

EL GRABEN DE QUERÉTARO, MÉXICO. OBSERVACIONES DE FALLAMIENTO ACTIVO

Gerardo de Jesús Aguirre-Díaz¹, F. Ramón Zúñiga-Dávila Madrid², Francisco Javier Pacheco-Alvarado³, Marco Guzmán-Speziale² y Jorge Nieto-Obregón⁴

¹ UNICIT, Instituto de Geología, UNAM, Campus Juriquilla, A.P. 1-742, Querétaro, Qro., 76001, Mexico

E-mail: gjad@servidor.unam.mx

² UNICIT, Instituto de Geofísica, UNAM, Campus Juriquilla, A.P. 1-742, Querétaro, Qro., 76001, Mexico

³ Servicio Sismológico Nacional, Instituto de Geofísica, UNAM, Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, México, D.F., 04100, México

⁴ División de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, UNAM, Circuito Interior, Ciudad Universitaria, México, D.F., 04100, México.

RESUMEN

La ciudad de Querétaro se ubica en una fosa, o graben, limitada por fallas normales NNW-SSE al occidente y oriente respectivamente, y por fallas normales ENE-WSW al norte y sur respectivamente. Algunas de las fallas NNW-SSE del graben de Querétaro son más jóvenes que el sistema ENE-WSW, ya que las primeras desplazaron a fallas del segundo. El sistema ENE-WSW es reportado en otros trabajos como sísmicamente activo. El sistema NNW-SSE es también sísmicamente activo; una falla NNW al sureste de la ciudad de Querétaro registró sismicidad de hasta 3.0° durante enero y febrero de 1998. Agrietamientos y hundimientos en el terreno en la parte occidental de la ciudad de Querétaro se asocian a una falla SSE que cruza esa parte de la ciudad y a la compactación diferencial de sedimentos por la sobreexplotación del acuífero de Querétaro. Las fallas NNW-SSE son parte del sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende, que a su vez es parte de la provincia extensional de Cuencas y Sierras. El sistema ENE-WSW es parte del sistema de fallas Chapala-Tula, el cual es interpretado por otros autores como un sistema intraarco del Cinturón Volcánico Mexicano.

INTRODUCCIÓN

El valle de Querétaro se ubica en la intersección de dos sistemas de fallas regionales, cada uno con varias centenas de kilómetros de largo. Uno tiene una orientación norte-noroeste (NNW) y es conocido como Sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende (SFTSMA) (Demant, 1978) (Fig. 1); el otro tiene una orientación este-noreste (ENE) y se le conoce como Sistema de Fallas Chapala-Tula (SFCHT) (Johnson y Harrison, 1990). Ambos sistemas se intersectan en una amplia franja que abarca al menos desde Huimilpan, Querétaro (Qro.), hasta Santa Rosa Jáuregui, Qro., y desde Apaseo El Alto, Guanajuato, hasta Amazcala, Qro., (Fig. 2). Esta intersección de sistemas produjo un arreglo ortogonal de fallas normales que forma un mosaico de horsts, grabens y semigrabens, que culminan con el graben de Querétaro.

En el presente trabajo resumimos algunas de las características observadas en las fallas de la ciudad de Querétaro y sus alrededores, mencionamos la reciente sismicidad relacionada a una falla normal con rumbo NNW, que ocurrió en las cercanías de Sanfandila, Qro, y mostramos ejemplos de los daños ocasionados a la infraestructura urbana asociados a una de estas fallas. Una descripción más completa de las fallas y geología de esta región y de la sismicidad relacionada a la falla de Sanfandila será publicada en otro trabajo en preparación (Aguirre-Díaz *et al.*).

