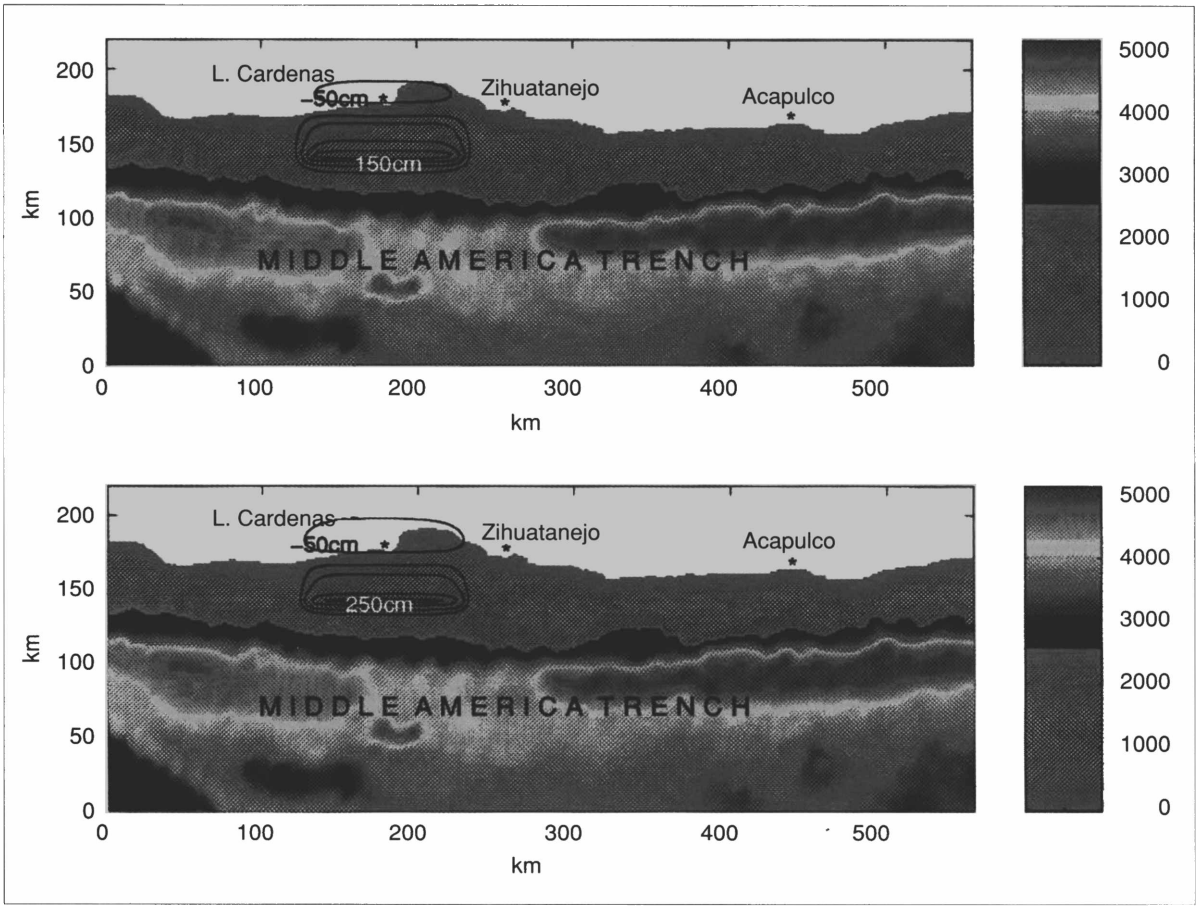


FIGURA 13. Simulación en computadora: contornos de desplazamiento vertical inicial del fondo marino debido a un sismo frente a Lázaro Cárdenas: (arriba) algo mayor (en 40%) al del 19 de septiembre de 1985 (Michoacán-Guerrero), y (abajo) similar al del 9 de octubre de 1995 (Jalisco-Colima). Las escalas de color indican la profundidad del océano.

Advertencias importantes

- Las alturas máximas de agua que proporcionan las simulaciones en la computadora (figura 14) están referidas a la cota cero (0) del nivel medio del mar, pero las alturas de inundación que aparecen en las figuras 17, 18a, 18b, 19 y 20 son las alturas (espesor) de la capa de agua de inundación por sobre el nivel del piso (tierra seca), que se obtuvieron restándole a las alturas de agua predichas por la computadora las alturas topográficas sobre el nivel medio del mar de cada lugar en particular, según el mapa topográfico (figura 3).

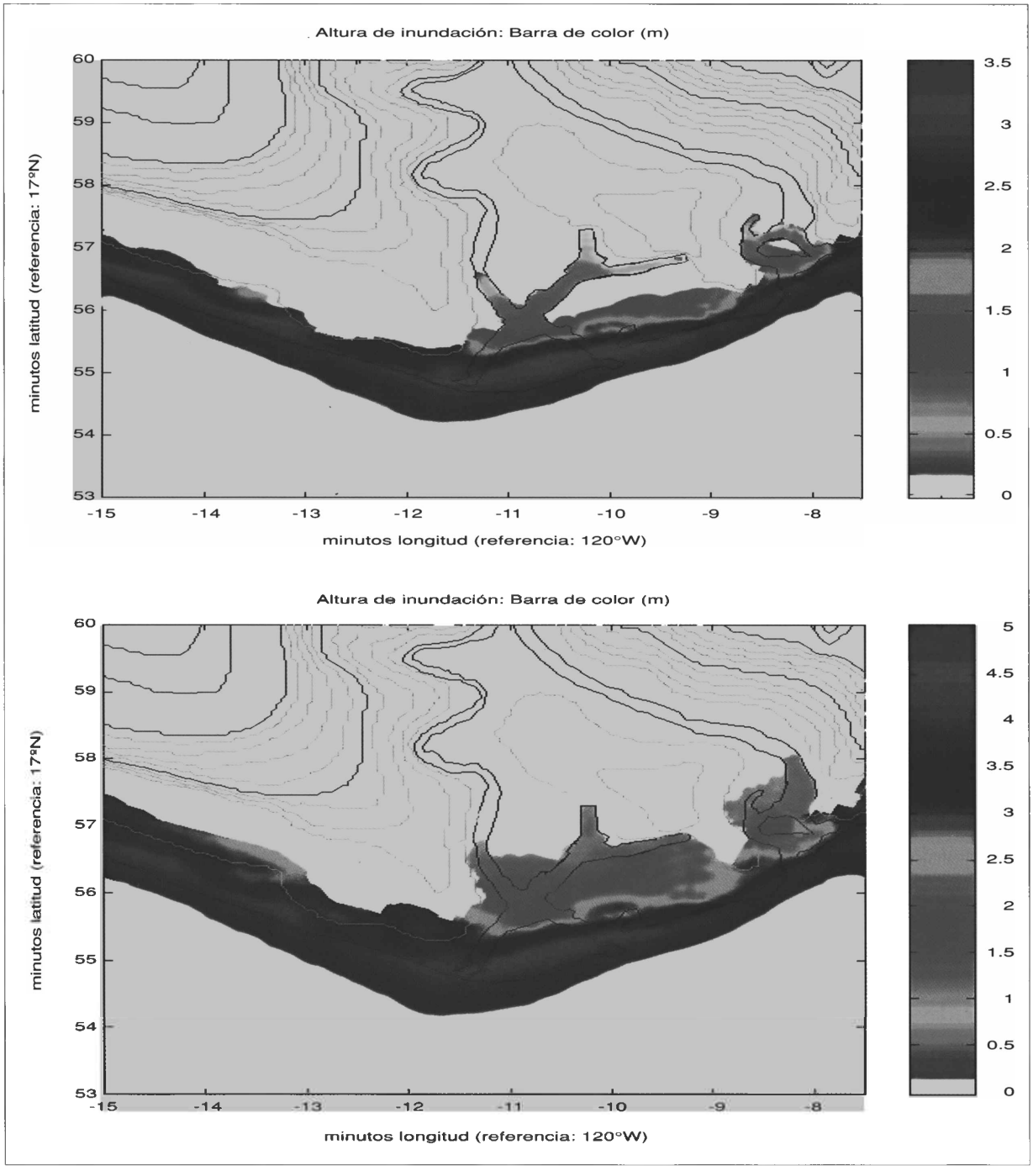


FIGURA 14. Simulación de extensiones horizontales y alturas de agua (sobre el nivel medio del mar) para inundación por maremotos: (arriba) más probable (riesgo bajo), algo mayor (en 40%) al del 19 de septiembre de 1985 (Michoacán Guerrero), y (abajo) menos probable (riesgo medio), similar al del 9 de octubre de 1995 (Jalisco-Colima).

