

DIFERENCIAS DE ATENUACIÓN SÍSMICA EN UN ANÁLISIS POR TRAYECTORIAS: ZONA DE SUBDUCCIÓN HACIA QUERÉTARO

DIFFERENCES IN SEISMIC ATTENUATION IN A TRAJECTORY
ANALYSIS: SUBDUCTION ZONE TOWARDS QUERÉTARO

Paola Liliana Sánchez López^{1*}
Alejandro Clemente Alvarado Chávez²
Ángel Gregorio Figueroa Soto³
Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández⁴

*División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería^{1,2 y 4}
Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra³
Universidad Autónoma de Querétaro^{1,2 y 4}
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo³*

paosalop8@gmail.com^{1}
alejandro.clemente@uaq.mx²
angfsoto@gmail.com³
miguel.perezlara@uaq.edu.mx⁴*

RESUMEN

Algunas investigaciones sugieren que, debido a la composición morfotectónica de la faja volcánica transmexicana (FVTM), existen diferencias significativas en el comportamiento de las señales sísmicas provocadas por los terremotos con fuente en la zona de subducción y lugares dentro de la FVTM. El interés de este artículo es presentar esas diferencias mediante el análisis de cuatro trayectorias particulares: Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca, cuatro desplazamientos convergen a la misma dirección, al estado de Querétaro, que se encuentra dentro de la FVTM. Se analizan 40 registros sísmicos de velocidad de ocho movimientos telúricos interplaca para encontrar las diferencias de aceleración pico

Es interesante examinar el comportamiento de las señales sísmicas provocadas por los terremotos, ya que comparten la particularidad de que las anomalías provienen de la misma fuente, que viene a ser la zona y lugar de subducción dentro de la faja volcánica transmexicana.

del terreno (PGA, por sus siglas en inglés) para cada trayectoria. Asimismo, se comparan los valores obtenidos con tres relaciones de atenuación, dos las cuales rigen el peligro sísmico en México.

Palabras clave: atenuación sísmica, FVTM, interplaca, PGA.

ABSTRACT

Research suggests that because of the morphotectonic composition of the Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB) there are significant differences in the behavior of the seismic signals caused by the earthquakes originated in the Mexican subduction zone, and other places inside the TMVB. This article focuses on showing these differences through the analysis of four trajectories in particular: Colima, Michoacan, Guerrero and Oaxaca, each trajectory headed to the state of Queretaro, located within the TMVB. To identify these differences, we analyze 40 seismic speed entries from eight interplate earthquakes. The results show the differences in the peak ground acceleration (PGA) for each path, and we compare the results with three attenuation relationships; two of which measure the seismic danger in Mexico.

Keywords: seismic attenuation, TMVB, Interplate, PGA.





INTRODUCCIÓN

La zona de subducción mexicana es una de las regiones sismogénicas más activas del mundo [1]. Esta actividad se debe principalmente a la interacción entre las placas Norteamericana, de Cocos, del Pacífico, Rivera y Caribe, así como las fallas locales, pero estas últimas de menor incidencia [2]. Como se muestra en la Figura 1, los estados de Oaxaca, Guerrero, Chiapas, Michoacán, Jalisco y Colima cuentan con mayor sismicidad [3], pues en ellos se concentran los epicentros de los sismos interplaca causados por la subducción de las placas oceánicas de Cocos y Rivera bajo la Norteamericana y del Caribe [4].

A partir del estudio de la actividad sísmica de México, se han desarrollado métodos semiempíricos para conocer cómo disminuye la intensidad de la carga sísmica en función de la distancia a su origen. Estas investigaciones de atenuación

sísmica son fundamentales para estimar el peligro sísmico de una región, y a su vez, permiten establecer criterios de diseño adecuados para las construcciones.

La faja volcánica transmexicana (FVTM) es una de las áreas de mayor interés para las investigaciones geológicas y geofísicas [4]. En varias de ellas se plantea que, debido a su composición morfotectónica, las señales sísmicas provenientes de la zona de subducción pueden amplificarse o atenuarse [5, 6]. De igual manera, se han hecho estudios que exponen de forma general las diferencias de atenuación hacia la parte central y a lo largo de la zona de subducción del país; sin embargo, se omitieron datos dentro de la FVTM, o bien, se hicieron simulaciones para una sola trayectoria [7].

Al momento de esta investigación se desconocen las diferencias cuantitativas que llegan a existir

entre los valores probables de aceleración pico del terreno (PGA, por sus siglas en inglés) dentro de la FVTM, en particular para la ciudad de Querétaro [8]. En este artículo se realizó el análisis de la señal sísmica por medio de cuatro trayectorias desde la zona de subducción hacia Querétaro: Colima, Michoacán, Guerrero y Oaxaca. Los resultados se comparan con tres relaciones de atenuación; la primera de ellas, propuesta por Mario Ordaz en 1989 [9], se basa en sismos interplaca registrados en su mayoría por la red de Guerrero; la segunda, de Daniel García [10], se desarrolla a partir de eventos entre los estados de Colima y Oaxaca; y la tercera, por Alejandro Clemente [7], se enfoca particularmente, en la trayectoria de Guerrero a Querétaro.

Se concibe que la metodología ayude a determinar cuál es la trayectoria que presenta mayor riesgo sísmico para la Ciudad.

