



MARIO CHÁVEZ

SISMOS EXTREMOS, CONSECUENCIAS ECONÓMICAS Y SUPERCÓMPUTO

Los sismos de origen tectónico son fenómenos complejos que varían con el tiempo y en el espacio, y son generados por el súbito desplazamiento (o deslizamiento) relativo de dos o más placas tectónicas de la corteza terrestre moviéndose en direcciones y con velocidades diferentes. Mediante ese deslizamiento, se libera la energía elástica acumulada lentamente en las zonas de contacto de las placas. Cuando los deslizamientos (de la fuente sísmica) son de hasta decenas de metros, ocurren los sismos extremos de magnitudes de ondas de superficie (magnitud basada en la amplitud máxima de las ondas superficiales de Rayleigh con periodos cercanos a 20 segundos –Ms–), generalmente mayores de 8. Se ha estimado que la frecuencia de ocurrencia (o periodo de retorno) de estos sismos varía de decenas a miles de años, dependiendo de la zona sísmica en cuestión; no obstante, las consecuencias de su ocurrencia en la vecindad de regiones urbanas con alta densidad de población pueden ser catastróficas, tanto desde el punto de vista humano, como del socioeconómico.

A continuación se presenta una síntesis de las investigaciones que el grupo encabezado por el autor está realizando sobre el modelado matemático-computacional de la propagación de sismos extremos utilizando supercomputadoras, incluyendo resultados sobre el modelado de los sismos de México del 19/9/1985 Ms 8.1 y magnitud de momento sísmico Mw 8.1 (figura 1)¹ y de China del 12/5/2008 Ms 8 (Mw 8) –figura 2–. Así como, los resultados del modelado

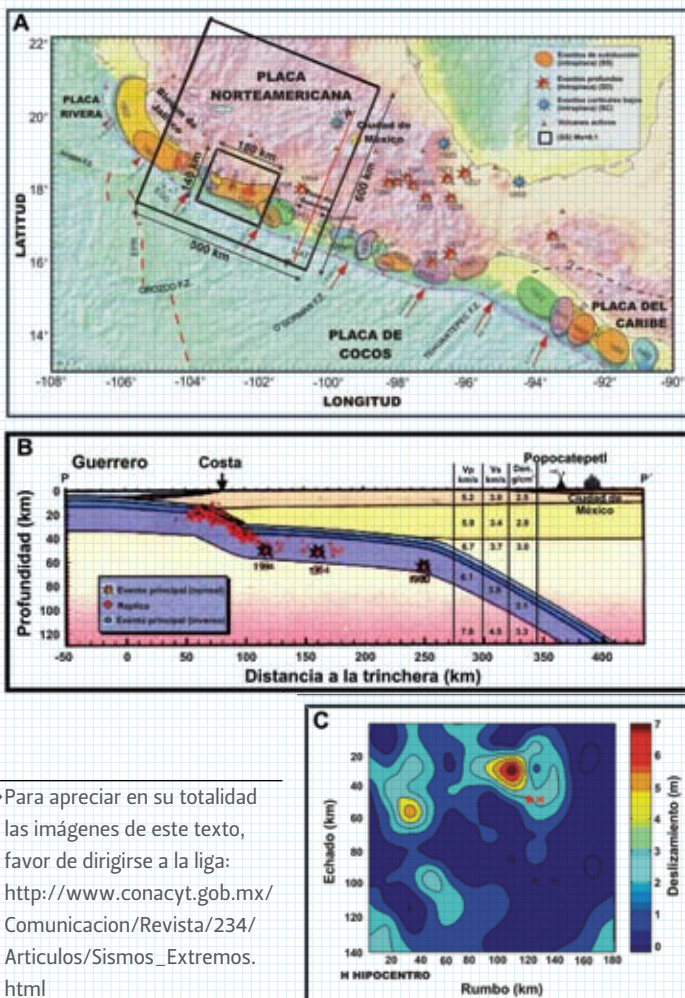
de sismos escenario extremos II de Mw 8.5, con epicentros en las costas de Guerrero y Jalisco y de sus posibles consecuencias económicas en las ciudades de México (CM) y Guadalajara (GDL), respectivamente. A partir de estos resultados se puede proponer acciones, con el fin de minimizar y/o mitigar las posibles pérdidas y daños asociados a la potencial ocurrencia de dichos sismos extremos.