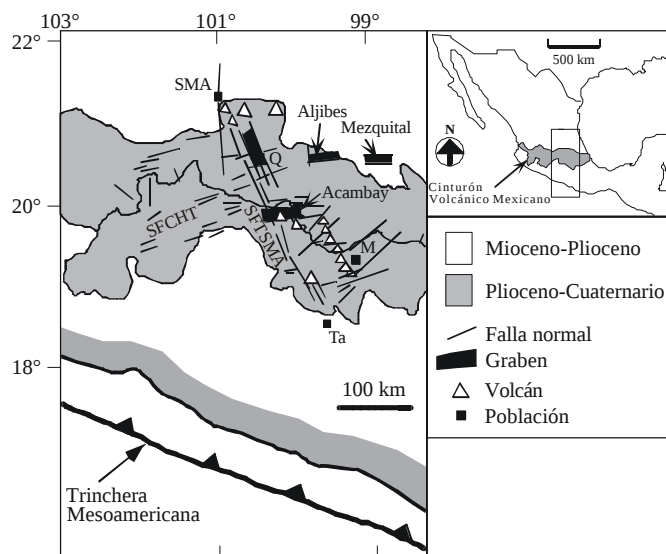


Figura 1.- Mapa índice del sector central del Cinturón Volcánico Mexicano, y de los principales sistemas de fallas Taxco-San Miguel de Allende (sistema NNW-SSE) y Chapala-Tula (sistema WSW-ENE).

EL GRABEN DE QUERÉTARO

En la Fig. 2 es posible observar que el arreglo ortogonal de fallas de los sistemas NNW y ENE produce dos orientaciones principales para el graben de Querétaro: una limitada por fallas

