

Evidencia geodésica de movimientos verticales recientes en la zona sismogeneradora de Acambay, México

Luis Miguel Espinosa-Rodríguez
José Ramón Hernández-Santana
Ana Patricia Méndez-Linares

Resumen

La región central mexicana está conformada por un complejo sistema de fallas, fosas tectónicas y pilares y manifestaciones volcánicas (estratovolcanes, campos monogenéticos y coladas fisurales), que atraviesan al Cinturón Volcánico Transversal. En este contexto y de manera particular, el sistema disyuntivo que constituye a la región de Acambay, en el estado de México, ha mostrado evidencia de actividad sismogeneradora desde hace casi un siglo hasta el presente. De acuerdo con lo anterior y basados en el análisis geomorfológico y las mediciones geodésicas, se mostró la dinámica que presentan estas morfoestructuras en un estudio comparativo multitemporal (1998/2003 al 2011). Las velocidades de los movimientos tectónicos verticales recientes reflejan valores de ascenso, que oscilan entre +7,3 y +12,8 mm/año, en el horst septentrional Santa María Tixmadejé, mientras que en el graben central de Acambay los ascensos son muy débiles, del orden de +0,4 a +0,5 mm/año.

Palabras clave: Acambay; sistema volcánico transmexicano; geodinámica; tectónica; movimientos verticales; mediciones geodésicas.

Geodetic proof of vertical recent movements at the seism generating zone of Acambay, Mexico

Abstract

The central territorial belt oriented west-east and located along the parallel 19^o in the Mexican Republic, is composed of a complex system of faults, that respond to the consequent morphology of a tension arched system, which has been erected to the Volcanic Transmexican or Transversal Belt. This region evidences the dynamics and evolution of a graben and horst tectonic system, as well as volcanic manifestations characterized by stratovolcanoes, monogenetic fields and fisural flows, among others. In particular, in the center of the Mexican regional complex, the fault system which delimits the region of Acambay in the state of Mexico, had showed evidences of seismogenerating activity during a century until the present time. According to the above and based on the geomorphological analysis and the geodetic measurements, the dynamic presented by these morphostructures in a multitemporal comparative study (1998/2003 to 2011) is showed. The rates of vertical tectonic movements reflect recent rise values ranging from + 7,3 to 12,8 mm/year in the northern horst of Santa María Tixmadejé, while in the central graben of Acambay are very weak, of the order of + 0,4 to + 0,5 mm/year.

Keywords: Acambay; trans-mexican volcanic system; geodynamic; tectonic; vertical movements; geodetic measurements.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las unidades geotectónicas, geomorfológicas y geodinámicas más interesantes del territorio mexicano lo constituye el sistema volcánico transmexicano, el cual se extiende, con dirección oeste-noroeste a este-sureste, desde las costas del océano Pacífico hasta el golfo de México. Según diversos autores (Nixon 1982; Ponce *et al.* 1992; Pardo & Suárez 1993; Norini *et al.* 2010), se trata de un arco volcánico continental activo, resultado del mecanismo de subducción de las placas Cocos y Rivera, bajo la placa Norteamericana. La actividad tectónica, volcánica y sísmica de este comenzó a partir del Mioceno superior (Ferrari 2000), aunque Garduño y otros investigadores (2009) consideran que el sistema de fallas longitudinales surgió en el Mioceno temprano.

De acuerdo con Aguayo y Trápaga (2013), el sistema tiende a separarse en una dirección generalizada norte-sur, encontrándose en un proceso de emersión afectado por esfuerzos distensivos, que generan sistemas estructurales complejos de fosas y pilares, cuyo arreglo geomorfológico corresponde al desarrollo de valles escalonados hacia el centro, como ocurre en el sistema de horst y graben del área estudiada. De acuerdo con los patrones estructurales de fallamiento y el vulcanismo asociado, Ego y Ansan (2002) lo dividieron en tres regiones: la occidental, en Jalisco, conformada por una zona de junta triple; la central, entre los 102° y los 99° de longitud oeste, con un patrón de fallas normales de rumbo este a oeste; y la oriental, desde Puebla hasta el golfo de México, con un diseño NNW-SSE de fallas normales.

Estas regiones han sido investigadas de manera diferenciada, predominando gran parte de los estudios en la parte central, donde se extienden las depresiones de tipo graben de Cuitzeo y de Acambay. Esta última estructura presenta unas dimensiones de 80 km de largo por 15 km a 30 km de ancho y se encuentra limitada por cuatro fallas normales notables (Persaud *et al.* 2006; Roldán, Aguirre & Rodríguez 2011): Epitacio Huerta y Acambay-Tixmadejé (al norte) y Venta de Bravo y Pastores (al sur), todas con actividad tectónica y sísmica actual (Figura 1). Según algunos investigadores (Suter, Quintero & Johnson 1992; Suter *et al.* 1995b; García, Macías & Garduño 2000) estas depresiones centrales están delimitadas por una red principal de fallas normales, a menudo dispuestas en dirección WNW-ESE a W-E, de desplazamiento lateral-derecho, en sistemas escalonados con estructuras de tracción, por ejemplo, las fallas Venta de Bravo, Pastores y Tenango.