MODELADO MATEMÁTICO-COMPUTACIONAL DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS

La propagación de las ondas sísmicas de origen tectónico puede ser expresada mediante la llamada ecuación de onda elástica en tres dimensiones (3D). En un medio isótropo finito (es decir, en un medio acotado espacialmente y con las mismas propiedades mecánicas en las 3D), dicha ecuación está conformada por un sistema de nueve ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas de primer orden (ecuaciones en las que el determinante de los coeficientes de las derivadas es menor que cero) que incluye los tres componentes del vector de velocidades de las partículas del medio, los seis componentes independientes del tensor de esfuerzos (esfuerzo = fuerza/área), el vector de fuerzas sísmicas (que representan la fuente sísmica), así como las condiciones de frontera e iniciales del problema.^{1,2}

Para resolver el sistema de ecuaciones descrito (o sea, para obtener la variación con el tiempo de las velocidades en las 3D) se utilizó un esquema de diferencias finitas alternadas 3D de segundo orden en el tiempo y de cuarto orden en el espacio. El esquema se implementó con un código computacional en paralelo que permite discretizar (dividir) en subdo-

>> FIGURA 1. A) Proyección en la superficie del volumen finito (500x600x124km³) utilizado para el modelado del sismo extremo de Michoacán, México, del 19 de septiembre de 1985 Ms 8.1; B) Estructura geológica y parámetros geofísicos de las capas de la corteza terrestre del volumen finito; C) distribución de deslizamiento de la fuente sísmica correspondiente al sismo de 1985.



♦ Para apreciar en su totalidad las imágenes de este texto, favor de dirigirse a la liga: http://www.conacyt.gob.mx/Comunicacion/Revista/234/Articulos/Sismos_Extremos.html

- I. El momento sísmico (M_0) permite cuantificar la energía liberada por un sismo, y es igual al área de ruptura (o deslizamiento) de la fuente \times el deslizamiento promedio del sismo \times la resistencia al corte de la roca en la zona de ruptura; sus unidades son dina \times cm. Mw se estima a partir de M_0 .
- II. Son sismos de magnitudes (en ocasiones muy) superiores a los que han ocurrido en una zona sísmica de interés y que, probablemente, ocurrirán en el futuro; por ejemplo, el sismo de Andamán, Indonesia 26/12/2004 –que generó el Tsunami–, con Mw 9.3. Hasta antes de este sismo, históricamente en esta región, habían ocurrido otros de Mw máximas de 8.6 u 8.7.

El modelado matemático-computacional de la propagación de ondas sísmicas en 3D, mediante supercomputadoras es útil en el análisis de escenarios de sismos extremos y sus consecuencias económicas

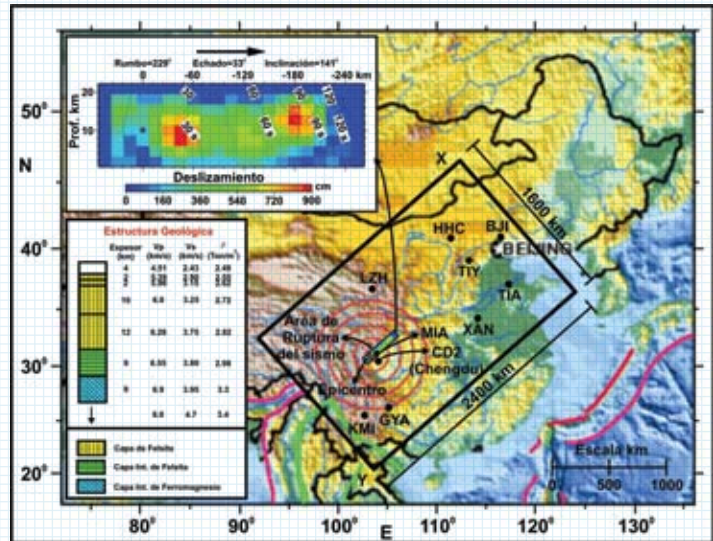
minios el dominio físico (medio finito) continuo de interés, y que la solución numérica de las ecuaciones mencionadas se realice mediante la utilización de supercomputadoras (figura 3).^{III} En esta investigación se utilizaron las supercomputadoras KanBalam de la UNAM, que cuenta con 1368 procesadores, y HECToR de la Universidad de Edimburgo, Reino Unido, que tiene 11,328 procesadores.²

RESULTADO DEL SISMO Ms 8.1 DE MÉXICO 1985

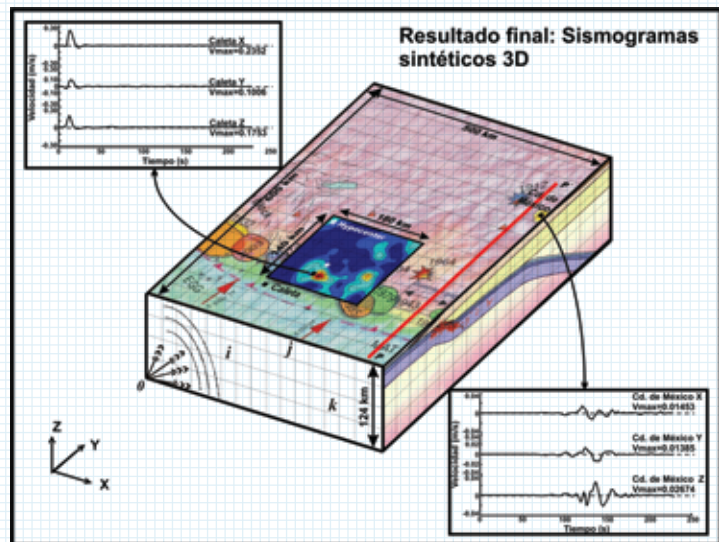
El sismo de Michoacán (19/9/85), de magnitud Ms 8.1 (Mw 8.1), produjo 30,000 fatalidades y pérdidas económicas por 6.3 billones de dólares.³ En la figura 1A se presenta la proyección en la superficie del volumen utilizado para representar el volumen de interés,^{IV} para el sismo de México (500x600x124km).³ En la