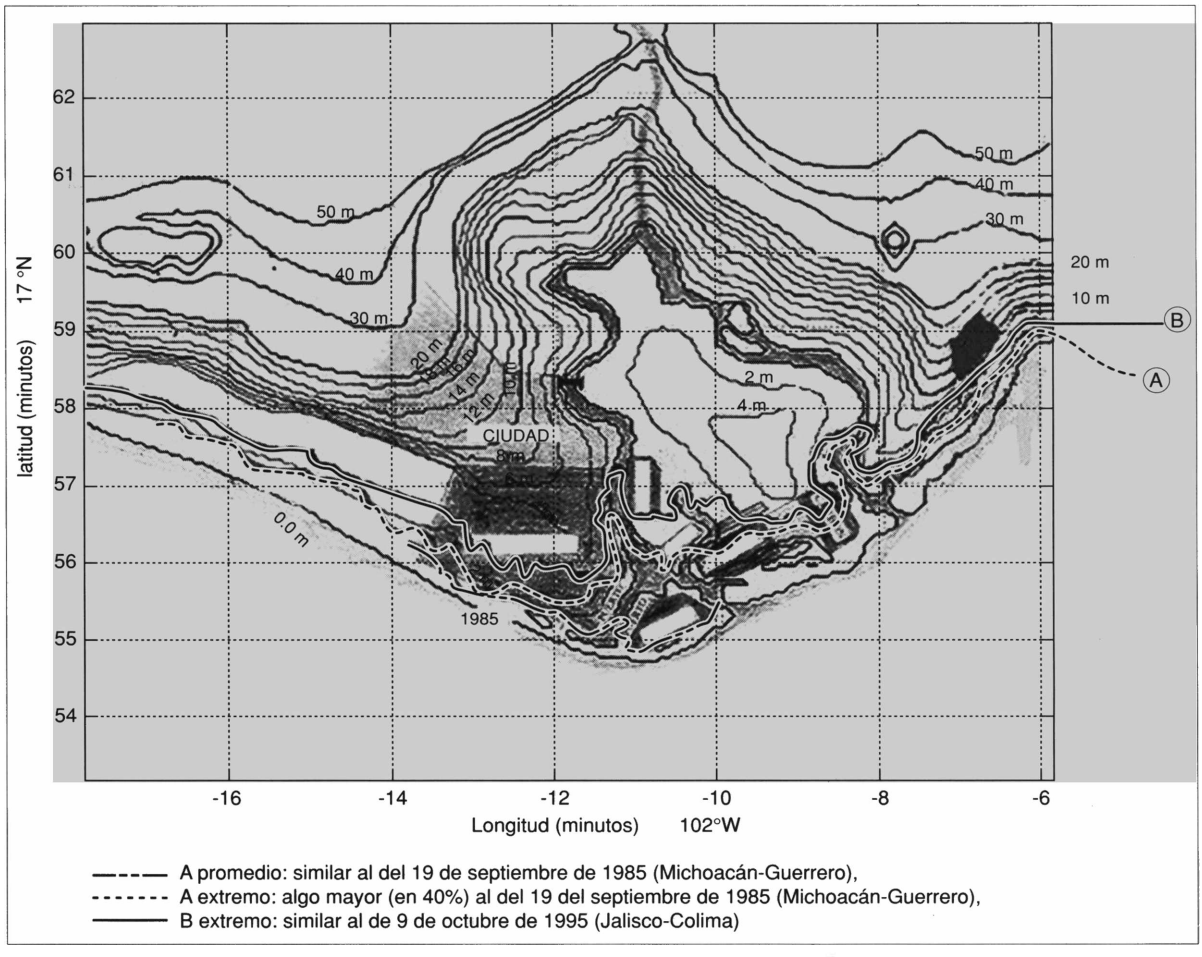
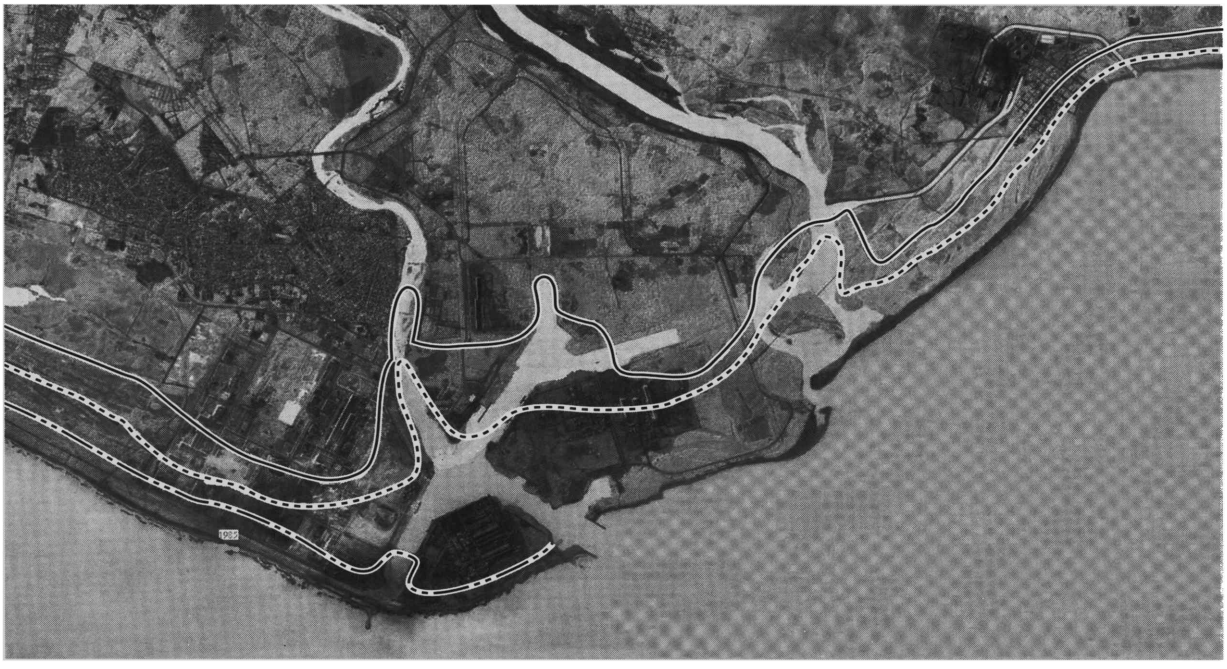


FIGURA 15. Delta del río Balsas: delimitación de las zonas de riesgo de inundación (en mapa topográfico) por maremotos de tipo A promedio, A extremo y B extremo.

- Las alturas de inundación (espesor) de la capa de agua que aparecen en las figuras 17, 18a, 18b, 19 y 20 son valores promedio, es decir que se supone que la marea está en su nivel medio a la hora de la llegada del maremoto. Estas alturas de inundaciones pueden fluctuar, siendo mayores o menores que las indicadas, en aproximadamente 27 centímetros si a la hora en que llega el maremoto la marea está en su pleamar media superior o en su bajamar media inferior, respectivamente (véase la tabla de niveles de la marea en el puerto de Lázaro Cárdenas). Del análisis de la figura 16 y siguientes puede verse, a grandes rasgos, que:



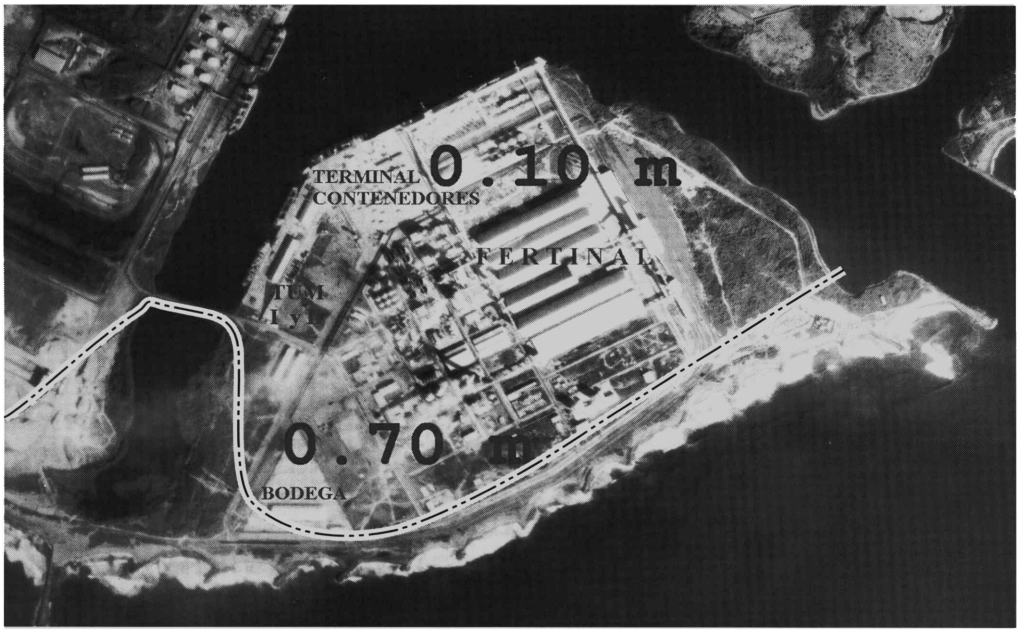
—·-·— A promedio: similar al del 19 de septiembre de 1985 (Michoacán-Guerrero),
------- A extremo: algo mayor (en 40%) al del 19 de septiembre de 1985 (Michoacán-Guerrero), y
——— B extremo: similar al del 9 de octubre de 1995 (Jalisco-Colima)

FIGURA 16. Delta del río Balsas: delimitación de las zonas de riesgo de inundación (en fotografía aérea) por maremotos de tipo A promedio, A extremo y B extremo.