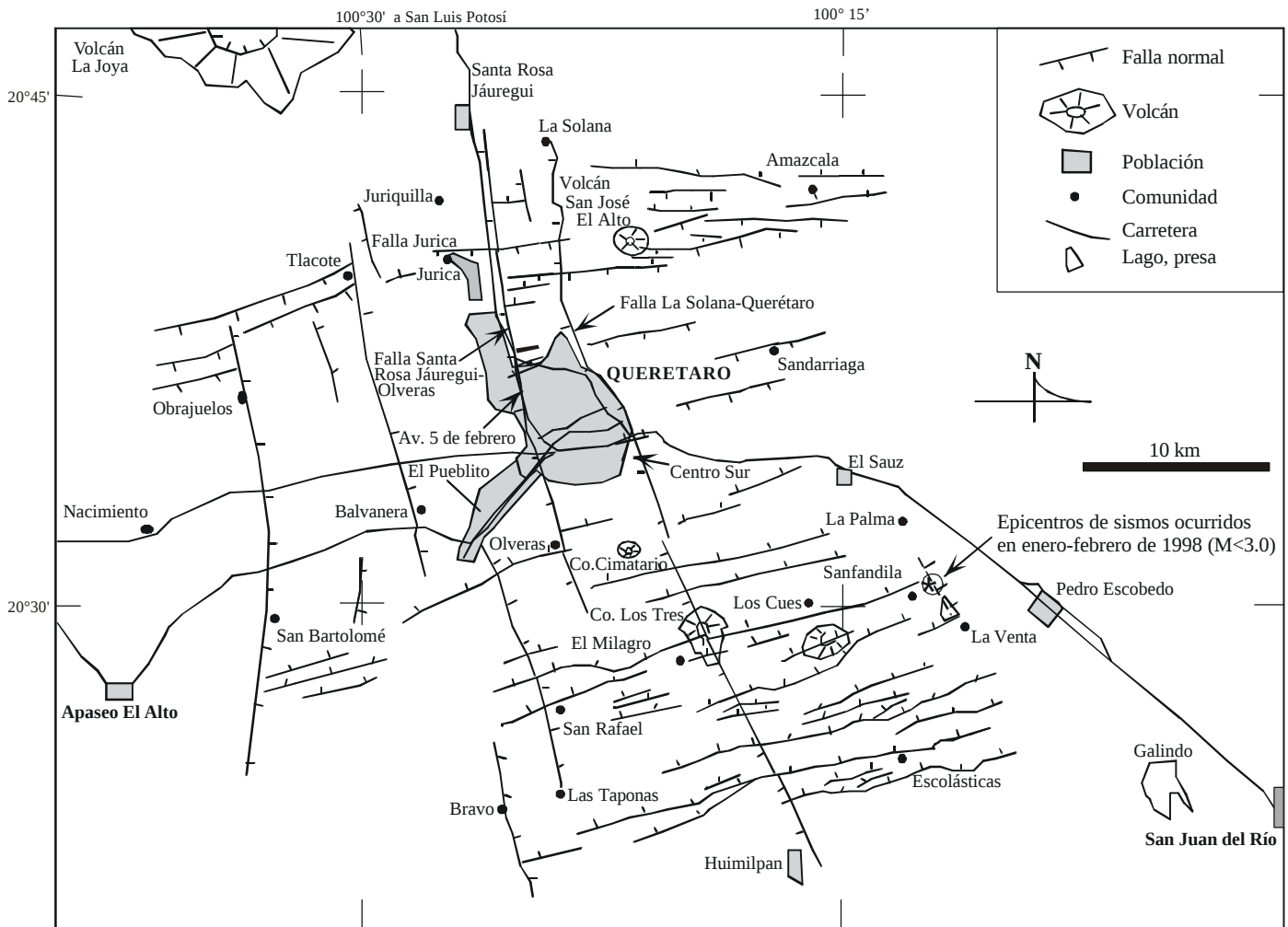


Figura 2.- Mapa estructural que muestra la ubicación del graben de Querétaro y de los sistemas de fallas que se intersectan en esta zona formando un arreglo ortogonal de horsts, grabens y semigrabens.

NNW-SSE y otra limitada por fallas ENE-WSW. Para la primera estructura el hombro occidental del graben está definido por las fallas de Tlacote-Balvanera y El Pueblito-Las Taponas, y el hombro oriental por las fallas de Santa Rosa Jáuregui-Olveras y La Solana-Querétaro (Fig. 2). En el segundo caso, el graben está limitado por varias fallas de rumbo ENE-WSW tanto al norte como al sur de la ciudad de Querétaro. Estas fallas ENE-WSW forman pequeños semigrabens con fallas con echados al sur en el hombro norte del graben y semigrabens con fallas con echados al norte en el hombro sur. La serie de semigrabens termina en un graben de rumbo ENE pobremente definido, dentro del que se encuentra la ciudad de Querétaro.

TIEMPOS RELATIVOS DE FALLAMIENTO

En el graben de Querétaro y su periferia se tienen evidencias geológicas y geofísicas de que algunas fallas NNW-SSE fueron posteriores a fallas ENE-WSW. La evidencia geológica incluye: 1) Las fallas NNW-SSE cortan a las fallas ENE-WSW. Esto se observa claramente en varias intersecciones de estos dos sistemas de fallas. Por ejemplo, la falla Santa Rosa Jáuregui-Olveras corta a varias fallas más pequeñas de rumbo ENE-WSW

(Fig. 2). En el campo es notorio cómo las fallas ENE-WSW prácticamente desaparecen al pasar del bloque levantado al bloque caído de la falla Santa Rosa Jáuregui-Olveras. Algunas fallas ENE-WSW no desaparecen del todo, como sucede con la falla Jurica (Fig. 2), pero se observa un cambio en la altura del escarpe de la falla ENE al pasar del lado oriental al occidental de la falla Santa Rosa Jáuregui-Olveras. El mismo patrón se observa en varias intersecciones similares. 2) Algunas de las fallas NNW-WSW tienen escarpes frescos, relativamente poco erosionados, como por ejemplo la falla La Solana-Querétaro, cerca del sector conocido como Centro Sur de la Ciudad de Querétaro (Fig. 3).