III. Las supercomputadoras son sistemas de cómputo de alto rendimiento que utilizan centenas o miles de procesadores comunicados entre si y que permiten la ejecución de un código (conversión de las expresiones matemáticas en un lenguaje comprensible para la computadora) en paralelo, con lo cual, cada uno de los procesadores realiza, simultáneamente, sólo una parte (del total) de los cálculos requeridos por el modelo matemático y así obtener resultados sintéticos como los sismogramas mostrados en la figura 3.

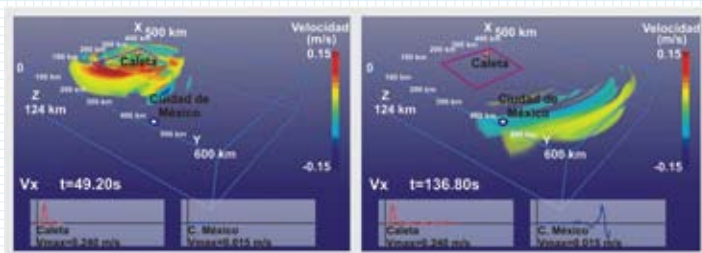
IV. El volumen del medio finito del párrafo anterior, es en éste caso de 500 km de largo x 600 km de ancho x 124 km de profundidad. Estas dimensiones, aparte de incluir el área de ruptura (deslizamiento) estimada para dicho sismo (180 x 140 km²), una superficie que incluyera a la Ciudad de México, así como el perfil de la figura 1B, tomó en cuenta la capacidad de la supercomputadora utilizada, y el tiempo total de cómputo disponible.



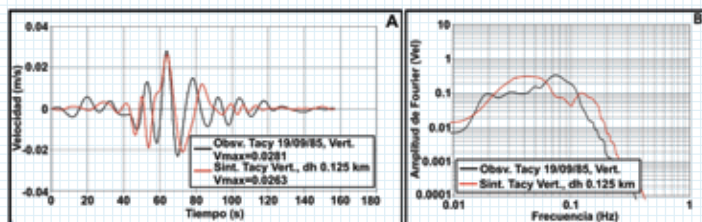
>> FIGURA 2. Proyección en la superficie del volumen finito (2400x1600x300 km³) utilizado para el modelado del sismo extremo de Sichuan, China, del 12 de octubre de 2008 Ms 8; Estructura geológica y parámetros geofísicos de las capas de la corteza terrestre del volumen finito; Distribución de deslizamiento de la fuente sísmica correspondiente al sismo de 2008.



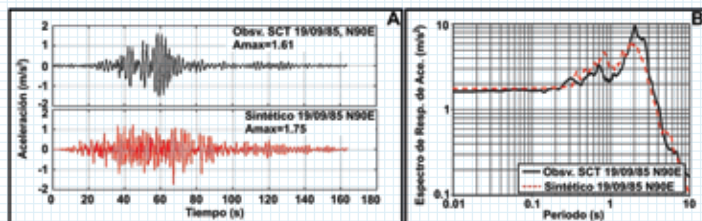
>> FIGURA 3. Aplicación del esquema de diferencias finitas alternadas 3D al modelado matemático-computacional de la propagación del sismo extremo de México de 1985, y un ejemplo de los resultados obtenidos: los sismogramas (velocidades) de baja frecuencia (< 0.3Hz) en Caleta, Michoacán y la Ciudad de México (Estación sismológica de Tacubaya).



>> FIGURA 4. Patrones de propagación en la dirección “Y” de las velocidades sintéticas de las ondas sísmicas de baja frecuencia (<0.3 Hz) obtenidas, por primera vez, para el sismo de México de 1985 y sismogramas sintéticos (velocidades) de baja frecuencia (< 0.3Hz) en Caleta, Michoacán y la Ciudad de México (Estación sismológica de Tacubaya).



>> FIGURA 5. Sismogramas (velocidades) de baja frecuencia (<0.3 Hz) observado y sintético y sus respectivos espectros de amplitudes de Fourier de la estación sismológica de Tacubaya, (localizada en el llamado suelo firme) de la Ciudad de México para el sismo de México de 1985.



>> FIGURA 6. Sismogramas (aceleraciones) de banda ancha (0.01<frecuencia <10 Hz; periodo (s) = 1 / frecuencia) observado y sintético y sus correspondientes espectros de respuesta de aceleraciones, $S_a(5\%)$, del sitio SCT (localizado en suelos compresibles) de la Ciudad de México para el sismo de México de 1985.