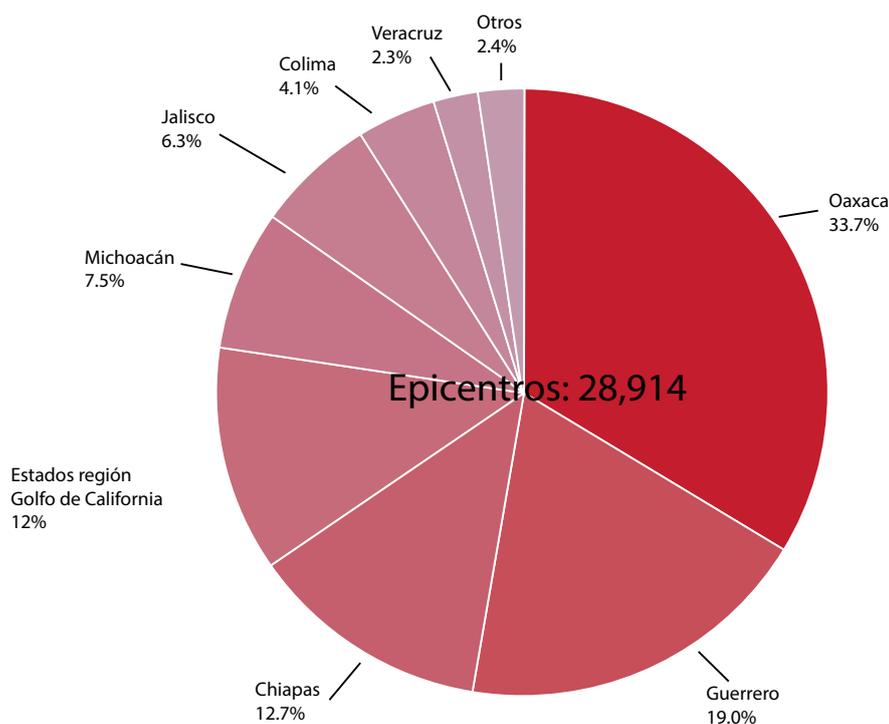


Figura 1. Sismicidad anual en México 2021 [13].

DATOS

Se emplearon 40 registros de velocidad de ocho sismos interplaca ocurridos entre los años 2012 y 2018. Los datos tienen un rango de magnitud de momento (Mw) de 5.1 a 7.2 y una profundidad (H) de 3.2 a 20 km (Tabla 1).

En la Figura 2 se grafican los epicentros de los sismos y las estaciones a cargo del Servicio Sismológico Nacional (SSN) de las cuales se obtuvo esta información. La red de banda ancha del SSN está equipada con sismómetros STS-2 cuyas frecuencias de muestreo van de 80 a 100 Hz.

Tabla 1. Sismos analizados en este estudio.

TRAYECTORIA	EVENTO	FECHA UTC	HORA UTC	LATITUD ° N	LONGITUD ° W	H Km	MAGNITUD Mw	REGISTROS
COLIMA	1	20/02/2013	21:23:09	18.500	-103.990	3.2	5.6	6
	2	09/02/2018	14:05:48	18.950	-104.810	3.5	5.9	6
MICHOCÁN	3	11/04/2012	22:55:10	17.922	-103.068	20.0	6.4	4
	4	17/07/2018	8:54:37	18.140	-103.520	5.0	5.1	5
GUERRERO	5	08/05/2014	17:00:14	16.990	-100.920	10.0	6.5	5
	6	10/05/2014	7:36:00	17.040	-100.890	10.0	6.1	5
OAXACA	7	08/05/2016	7:33:59	16.320	-97.880	7.4	6	5
	8	16/02/2018	23:39:39	16.220	-98.010	16.0	7.2	4

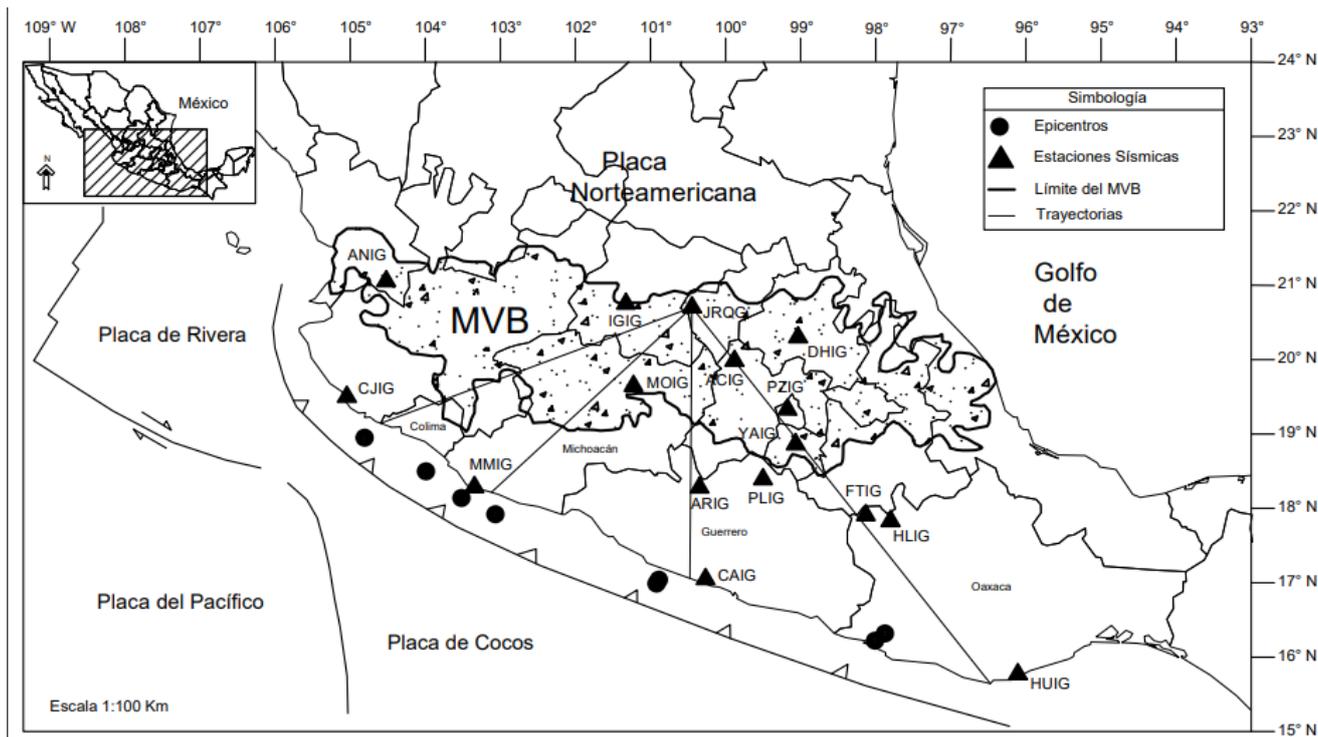


Figura 2. Ubicación de epicentros analizados en este estudio.