- La zona de mayor riesgo es la isla de Enmedio, cuyas instalaciones (terminales de usos múltiples, terminal de contenedores, planta de FERTINAL y bodega de consolidación) pueden ser inundadas por eventos del tipo A o B (figuras 18a y 18b).
- La franja costera (aproximadamente 1/8 a 1/4 del área total) de las instalaciones de ambas siderúrgicas (SICARTSA e IMEXSA) puede ser afectada, de acuerdo con la gravedad del maremoto, pero el resto de sus instalaciones, tierra adentro, están fuera de la zona de riesgo (figura 17).
- En la franja vecina al océano de la isla del Cayacal, las instalaciones que pueden resultar afectadas más fuertemente por ambos tipos de evento (A y B) son la terminal de descarga de carbón de la CFE y el centro de almacenamiento de combustible de PEMEX, y en menor grado (entre 1/3 a 2/3 de sus instalaciones) la planta constructora de turbinas de NKS y el patio de almacenamiento de carbón y cenizas también de la CFE (figura 19).

—- - — A promedio: similar al de l19 de septiembre de 1985 (Michoacán-Guerrero),
- - - - - - - A extremo: algo mayor (en 40%) al del 19 de septiembre de 1985 (Michoacán-Guerrero), y
——— B extremo: similar al del 9 de octubre de 1995 (Jalisco-Colima).
Se indica la altura máxima (espesor) de la capa de agua de inundación por *sobre el nivel del piso* (tierra seca) para la *franja costera* y el *área interior*, para los casos A extremo y B extremo. Estas alturas pueden variar hasta en ± 30 centímetros según el nivel al que se encuentre la marea a la hora de la llegada del maremoto.

FIGURA 17. Siderúrgicas SICARTSA e IMEXSA: delimitación de las zonas de riesgo de inundación por maremotos de tipo A promedio, A extremo y B extremo.



—·-·— A promedio: similar al del 19 de septiembre de 1985 (Michoacán-Guerrero), y alturas máximas (espesor) de la capa de agua de inundación por *sobre el nivel del piso* (tierra seca) para dos zonas (*costera y portuaria*), para maremotos de tipo:
(arriba) ------- A extremo: algo mayor (en 40%) al del 19 de septiembre de 1985 (Michoacán-Guerrero), y
(abajo) ——— B extremo: similar al del 9 de octubre de 1995 (Jalisco-Colima).
Estas alturas pueden variar hasta en ± 30 centímetros según el nivel al que se encuentre la marea a la hora de la llegada del maremoto.

FIGURA 18. Isla de Enmedio: delimitación de las zonas de riesgo de inundación por un maremotos de tipo A promedio, A extremo y B extremo.

------- A extremo: algo mayor (en 40%) al del 19 de septiembre de 1985 (Michoacán-Guerrero), y
——— B extremo: similar al del 9 de octubre de 1995 (Jalisco-Colima).
Se indica la altura máxima (espesor) de la capa de agua de inundación por *sobre el nivel del piso* (tierra seca) para la *franja costera* y el *área interior,* para los casos A extremo y B extremo. Estas alturas pueden variar hasta en ± 30 centímetros según el nivel al que se encuentre la marea a la hora de la llegada del maremoto.

FIGURA 19. Isla del Cayacal, área costera: delimitación de las zonas de riesgo de inundación por maremotos de tipo A extremo y B extremo.

- En las riberas interiores de la isla del Cayacal: los silos de granos de la agroindustria ABSA y una parte marginal de la zona naval podrían ser afectados en caso de ocurrir un evento severo (tipo B); la mayor parte de la zona naval, el centro de estudios CETMAR y la Productora Mexicana de Tubería están fuera de la zona de riesgo (figura 16).
- Asimismo, la zona urbana de Ciudad Lázaro Cárdenas está también fuera de riesgo, incluyendo las zonas urbanas aledañas a la ribera del río, porque la pérdida de energía de las olas del maremoto al avanzar por el río impide que lleguen tan aguas arriba con alturas notorias (figura 16).
- En Petacalco: la central termoeléctrica de la CFE no sería afectada por inundaciones marinas debido a que está construida en cotas de elevación mayores de 10 metros so-

------- A extremo: algo mayor (en 40%) al del 19 de septiembre de 1985 (Michoacán-Guerrero), y
——— B extremo: similar al del 9 de octubre de 1995 (Jalisco-Colima).
Se indica la altura máxima (espesor) de la capa de agua de inundación por *sobre el nivel del piso* (tierra seca) para la *franja costera* y el *área interior*, para los casos A extremo y B extremo. Estas alturas pueden variar hasta en ± 30 centímetros según el nivel al que se encuentre la marea a la hora de la llegada del maremoto.

FIGURA 20. Costa de Petacalco: delimitación de las zonas de riesgo de inundación por maremotos de tipo A extremo y B extremo.

bre el nivel medio del mar; sin embargo, su funcionamiento podría verse interrumpido por la destrucción que ocasione el maremoto a la banda transportadora de carbón y cenizas que se ubica a través del brazo izquierdo del río, muy cercana a la boca y desprotegida. Un maremoto de tipo A inundaría solamente la zona de playas de Petacalco, pero uno de tipo B afectaría también la parte urbana del pueblo comprendida entre la playa y la carretera (figura 20).

Capítulo III

RECOMENDACIONES PARA LA REDUCCIÓN DE LA VULNERABILIDAD

Recomendaciones generales

Es fundamental para la efectividad de esta estrategia de disminución de pérdida de vidas, daños materiales, interrupción de servicios e impacto socioeconómico que puedan provocar futuros maremotos, la instrumentación de regulaciones sobre el uso del suelo en los planes de desarrollo urbano y la elaboración y aplicación de planes de contingencia (evacuación, refugios, etc.) por parte de las autoridades correspondientes.

Es necesario, antes de la posible ocurrencia de un maremoto, que las autoridades de protección civil municipal, con el apoyo de las autoridades estatales y federales respectivas:

- Evalúen el riesgo y la vulnerabilidad de las comunidades costeras susceptibles a su ataque, identificando los asentamientos humanos con alta densidad de población y la infraestructura física (escuelas, hospitales, teatros, conjuntos habitacionales, centros comerciales, hoteles, restaurantes, oficinas públicas, plantas de generación de energía eléctrica, depósitos de combustible, centrales de comunicación y transporte, etc.) existentes en la zona de riesgo de inundación. Esta información deberá incorporarse a un mapa local de riesgo de cada comunidad, analizándolo e incluyendo en él las rutas de evacuación, los refugios de emergencia y los refugios permanentes.
- Establezcan restricciones y regulaciones sobre el uso del suelo en las zonas de alto riesgo en sus planes de desarrollo urbano y de vivienda, y las incorporen a sus leyes de asentamientos humanos y reglamentos de ordenamiento territorial, vigilando que se obedezcan.
- Definan y operen un sistema o servicio de alerta temprana de maremotos a nivel regional, conectado en enlace permanente (24 horas al día, los 365 días al año) a nivel nacional con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) de la Secretaría de Gobernación y con las instituciones nacionales (universidades, centros

de investigación) que operan las redes de monitoreo sísmico y de nivel del mar que permiten detectar y confirmar la generación de un maremoto al ocurrir un sismo; y de ser posible, a nivel internacional con el Sistema de Alerta de Maremotos del Pacífico. La infraestructura de las redes de telecomunicación de este servicio no debe basarse en comunicaciones telefónicas alámbricas ni en equipos de transmisión-recepción que no tengan alimentación autónoma; los servicios telefónicos y el suministro de energía eléctrica se interrumpen en las comunidades costeras cercanas al epicentro al ocurrir sismos de gran magnitud, precisamente en los momentos más cruciales para la comunicación de mensajes de alerta de posibles maremotos. La red de comunicaciones debe ser inalámbrica (vía radio o satélite) y con equipos que cuenten con suministro eléctrico generado por combustible, baterías o paneles solares.

- Elaboren los planes de contingencia (incluyendo rutas de evacuación y refugios de emergencia y temporales) que aplicarán al ocurrir un maremoto, poniendo especial énfasis en la evacuación de las zonas más densamente pobladas y habitadas por menores de edad o enfermos (escuelas y hospitales), y en los núcleos habitacionales en los que gran parte de la población duerme en la noche.
- Desarrollen un programa de difusión, comunicación social y educación pública sobre la naturaleza y ocurrencia de los maremotos, sus métodos de prevención y recomendaciones para actuar durante su ocurrencia. Se debe diseñar, elaborar y distribuir material educativo impreso y audiovisual: trípticos, folletos, videos, manuales, etcétera, y organizar conferencias y cursos cortos tanto en el ámbito del sistema educativo formal como en el de la capacitación de las autoridades y del personal encargado de aplicar los planes de contingencia. La inclusión de información en los medios de comunicación (radio, televisión, periódicos) y en páginas de directorios telefónicos locales es también muy efectiva. El desarrollo de una cultura de autoprotección entre la población es fundamental para la efectividad de la estrategia de protección civil.
- Efectúen simulacros de evacuación en las zonas potencialmente inundables por maremotos, para evaluar los resultados de sus planes de contingencia.