La falla de Acambay-Tixmadejé posee escarpes que forman el bloque levantado, alcanza alturas relativas de 400-500 m, con respecto a la parte central del graben. El plano de falla presenta echados de 60° y 70° hacia el

sur (Quintero 2002). En la porción oriental se han identificado dos edificios volcánicos de dimensiones importantes: el volcán Temascalcingo y el volcán Altamirano (Aguirre 1995). La sismicidad y la formación de sismodislocaciones en las referidas fallas regionales han sido sostenidas, desde fines del Terciario hasta el Holoceno, incluyendo su etapa más reciente. Algunos autores sostienen que el borde norte del graben presenta mayor actividad sismotectónica (Suter *et al.* 2001) y significativas deformaciones tectónicas de su relieve (Ramírez 1998). La cinemática de las fallas atestigua la posibilidad de sismos con magnitud mayor a siete grados Richter (Suter *et al.* 1995a), así como la deformación de depósitos lacustres y rocas volcánicas plioceno-cuaternarias. En los registros sismoestadísticos históricos aparecen dos eventos significativos: el terremoto de Acambay (19-11-1912), con $M_s=7,0$ y el de Maravatío (22-febrero-1979), con $M_s=4,9$ (Astiz 1980).

En otro orden de ideas, debido a la extensión y complejidad del territorio mexicano, no son numerosos los estudios emprendidos sobre la expresión estructuro-geológica en el relieve y, mucho menos aún, sobre las velocidades y tendencias de los movimientos tectónicos verticales recientes de la corteza terrestre, mediante el empleo de la información de los registros geodésicos sobre el control vertical del país. Solo a los efectos de establecer modelos de desplazamientos de la placa Norteamericana y los efectos de los ciclos sísmicos en México, Márquez y De Mets (2009) estudiaron las deformaciones, mediante un registro continuo de 13 estaciones de la Red Nacional Geodésica Activa, con GPS de alta precisión, existiendo la estación TOLU ($19,293^\circ$ N; $99,644^\circ$ E), en Toluca, ciudad capital del estado mexiquense, relativamente cercana al área de estudio. Los resultados de las deformaciones transitorias en dicha estación indicaron movimientos hacia el norte, con valores de $-2,0 \pm 0,8$ mm/año y hacia el este, con valores de $-5,3 \pm 0,6$ mm/año. Es así que la historia sísmica de la región, el carácter morfoestructural y dinámico de su relieve sugieren una elevada inestabilidad tectónica reciente y una notable actividad sismogeneradora del tipo intraplaca, a lo largo de la falla Acambay-Tixmadejé y otras del sistema Chapala-Tula.

De acuerdo con lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo central la búsqueda de las evidencias que manifiesten la dinámica de dicha estructura regional (porción septentrional del sistema de horst Santa María Tixmadejé y graben de Acambay), a través de la comparación multitemporal (1998/2003 a 2011) de los valores de los signos geodésicos de primer orden, mediante el empleo comparativo de su registro altimétrico de precisión y del levantamiento GPS en condiciones de campo, con vistas a determinar las magnitudes y tendencias de las velocidades de los movimientos tectónicos verticales recientes de la corteza terrestre local. Estos resultados

geodinámicos complementan, de cierta manera, el conocimiento geocientífico acumulado en tan singular región por numerosos especialistas en las últimas décadas.

1.1. Área de estudio

El área estudiada se localiza en el municipio de Acambay de Ruiz Castañeda, al noreste del estado de México y constituye el sector nororiental del graben homónimo. Las coordenadas del área municipal son $19^{\circ} 50'$ y $20^{\circ} 05'$, de latitud norte y $99^{\circ} 40'$ y $100^{\circ} 05'$, de longitud oeste; ocupa una superficie de $492,13 \text{ km}^2$ (Figura 2).