Los patrones de propagación en 3D de las velocidades sintéticas de las ondas sísmicas de baja frecuencia se obtuvieron por primera vez para los sismos extremos de Michoacán, México de 1985 y de Sichuán, China de 2008

figura 1B se presentan los valores de las velocidades de propagación de las ondas de compresión, P, (V_p),^v de corte, S, (V_s)^{vi} y peso específico, de las capas de la corteza terrestre seleccionada para representar el medio finito correspondiente,¹ y en la figura 1C la distribución del deslizamiento de la fuente sísmica correspondiente a dicho sismo extremo.³

La figura 4 muestra imágenes en 3D para diferentes tiempos de los patrones de propagación en la dirección “Y” de las velocidades sintéticas –es decir, generadas en computadora– de las ondas sísmicas de baja frecuencia (<0.3 Hz) obtenidas, por primera vez, para el sismo de México de 1985. Nótese la complejidad del patrón de propagación para $t = 49.2$ s, en el cual la fuente sísmica está todavía rompiendo (deslizándose) en la vecindad de Caleta, Michoacán, comparado con el correspondiente a $t = 136.8$ s, en el cual la ruptura (deslizamiento) de la fuente ha terminado y se observan paquetes de ondas (superficiales de Love, L, y de Rayleigh, R)¹ bien desarrolladas, dirigidas, de manera preferencial, hacia la Ciudad de México (CM). También se incluye en la figura 4 los sismogramas (velocidades) sintéticos en la dirección X, correspondientes a los sitios Caleta, en Michoacán y Tacubaya (en suelo firme) en la CM. Los resultados se obtuvieron con una *discretización* espacial 0.125 km en las 3D del dominio mostrado en la figura 3, que requirió 24 horas de cómputo en 1024 procesadores de la supercomputadora HECToR.

Se considera que los paquetes de ondas, especialmente las superficiales de la figura 4 son la causa fundamental de los extensos daños observados en 1985^{vi} en la infraestructura de la CM, aparte de las amplificaciones de las ondas sísmicas en sus zonas que fueron lacustres (debido a las propiedades

V. Ondas en las que el desplazamiento de las partículas del medio coincide con el de propagación.

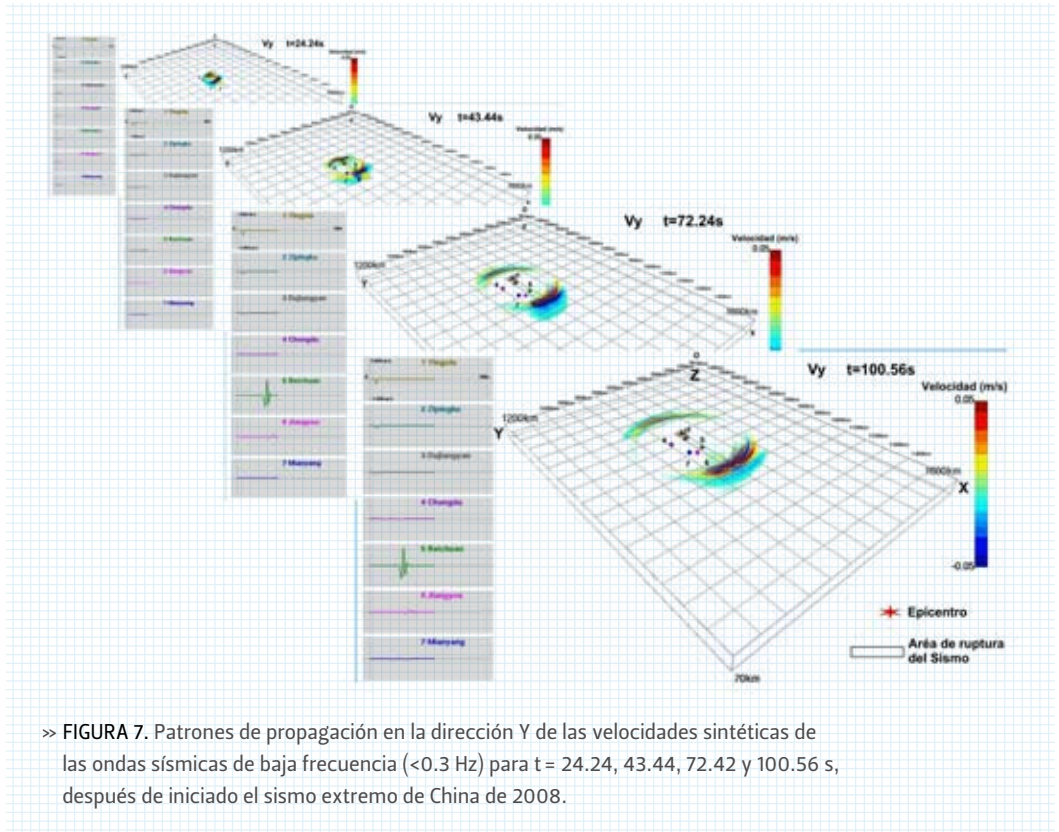
VI. Ondas en las que el desplazamiento de las partículas del medio es transversal a la dirección de propagación y V_s es menor que V_p .