Sugimoto *et al.* (2001) demuestra cuantitativamente, usando datos de dos maremotos ocurridos en la bahía de Usa (Japón), que el establecimiento adecuado de medidas de prevención y de un sistema de alerta temprana reducen la pérdida de vidas humanas.

Políticas de ordenamiento territorial y de ocupación de la franja costera

Las políticas de ordenamiento territorial para el uso y ocupación de la franja costera expuesta a maremotos deben considerar la necesidad de ubicación de las actividades en la costa, su potencial en cuanto a pérdida de vidas humanas y de obras materiales al ocurrir un maremoto, y la densidad de la población.

Para la ocupación de la franja costera se deberán priorizar las diferentes actividades, tomando en cuenta que para cumplir sus funciones:

- *Imprescindiblemente deban* estar a la orilla del mar o usufructuando la costa. Ejemplos: instalaciones portuarias y astilleros, marinas para embarcaciones turísticas, playas habilitadas para recreación, instalaciones para el cultivo de especies marinas, etcétera.
- No siendo necesario, *pueda ser deseable* que se ubiquen en la zona costera. Ejemplos: hoteles y restaurantes para turistas, empacadoras de pescado y mariscos, plantas de tratamiento de aguas residuales y tanques sépticos, estacionamientos para automóviles, parques de recreación, tierras de cultivo agrícola, etcétera.
- *Sea innecesario* que estén a la orilla de la costa, que sean *muy vulnerables*, o que por su alta concentración de población hagan *difícil su evacuación*, especialmente en horas de la noche. Ejemplos: escuelas, hospitales, teatros, cinemas, mercados, correos, centros comerciales, cárceles, conjuntos habitacionales, oficinas públicas, plantas de generación o de distribución de energía eléctrica, centrales de comunicación, estaciones de autobuses o de ferrocarriles, aeropuertos, museos, archivos de documentación pública (catastro, judiciales), estaciones de policía y de bomberos, industrias no relacionadas con el mar, etcétera.

Características de las rutas de evacuación y de los refugios

- *Rutas de evacuación*: Son las vías que permiten pasar de las zonas inundables hacia las zonas de seguridad. Estas rutas deben ganar altura en una distancia lo más corta posible y tener un ancho suficiente para no quedar bloqueadas por la caída de construcciones o por tráfico excesivo.
- *Refugios de emergencia*: Son edificios (por ejemplo los hoteles), torres o instalaciones industriales, de tres o más pisos de altura, con estructura suficientemente sólida para no ser dañados por los sismos, y que estén ubicados *en la zona de inundación*, donde se refugiarán todas aquellas personas (trabajadores, estudiantes, madres con niños, ancianos, enfermos, minusválidos, etc.) que no hayan podido abandonar a tiempo la zona.
- *Refugios permanentes*: Son instalaciones ubicadas *fuera de la zona de inundación*, en las que se albergará a los desalojados hasta que cese el arribo de la secuencia de olas del maremoto, es decir hasta que el mar retorne a la calma (de medio día a un día, o más).

Recomendaciones específicas para el sector portuario-industrial de Lázaro Cárdenas

En Lázaro Cárdenas predomina el uso del frente marino costero para fines industriales y portuarios (no urbanos), que se caracterizan por un alto valor en equipos, bajo valor en edificaciones, extenso almacenamiento y transporte de materiales riesgosos, y relativamente mediana densidad de población. Las medidas que se propongan deben tratar de amortiguar el impacto de un maremoto en estas zonas, minimizar la posible pérdida de vidas y la interrupción de las redes de comunicación, servicios y energía, e impedir la ocurrencia y propagación de incendios y de contaminación del aire y de las aguas adyacentes.

El análisis de las posibles zonas de inundación y de la distribución de las diversas estructuras, vías de comunicación y población presentes en ellas, permite recomendar que se establezcan las posibles rutas de evacuación y las zonas de refugio que se indican en la figura 21 para evitar o minimizar la pérdida de vidas al ocurrir un eventual maremoto. En particular, se recomienda que se establezcan zonas de refugio a suficiente altura en:

- El área de las siderúrgicas SICARTSA e IMEXSA adyacente a la zona urbana de la ciudad.
- El centro de la isla del Cayacal, en donde la topografía es más elevada.
- El patio de FERTINAL o de las terminales de usos múltiples en la isla de Enmedio.
- La zona de las instalaciones de PEMEX adyacente a la dársena comercial.

En la figura 21 se indican también las rutas de evacuación sugeridas, que conducen a las zonas de refugio ya indicadas o a partes altas de la ciudad.

Es importante mencionar la posibilidad de que ocurran daños secundarios (incendios, explosiones y derrames de combustibles o de contaminantes tóxicos o químicos) ocasionados por:

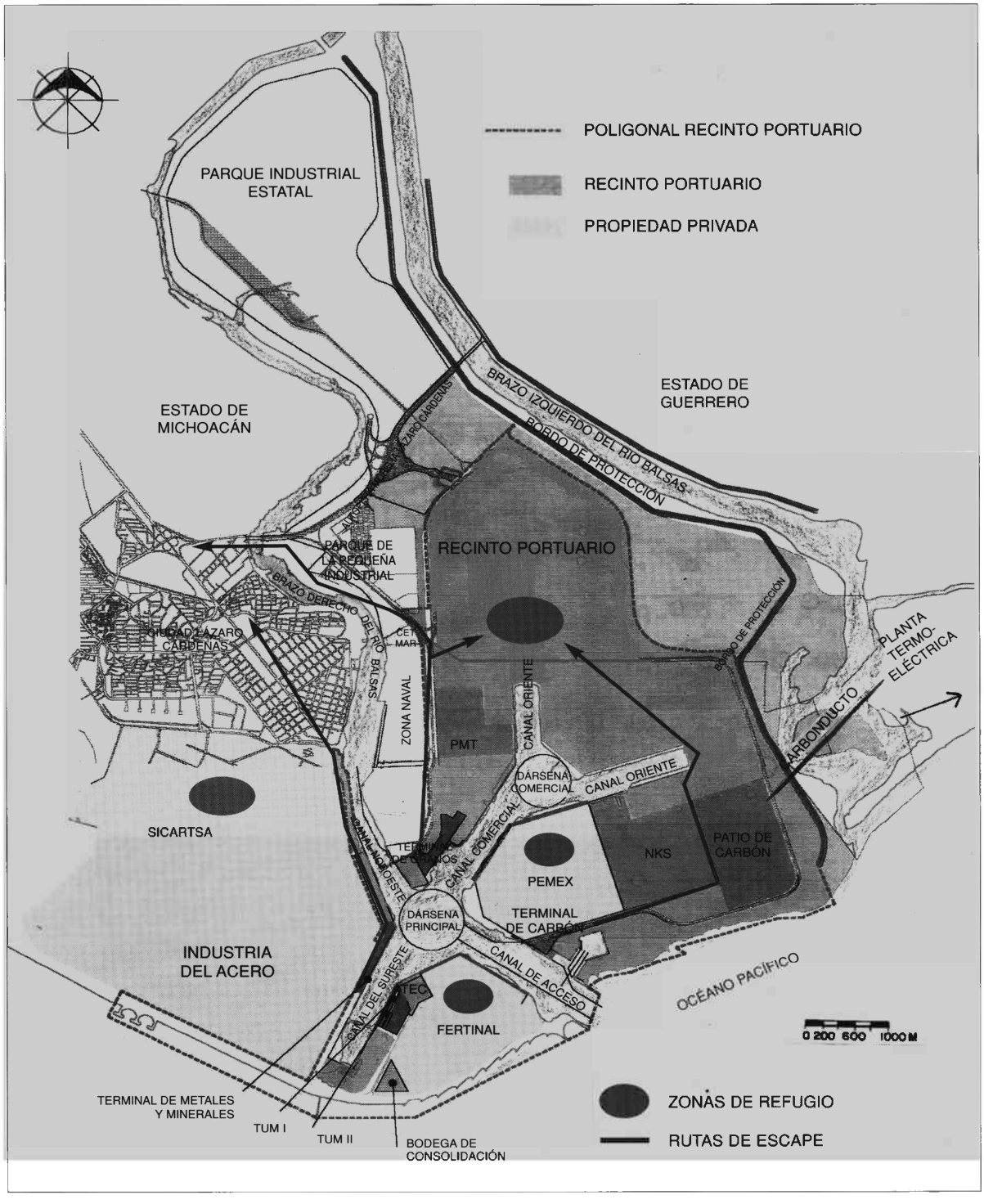


FIGURA 21. Zonas de refugio y rutas de evacuación recomendadas, en Ciudad Lázaro Cárdenas.

- El impacto de embarcaciones y otros objetos flotantes contra instalaciones fijas en la costa, como tanques de almacenamiento de combustibles, ácidos y fertilizantes, no protegidas de la acción violenta del océano.
- La ruptura de los citados tanques y el acarreo de los contaminantes por el agua del mar al interior de la zona porturia-industrial y sus instalaciones, así como aguas arriba del río Balsas hacia la zona urbana de la ciudad.