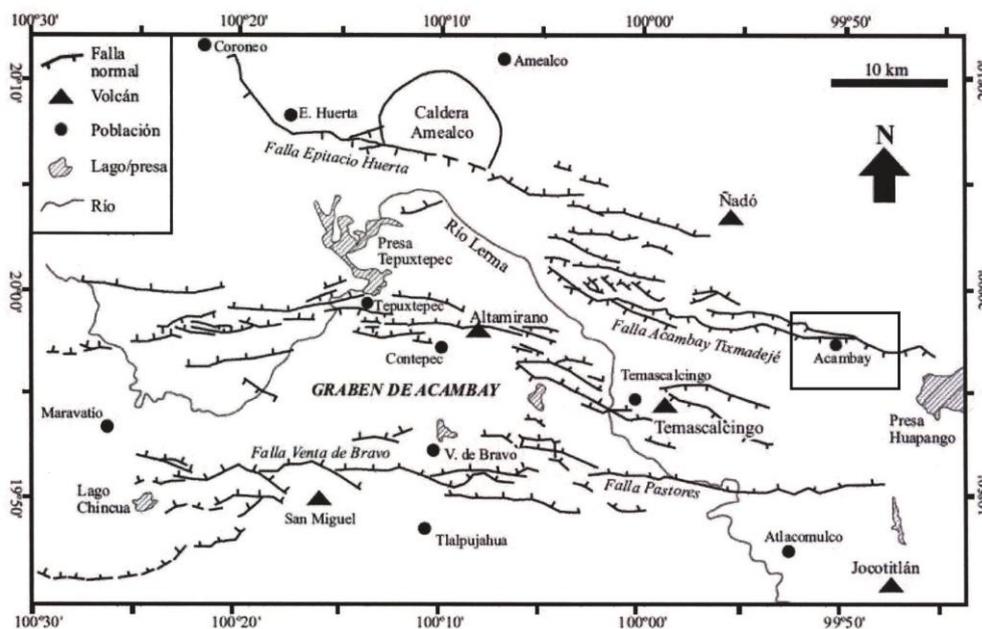


Figura 1. Principales estructuras del graben de Acambay (Suter *et al.* 1995b). Área de estudio enmarcada en el cuadro central derecho de la figura.

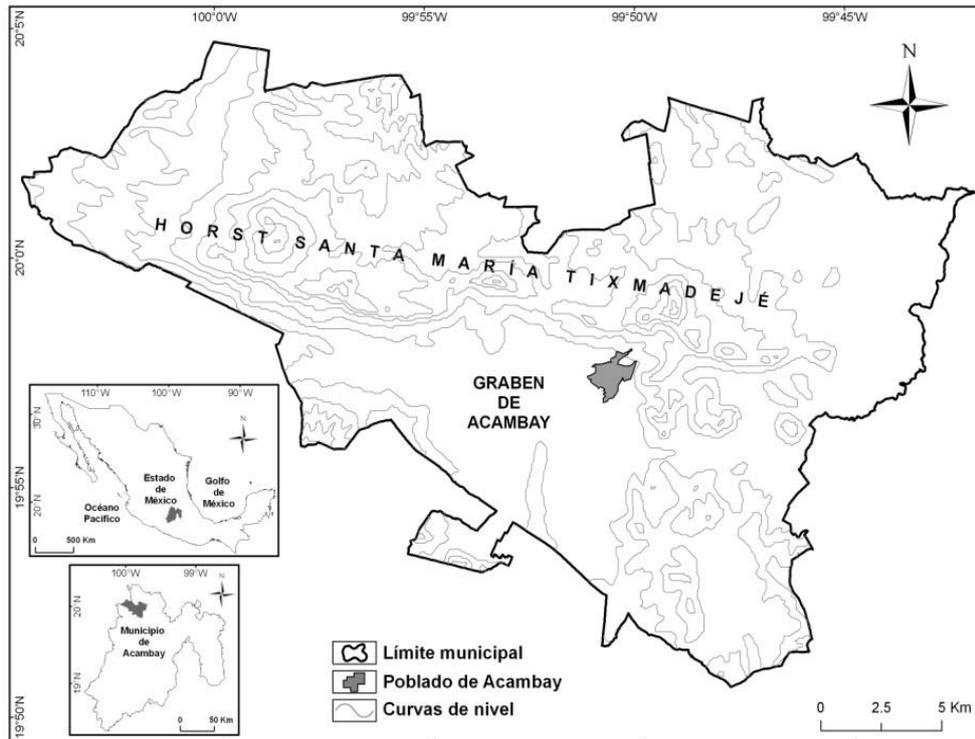


Figura 2. Localización geográfica del área de estudio.

La constitución geológica está representada por tobas de composición andesítica del Mioceno medio-superior, flujos de lava basáltica y rocas piroclásticas del Pleistoceno-Holoceno; los depósitos aluviales del Pleistoceno superior-Holoceno están integrados por fragmentos de rocas volcánicas (gravas) y arenas y arcillas (SECOFI 1996).

De manera particular, la mayor parte del municipio de Acambay se encuentra asentada en el techo de una falla normal dentro de un graben, mientras que el restante territorio discurre entre piedemontes, lomeríos asociados a domos de obturación y taludes, formados en la base de la falla norte de la municipalidad.

