

Modelado 3D de sismos extremos con supercomputadora

POR MARIO CHÁVEZ

Como parte de la investigación que se realiza en la Coordinación de Ingeniería Sismológica, para estimar el peligro sísmico asociado con sismos extremos de magnitudes iguales o mayores de 8, en los últimos años he desarrollado y aplicado modelos que requieren el uso del denominado cómputo de alto rendimiento mediante supercomputadoras. Éstas son sistemas de cómputo que utilizan centenas o miles de procesadores y que permiten la ejecución de un código en paralelo, como por ejemplo la supercomputadora KanBalam de la UNAM (ref 1).

El modelado realista de la propagación de sismos extremos, como los ocurridos en Michoacán, México, el 19 de septiembre de 1985, de magnitud Ms 8.1 (fig 1), o en Sichuán, China, el 12 de mayo de 2008 con Ms 7.9 (fig 2), representa un reto numérico y computacional, porque requiere grandes recursos computacionales, tanto en términos de memoria (RAM) como de almacenaje de datos, así como el uso intensivo de supercomputadoras con miles de procesadores.

La importancia de poder realizar dicho modelado se debe a que esos eventos, en algunos casos, conducen a pérdidas de miles de vidas, así como de billones de dólares (1 billón=1000 millones). Por ejemplo, las pérdidas por los sismos de México y China fueron del orden de 30 000 y 80 000 vidas, además de 7 y 100 billones de dólares americanos, respectivamente. Aunque la estimación de los periodos de retorno de los sismos extremos es todavía controversial —en el caso de México se han propuesto periodos de retorno de decenas de años para sismos de subducción superficiales extremos, y para la región de Sichuán, en China, de cientos

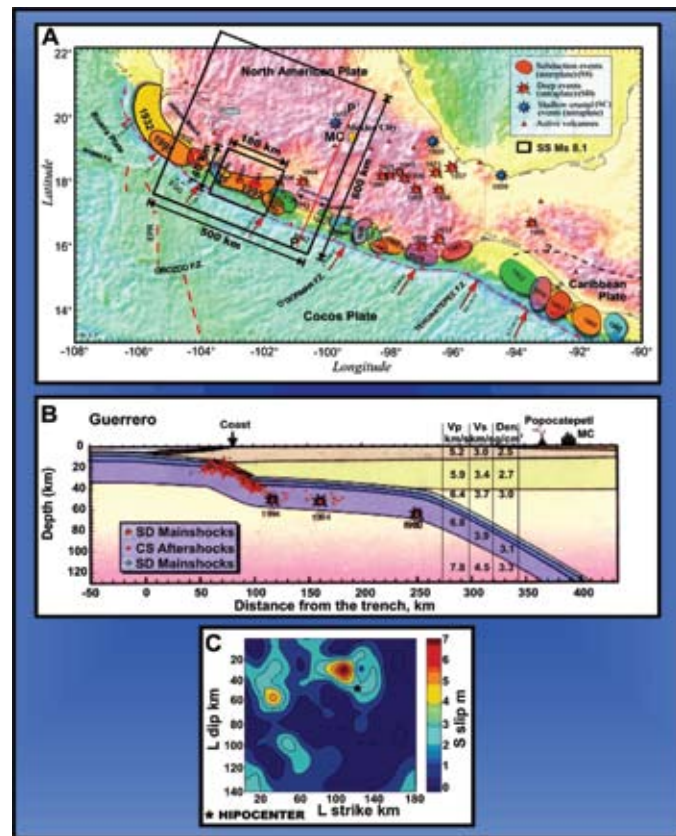


Fig. 1 A) Rectángulo interno: Área de ruptura del sismo del 19/09/85 Ms 8.1; Rectángulo externo: proyección superficial del volumen de la corteza terrestre de 500x600x124 km³ que representa el dominio físico de interés, B) Perfil de la costa hasta la Ciudad de México que muestra la geometría y algunas características mecánicas de las placas de Cocos y Norteamericana, C) Distribución cinemática de la ruptura del sismo del 19/09/85 (Ref. 2).

o miles de años— existe gran interés sismológico, ingenieril y económico en el modelado realista.