METODOLOGÍA

52

Para determinar los valores de **PGA** se recopilaron los sismogramas de las trazas de velocidad de sitios en roca. El primer paso fue elegir señales completas con alta relación señal-ruido ($S/R > 2.5$) [11]; este nivel se estimó a partir de cocientes espectrales H/V [12, 13].

Posteriormente, se recortaron los registros a ventanas de tiempo entre 5 y 50 segundos a partir del inicio de la onda S para obtener los puntos máximos. A cada serie de tiempo se le aplicó una deconvolución y corrección de línea base; para tal fin fue necesario construir un archivo de polos y ceros [14].

El **PGA** empleado se obtuvo mediante los promedios cuadráticos de la aceleración máxima de las componentes horizontales de cada registro con base en la ecuación (1) [2].

$$PGA = \sqrt{\frac{A_E^2 + A_N^2}{2}} \quad (1)$$

Se determinaron las distancias hipocentrales a cada estación a partir de la profundidad (H) y distancia epicentral de cada evento sísmico, con la finalidad de graficar los resultados y observar la atenuación de las ondas sísmicas en función de la distancia respecto a la fuente. Como ya se mencionó antes, a modo de punto de comparación se utilizaron las relaciones de atenuación desarrolladas por Ordaz [9] (Ecuación 2), García [5] (Ecuación 3) y Clemente [1] (Ecuación 4).

$$\log PGA = 1.76 + 0.300Mw - \log R - 0.0031R \quad (2)$$

$$\log PGA = 2.5 + 0.12Mw - 0.0037R - (1.82 - 0.16Mw) \log(R + 0.0075 * 10^{0.474Mw}) - 0.003H \quad (3)$$

$$\log PGA = (-0.25 + 0.325Mw - 0.00608H) + (-0.00125 + 0.00126Mw - 0.000018H)R + (0.00429 - 0.00672Mw + 0.00135H) \log R \quad (4)$$

Las tres ecuaciones involucran las variables de magnitud de momento (Mw) y distancia hipocentral (R). No obstante, en las ecuaciones 3 y 4 se agrega la profundidad (H).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 3-6 se muestra la comparación de los **PGA** observados en este estudio con los valorados por medio de las tres relaciones de atenuación. Se consideró la banda de desviación estándar de cada una de ellas como ± 0.25 (factor de sobreestimación de 1.78) para la ecuación de Ordaz

[9]; ± 0.33 (factor de sobreestimación de 2.13) para la de García [10] y ± 0.21 (factor de sobreestimación de 1.62) para la propuesta de Clemente [7].

En cuanto a la trayectoria de Colima (Figuras 3a-3f), se destaca que los valores de **PGA** calculados con las relaciones de atenuación se encuentran sobreestimados en

los primeros 200 km con respecto a los observados. Después de tal distancia, los valores analizados convergen con las bandas de desviación estándar de las ecuaciones de atenuación propuestas por García [10] y Clemente [7]; estos dos últimos modelos son los que describen con mayor precisión los valores de **PGA** en esta trayectoria.

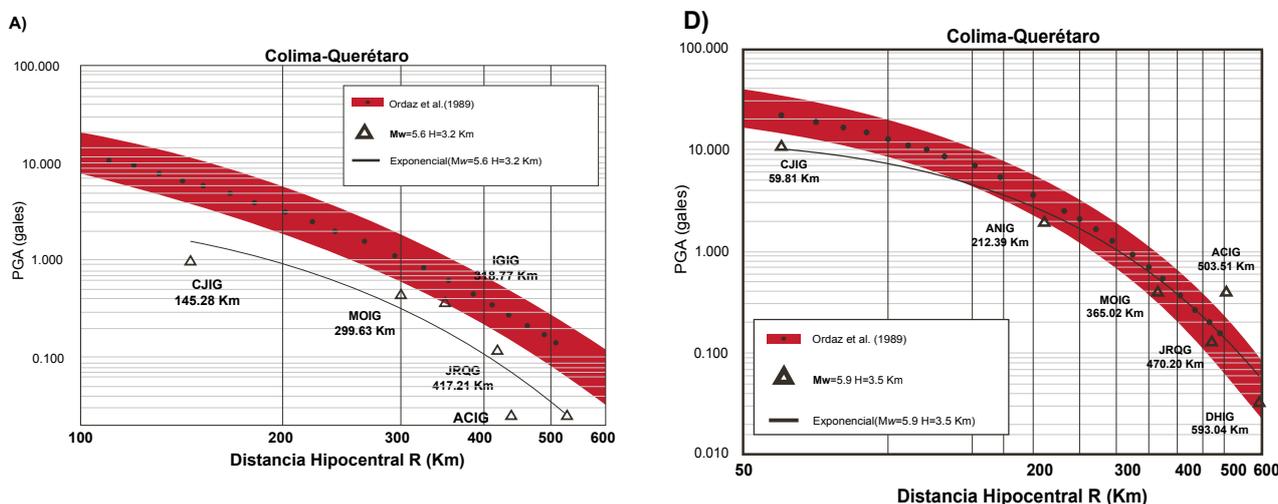


Figura 3. Gráficas de atenuación (Trayectoria Colima).