En el año de 1912 se registró un movimiento sísmico de magnitud 7,4° y el epicentro se localizó dentro del municipio, provocando la muerte de 161 personas y daños a la infraestructura. Los mayores efectos del movimiento se encontraron en la porción septentrional del graben, afectando a poblaciones como Temascalcingo, San Pedro El Alto, Venta San Lucas y San Andrés Timilpan, situadas en la parte central del graben de Acambay y, por último, las que se ubican en la porción meridional; mientras que como efectos secundarios, localidades como Santa María Tixmadejé, Dongú y San Pedro Potla, experimentaron el desprendimiento y caída de bloques provenientes de los escarpes de la falla (Urbina & Camacho 1913).

1.2. Desplazamientos tectónicos y geodesia aplicada: actualidad internacional

En las últimas décadas, el desarrollo de las investigaciones geodésicas instrumentales y el empleo de la tecnología GPS permitieron revelar y evaluar la dirección, velocidad y tendencias de los movimientos tectónicos recientes de la corteza terrestre, tanto verticales como horizontales, en grandes territorios continentales (Europa centro-oriental y mediterránea, Norteamérica, África, Asia Central, Sudamérica) e insulares (Islandia, islas del mar Egeo, Cuba, Japón), por citar algunos casos.

Los reportes más antiguos sobre estudios geodinámicos, aplicando las re-nivelaciones, se localizan en la parte europea de Rusia (Enman & Nikonov 1993), con análisis cartográficos de los levantamientos geodinámicos de 1958, 1963, 1971 y 1986, donde se reportan, en general, valores extremos de descensos de -4,3 mm/año y de ascensos de +14,6 mm/año. Estudios geodésicos emprendidos por Papazachos, Kiratzi y Papazachos (1992), a lo largo de la región costera de Albania, Yugoslavia y Grecia occidental, reflejaron ascensos de +2 mm/año; en las islas Jónicas, +10 mm/año, en dirección E-W y 11 mm/año en dirección N-S y en el arco helénico (sur del Peloponeso, Creta y Rodos) fue de +6 mm/año. En el mar Egeo y sus alrededores las deformaciones son de +5 mm/año; en Anatolia noroccidental y las zonas de fallas del Egeo norte los valores alcanzaron los +19 mm/año a +22 mm/año. En otros sitios mediterráneos y centrales de Europa, como la región geotermal italiana de Travale y el centro de la antigua república checoslovaca, se reportan valores de subsidencia entre -20 mm/año a -25 mm/año (Geri, Perusini & Rossi 1984) y de -40 mm/año (1943-1976), respectivamente (Zeman 1988).

Investigaciones de Finko (1992), en el escudo kasajo, en Asia central, reflejaron ascensos de + 20 mm/año a + 23 mm/año en las montañas Kent y Karkaraly; mientras Rontogianni (2010) reportó, mediante 18 campañas GPS (1994-2000), ascensos entre +30 mm/año a +35 mm/año en Ática, Evia, Peloponeso oriental, islas del Egeo y Patras. En las condiciones insulares cubanas, Lilienberg y otros investigadores (1988) encontraron contrastes geodinámicos (+10 mm/año a +30 mm/año) en la región oriental (1956-1976), donde las montañas de la Sierra Maestra, Gran Piedra, Meseta del Guaso y Sagua de Tánamo alcanzaron valores de +5 mm/año a +10 mm/año; mientras la subsidencia en las depresiones circundantes (depresiones del Cauto, Central y Guantánamo) experimentó descensos entre -10 mm/año a -15 mm/año. Garduño y demás colaboradores (2001) detectaron tasas de desplazamientos verticales por las fallas, entre 4 cm/año

y 6 cm/año, debido a la sobreexplotación de acuíferos en la región de Morelia, en México.

En la República de Yibuti, en África oriental, entre los años 1979 y 1983, el rift del lago Assal arrojó una expansión de +60 mm/año, perpendicular a las fallas normales que lo bordean, las que mostraron ascensos entre +5 mm/año y +10 mm/año (Kasser, Ruegg & Lopine 1987), mientras que en el valle de rift de Kenia, la expansión alcanzó +2 mm/año (Rostom 1991). Otros resultados sobre movimientos expansivos fueron reportados por Völksen y otros investigadores (2009), en Islandia, durante 9 años de monitoreo con estaciones GPS, revelando desplazamientos horizontales de +20 mm/año y verticales en la región central de la isla de +25 mm/año. Otros datos sobre desplazamientos horizontales reflejan magnitudes importantes en la porción oriental de la zona de la falla Anatolia norte (Ozener *et al.* 2010), del orden de +16 mm/año a +24 mm/año, con respecto a Eurasia; mientras en la zona de la falla dextral Boconó, en Colombia, Molina (2006) determinó movimientos horizontales del orden de +12 mm/año y Argus y Gordon (2001) desplazamientos sostenidos de +39 mm/año en la falla San Andrés.