Por otro lado, una falla NNW, que no aflora en superficie, registró sismicidad entre enero y febrero de 1998 con magnitudes de hasta 3.0 (G. Aguirre-Díaz *et al.*, en prep.). Los epicentros se ubicaron cerca de la comunidad de Sanfandila, en el Municipio de Pedro Escobedo (Fig. 2). En base a los registros sísmicos se pudo comprobar la ruptura de una falla orientada NNW a una profundidad aproximada de 7 km. Incluso, es probable que el temblor de 1887 de Pinal de Amoles, Qro., $M_1 = 5.3$, también fuera causado por una falla normal orientada NNW (Suter *et*

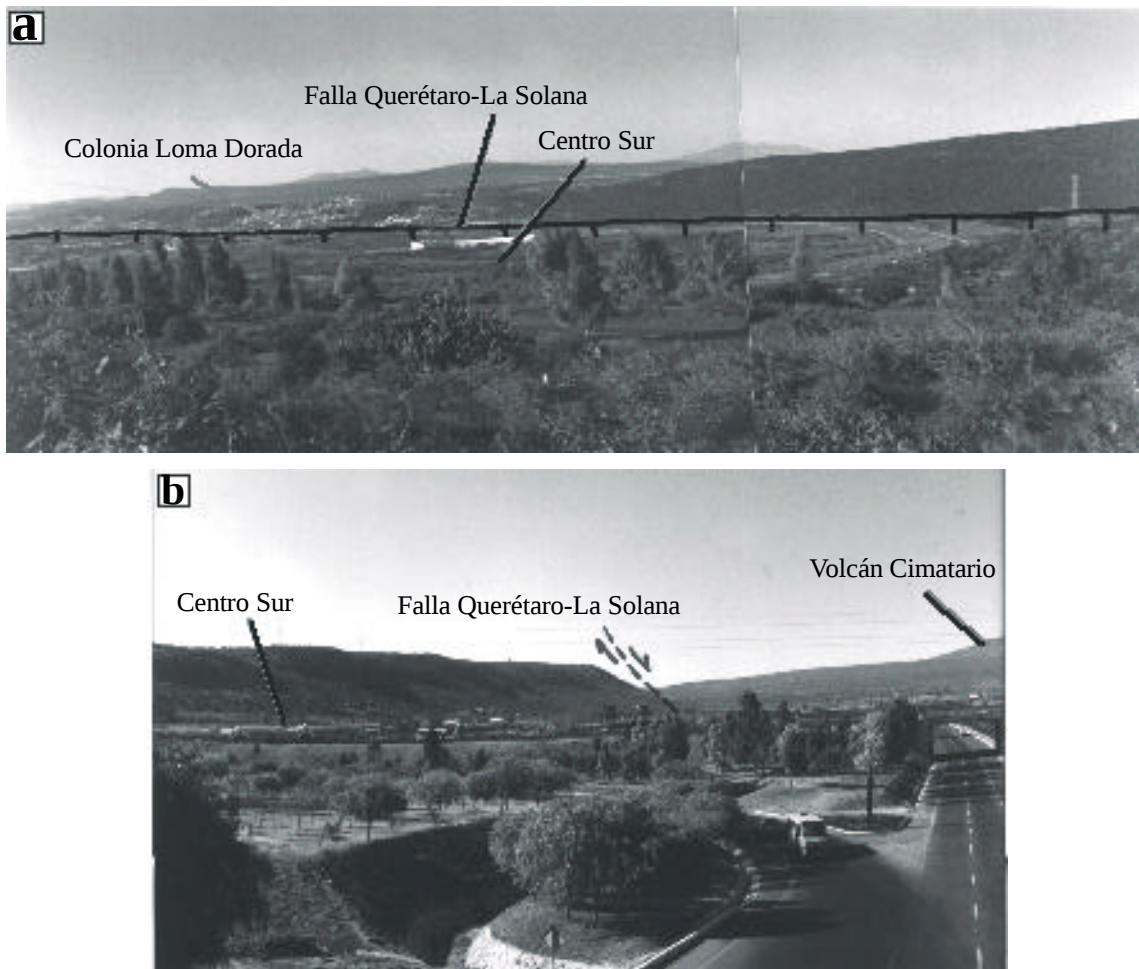


Figura 3.- Falla SSE La Solana-Querétaro. a) Vista panorámica hacia el noreste del escarpe producido por la falla La Solana-Querétaro en su tramo sur, cerca del Centro Sur de la Ciudad de Querétaro. La altura del escarpe es de 160 m en su parte más alta. Al fondo se observa la parte oriental de la ciudad de Querétaro, que ha crecido sobre el escarpe de falla. b) Vista al sur de la falla cerca del Centro Sur, y la Central Camionera en primer plano. Nótese lo poco erosionado de la misma, la ausencia de drenajes profundos, y lo escarpado de la falla.

al., 1996). Por lo tanto, el sistema de fallas NNW-SSE puede considerarse como potencialmente activo, al menos en la cercanía de la Ciudad de Querétaro, en cuyo caso, podría interpretarse como una reactivación de fallas de la provincia de Cuencas y Sierras.

ESQUEMA TECTÓNICO REGIONAL

El fallamiento ENE-WSW está asociado al SFCHT que es paralelo al Cinturón Volcánico Mexicano. Suter *et al.* (1995a) han definido a este sistema como un fallamiento intraarco, el cual es considerado sísmicamente activo (Suter *et al.*, 1995a, 1995b). Fallas sismogénicas son parte de grabens y semigrabens relativamente cercanos a la ciudad de Querétaro, como el semigraben de Aljibes y el valle del Mezquiteal (Suter *et al.*, 1995b) y el graben de Acambay (Suter *et al.*, 1995a).

Por otro lado, el fallamiento NNW-SSE se ha considerado, por su orientación, como parte de la provincia de Cuencas y Sierras (Nixon *et al.*, 1987; Henry y Aranda, 1992), y por lo tanto más antiguo que el fallamiento ENE-WSW, ya que se tie-