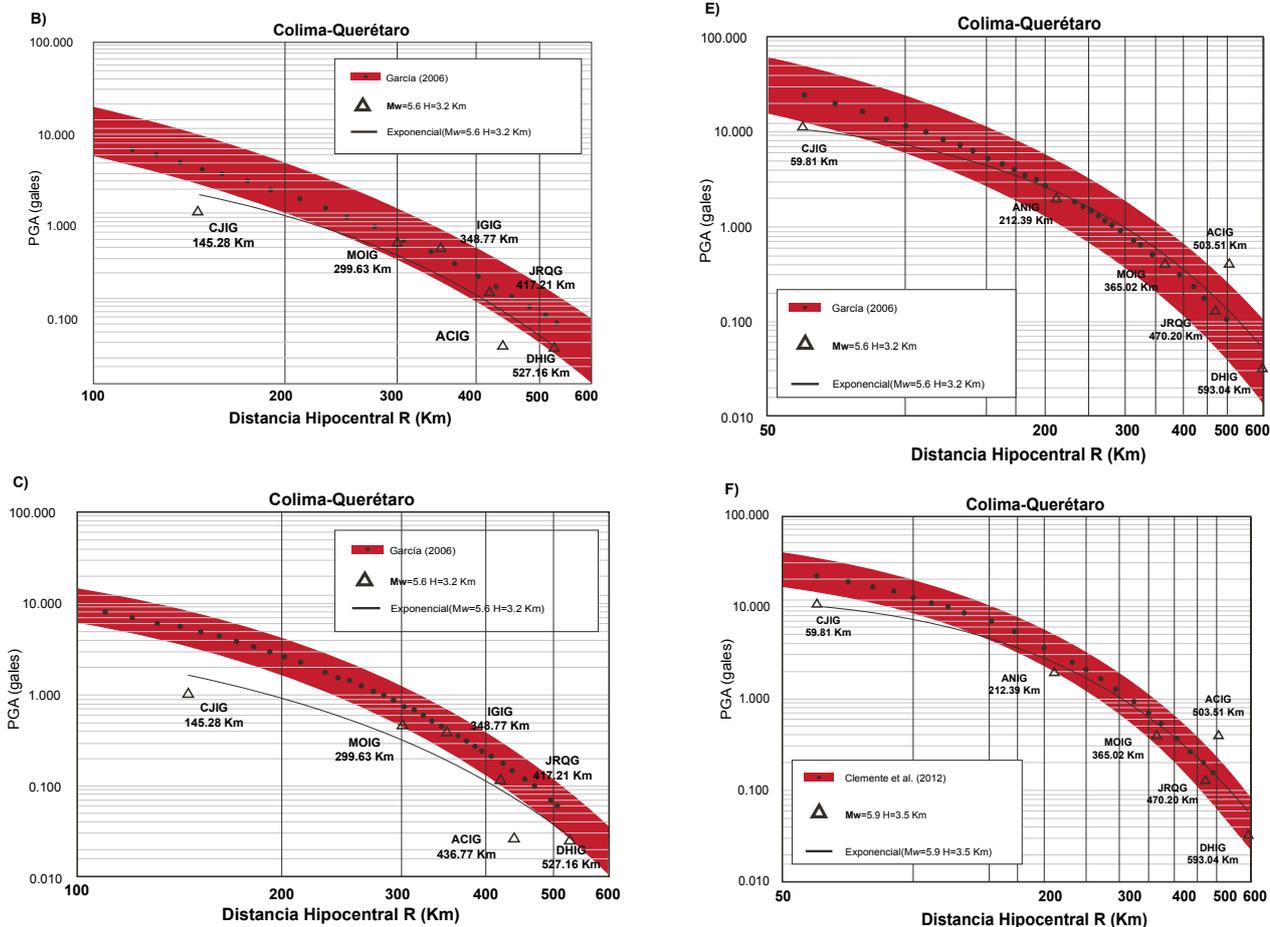


Figura 3 (continuación). Gráficas de atenuación (Trayectoria Colima).

En cuanto a la trayectoria de Michoacán (Figuras 4a- 4f), la ecuación de atenuación propuesta por Clemente [7] subestima el PGA observado en los primeros 200 km, pero después de esa distancia los PGA se encuentran dentro de la desviación estándar (± 0.21).

Por otro lado, las curvas de atenuación trazadas a partir de la ecuación propuesta por García [10] presentan estimaciones más concordantes con respecto a los valores observados, debido a que los PGA se encuentran dentro del ancho de banda correspondiente a la desviación estándar.