VII. Cuando las ondas de compresión P y de corte S llegan a la superficie, se generan las llamadas ondas superficiales (de Love, L, y de Rayleigh, R), que se propagan por la superficie de la discontinuidad de la interfase de la superficie terrestre (tierra-aire) y que, debido a sus grandes amplitudes, se ha observado que son las causantes principales de los daños generados por los sismos en las construcciones.

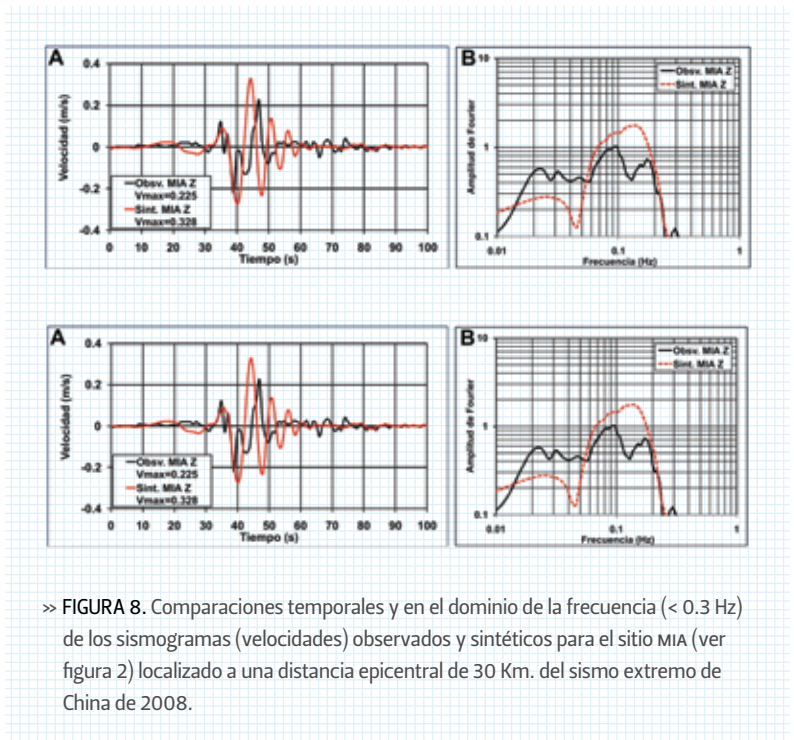
dinámicas de sus suelos compresibles), y/o de los insuficientes valores de las fuerzas sísmicas (fuerza = masa x aceleración)¹ consideradas en el diseño de la infraestructura que resultó dañada parcial, o totalmente durante el sismo de 1985.

La figuras 5 A y B presentan los sismogramas (velocidades) de baja frecuencia (< 0.3 Hz) observado y sintético y sus respectivos espectros de amplitudes de Fourier^{viii} registrados en la estación sismológica de Tacubaya (localizada en el llamado suelo firme) de la CM, para el sismo de 1985, respectivamente. Las figuras 6 A y B muestran los sismogramas (aceleraciones) de banda ancha (frecuencias de 0.01 a 10Hz) observado y sintético (obtenido con el método híbrido de la referencia 4) del sitio SCT (localizado en suelos compresibles de la CM), así como sus correspondientes espectros de respuesta de aceleraciones $S_a(5\%)^ix$ que produce un sismo (o sismograma) en estructuras (u osciladores simples¹) con diferentes periodos naturales de vibrar y que disipan la misma cantidad de energía, expresada por el denominado *porcentaje de amortiguamiento crítico*. En la figura 6 B, las ordenadas representan las respuestas (aceleraciones) máximas a los sismogramas observado y sintético N90E del sitio SCT del sismo de 1985, de sistemas estructurales simples, con periodo natural de vibrar T y amortiguamiento

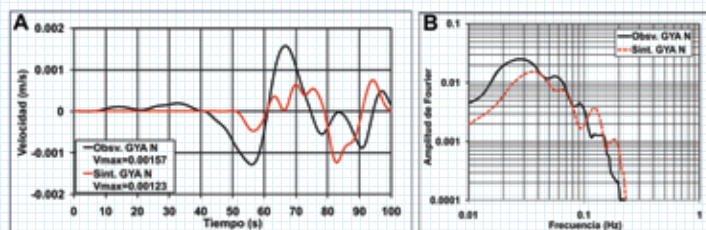
- VIII. Gráficas que representan en las ordenadas el módulo de la parte real e imaginaria de la transformada de Fourier del sismograma, cuyos máximos corresponden a las frecuencias (abscisas) en que las ondas sísmicas tienen más energía.
- IX. Gráficas que representan las respuestas máximas (expresada por ejemplo por las aceleraciones) de sistemas estructurales simples sometidos a un sismograma específico.