1.3. Antecedentes geodinámicos y sísmicos en la región de Acambay

Diversos han sido los estudios realizados en torno a la falla y al municipio de Acambay, debido a los reportes sísmicos regionales y locales. De acuerdo con Langride y otros investigadores (2000), el graben se relaciona, por lo menos, con cuatro eventos sísmicos ocurridos en el Pleistoceno y otros más de edad holocénica, relacionados todos con la dinámica intra-arco, que dejaron evidencias morfológicas en columnas estratigráficas, donde se destacan cuñas coluviales rellenas, grietas de erosión truncadas y corrimiento de unidades estratigráficas, entre otras. Estos autores destacan valores de desplazamiento sinistral con un promedio aproximado de 105 cm +/- 10 cm, que se correlacionan con los últimos tres eventos en la llanura de Huamango y una tasa de deslizamiento de 0,17 mm al año, que se presenta con una recurrencia aproximada de 3 600 años para los grandes terremotos, calculados a partir de excavaciones y valores; toda vez que refieren la correlación del sismo de 1912, que conformó un vector con orientación NNE y rupturas aproximadas a los 60 cm.

Otros autores (Garduño *et al.* 2001) correlacionan la actividad sísmica con un par de complejos sistemas de fallas orientadas, en primer término, en dirección NNW-SSE, que se han reactivado y, por otra parte, un sistema con rumbo E-W, originado en el período terminal hace unos ocho millones de años en el Mioceno. La analogía entre los sistemas de graben en el centro-occidente del Cinturón Volcánico se correlaciona con sismos históricos, que en promedio,

presentan magnitudes iguales o superiores a 7,0 grados en la escala Richter y otros de menor intensidad, pero que en conjunto se relacionan con la dinámica de Tlalpuhahua y la falla de Venta de Bravo, motivo por el cual algunos autores (Astiz 1980; Suter *et al.* 1995a; Suter, Carrillo & Quintero 1996) asienten la dinámica presente de la falla de Acambay.

De acuerdo con el catálogo sismoestadístico del Servicio Sismológico Nacional (Instituto de Geofísica 2010) de las últimas cuatro décadas, la actividad sísmica es de magnitud moderada a alta y con cierta recurrencia (Tabla 1, Figura 3).

Tabla 1. Registro general de actividad sísmica periférica al municipio de Acambay, estado de México, que agrupa los últimos 40 años de información reportada. Fuente: Instituto de Geofísica (2010)

Long	Lat	UTM_X	UTM_Y	Fecha	Magnitud	Profundidad
99°41'00"	20°27'99"	457187,92	2242519,69	01/04/1976	3,5	9
100°30'00"	20°16'00"	364142,18	2229718,32	28/02/1979	4,5	19
100°37'00"	19°85'99"	356553,98	2196571,72	01/03/1979	4,7	28
100°11'99"	19°81'99"	382703,76	2191951,46	26/02/1979	4,4	0
99°39'99"	19°99'99"	458157,65	2211531,26	30/04/1981	3,2	1
99°29'99"	20°10'00"	468638,19	2222575,59	25/05/1981	3,8	15
99°21'00"	20°31'00"	478076,00	2245800,46	21/01/1987	4,1	---
100°56'17"	20°16'99"	336796,00	2231059,00	14/09/1988	3,4	70
100°48'00"	20°02'00"	345190,55	2214379,12	09/06/1998	3,9	12
100°50'00"	19°99'99"	343078,33	2212183,96	09/06/1998	4,1	12
100°51'00"	19°59'00"	341626,87	2166811,58	07/10/1999	3,8	14
99°54'00"	20°20'99"	443587,82	2234812,02	08/02/1999	3,3	17
100°17'99"	19°87'99"	376465,81	2198634,81	14/02/2000	3,4	2
100°14'00"	19°88'99"	380661,33	2199712,73	04/06/2000	3,7	5
100°26'00"	19°64'00"	367892,07	2172132,80	25/01/2001	3,4	3
100°23'99"	19°45'99"	369844,99	2152195,97	09/01/2001	3,7	4
100°45'00"	20°00'00"	348309,93	2212137,89	01/09/2005	3,8	73
99°17'99"	20°24'99"	481200,94	2239156,92	06/02/2005	3,7	4
100°83'99"	19°98'99"	307488,70	2211431,69	30/04/2006	4,2	15
100°92'00"	19°60'99"	298638,57	2169457,46	01/03/2006	3,6	10
100°16'00"	19°69'99"	378423,25	2178698,77	06/02/2008	3,7	16
100°95'00"	19°92'00"	295886,49	2203812,28	26/07/1009	3,8	10
100°20'00"	19°66'00"	374199,25	2174300,89	04/02/2009	3,6	4