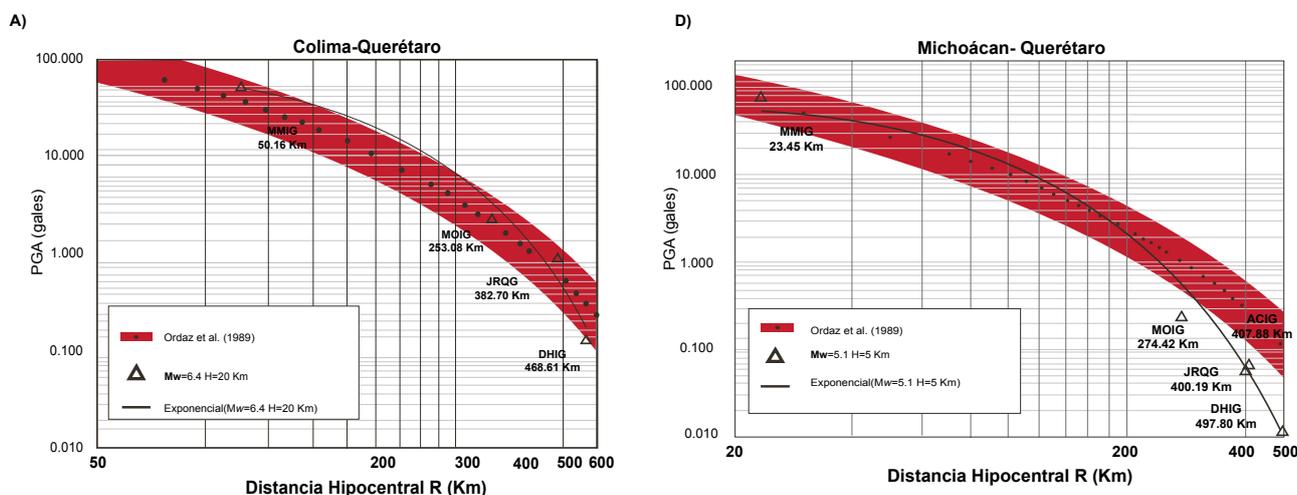


Figura 4. Gráficas de atenuación (Trayectoria Michoacán).

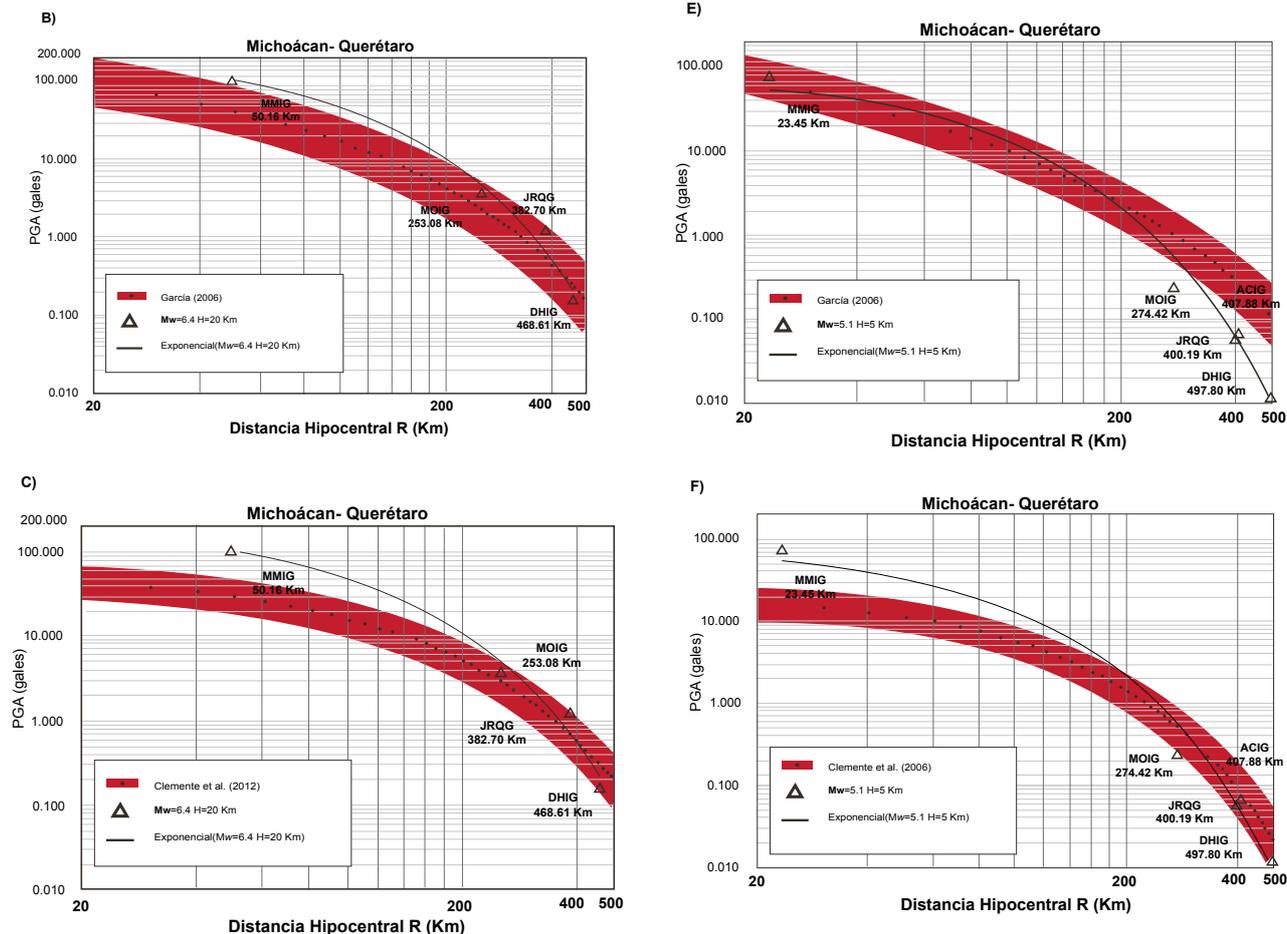


Figura 4 (continuación). Gráficas de atenuación (Trayectoria Michoacán).

En cuanto a la trayectoria de Guerrero, en la Figura 5a los valores de PGA observados concuerdan con los estimados con la relación de atenuación de Ordaz [9], mientras que en la Figura 5d tres de los valores examinados están fuera del rango de desviación estándar. Por otra parte, los valores estimados con la ecuación de García [10] se aproximan a los razonados.