nen registros de que el fallamiento Cuencas y Sierras pudo haber sucedido hace 30 Ma (Aguirre-Díaz y McDowell, 1993) y en algunas partes desde hace 49 Ma (Aranda y McDowell, 1998). Estudios regionales de fallamiento activo en México indican que al norte del Cinturón Volcánico Mexicano la extensión tipo Cuencas y Sierras (fallamiento normal NNW-SSE y NS) ha continuado hasta el Presente (Suter, 1991), o al menos hasta el Cuaternario (Henry y Aranda, 1992; Aranda y Henry, 1992).

Con base en lo anterior, se infiere que el graben de Querétaro al principio tuvo una orientación NNW limitado por fallas antiguas de la provincia de Cuencas y Sierras; posteriormente fue afectado por fallamiento de rumbo ENE-WSW, asociado al sistema intra-arco del Cinturón Volcánico Mexicano; y finalmente sucedió la reactivación de fallas NNW y SSE, que limitan al graben de Querétaro al occidente y oriente, respectivamente. Este arreglo dió como resultado un graben limitado por fallas tanto al norte y sur, como al oeste y este.

AGRIETAMIENTOS EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO

En la región occidental de la Ciudad de Querétaro se han registrado agrietamientos en el terreno y subsidencia del suelo a lo largo de una trasa que las autoridades locales han interpretado como una falla de orientación SSE (Fig. 4). Estas grietas y la subsidencia del terreno han ocasionado daños importantes a la infraestructura urbana, tales como deformación de vías importantes de comunicación, como es el caso de la Avenida 5 de Febrero (Fig. 4a), y daños a construcciones (Fig. 4b). La deformación del terreno en este sector de la ciudad sigue una trasa NNW-SSE, y coincide con la ubicación de la falla Santa Rosa Jáuregui-Olveras (Fig. 2). Sin embargo, aunque es evidente la continua subsidencia y deformación del terreno a lo largo de esta trasa, no se ha registrado sismicidad para poder afirmar movimiento a lo largo de la falla mencionada, aunque tampoco se ha verificado por microsismicidad. Son varios los factores que posiblemente intervienen para la formación de las grietas y el hundimiento del terreno. Destacan: 1) la presencia de una falla normal, en este caso, orientada SSE; 2) sedimentos acumulados sobre la falla; y 3) la compactación diferencial de estos sedimentos a uno y otro lado de la falla debida a la sobre-explotación de agua subterránea. Esta última causa supone una mayor acumulación de sedimentos sobre el bloque caído de la falla con respecto a los sedimentos acumulados en el bloque levantado, situación que ocasionará una mayor compactación en el lado caído durante la extracción de agua subterránea.