La posibilidad de ocurrencia de estos tipos de contaminación, como efecto secundario del maremoto, debe ser estudiada y evaluada cuidadosamente para planear las medidas de prevención más adecuadas. En la zona portuaria-industrial de Lázaro Cárdenas se manejan diversos tipos de sustancias, con predominio de:

- Materias en polvo o granuladas: carbón, cenizas, granos, minerales, etcétera, en las instalaciones y muelles de SICARTSA, IMEXSA, CARBONSER, APILAC y ABSA. Estos materiales de tamaño fino a mediano pueden ser acarreados por el maremoto en las aguas de las dársenas y canales de navegación o río arriba, así como a las márgenes costeras, causando daño y efectos tóxicos a la población y a la fauna marina.
- Líquidos, que pueden ser solubles en el agua, o bien flotar en las instalaciones y muelles de PEMEX y FERTINAL. Estas sustancias tienen el mismo riesgo de ocasionar daños y toxicidad que las anteriores al ser dispersadas en el agua, pero además pueden provocar incendios por inflamación, como es el caso de los combustibles, y envenenamiento respiratorio en el caso de algunas que típicamente se manejan en las plantas de elaboración de fertilizantes y que reaccionan con el agua de mar, desprendiendo vapores tóxicos (ácidos, soluciones nitrogenadas, nitratos, sulfatos, fosfatos, amoniaco, urea, etc.).

Es también factible que la intrusión masiva y repentina de agua de mar en ciertos sectores de las industrias siderúrgicas en las que el material se encuentra a altas temperaturas, produzca la liberación de hidrógeno, con potencial explosivo. Esta posibilidad merece ser debidamente analizada por expertos en la materia que después harían las recomendaciones correspondientes.

Los responsables de las instalaciones mencionadas deben evaluar su diseño y características, así como los métodos de almacenamiento y de transporte de materias para

asegurarse de que están debidamente protegidas y pueden soportar el arribo de maremotos leves o moderados, como los simulados en este estudio, o de embarcaciones u objetos flotantes que los impacten, sin ocasionar rupturas, contaminación, incendios o efectos tóxicos o explosivos. Adicionalmente, es conveniente que las nuevas instalaciones de este tipo que se proyecten, se ubiquen fuera de las áreas de riesgo de inundación.

Por el riesgo de derrames, se debe restringir el almacenamiento de sustancias peligrosas en aquellas zonas del recinto portuario que son susceptibles de licuefacción y hundimiento del piso al ocurrir sismos grandes, aun cuando no se generen maremotos.

La primera línea de defensa contra un maremoto es la zona de playas adyacente a la costa, la cual ayuda, por efecto de fricción, a disminuir la velocidad de las olas. Se debe establecer en ella una ancha franja de protección y amortiguamiento. Esta zona sirve también para "atrapar" e impedir el avance de arena, sedimentos, vegetación, escombros y otros materiales que el maremoto transporta tierra adentro. Las forestas de protección son muy útiles para atrapar estos materiales en zonas en que se espera que las olas del maremoto sean menores a 3 metros. Shuto (1984) recomienda que se planten árboles con raíces fibrosas que sujeten el material del suelo, a distancias de 2 metros entre sí, en una franja de 200 a 300 metros de ancho (figura 22). Deben preferirse las especies nativas o que hayan demostrado buena adaptación a las condiciones climáticas. En Lázaro Cárdenas abundan, en la planicie costera y prácticamente hasta la línea de agua, las especies de palmeras de coco de agua, plátanos y papayos, entre otras.

Por otra parte, debe evitarse que las vías férreas y carreteras, que son vitales para el funcionamiento de las instalaciones, se sitúen en esta zona de riesgo y queden expuestas a su destrucción o a su interrupción por depósito de arena, sedimentos, escombros y otros materiales acarreados por las aguas del maremoto; o bien, deben ser construidas en estructuras elevadas, a mayor altura que las posibles olas de los maremotos, ser reforzadas contra la erosión y protegidas contra el impacto de las olas de inundación mediante la construcción de bermas, paredes o forestas protectoras. La efectividad de las bermas puede mejorarse agregándoles forestas de protección en su parte alta, que ayuden a atrapar el material transportado que pudiera sobrepasarlas (figura 23).

El puente de acceso a la isla de Enmedio es especialmente importante por el rol que puede jugar como única vía de evacuación en caso de maremotos, incendios, explosiones y otro tipo de desastres. Su diseño, construcción y mantenimiento, particularmente en

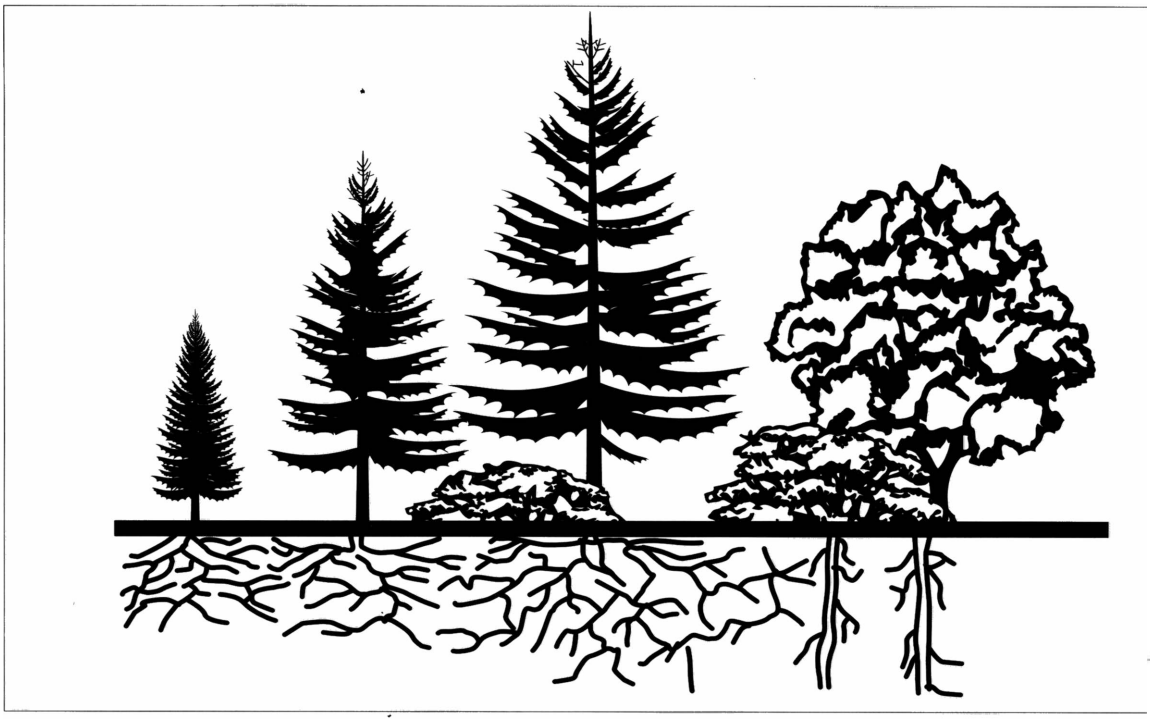


FIGURA 22. Foresta de protección con raíces fibrosas.

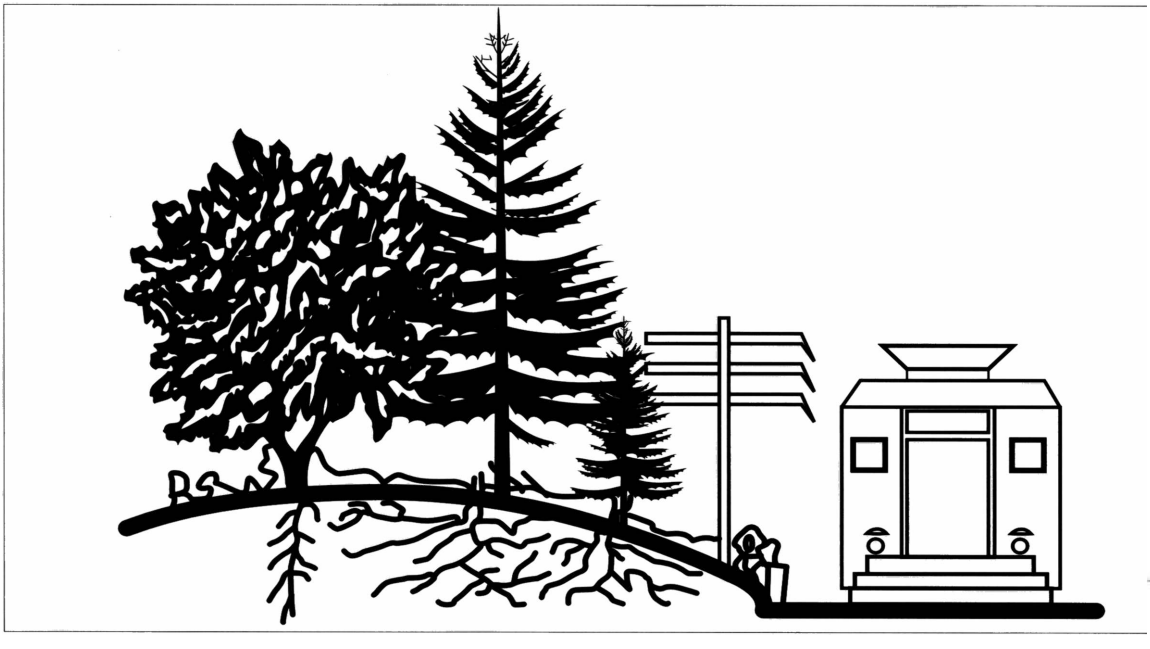


FIGURA 23. Berma forestada protegiendo la vía férrea.

los soportes que serían afectados por escurrimiento de material, deben hacerse con ingeniería de alta calidad.