La propagación de las ondas sísmicas generada por un sismo puede ser expresada en términos de las velocidades y los esfuerzos, mediante la ecuación de onda elástica en tres dimensiones (3D). En un medio isótropo (es decir, en un medio con las mismas propiedades en las 3D) dicha ecuación consiste en un sistema de nueve ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas de primer orden, que incluye los tres componentes del vector de velocidades de las partículas y de los seis componentes independientes del tensor de esfuerzos. El medio puede ser descrito por las constantes de Lamé y la densidad de masa, y la fuente sísmica, por un tensor de momento de la fuente (ref 2).

Para resolver el sistema de ecuaciones descrito, en este trabajo se usó un esquema de diferencias finitas alternadas de segundo orden en el tiempo y de cuarto orden en el espacio. Este esquema permite aproximar las derivadas parciales, por

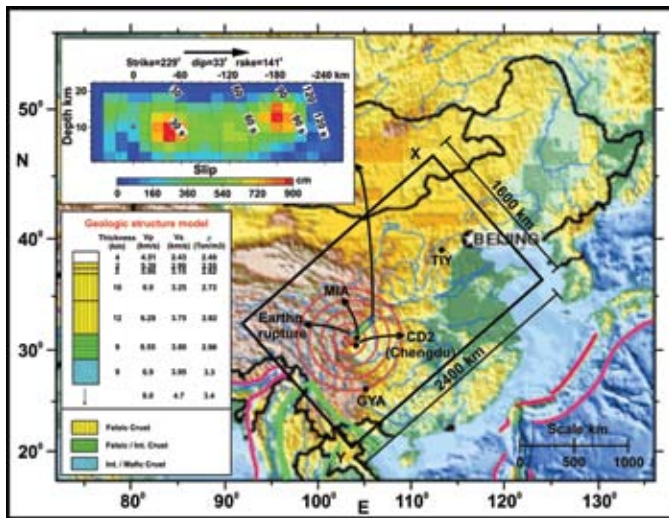


Fig. 2 Localizaciones de: a) el epicentro (punto rojo) del terremoto de Sichuan del 12/05/08 Ms=7.9; b) su área de ruptura y deslizamiento cinemático en las direcciones SW-NE; c) 4 sitios de la red Acelerográfica y Sismológica de China; d) la proyección superficial del volumen de 2400x1600x300 km³ utilizado en la modelización de la región de interés; e) Parámetros de la estructura geológica adoptados para de la región de interés, (Ref. 7).

diferencias finitas centradas, sin duplicar los operadores espaciales y con mayor precisión que otros esquemas. Además, los subconjuntos de las variables dependientes pueden ser almacenados en diferentes mallas temporales y espaciales. Por ejemplo, el vector de velocidades puede ser almacenado en puntos de la malla desfasados, tanto en el espacio como en el tiempo, a la mitad de los respectivos intervalos de discretización empleados (ref 2).

Con el fin de utilizar óptimamente las supercomputadoras disponibles, el algoritmo correspondiente al esquema recién mencionado fue paralelizado en 3D, con lo cual, el dominio donde se propagan las ondas sísmicas fue discretizado en subdominios y distribuido entre un número de procesadores.

Se utilizó una partición simple para que a cada uno de los procesadores le correspondiera un mismo número de puntos de la malla. Se utilizó la interfase denominada MPI (por sus siglas en inglés, Message Passing Interface) que permite la lectura y comunicación eficiente de datos entre subdominios vecinos, requeridos por el algoritmo, además de que es independiente de la plataforma (supercomputadora) en que se ejecute el algoritmo.

Como parte del proyecto Scientific Computing Advanced Training (SCAT) financiado por la Comunidad Europea, en el que participan varios institutos de la UNAM (en este caso a través de Mario Chávez del II) y el STFC Daresbury Laboratory (DL) en el Reino Unido, el código ha sido instalado y ejecutado en tres supercomputadoras de doble núcleo: KanBalam de la UNAM con 1368 procesadores (ref 1), HPCx con 2560 procesadores (ref 3) y HECTOR con 11328 procesadores (ref 4), del STFC-DL. Lo anterior permitió hacer un estudio tipo benchmarking del código, cuyos resultados muestran que, independientemente de la supercomputadora utilizada, cuando el número de procesadores empleados es mayor de 70 % del total disponible en ésta, la eficiencia computacional disminuye considerablemente (ref 5).