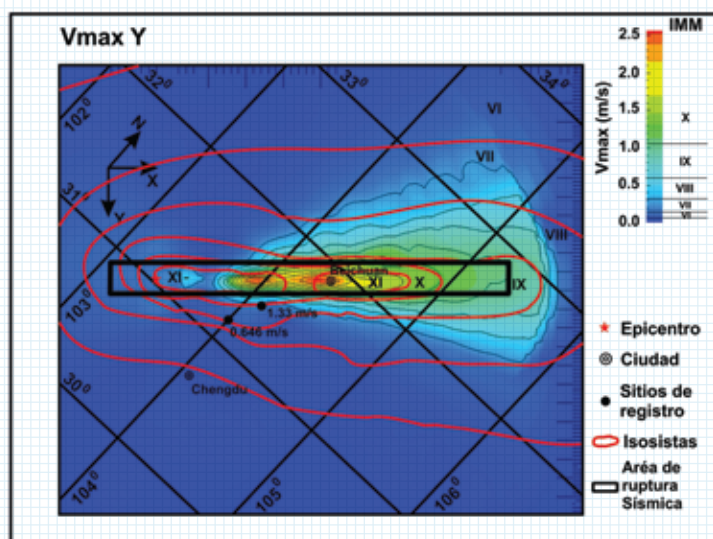
>> FIGURA 7. Patrones de propagación en la dirección Y de las velocidades sintéticas de las ondas sísmicas de baja frecuencia (<0.3 Hz) para t = 24.24, 43.44, 72.42 y 100.56 s, después de iniciado el sismo extremo de China de 2008.



>> FIGURA 8. Comparaciones temporales y en el dominio de la frecuencia (< 0.3 Hz) de los sismogramas (velocidades) observados y sintéticos para el sitio MIA (ver figura 2) localizado a una distancia epicentral de 30 Km. del sismo extremo de China de 2008.



>> FIGURA 9. Comparaciones temporales y en el dominio de la frecuencia (< 0.3 Hz) de los sismogramas (velocidades) observados y sintéticos para el sitio GYA (ver figura 2) localizado a una distancia epicentral de 600 Km. del sismo extremo de China de 2008.



>> FIGURA 10. Comparación de los patrones de velocidades sintéticas máximas en la dirección Y, con las observaciones de las intensidades de Mercalli modificadas (IMM) observadas en la topografía e infraestructura localizada sobre y en la vecindad de la zona de ruptura del sismo extremo de de China de 2008.

crítico de 5%. Nótese que en ambos casos los sismogramas son similares, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia (o su recíproco el periodo), así mismo se remarca que el valor máximo de $S_a(5\%)$ observado para el sismo de 1985 fue cercano a $1G$ ($G = 9.81 \text{ m/s}^2$).

RESULTADOS DE SISMO M_s 8 EN CHINA

El sismo de Sichuán, China del 12/5/2008 de magnitud M_s 8 (M_w 8) produjo 80000 fatalidades y pérdidas económicas por 100 billones de dólares.⁵ En la figura 2

se presenta la proyección en la superficie del dominio utilizado para representar el volumen finito de interés ($2400 \times 1600 \times 300 \text{ km}^3$). En la misma figura se incluye la estructura geológica y parámetros V_p , V_s y peso específico, así como la distribución de deslizamiento de la fuente sísmica utilizados en su modelado.⁵

La figura 7 incluye los patrones de propagación de velocidades sintéticas 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.⁵ Es relevante observar que en este caso, las velocidades sintéticas mínimas y máximas corresponden a la dirección de ruptura del sismo (eje X) y perpendicular a ésta (eje Y), respectivamente. Las figuras 8 y 9 incluyen las comparaciones temporales y, el dominio de la frecuencia de sismogramas observados y sintéticos para sitios localizados a distancias epicentrales de 30 (MIA) y 600 km. (GYA), (figura 2). Las comparaciones también son satisfactorias en estos dos casos, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.

Igualmente se obtuvieron 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 (cuyos valores representan una medida subjetiva de los efectos producidos por un sismo, donde el XII representa el máximo de la llamada Escala de Intensidades de Mercalli Modificada) observadas en la topografía e infraestructura localizada sobre y en la vecindad de la zona de ruptura del sismo de China (figura 10).

SISMOS ESCENARIO EXTREMOS Y CONSECUENCIAS ECONÓMICAS

A continuación, algunos de los resultados de los estudios efectuados para analizar las consecuencias económicas en las ciudades de México (CM) y Guadalajara (GDL), asociados a la posible ocurrencia de sismos escenario extremos de magnitud M_w 8.5 con epicentros en las costas de Guerrero (figura 11) y Jalisco.^{3,4} La estructura geológica y parámetros V_p , V_s y peso específico para el sismo escenario en Guerrero son las de la figura 1B, y las correspondientes al de Jalisco se presentan en las referencias citadas.