Dos obras programadas o en ejecución que mejorarán sustancialmente la facilidad y rapidez de evacuación de algunas áreas de la isla del Cayacal son la vialidad norte, con su entronque con la nueva autopista Morelia-Lázaro Cárdenas (figuras 21), y el nuevo puente sobre el brazo derecho del río conectado con la vialidad ampliada a cuatro carriles del malecón ribereño del centro de la ciudad (figura 24).

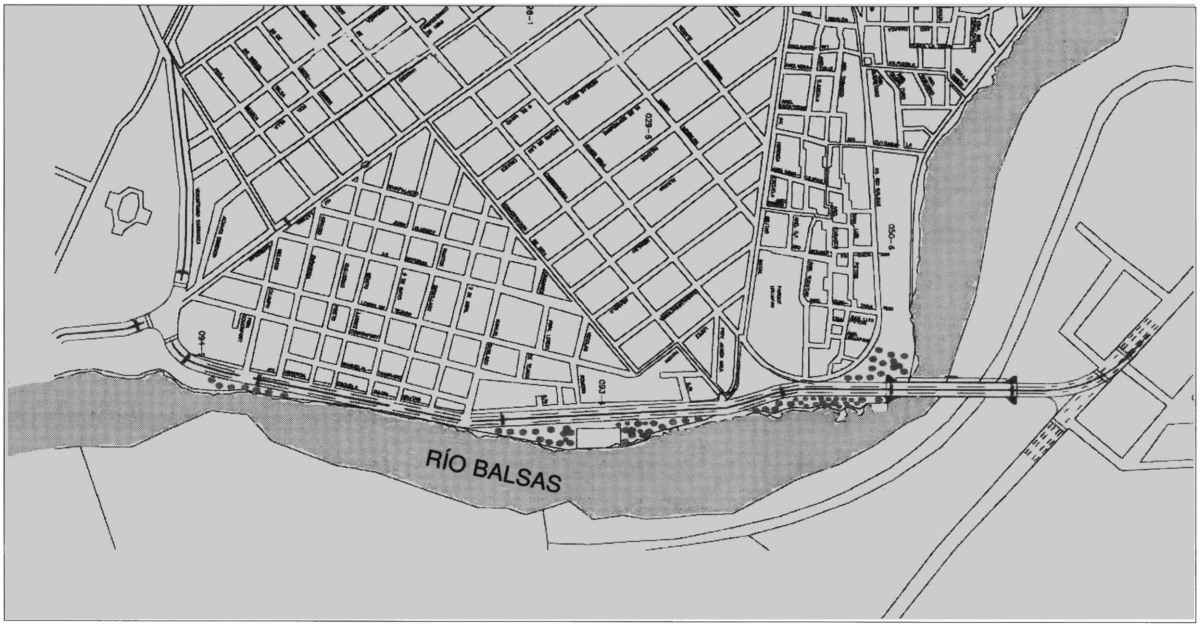


FIGURA 24. Nueva vialidad ampliada de acceso al puerto y puente de conexión con la isla del Cayacal.

Obras de protección alternativas

En caso de ser necesario, debe proponerse la construcción de obras de ingeniería civil adicionales para la protección de los tanques de almacenamiento y otras instalaciones situadas en las zonas de riesgo.

Otras obras de mayor envergadura y costo, como la construcción de rompeolas y paredes protectoras de concreto armado, varios kilómetros a lo largo de los frentes de costa, han dado buenos resultados en otros lugares del mundo, como Japón, donde los maremotos impactan con mayor severidad. También existe la tecnología para construir puentes de dique o de cortina móvil para bloquear el acceso del agua del mar a las bocas de los ríos y a los estuarios al arribar maremotos, si esto es necesario.

El análisis, diseño, financiamiento y construcción de estas y otras obras de protección de mayor costo y envergadura debe quedar a consideración de las autoridades y de los propietarios o usuarios de las diferentes empresas que ocupan la zona portuaria-industrial, si es que opinan que se justifique.

Recomendaciones a la población: antes, durante y después de ocurrir un maremoto

Estas recomendaciones son las estándar del Centro Nacional de Prevención de Desastres, de la Secretaría de Gobernación, publicadas por Farreras y Domínguez (1996), y se aplican si usted y su familia viven o trabajan cerca de la costa del Pacífico de México (a menos de un kilómetro o de diez cuadras, aproximadamente). Recuerde que no todos los sismos causan maremotos.

La experiencia indica que las víctimas de los maremotos han sido, en su mayoría, las personas que ignoraron las recomendaciones.

Prevención: mucho antes de que ocurra un maremoto

- Acuda a la Unidad de Protección Civil o a las autoridades locales para saber:
  - Si las zonas en que viven, trabajan o estudian usted y su familia están sujetas a este riesgo.
  - Cuáles son las rutas de evacuación a lugares altos.
  - Qué lugares funcionarán como refugios de emergencia y cuáles como refugios permanentes.
  - Por qué medios recibirá los mensajes de emergencia.
  - Cómo podrá integrarse a las brigadas de auxilio, si quiere ayudar.
- En caso de tener niños o familiares enfermos o de edad avanzada, prevea cómo habrá de transportarlos.
- Procure un lugar para proteger a sus animales y su equipo de trabajo.
- Guarde fertilizantes e insecticidas en lugares a prueba de agua e inundaciones, pues en contacto con ella se contaminan.
- Elabore con sus familiares y compañeros de trabajo un plan, señalando las rutas de evacuación, los refugios y los lugares de reunión posterior.

- Participe en simulacros de desalojo si las autoridades le solicitan su colaboración.
- Tenga siempre a mano un botiquín portátil para primeros auxilios y una radio de pilas portátil.
- Si no lo sabe, aprenda a desconectar el gas y la electricidad de su vivienda.

Durante el maremoto

Si ocurre un sismo lo suficientemente fuerte como para agrietar paredes, o que impida sostenerse de pie, es muy probable que en los siguientes segundos o minutos llegue un maremoto. Protéjase primero de los efectos del sismo colocándose bajo una mesa o bajo el dintel de una puerta y manteniéndose lejos de cualquier objeto que pueda caerle. No espere el aviso de las autoridades sobre la generación de un posible maremoto, porque puede no haber tiempo suficiente. Considere el sismo como una alerta natural, aléjese de playas y zonas bajas de la costa y diríjase de inmediato a un lugar alto.

Si no ocurre ningún sismo, o si éste es débil, pero escucha noticias de que ocurrió un terremoto en un lugar vecino o lejano del océano Pacífico, manténgase alerta y con su radio o televisor encendido para recibir información e instrucciones de las fuentes oficiales.

Atienda y obedezca las indicaciones de las autoridades y conserve la calma. Si es alertado por las autoridades de que se aproxima un maremoto, busque refugio en alturas superiores a los 15 metros. Las autoridades y los servicios nacionales e internacionales de alerta de maremotos no emiten falsas alarmas.

- Solamente si hay tiempo para hacerlo (maremotos de origen lejano):
  - Guarde en lugares altos, fije y amarre todos los objetos sueltos que pudieran ser arrastrados por el maremoto.
  - Selle la tapa de su pozo o aljibe para tener reserva de agua no contaminada.
  - Desconecte los equipos de gas y energía eléctrica.
  - Cierre bien las puertas y ventanas de su vivienda.
- Si no hay tiempo para hacerlo (maremotos de origen local):
  - Olvídese de los objetos, muebles, etcétera, y llévese solamente un botiquín de mano y algunos documentos personales importantes; huya y salve su vida, la

de sus familiares y la de sus animales. Vaya a un lugar de refugio que esté a lo menos un kilómetro tierra adentro de la costa o a 15 metros sobre el nivel del mar, o bien al tercer piso de un edificio sólido que no haya sido dañado por el sismo.

Si las autoridades le recomiendan evacuar la casa donde vive o su lugar de trabajo, *hágalo de inmediato.* Desaloje ordenadamente y en calma, sin pánico. Si le indican que *no* desaloje porque el sitio está fuera de la zona de peligro, *no lo haga.*

La mayoría de los maremotos se inician con un recogimiento del mar que deja grandes extensiones en seco. Es un aviso. No se acerque a la playa a mirar, a recoger peces o mariscos, ni a esperar el maremoto. *Aléjese inmediatamente.* El maremoto llegará en pocos minutos y a gran velocidad y será demasiado tarde para huir. *Nunca vaya a la playa a observar un maremoto, puede ser lo último que vea.*

Los maremotos pueden penetrar por ríos, esteros, arroyos o lagunas costeras varios kilómetros tierra adentro. *Aléjese de esos cuerpos de agua.*

Las alturas de las olas de un maremoto varían considerablemente a lo largo de la costa, aun en distancias cortas. No debemos engañarnos por el pequeño tamaño de las olas de un maremoto al llegar a una playa; puede tener olas de gran altura en otro lugar costero a muy pocos kilómetros de esa playa.