De los resultados obtenidos en KamBalam y HECTOR, se muestran aquí los del modelado de la propagación de los dos sismos extremos citados previamente. En las figs 1 y 2 se presentan las proyecciones en la superficie de los dominios físicos utilizados para representar los volúmenes de interés para los sismos de México (500 x 600 x 125 km³) y China (2400 x 1600 x 600 km³), respectivamente. Además, dichas figuras incluyen algunas de las propiedades mecánicas y de densidad de masa, de las capas de la corteza terrestre propuestas para representar los respectivos dominios, así como las distribuciones de los desli-

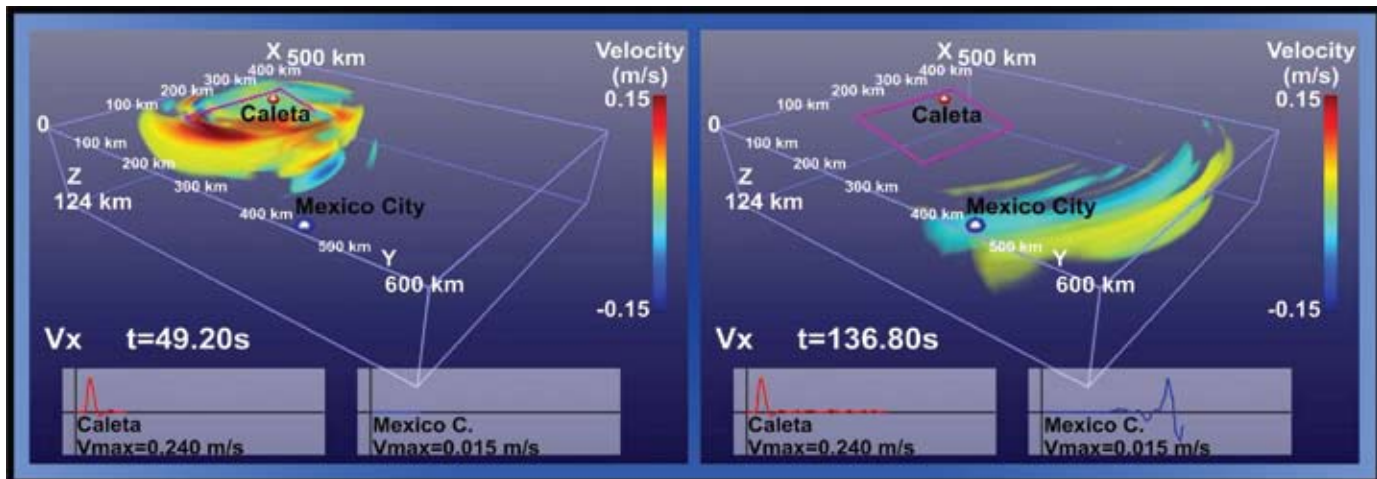


Fig. 3 Patrones de propagación de velocidades sintéticas (modeladas) de las ondas sísmicas de baja frecuencia (<0.3 Hz) en la dirección X, para t=49.2 y 136.8s, del sismo de México de 1985. Se incluyen los sismogramas correspondientes para Caleta y Tacubaya.

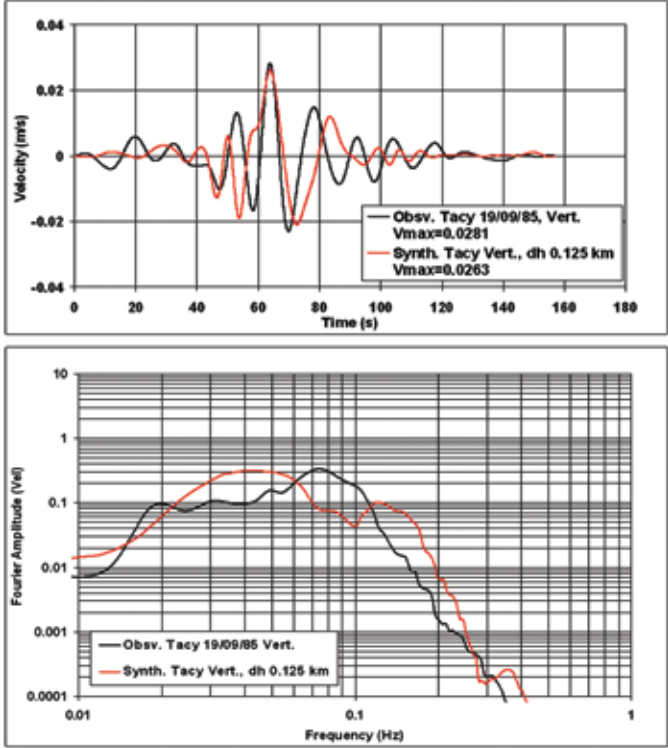


Fig. 4 Sismogramas de velocidades (frecuencia <0.3 Hz) y espectros de amplitudes de Fourier, observados y sintéticos en la dirección Vertical para el sitio Tacy (Tacubaya), del sismo del 19/09/85 Ms 8.1, en la Ciudad de México.