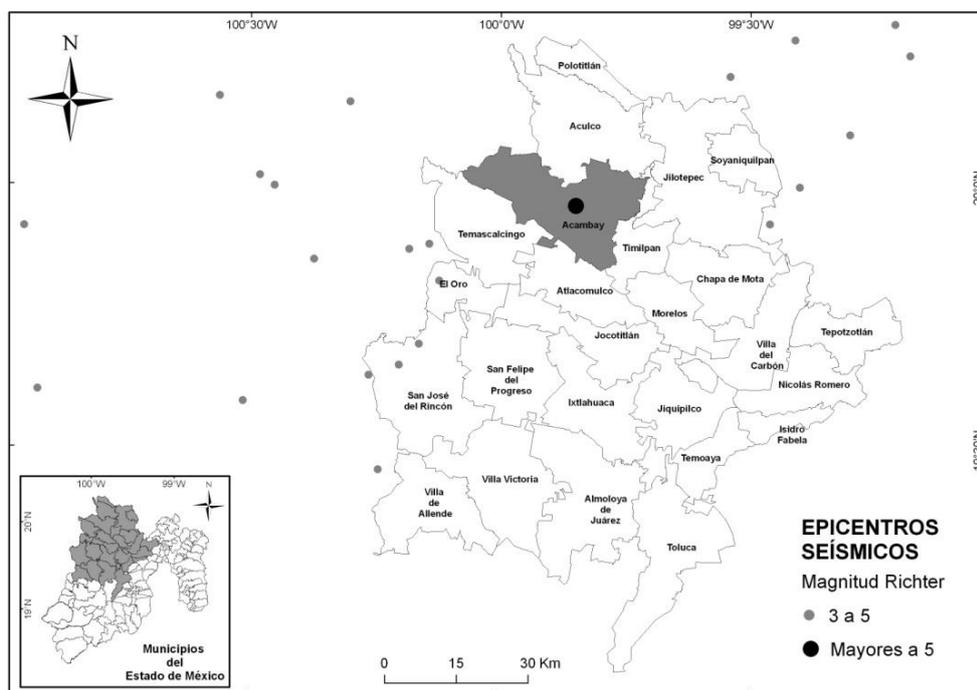


Figura 3. Localización de focos sísmicos correlacionados en el ámbito regional con el municipio de Acambay, estado de México. Fuente: Instituto de Geofísica (2010).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La determinación de la posición geográfica del área, así como sus condiciones topográficas fueron tomadas de las hojas Atlacomulco (E14-A-17) y El Oro de Hidalgo (E14-A-16), a escala 1:50000, elaboradas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI 2009) (Figura 2). Para el conocimiento geológico del área de estudio, se utilizó la carta geológica del Instituto de Fomento Minero del estado de México, a escala 1:250000 (2010), así como trabajos relacionados con la constitución geólogo-tectónica de la región (Nixon 1982; Pasquaré *et al.* 1991; Ponce *et al.* 1992; Suter, Quintero & Johnson 1992; Pardo & Suárez 1993; Aguirre 1995; Suter *et al.* 1995a, 1995b, 2001; Suter, Carrillo & Quintero 1996; SECOFI, 1996; Ramírez 1998; Ferrari 2000; García, Macías & Garduño 2000; Ego & Ansan, 2002; Norini *et al.* 2010; Roldán, Aguirre & Rodríguez 2011; Aguayo & Trápaga 2013). Entretanto, la sismicidad histórica asociada a la falla Acambay-Tixmadejé fue consultada en los trabajos de varios autores (Urbina & Camacho 1913; Astiz 1980; Suter, Carrillo & Quintero 1996; Langride *et al.* 2000; Persaud *et al.* 2006; Garduño *et al.* 2009), así como en los registros del Instituto de Geofísica de la UNAM (2010) (Tabla 1, Figura 3).

Por otra parte, los métodos geodésicos empleados, tanto por métodos de nivelaciones geodésicas de primer orden como por levantamientos con GPS de

precisión, constituyeron la base cuantitativa instrumental para la comparación multitemporal de los datos geodésicos, localizados en cinco signos geodésicos de la Red Geodésica Nacional de primer orden, dentro del territorio municipal de Acambay, a ambos lados de la falla Acambay-Tixmadejé, ocupando sectores del graben de Acambay (dos signos: 01 y 02) y del horst septentrional Santa María Tixmadejé (tres signos: 03, 04 y 05), este último localizado al norte de la falla (Figura 4).