Excepto por la reciente sismicidad en la falla Sanfandila, no se ha reportado sismicidad notoria en las fallas que afectan la Ciudad de Querétaro. Sin embargo, no se puede descartar la posibilidad de microsismicidad a lo largo de éstas, impercepti-

ble para la población en lugares como la Avenida 5 de Febrero, con abundante tráfico de vehículos pesados, pero que sería registrada por un monitoreo sísmico sistemático. De darse dicha microsismicidad, sería necesario evaluar si es por actividad tectónica o por la sobre-explotación del manto acuífero, como se ha demostrado en estudios de las fallas en la Ciudad de Aguascalientes (Lermo, *et al.*, 1996) por sobre-explotación de agua.

Aun falta realizar estudios geológicos y geofísicos en la Ciudad de Querétaro que permitan cuantificar el riesgo para la población y para la infraestructura urbana debido a las fallas de este lugar, y la influencia de éstas en el acuífero que abastece esta ciudad. Algunos de estos estudios han comenzado o están por comenzar. Sin embargo, es importante señalar que la cartografía geológica de las fallas y el levantamiento estratigráfico de la zona, documentado con fechamientos isotópicos, es el estudio base para los demás.

CONCLUSIONES

- El graben de Querétaro está limitado por fallas ENE-WSW en sus lados norte y sur, respectivamente, y por fallas NNW-SSE en sus lados occidental y oriental, respectivamente. Apparently, primero se formaron fallas antiguas de tipo Sierras y Cuencas, con orientación NNW-SSE; posteriormente se formó un graben limitado por fallas ENE-WSW, que después fue afectado por fallamiento NNW-SSE, formándose un nuevo graben orientado NNW sobre el anterior. Esto significa que algunas de las fallas NNW-SSE son más jóvenes que



Figura 4.- Daños en propiedades cercanas a la Avenida 5 de Febrero, en la parte occidental de la ciudad de Querétaro, causada por hundimientos en el terreno sobre la trasa de la falla Santa Rosa Jáuregui-Olveras, con rumbo SSE. a) escarpe de 50 cm de alto en una de las calles afectadas (la línea punteada marca la zona deformada). La puerta que se observa a la derecha estaba originalmente al nivel de la calle, pero ahora se encuentra debajo de ese nivel; b) vista la sur de la Avenida 5 de Febrero mostrando una zona deformada (línea punteada). Nótese el desalineamiento del muro central de la avenida al intersectar con la línea punteada; c) daños en los muros de una construcción; d) daños en una bodega en la zona industrial al oriente de la Avenida 5 de Febrero.

b



c



d



las fallas ENE-WSW y que el graben de Querétaro está limitado por fallas en las direcciones norte-sur y este-oeste.

- El fallamiento NNW-SSE es considerado potencialmente activo en base a sismicidad reciente (enero-febrero de 1998) en una de las fallas con esta orientación cercana a Sanfandila, Querétaro., y a que corta a fallas del sistema ENE-WSW. El fallamiento ENE-WSW pertenece al sistema intraarco del Cinturón Volcánico Mexicano, que es también considerado sísmicamente activo, aunque no se registran evidencias de actividad reciente en el graben de Querétaro.
- No se descarta la posibilidad de que alguna de las fallas del graben de Querétaro y su periferia puedan reactivarse en cualquier momento, como fue el caso de la falla Sanfandila, lo que implica un riesgo para la población e infraestructura urbana de la Ciudad de Querétaro y comunidades cercanas.