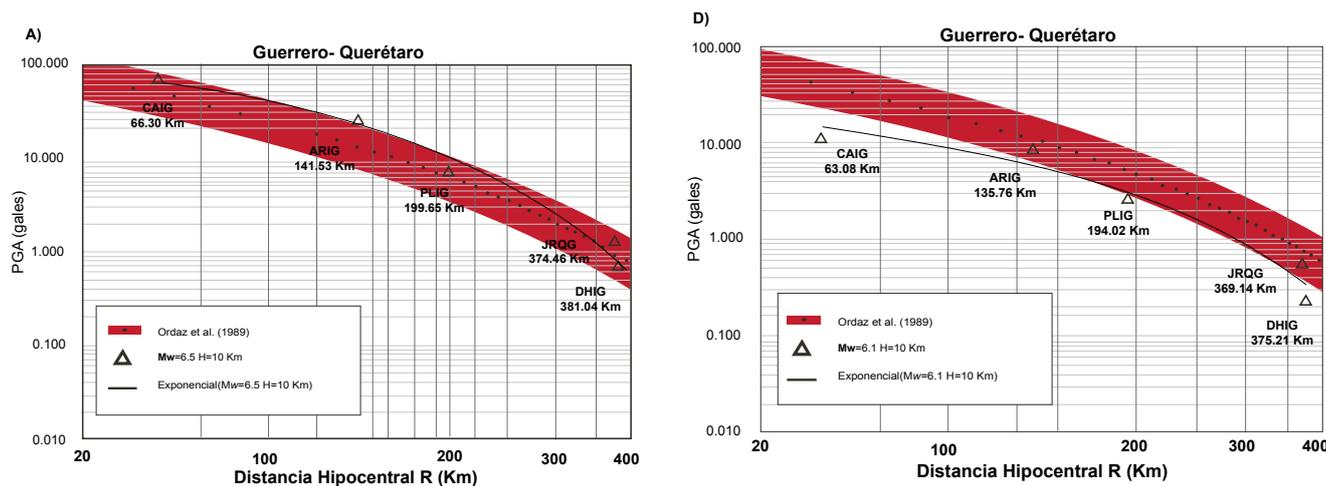


Figura 5. Gráficas de atenuación (Trayectoria Guerrero).



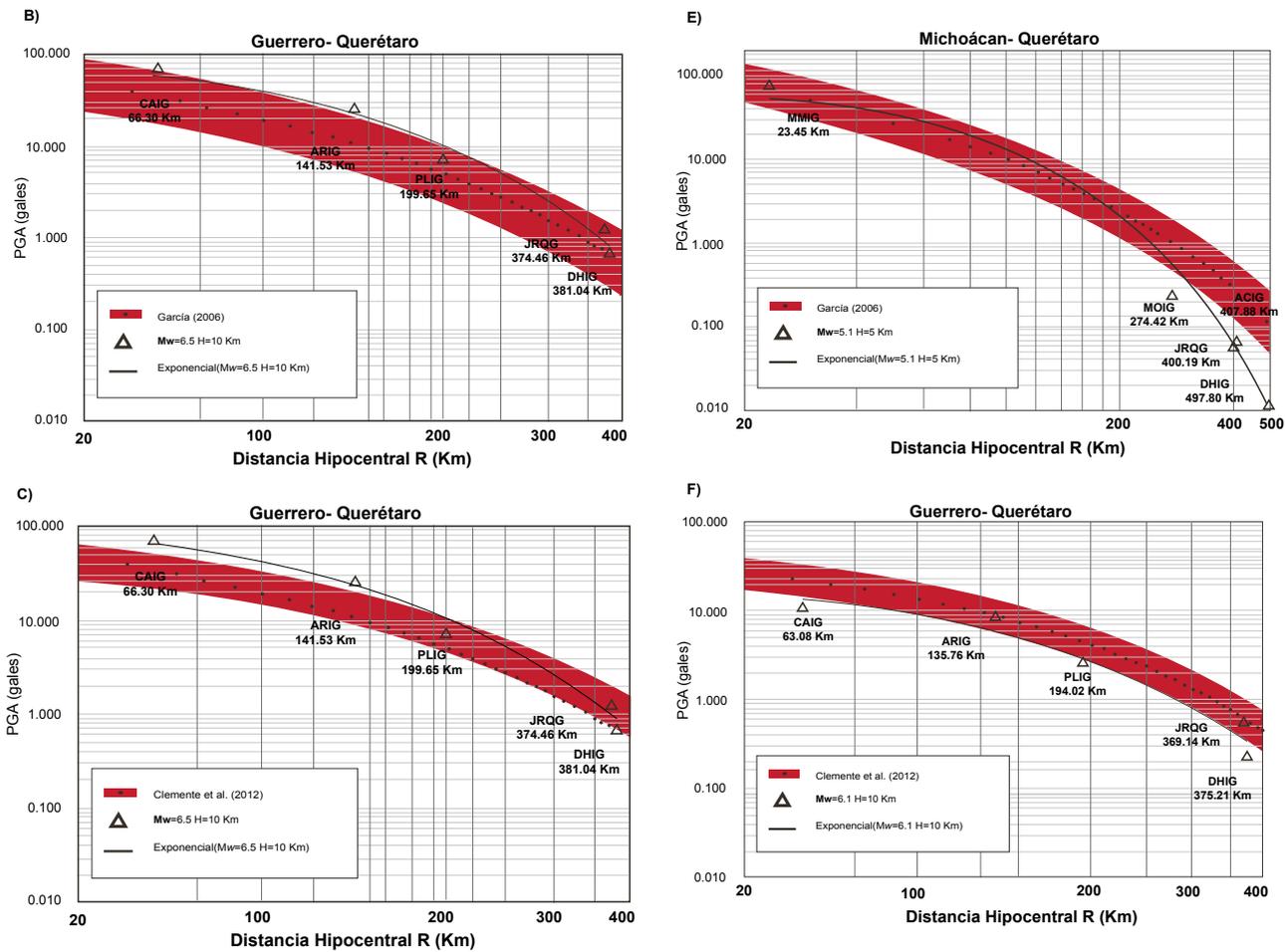


Figura 5. Gráficas de atenuación (Trayectoria Guerrero).