zamientos cinemáticos de las fuentes sísmicas correspondientes a dichos sismos extremos (refs 6 y 7).

La fig 3 muestra las imágenes de los patrones de propagación de velocidades sintéticas (modeladas) de las ondas sísmicas de baja frecuencia (<0.3 Hz) obtenidas, por primera vez, para el sismo de México de 1985. Se incluyen los patrones correspondientes a los tiempos de 49.2 y 136.8 s, después del inicio de la ruptura de la fuente sísmica incluida en la fig 1. También se incluyen en esta figura los sismogramas sintéticos correspondientes a los sitios Caleta y Tacubaya.

Nótese la complejidad del patrón para $t = 49.2$ s, en el cual la fuente está todavía rompiendo (en la vecindad de Caleta, Michoacán), comparado con el correspondiente a $t = 136.8$ s, en el cual la ruptura de la fuente ha terminado y se observan paquetes de ondas superficiales bien desarrolladas, dirigidas, de manera preferencial, hacia la Ciudad de México. Tales ondas se consideran una de las causas de los extensos daños observados en la infraestructura de esta ciudad, aparte de las amplificaciones causadas por las propiedades dinámicas de los suelos compresibles de las zonas que fueron lacustres.

La fig 4 presenta los sismogramas observado y sintético (y los espectros de amplitudes de Fourier de velocidades) de

la estación sismológica y acelerográfica de Tacubaya, localizada en el llamado suelo firme de la Ciudad de México. El sintético corresponde a una discretización espacial de 0.125 km, en las 3D del dominio mostrado en la fig 1. Este modelo del sismo de México requirió el uso de 1024 procesadores de HECTOR por 24 h. Nótese la similitud de los sintéticos con los observados, tanto en el dominio del tiempo, como en el de la frecuencia (ref 6).

La fig 5 incluye los patrones de propagación de velocidades sintéticas (modeladas) de las ondas sísmicas de baja frecuencia (<0.3 Hz) para $t = 24.24, 43.44, 72.42$ y 100.56 s, después de iniciado el sismo de China. Los resultados corresponden a una discretización espacial en las 3D de 1 km (ref 7). Es relevante que en este caso, las velocidades máximas y mínimas corresponden a la dirección de ruptura del sismo (eje X) y perpendicular a ésta (eje Y), como se observa en la fig 5.

Este resultado permitió explicar las observaciones sobre la modificación de la topografía y los daños observados en la infraestructura y ciudades localizadas sobre la zona en la dirección de ruptura del sismo, así como los daños leves reportados para sitios localizados a distancias de, por ejemplo, 80 km del epicentro (como la ciudad de Chengdu, capital de Sichuán), pero perpendiculares a la dirección de ruptura (figs 2 y 5).

La fig 6 incluye las comparaciones temporales y en el dominio de la frecuencia de sismogramas observados y sintéticos para sitios localizados a distancias epicentrales de 70 (MIA), 600 (GYA) y 1200 km (TYI). Las comparaciones también son satisfactorias en estos tres casos, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. Igualmente se obtuvieron