Evite caminar por los sectores inundados. Aunque el nivel del agua sea bajo, puede aumentar rápidamente, desarrollar velocidades peligrosas y arrastrar a su paso automóviles, embarcaciones, árboles, animales, rocas, escombros, etcétera. No se acerque a conductores de electricidad averiados; recuerde que el agua de mar es conductora de electricidad.

Un maremoto no es una sola ola, sino una secuencia de olas que arriban espaciadas entre sí una tras otra cada 15 a 40 minutos. Puede haber diez o más olas destructivas en un lapso de 12 a 24 horas. Si su vivienda o lugar de trabajo se encuentran en la zona afectada, *no* debe regresar a ellos hasta que las autoridades le indiquen que el peligro ha desaparecido.

Los maremotos en mar abierto, lejos de la costa, tienen alturas de ola muy pequeñas. Solamente son destructivos al llegar a la costa. Si usted se encuentra en una embarcación y siente un fuerte sismo o recibe aviso de ocurrencia de un maremoto, no se acerque a puerto, o salga a mar abierto si está en puerto.

DESPUÉS DEL MAREMOTO

- Conserve la calma y tranquilice a sus familiares.
- Permanezca fuera de las áreas de desastre. Su presencia podría entorpecer las acciones de auxilio y rescate. Pero si las autoridades se lo solicitan, preste completa ayuda a las organizaciones de socorro y de protección civil, y a las autoridades militares y navales.
- Reporte inmediatamente los heridos a los servicios de emergencia.
- No tome agua ni coma alimentos que hayan estado en contacto con el agua de mar.
- Mantenga desconectados el gas y la electricidad hasta asegurarse de que no hay fugas ni peligro de cortocircuitos.
- Antes de conectar sus aparatos eléctricos, cerciórese de que estén secos.
- Informe de los daños al drenaje y a los sistemas de agua potable.
- Siga las instrucciones emitidas por radio, televisión u otro medio de comunicación.
- No divulgue ni haga caso a rumores.

Educación pública, difusión y ejercicios

Es fundamental para la efectividad de esta estrategia de disminución de pérdida de vidas, daños materiales, interrupción de servicios e impacto socioeconómico que puedan provocar futuros maremotos, la instrumentación de programas de educación pública sobre la naturaleza y ocurrencia de estos fenómenos. En especial, crear conciencia en la población joven de la ciudad sobre el riesgo y la vulnerabilidad de su comunidad ante estos fenómenos y sus medidas de prevención, a fin de que desarrollen una "cultura de autoprotección" siguiendo los lineamientos del Sistema Nacional de Protección Civil. Es tarea de las autoridades locales y de las empresas públicas y privadas extender esta labor educativa a su personal y a la numerosa población flotante de trabajadores migratorios eventuales de la zona industrial-portuaria que desconocen el impacto de estos fenómenos.

Con este propósito, durante la ejecución de este proyecto se organizó un conjunto de conferencias, videos y cursos cortos que se ofrecieron con la colaboración y a través de la Casa de la Cultura y del Departamento de Educación y Cultura del Ayuntamiento de Ciudad Lázaro Cárdenas, a las instituciones locales de educación media y superior y para el público en general. Se editó un impreso educativo de divulgación titulado "Tsunamis en México, sus riesgos y su prevención", que se distribuyó a los asistentes a las conferencias. Se editó la versión en español de un librito infantil de la UNESCO sobre la prevención de tsunamis, el cual fue distribuido en establecimientos de educación primaria, secundaria y preparatoria de Ciudad Lázaro Cárdenas, lo mismo que en algunas comunidades pesqueras de litoral michoacano.

Se efectuaron labores de acercamiento y vinculación con las autoridades locales (Departamento de Planeación Urbana y Departamento de Protección Civil del Ayuntamiento de Ciudad Lázaro Cárdenas) tanto con el fin de obtener la información necesaria para realizar esta investigación como para proporcionar la información que permita

a las autoridades incluir en el plan de contingencia las medidas contra la eventual ocurrencia de un maremoto; e igualmente con la Administración Portuaria Integral de Lázaro Cárdenas y con algunas de las industrias de los sectores público y privado, con el mismo propósito. Además se concedieron entrevistas en la prensa y en la televisión local para informar a la población y para difundir estas investigaciones y sus efectos en la prevención de posibles desastres sociales que los maremotos pudieran ocasionar.

Es también importante que las autoridades realicen periódicamente ejercicios de simulacro de arribo de maremotos, ya que estos fenómenos son de ocurrencia poco frecuente y la población tiende a olvidar las medidas preventivas, las rutas de evacuación y la ubicación de los refugios.

Conclusiones y proyección futura

El análisis de riesgo de inundación por maremotos en Ciudad Lázaro Cárdenas es alentador porque presenta situaciones que son relativamente viables de manejar para su prevención, tanto por las alturas de ola previsibles como por la extensión de la posible zona de inundación. Por ejemplo, previa investigación pericial, se pueden identificar en las zonas de riesgo algunos edificios con altura y resistencia adecuadas para ser designados como lugares de refugio, no solamente útiles para el caso de maremotos sino también de tormentas o huracanes que ocurran en conjunción con marea alta. Asimismo, son identificables las rutas de evacuación más expeditas que se pueden habilitar. Otras medidas sugeridas, como la construcción de bermas para proteger las vías férreas y las carreteras expuestas, o la plantación de forestas en las zonas aledañas a la costa, son factibles de ejecutar a un costo razonable y en un lapso de tiempo breve. La prevención de derrames de combustibles y sustancias contaminantes en la zona portuaria, causados por un eventual maremoto, merece un análisis más completo por parte de los especialistas en la materia.

- La repetición de un maremoto similar al del 19 de septiembre de 1985 (tipo A promedio), produciría sólo daños muy leves: destrucción de vías férreas y vialidades en la zona cercana a la playa, y arena erosionada, transportada o depositada. No se espera que ocasione víctimas directas o indirectas.
- La ocurrencia de un maremoto del tipo A extremo causaría inundaciones de 20 a 70 centímetros por sobre el nivel de tierra, en la franja costera. En la zona portuaria e industrial, los daños en las siderúrgicas y en las instalaciones de PEMEX, NKS y CARBONSER en la isla del Cayacal, serían de menor cuantía y estarían muy localizados en la zona adyacente a la costa. Sin embargo, las terminales de contenedores y de usos múltiples, y la planta de FERTINAL ubicadas en la isla de Enmedio, pueden esperar

daños de mayor consideración. La banda transportadora de carbón y cenizas que atraviesan el brazo izquierdo del río sería gravemente dañada o muy probablemente destruida. En Petacalco la inundación cubriría solamente la zona de playas. Puede esperarse que se produzcan algunas víctimas y lesionados si no se cuenta con los lugares de refugio adecuados o si no se evacúan con prontitud las zonas de riesgo.

- La ocurrencia de un maremoto del tipo B extremo causaría inundaciones de 70 centímetros a 1.90 metros por sobre el nivel de tierra, en la franja costera, y de 10 centímetros a 1 metro en la zona inmediata tierra adentro. Aproximadamente un tercio del área ocupada por las siderúrgicas puede ser afectada, con daños de mayores a menores según la cercanía de sus instalaciones a la costa en esa zona. Algo semejante puede ocurrir en los muelles de metales y minerales y en las instalaciones de PEMEX, NKS y de carbón en la costa de la isla del Cayacal, con posible riesgo de derrame y dispersión de combustibles y/o incendios. En los silos de granos de ABSA y en las zonas aledañas, la capa de agua de la inundación no será mayor de 10 centímetros, ocasionando daños insignificantes. La isla de Enmedio sería cubierta totalmente por el agua, pudiendo ocasionarse un desastre con daño extenso y grave a las instalaciones portuarias de las terminales de usos múltiples y de contenedores, y especialmente a la planta de FERTINAL. Es altamente probable que en ese lugar ocurran derrames y contaminación por sustancias tóxicas y reactivos químicos que se dispersen en el agua y en el aire. La banda transportadora de carbón de la CFE sería destruida. El área urbana de Petacalco comprendida entre la carretera y la playa se inundaría con una capa de agua de 10 a 50 centímetros, y la playa sería cubierta con aproximadamente 1 metro de altura de agua. Puede esperarse que se produzca un mayor número de víctimas y lesionados que en los casos anteriores, en especial en la isla de Enmedio, si no se cuenta con los lugares de refugio adecuados o si no se desalojan con prontitud las zonas de riesgo.

El área urbana de la Ciudad Lázaro Cárdenas, la base naval de la Secretaría de Marina, el Centro de Estudios Tecnológicos del Mar, la fábrica de tubería PMT, la central termoeléctrica de Petacalco y otros lugares más tierra adentro, se encuentran fuera de las zonas de riesgo de inundación por maremotos del tipo estudiado en esta investigación.