AGRADECIMIENTOS

El presente estudio fue realizado con financiamiento del proyecto PAPIIT IN-108196 otorgado por la Dirección General de Asuntos del Personal Académico de la UNAM, y con recursos internos asignados a la Unidad de Investigación de Ciencias de la Tierra, campus UNAM-Juriquilla, por el Instituto de Geología, UNAM. Nuestro sincero agradecimiento al Ing. Vicente Ávila Durán y al Ing. Javier Carrasco Hernández, por su ayuda durante el trabajo de geología de campo, y a Emilio Nava Alatorre, Victor Hugo Espíndola y Nikolai Shapiro por su valioso apoyo durante el monitoreo sísmico en Sanfandila. Finalmente, agradecemos a Arturo Martín y a un árbitro anónimo los comentarios hechos a nuestro trabajo.

REFERENCIAS

- Aguirre-Díaz, G. J. y McDowell, F.W., 1993, Nature and Timing of faulting and syn-extensional magmatism in the southern Basin and Range, central-eastern Durango, Mexico: *Bulletin of the Geological Society of America*, v. 105, p. 1435-1444.
- Aranda-Gómez, J. J., y Henry, C. D., 1992, Fallamiento cuaternario cerca de la ciudad de Durango: Naturaleza del periodo de deformación más joven relacionado a extensión multiepisódica en el noroeste de México: *Unión Geofísica Mexicana, Geos*, v. 12, p. 53-54.
- Aranda-Gómez, J. J. y McDowell, F. W., 1998, Paleogene extension in the southern Basin and Range province of Mexico: Syndepositional tilting of Eocene red beds and Oligocene volcanic rocks in the Guanajuato Mining District: *International Geology Review*, v. 40, p. 116-134.
- Demant, A., 1978, Características del Eje Volcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Rev. Inst. Geol. UNAM*, v. 2, p. 172-187.

- Henry, C. D. y Aranda-Gómez, J. J., 1992, The real southern Basin and Range: Mid- to late Cenozoic extension in Mexico: *Geology*, v. 20, p. 701-704.
- Johnson, C. A. y Harrison, C. G. A., 1990, Neotectonics in central Mexico: *Phys. Earth Planet. Int.*, v. 64, p. 187-210.
- Lermo, J., Nieto-Obregón, J., Zermeno, M., 1996, Faults and fractures in the valley of Aguascalientes. Preliminary microzonification: XI World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 1651, 8 pp.
- Nixon, G. T., Demant, A., Armstrong, R. L., y Harakal, J. E., 1987, K-Ar and geologic data bearing on the age and evolution of the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Geofis. Int.*, v. 26, p. 109-158.
- Suter, M., 1991, State of stress and active deformation in Mexico and western Central America: in *Neotectonics of North America*, D. B. Slemmons *et al.*, eds., Geological Society of America, Boulder, Colorado, *Decade Map Vol. 1*, 401-1421.
- Suter, M., Carrillo-Martínez, M., y Quintero-Legorreta, O., 1996, Macrosismic study of shallow earthquakes in the central and eastern parts of the Trans-mexican volcanic belt, Mexico: *Bulletin of the Seismological Society of America*, v. 86, p. 1952-1963.
- Suter, M., Quintero, O., López, M., Aguirre, G., y Farrar, E., 1995a, The Acambay graben: Active intraarc extension in the trans-Mexican volcanic belt, Mexico. *Tectonics*, v. 14, p. 1245-1262.
- Suter, M., Carrillo, M., López, M., y Farrar, E., 1995b, The Aljibes half graben, active extension at the boundary between the trans-Mexican volcanic belt and the southern Basin and Range: *Geol. Soc. Amer. Bull.*, v. 107, p. 627-641.