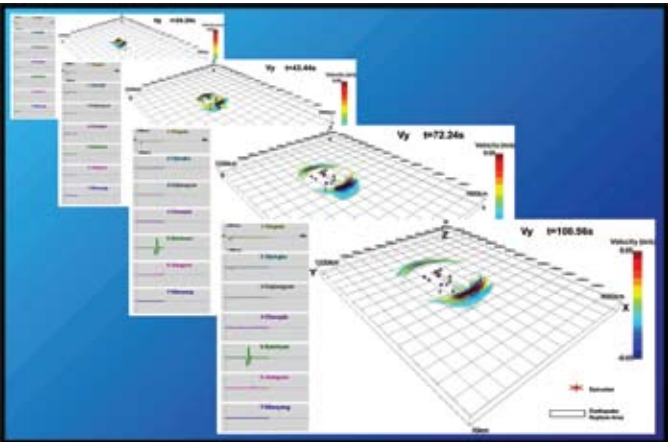


Fig 5 Patrones de propagación de velocidades sintéticas (<0.3 Hz) para $t = 24.24, 43.44, 72.42$ y 100.56 s, en la dirección Y del sismo de Sichuan del 12/05/09. Nótese que las velocidades máximas están en la dirección Y, que es la de ruptura de la fuente sísmica y las mínimas están perpendicular a la anterior (dirección X).

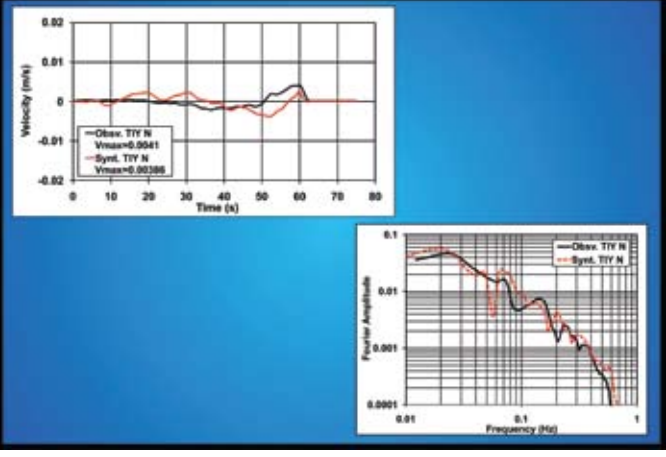
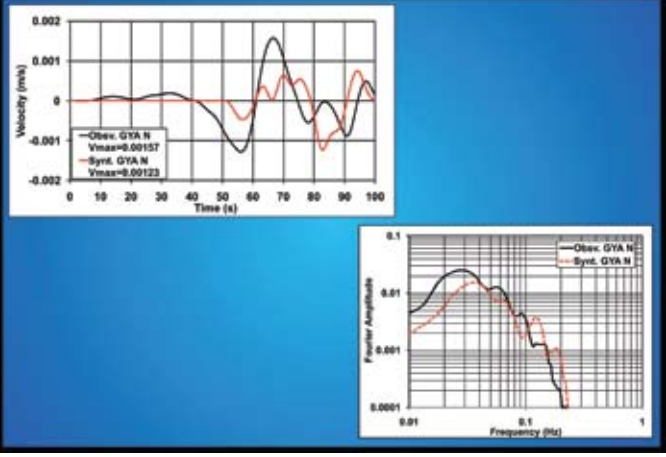
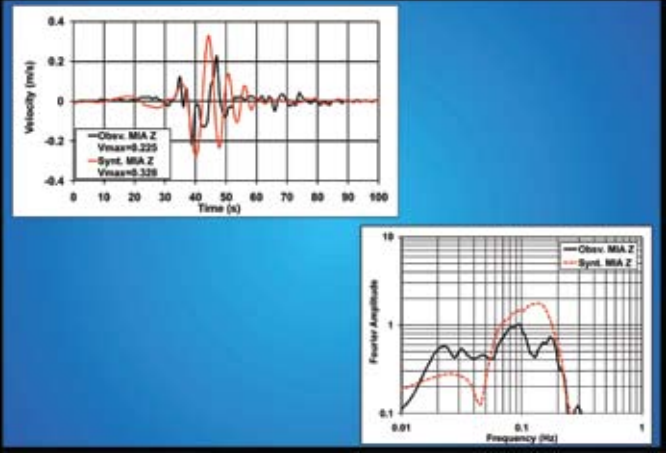


Fig. 6 Sismogramas ($f < 3$ Hz.) observados y sintéticos para las estaciones, A) MIA, B) GYA y C) TIY, del sismo de Sichuan del 12/05/2008.

resultados satisfactorios de la comparación de los patrones de velocidades sintéticas máximas en la dirección Y, con las observaciones de las intensidades de Mercalli modificadas del sismo de China (fig 7 [ref 8]).