RESULTADOS PARA LA CIUDAD DE MÉXICO

La figura 12 A muestra la distribución en la CM de los valores de las ordenadas espectrales máximas de

suscríbete
ahora

12 EJEMPLARES
AL PRECIO DE 10

RECIBE LA EDICIÓN MENSUAL
EN TU PROPIO DOMICILIO

SUSCRIPCIÓN ANUAL

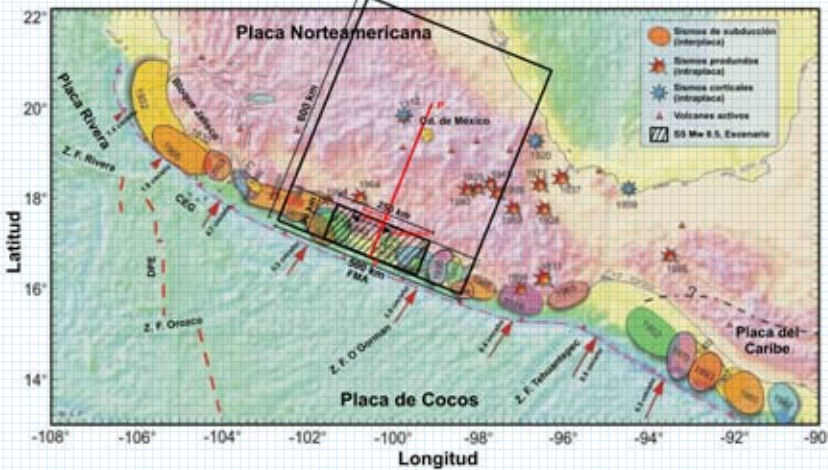
EN MÉXICO
\$400.00

EN EL EXTRANJERO
\$110.00 dólares

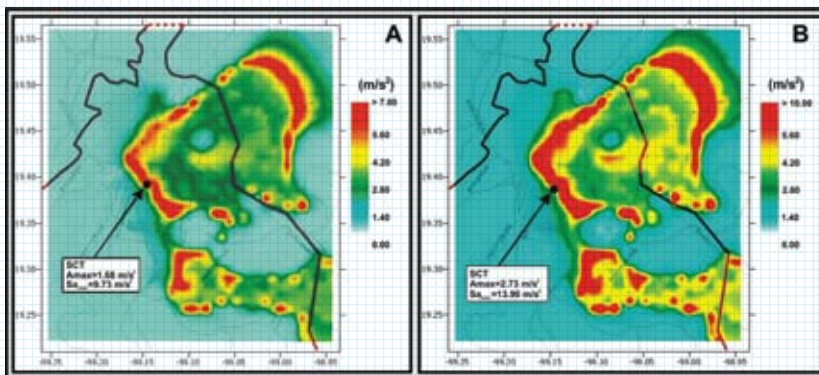
Deposita en la cuenta BBVA Bancomer 00440634494 y envía la ficha de depósito con todos tus datos (nombre, dirección completa, teléfono y, en su caso, RFC) al fax (55) 55 50 58 00 y 01 ext. 119, para mayores informes comunicarse al (55) 55 50 58 01 ext. 216

reunimex@servidor.unam.mx
www.revistadelauniversidad.unam.mx

REVISTA DE LA UNIVERSIDAD DE MÉXICO



» FIGURA 11. Proyección en la superficie del volumen finito (500x600x124km³) utilizado para el modelado del sismo escenario extremo Mw 8.5 con epicentro en las costas del estado de Guerrero.



» FIGURA 12. A) Distribución en la Ciudad de México de los valores de las ordenadas espectrales máximas de aceleración $S_a(5\%)$ para periodo natural de vibrar de 2 segundos del sismo de 1985 Ms 8.1 (Mw 8.1); B) distribución de $S_a(5\%)$ correspondientes al sismo escenario de Mw 8.5 con epicentro en las costas del estado de Guerrero.

aceleración $S_a(5\%)$ para un periodo natural de vibrar de 2 segundos del sismo de 1985 Mw 8.1, y la figura 12 B presenta la distribución correspondiente al sismo escenario extremo de Mw 8.5. De la comparación de estas figuras se puede concluir: 1) los valores de $S_a(5\%)$ para el sismo escenario extremo son superiores a las del sismo de 1985, y 2) las superficies de las zonas de la CM en las cuales éstas se presentan son también mayores que las estimadas para el sismo de

1985. Por ejemplo, para el sitio SCT (ubicado en la zona de suelos compresibles de la Ciudad de México) la $S_a(5\%)$ fue de aproximadamente 1 G para el sismo de 1985 y de 1.4 G para el sismo escenario extremo.