Del mismo modo en la trayectoria de Oaxaca (Figuras 6a-6f), la mayoría de los datos observados coinciden con los estimados a partir de la relación de atenuación por García [10].

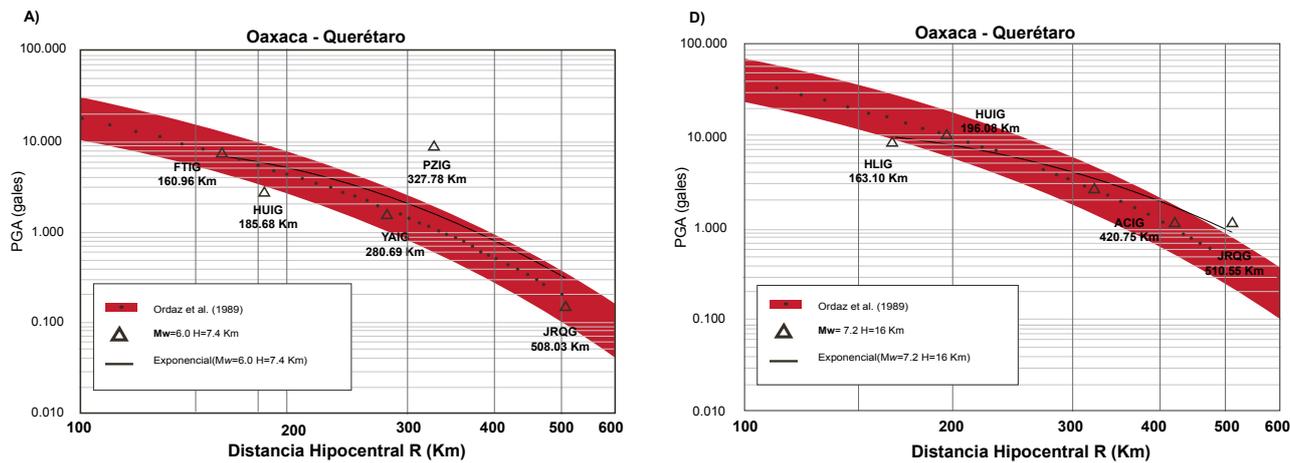


Figura 6. Gráficas de atenuación (Trayectoria Oaxaca).

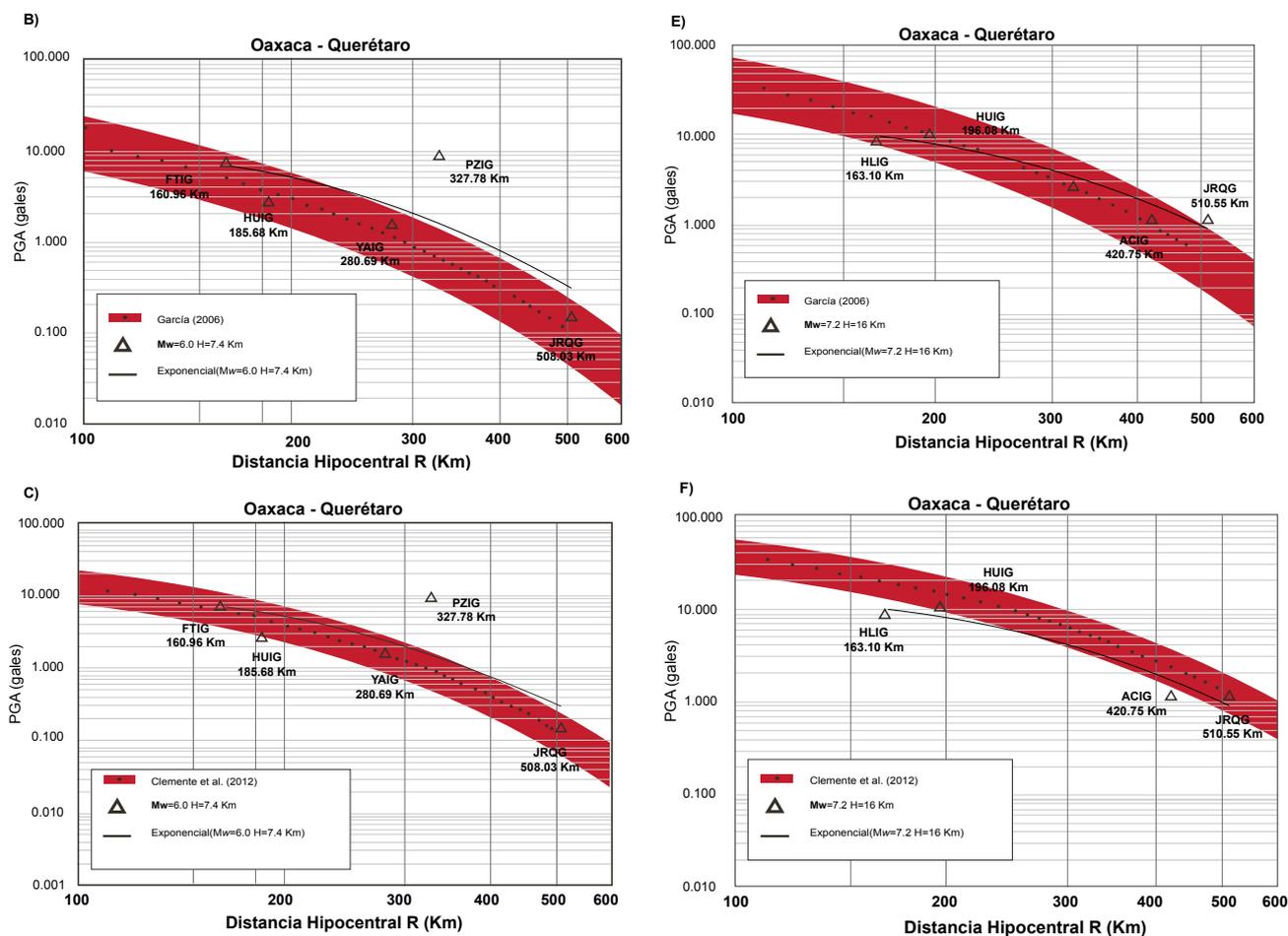


Figura 6 (continuación). Gráficas de atenuación (Traectoria Oaxaca).