Los resultados recién mostrados, así como los obtenidos para el sismo de Colima, Jalisco, de 1995, Mw 8 (ref 9), llevan a la conclusión de que el modelado recién descrito, complementado

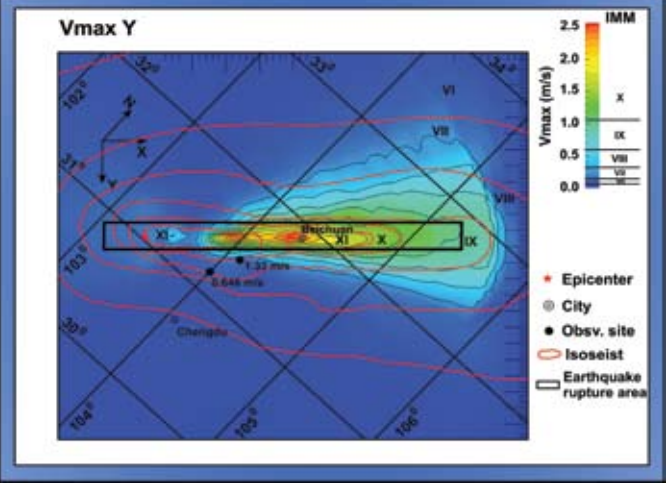


Fig. 7 Comparación del patrón de velocidades máximas sintéticas en la dirección Y, con los valores de las isosistas de las Intensidad de Mercalli Modificadas del sismo de Sichuan del 12/05/08.

con la obtención de sismogramas sintéticos de alta frecuencia, que son parte del método híbrido propuesto y aplicado en la ref 9, pueden ser utilizados en estudios de peligro sísmico para analizar escenarios de sismos extremos en regiones o sitios de interés. Conviene mencionar que el método híbrido fue utilizado recientemente en la obtención de los espectros de diseño sísmico para la Terminal Marítima Dos Bocas de PEMEX (ref 10) y para la presa El Cajón de CFE (ref 11).

Es importante remarcar e insistir en el potencial que proporciona utilizar el supercómputo en este tipo de estudios.

El autor agradece la colaboración de sus coautores en los trabajos sintetizados en este documento.

Referencias

1. <http://www.super.unam/index.php?op=eqhw>
2. Cabrera, E, Chávez, M, Madariaga, R, Perea, N, y Frisenda, M (2007), 3D parallel elastodynamic modelling of large subduction earthquake, *Lecture Notes in Computer Science*, LNCS 4757 2007, Springer
3. <http://www.hpcx.ac.uk/>
4. <http://www.hector.ac.uk/>
5. Chávez, M, Cabrera, E, Madariaga, R, Perea, N, Moulinec, Ch, Emerson, D, Ashworth, M, y Salazar, A (2008), Benchmark study of a 3D parallel code for the propagation of large subduction earthquakes, *Lecture Notes in Computer Science*, LNCS 5205, Springer
6. Chávez, M, Cabrera, E, y Perea, N (oct 2008), Observations and modeling of extreme subduction earthquakes, *XIV World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, CD
7. Chávez, M, Cabrera, E, Chen, H, Perea, N, Salazar, A, Emerson, D, Ashworth, M, Moulinec, Ch, Wu, M, y Zhao, G (oct 2008), 3D wave propagation modeling of the 12 05 2008 Sichuan Ms 7.9 earthquake, *XIV World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, CD
8. Chávez, M, Cabrera, E, Chen, H, Perea, N, Salazar, A, Emerson, D, Ashworth, M, Moulinec, Ch, Wu, M, y Zhao, G (dic 2008), Modeling of the 3D wave propagation of the Sichuan Ms 7.9 earthquake of 12 05 08, *EOS Trans AGU*, Fall Meeting, Abstract U23B 0051, EUA, CD
9. Chavez, M, Olsen, KB, Cabrera, E (2004), Broadband modeling of strong ground motions for prediction purposes for subduction earthquakes occurring in the Colima Jalisco region of Mexico, *XIII World Conference on Earthquake Engineering*, CD
10. Chávez, M (jun 2004), Estudio de riesgo (peligro) sísmico para la Terminal Marítima Dos Bocas, informe final a PEMEX PEP, II UNAM, México
11. Chávez, M, y Olsen, K B (dic 2003), Escenarios sísmicos para el sitio donde se localizará el Proyecto Hidroeléctrico El Cajón de la CFE, informe final a CFE, II UNAM, México.