Los signos fueron clasificados según el nivel de estabilidad, mediante la inspección ingeniero-geomorfológica de los mismos, de acuerdo con lo reportado por algunos investigadores (Lilienberg *et al.* 1988, 1993a, 1993b; Marques 2003; Magaz *et al.* 2006). Criterios estos aplicados en investigaciones geodinámicas en Europa oriental y en Cuba debido a que, en ocasiones, los desplazamientos de los signos presentan la influencia de múltiples factores externos como: efectos de procesos naturales, condiciones de yacencia y resistividad de sus bases constructivas, entre otros.

Los resultados de la inspección de campo arrojaron trece signos geodésicos, en condiciones inestables por diferentes situaciones constructivas y de conservación actual, los cuales fueron discriminados del análisis geodinámico. Para el caso de Acambay, solo fueron empleados cinco signos, clasificados como estables, para un 27,7 % de los existentes en el área estudiada. Los signos están identificados con su número en la Figura 3 y con el número del registro de su placa: 03, con número de placa 15001011; 04, con 15001044; y 05, con 15001043 (estos tres están ubicados en el horst septentrional Santa María Tixmadejé, al norte de la falla de Acambay-Tixmadejé); y 01, con número de placa 15001088; y 02, con 15001089 (ubicados en el graben central de Acambay) (Tablas 2 y 3, Figura 4).

Las nivelaciones reiteradas y el levantamiento GPS de precisión contemplaron varias series instrumentales temporales:

- (a) la primera serie de información correspondió a las nivelaciones realizadas por el INEGI, en los años 1998 (tres signos geodésicos: 03, 04 y 05) y 2003 (dos signos geodésicos: 01 y 02), bajo los criterios normativos establecidos en el manual de normas técnicas de la institución para estos fines; mediante el empleo del equipo de nivel digital Dini 12, que permite la generación de datos de primer orden y clase 2, con estándares de exactitud y posicionamiento de sección de 4 mm por la raíz de K y de línea de 5 mm por la raíz de K.
- (b) y la segunda serie correspondió al año 2011, obtenida del levantamiento geodésico con un equipo GPS Trimble, de primer orden, con estándares de exactitud y posicionamiento menores a los referidos, los cuales fueron

corregidos a través del cálculo y análisis de vectores (marca a marca), errores estándar, ajustes y configuración de redes.

En las mediciones geodésicas realizadas en el año 2011 fueron tomadas, para cada signo geodésico, las variables siguientes: fecha y hora de procesamiento, tipo de solución, frecuencia de uso, precisión horizontal (en m), precisión vertical (en m), RMS, razón, efeméride utilizada, modelo de antena, hora de inicio, hora de término y duración del proceso.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los resultados de las mediciones geodésicas, comparando los valores altitudinales (Z) de cada uno de los signos geodésicos ubicados en el horst septentrional Santa María Tixmadejé (Tabla 2), mostró la actividad tectónica reciente de esta morfoestructura, situada en una zona sísmica intraplaca, donde experimenta velocidades de los movimientos verticales recientes, de moderada a alta, del orden de +7,3 mm/año a +12,8 mm/año, según los valores extremos de los signos geodésicos estudiados (signos 03, 04 y 05), tal como se muestra en las Tablas 2 y 3 y en la Figura 5. En el graben, también imperan los ascensos tectónicos, pero con magnitudes mucho menores de las velocidades, con respecto al horst septentrional Santa María Tixmadejé. En esta estructura deprimida, las velocidades de ascenso se mantienen muy bajas, entre +0,4 mm/año y +0,5 mm/año (signos geodésicos 01 y 02, Tabla 2 y 3, Figura 5).

Los rangos de desplazamientos en cada una de las morfoestructuras de Acambay demuestran el carácter de fracturación en bloques, señalado por otros autores (Suter, Quintero & Johnson 1992; Suter *et al.* 1995b; García, Macías & Garduño 2000). Se reflejan en el campo de las velocidades de los movimientos tectónicos verticales recientes mediante las nivelaciones reiteradas y el levantamiento GPS de precisión, así como atestiguan un mayor gradiente geodinámico en el bloque elevado septentrional, correspondiéndose con su estructura geológica, su historia de desarrollo neotectónico y la expresión morfoestructural de su relieve (Figuras 4 y 5).