Hasta el momento, los datos sugieren que la trayectoria que representa mayor riesgo sísmico para Querétaro es la de Michoacán, seguida de Guerrero, Oaxaca y Colima.

CONCLUSIÓN

La información obtenida comprueba que existen diferencias significativas entre las aceleraciones pico del terreno esperadas en Querétaro, de acuerdo con las trayectorias analizadas. Aun así, es necesario evaluar más datos para estimar con precisión cuál trayectoria resulta ser de gran peligro sísmico para la Ciudad; por tal motivo, se requiere observar la variabilidad de los resultados y comprobar la tendencia vista en este estudio con un tamaño de muestra mayor.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por los recursos otorgados para

realizar esta investigación, al igual que al Servicio Sismológico Nacional de México (SSN) por el mantenimiento de la estación, la adquisición y distribución de datos.

REFERENCIAS

- [1] Secretaría de Protección Civil del DF - CDMX., "Situación Sísmica: México en el entorno de la sismicidad mundial" <http://data.proteccioncivil.cdmx.gob.mx/simulacros/CDMX/Situacionsismica.html#:~:text=M%C3%A9xico%20es%20uno%20de%20los,se%20registran%20en%20el%20mundo>. (Consultado el 22 de mayo de 2022).
- [2] Servicio Geológico Mexicano, "Sismología de México." <https://www.sgm.gob.mx/Web/>

MuseoVirtual/Riesgosgeológicos/Sismologia-de-Mexico.html. (Consultado el 1 de agosto de 2022).

- [3] Universidad Nacional Autónoma de México. Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, "Sismos Recientes". [En línea] Disponible en: <http://www.ssn.unam.mx> (consultado el 20 de marzo de 2022).
- [4] A. Gómez-Tuena, M. T. Orozco-Esquivel, y L. Ferrari, "Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana", *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 57, no. 3. pp. 227-283, 2005. doi: 10.18268/bsgm2005v57n3a2.
- [5] H. Cruz-Jiménez, F. J. Chávez-García y T. Furumura, "Differences in attenuation of ground motion perpendicular to the

- Mexican subduction zone between Colima and Guerrero: An explanation based on numerical modeling", *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 99, no. 1. pp. 400-406, 2009. doi: 10.1785/0120080167.
- [6] N. M. Shapiro, M. Campillo, A. Paul, S. K. Singh, D. Jongmans y F. J. Sánchez-Sesma, "Surface-wave propagation across the Mexican Volcanic Belt and the origin of the long-period seismic-wave amplification in the Valley of Mexico", *Geophysical Journal International*, vol. 128, no. 1. pp. 151-166, 1997. doi: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb04076.x.
- [7] A. Clemente Chávez, "Relación De Atenuación Del Movimiento Del Suelo Para La Aceleración Máxima (PGA) Sobre El Cinturón Volcánico Mexicano (MVB); Análisis Por Trayectoria", *Revista de Ingeniería Sísmica*, vol. 93, no. 87. pp. 67-93, 2012. [En línea] Disponible en: <http://www.smis.org.mx/rsmis/n87/index.html>
- [8] P. Sánchez López, A. Clemente Chávez y A. Figueroa Soto, "Seismic attenuation in Mexico; Interplate seismicity and its behavior on the Mexican Volcanic Belt (MVB)", *Memorias del XVIII Int. Eng. Congr.*, 2022.
- [9] S. Ordaz, J. M. Jara y S. K. Singh, "Riesgo sísmico y espectros de diseño en el estado de Guerrero", *VIII Congreso Nacional Ingeniería Sísmica*, pp. 40-56, 1989.
- [10] D. García, "Estimación de parámetros de movimiento fuerte del suelo para terremotos interplaca e intraslab en Mexico central", Tesis de doctorado, Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España, 2007.
- [11] A. Clemente-Chavez et al., "On the behavior of site effects in central Mexico (the Mexican volcanic belt - MVB), based on records of shallow earthquakes that occurred in the zone between 1998 and 2011", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 14, no. 6. pp. 1391-1406, 2014. doi: 10.5194/nhess-14-1391-2014.
- [12] J. Lermo y F. J. Chavez-Garcia, "Site effect evaluation using spectral ratios with only one station", *Bulletin - Seismological Society of America*, vol. 83, no. 5. pp. 1574-1594, 1993. doi: 10.1785/bssa0830051574.
- [13] Y. Nakamura, "A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface", *Reporte trimestral del Railway Technical Research Institute, Japan*, vol. 30. 1989.
- [14] A. Figueroa Soto, A. Clemente Chávez y F. R. Zúñiga, "Deconvolución de sismogramas digitales y determinación del ruido sísmico para el sismógrafo Trillium 120 instalado en el campus Juriquilla de la UNAM", *Boletín del Centro de Geociencias UNAM*, no. 1. pp. 1-9, 2010. [En línea] Disponible en: http://www.geociencias.unam.mx/~bole/eboletin/ruido_sismico.pdf digitales y determinación del ruido sísmico para el sismógrafo Trillium 120 instalado en el campus Juriquilla de la UNAM". *Bol-e (Órgano de Comunicación electrónica del Centro de Geociencias de la UNAM)*, vol. 6, no.1, 2010.