Se proyecta completar este estudio con la simulación de la posible generación de maremotos por deslizamientos de grandes bloques de sedimento en el talud continental o en la plataforma submarina de la bahía de Petacalco, adyacente a la boca del brazo izquierdo del delta del río Balsas, generando olas de mayor tamaño que las ya analizadas. Se deben muestrear los sedimentos de fondo para analizar su morfología, distribución, tamaño, naturaleza y cohesión, a fin de caracterizar estos eventuales deslizamientos submarinos. Se cree que este pudo haber sido el mecanismo que generó el maremoto con olas de más de 10 metros de altura ocurrido el 22 de junio de 1932 en Cuyutlán, Colima, entre otros.

Bibliografía

Alcalá, G., 2000. "Transformación y perspectivas de las actividades portuarias, pesqueras y turísticas en el litoral occidental de México", propuesta de proyecto al Comité de Ciencias Sociales del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México, D.F., 14 p.

Anderson, J.G., P. Bodin, J.N. Brune, J. Prince, S.K. Singh, R. Quaas y M. Oñate, 1986. "Strong ground motion from the Michoacan-Mexico earthquake", en *Science*, 233 (4768), pp. 1043-1049.

Bodin, P., y T. Klinger, 1986. *Observations of coastal uplift associated with the 1985 Mexican subduction earthquakes*, EOS Transactions, American Geophysical Union, 67 (7), p. 85.

Borrero, J., M. Ortiz, V. Titov y C. Synolakis, 1997. *Field survey of Mexican tsunami produces new data, unusual photos*, EOS, 78 (8), pp. 85-88.

Dirección General de Oceanografía Naval de la Secretaría de Marina, 1999. Portulano núm. 518 "Puerto Lázaro Cárdenas", escala 1:20 000.

Farreras S., S., 1997. "Tsunamis en México", en *Contribuciones a la Oceanografía Física en México*, M.F. Lavín (ed.), monografía núm. 3, Unión Geofísica Mexicana, México, D.F., pp. 75-98.

Farreras S., S., y R. Domínguez, 1996. *Tsunamis*, Centro Nacional de Prevención de Desastres, Secretaría de Gobernación, fascículo núm. 12, México, D.F., 24 p.

Farreras S., S., y A.J. Sánchez, 1987. "Generation, wave form and local impact of the September 19, 1985 Mexican tsunami", en *Science of Tsunami Hazards*, 5 (1), pp. 3-13.

Farreras S., S., y A.J. Sánchez, 1988. "México 1985 Retrospective Assessment" y "Reducing Risk in Low Velocity Areas (México)", en *Planning for Risk: Comprehensive Planning for Tsunamis Hazard Areas*, Urban Regional Research (ed.) for National Science Foundation, EUA, 246 p.

Farreras S., S., y A.J. Sánchez, 1991. "The tsunami threat on the Mexican West coast: a historical analysis and recommendations for hazard mitigation", en *Natural Hazards*, 4 (2 y 3), pp. 301-316.

Fondo Nacional para los Desarrollos Portuarios, 1983. "Puerto Industrial de Lázaro Cárdenas" y "Parque para la Pequeña y Mediana Industria" (folletos), Sector de Comunicaciones y Transportes, Delegación de Puertos Mexicanos, Guadalajara, Jalisco, México.

Goto, C., Y. Ogawa, N. Shuto y F. Imamura, 1997. IUGG/IOC TIME Project: "Numerical Method of Tsunami Simulation with Leap-Frog Scheme", *Manuals and Guides*, núm. 35, Interg. Ocean. Comm. (UNESCO), París, pp. 1-19.

Hiernaux, D., 1993. "Enclave y geografía del poder en Ciudad Lázaro Cárdenas", en J. Padua y A. Vanneph (comp.), *Poder local y poder regional*, Centro de Estudios Históricos, El Colegio de México, México, D.F., pp. 164-182.

InfoPort, S.A. de C.V., 2000. "México: Puertos y Transporte", página de internet: http://www.infoport.com.mx/Cardenas.

Iwasaki, T., A. Mano, 1979. "Two-dimensional numerical computation of tsunami run-ups in the Eulerian description", Proceedings of the 26th Conference on Coastal Engineering, Japanese Society of Civil Engineering, Tokio, Japón, pp. 70-74.

Mansinha, L., y D.E. Smylie, 1971. "The displacement field of inclined faults", en *Bulletin Seismological Society of America*, 61, pp. 1433-1440.

Minello, N., 1982. *Siderúrgica Lázaro Cárdenas-Las Truchas. Historia de una empresa*, Centro de Estudios Sociológicos, El Colegio de México, México, D.F., 317 p.

Nishenko, S.P., y S.K. Singh, 1987. "Conditional probabilities and recurrence of large and great interplate earthquakes along the Mexican subduction zone", en *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77.

Pararas-Carayannis, G., 1985. "Feature: the Mexican earthquakes and tsunami of 19 and 21 September 1985", en *Tsunami Newsletter*, XVIII (2), pp. 1-4.

Pararas-Carayannis, G., 1988. "Source mechanism of the tsunamis of 19 and 21 September 1985, in Mexico", en *Natural Hazards*, 1 (3), pp. 285-294.

Preuss J., R. Preuss, A.J. Sánchez y S. Farreras S., 1986. "Update- Tsunami effects of the September 1985 Mexico earthquake", en *Tsunamis Newsletter*, XIX (2), pp. 7-9.

Rascón, O.H., y A.G. Villarreal, 1975. "On a stochastic model to estimate tsunami risk", en *Journal of Hydraulic Research*, 13 (4), pp. 383-403.

Rodríguez, C., 1976. "La dinámica en la región de Lázaro Cárdenas, Michoacán", en *Ciencia y Desarrollo*, núm. 10.

Sánchez, A.J., y S. Farreras S., 1993. "Catalog of tsunamis on the Western Coast of México", World Data Center A for Solid Earth Geophysics, Publication SE-5O, National Geophysical Data Center, NOAA, Boulder, Colorado, 79 p.

Shuto, N., 1984. "Summary of effect and limit of *tsunami* control forest", Proceedings of the International Tsunami Symposium I.U.G.G., Institute of Ocean Sciences, Dept. of Fisheries and Oceans, Sidney, British Columbia, Canadá, pp. 221-224.

Singh, S.K., L. Astiz y J. Havskov, 1981. "Seismic gaps and recurrence periods of large earthquakes along the Mexican subduction zone: a re-examination", en *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71, pp. 827-843.

Singh, S.K., M. Rodríguez y J. M. Espíndola, 1984. "A catalog of shallow earthquakes of Mexico, 1900-1981", en *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74, pp. 267-279.

Sugimoto, T., H. Murakami, Y. Kozuki, K. Nishikawa y T. Shimada, 2001. "A human damage prediction method for tsunami disasters incorporating evacuation activities", en *Natural Hazards*, 22 (3), 12 p.

Toledo, A., 2000. "Hacia un diagnóstico socioeconómico y ambiental del delta del río Balsas", conferencia presentada el 6 de diciembre del 2000 en el seminario *Una ventana a la región costera del occidente de México: la investigación multidisciplinaria COLMICH-COLMEX-CICESE*, en El Colegio de México, México.

Urban Regional Research, 1988. "Planning for Risk: Comprehensive Planning for Tsunami Hazard Areas", Project Report for the National Science Foundation, EUA, 246 p.

Riesgo de maremotos en Ciudad Lázaro Cárdenas, Michoacán. Medidas de prevención, se terminó de imprimir en el mes de agosto de 2003 en los talleres de Impresión y Diseño, Av. Río Churubusco 2005, Col. El Rodeo, México, D.F.

La edición consta de 1 000 ejemplares.

Cuando los habitantes de la Ciudad de México sufrieron y enfrentaron de manera ejemplar los devastadores efectos del terremoto acaecido en 1985, los pobladores de Ciudad Lázaro Cárdenas, Michoacán, estaban sumidos en la zozobra: el sismo había tenido origen frente a su litoral, y uno de sus efectos más temidos, un maremoto, había inundado parte de las instalaciones de FERTIMEX, atrapando dentro a cientos de obreros que fueron rescatados en lancha horas más tarde.

En aquel momento, pocos fueron los mexicanos que se enteraron de los efectos del fenómeno en la costa michoacana –que afortunadamente no cobró vidas humanas ahí– aturdidos como estaban por sus consecuencias mortíferas en la capital de la República.

Este tercer volumen de la serie *Linderos de la costa* nos explica a especialistas y a profanos en qué consiste el fenómeno del maremoto, cuáles son sus posibles consecuencias y, sobre todo, qué hacer cuando acontece, tomando como ejemplo el caso de Ciudad Lázaro Cárdenas. La claridad con que está escrito el texto –no exenta del lenguaje que emplean los científicos–, y particularmente la precisa exposición de las medidas que es necesario tomar para prevenir los desastres sociales que suelen ser la secuela indeseada de aquel fenómeno natural, hacen de este volumen una aportación singularísima para la planeación urbana de las ciudades situadas en el litoral del Occidente de México.

El Colegio de México

CICESE
Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

El Colegio de Michoacán