Las consecuencias económicas en la CM debidas a la posible ocurrencia de un sismo extremo de Mw 8.5 son analizadas en este trabajo por medio del concepto de *riesgo aceptable*.³ Si se fija que el monto de la posible pérdida económica debida a un sismo de

Sería deseable que en México se contara con supercomputadoras de más de 10,000 procesadores, con el fin de obtener soluciones a problemas complejos de interés nacional, en lapsos menores

Mw 8.5 sea igual a la observada en 1985, es decir de 6 billones de dólares, esta condición requeriría que el valor de $S_a(5\%)$ de 0.45G (vigente en el Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México para la zona de suelos compresibles) fuera como mínimo de 1.4 G.³

RESULTADOS PARA GUADALAJARA

De los modelados efectuados para el sismo escenario extremo en Jalisco³ y utilizando información sobre la superficie construida de GDL, así como funciones de vulnerabilidad sísmica (funciones que relacionan el daño de la infraestructura con la intensidad sísmica) aplicables a dichas construcciones, se estimó que, en el peor escenario de daños asociado a la ocurrencia del sismo escenario extremo Mw 8.5 considerado, aproximadamente 70 de los 300 km² con que cuenta GDL resultarían dañados, cuyo costo se elvaría, aproximadamente, a 19 billones de dólares.³

CONCLUSIONES

- >> Los resultados del modelado matemático-computacional de la propagación de sismos extremos utilizando supercomputadoras, en particular los de los sismos de México del 19/9/1985 de magnitud Ms 8.1 (Mw 8.1) y de China del 12/5/2008 Ms 8 (Mw 8), fueron exitosos en ambos casos y permiten explicar las causas fundamentales de los extensos daños provocados por dichos sismos.
- >> Se obtuvieron resultados del modelado de sismos extremos escenario de magnitud Mw 8.5 con epicentros en las costas de Guerrero y Jalisco y de sus posibles consecuencias económicas en las ciudades de México (CM) y Guadalajara (GDL), respectivamente.
- >> Para que el costo en la CM, debido al sismo escenario extremo en Guerrero, sea de 6 billones de dólares (como el de 1985) se requeriría que el valor del coeficiente sísmico de 0.45 G, vigente en la zona de suelos compresibles de la Ciudad de México, fuera de 1.4 G ($G = 9.81 \text{ m/s}^2$).
- >> El costo para GDL asociado a la ocurrencia del

sismo escenario extremo en Jalisco sería de aproximadamente 19 billones de dólares, debido a que 70 de 300 km² de su superficie construida resultarían dañados.

- >> Finalmente, se remarca la importancia, necesidad y potencial que encierra el utilizar el supercómputo en este tipo de estudios, por lo cual sería deseable que, en un futuro próximo se contara en México con supercomputadoras de más de 10,000 procesadores que permitirán trabajar y obtener, en lapsos menores, soluciones a problemas complejos de interés nacional. 🌐

♦ Todas las referencias citadas, excepto la 1, se encuentran en el sitio: <http://www.iingen.unam.mx/default.aspx> (pestañas: Investigación-Coordinaciones-Ingeniería Sismológica-Dr. Mario Chávez González).

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece la valiosa colaboración de sus coautores, pero se hace responsable de lo expresado en este artículo. También agradece el apoyo de la DGSCA de la UNAM, México y del Daresbury Laboratory del Reino Unido, para utilizar las supercomputadoras KanBalam y HECToR, respectivamente, de la Coordinación de la Investigación Científica de la UNAM, así como del proyecto SCAT, Europe Aid Contract (II-0537-FC-FA) de la Comunidad Europea ><http://www.scata-alfa.eu>

REFERENCIAS:

1. M. A. Herrera. *Biofísica, geofísica, astrofísica. Para qué sirve la física*. México: Ediciones Científicas Universitarias, UNAM- FCE, 2001.
2. M. Chávez, E. Cabrera, R. Madariaga, N. Perea, Ch. Moulinec, D. Emerson, M. Ashworth, A. Salazar. "Benchmark Study of a 3D Parallel Code for the Propagation of Large Subduction Earthquakes". *Lecture Notes in Computer Science, LNCS 5205*, Springer, 2008.
3. M. Chávez, E. Cabrera, y N. Perea. "Observations and Modeling of Extreme Subduction Earthquakes". *XIV World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China, CD, 2008.
4. M. Chávez, K. B. Olsen, E. Cabrera. "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, 2004.
5. M. Chávez, E. Cabrera, H. Chen, N. Perea, A. Salazar, D. Emerson, M. Ashworth, Ch. Moulinec, M. Wu y G. Zhao. "3D Wave Propagation Modeling of the 12 05 2008 Sichuan Ms 7.9 Earthquake". *XIV World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China: CD, 2008.

Mario Chávez González
 doctor en filosofía (PhD)
 por la Universidad de
 Southampton, Inglaterra,
 adscrito al Instituto de
 Ingeniería-UNAM, donde
 cultiva los temas: Riesgo
 sísmico en ambiente
 urbano e industrial,
 Modelado numérico
 con supercomputadora
 de la propagación de
 ondas sísmicas y Eventos
 extremos y su impacto
 económico. Perteneció
 al Sistema Nacional de
 Investigadores, a la Red
 de Modelos Matemáticos
 y Computacionales y fue
 merecedor del Premio
 1986 de la Academia de
 Ciencias de México.
 C. e.: chavez@servidor.unam.mx;
mariochavez.s@gmail.com