Por otra parte, este sistema morfoestructural refleja contrastes asimétricos de la morfología y morfometría del relieve entre el bloque elevado, situado al norte de la falla Acambay-Tixmadejé y el graben, situado al sur y limitado en su extremo meridional por la falla Pastores. En el bloque elevado Santa María Tixmadejé, los valores de disección vertical del relieve oscilan entre 200-300 m y 400-500 m, mientras en el graben varían entre 20-50 m y 50-100 m (Pérez *et al.* 2010), lo que refleja una actividad neotectónica más notable en el flanco norte del sistema de bloques

Tabla 2. Signos geodésicos utilizados en la evaluación geodinámica de la región de Acambay, con número de identificación en las figuras, número de placa, coordenadas UTM (x, y, z) para distintos años de nivelación y diferenciales altimétricas 2003-2011, 1998-2011 y 1994-2011

Número de signo geodésico / Registro de placa	Mediciones (1998)			Mediciones (2003)			Mediciones (2011)			Diferencial altimétrico (ΔZ)
	Coordenadas UTM		Altitud (Z)	Coordenadas UTM		Altitud (Z)	Coordenadas UTM		Altitud (Z)	
	Norte (Y)	Este (X)		Norte (Y)	Este (X)		Norte (Y)	Este (X)		
01 / 15001088	-----	-----	-----	2,206,801.085	402,259.135	2,574.089	2,206,801.079	402,259.072	2,574.093	+ 0.004
02 / 15001089	-----	-----	-----	2,208,601.815	402,574.935	2,658.497	2,208,601.809	402,574.883	2,658.500	+ 0.003
03 / 15001011	2,213,089.423	413,300.198	2,712.115	-----	-----	-----	2,213,091.146	413,299.906	2,713.069	+ 0.0954
04 / 15001044	2,212,996.418	405,893.201	2,760.083	-----	-----	-----	2,212,996.952	405,892.845	2,760.249	+ 0.166
05 / 15001043	2,214,043.190	405,284.795	2,807.390	-----	-----	-----	2,214,043.723	405,284.400	2,807.549	+ 0.159

Tabla 3. Magnitud de los movimientos tectónicos verticales recientes en el horst septentrional Santa María Tixmadejé en el graben central de Acambay

Número del signo (Figura 3)	Número de placa	Altitud (z) en el año 1998 (m)	Altitud (z) en el año 2003 (m)	Altitud (z') en el año 2011 (m)	Diferencia altimétrica (m)	Número de años entre mediciones (1998/2003-2011)	Velocidad de los movimientos tectónicos verticales recientes (m/año)
Signos geodésicos ubicados en el graben central de Acambay							
01	15001088	-----	2 574,089	2 574,093	+ 0,004	8	+ 0,0005
02	15001089	-----	2 658,497	2 658,500	+ 0,003	8	+ 0,0004
Signos geodésicos ubicados en el horst septentrional a la falla de Acambay-Tixmadejé							
03	15001011	2 712,115	-----	2 713,069	+ 0,0954	13	+ 0,0073
04	15001044	2 760,083	-----	2 760,249	+ 0,166	13	+ 0,0128
05	15001043	2 807,390	-----	2 807,549	+ 0,159	13	+ 0,0122

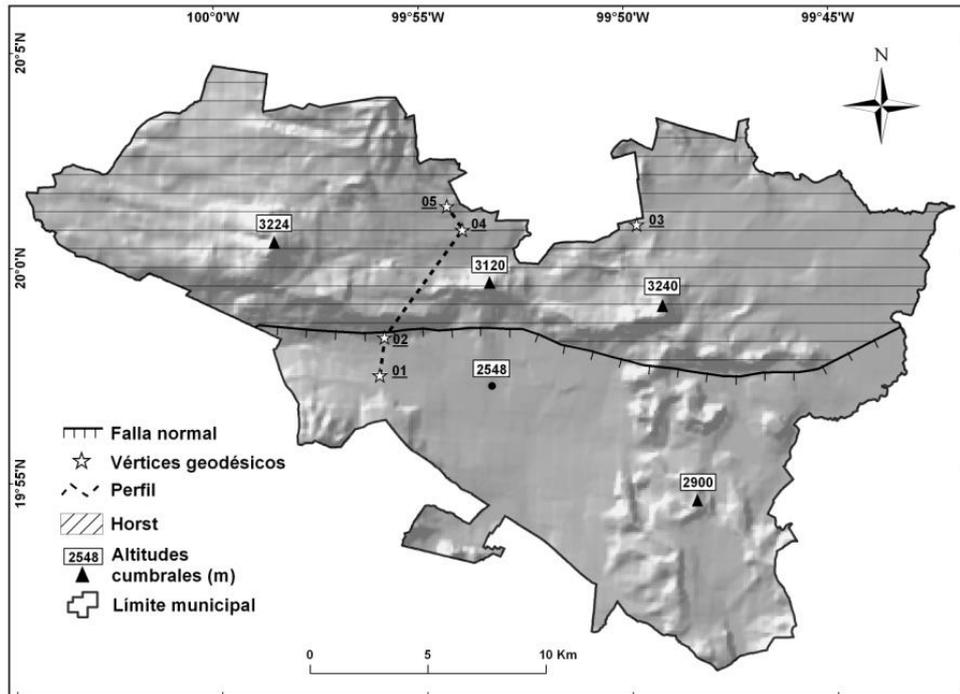


Figura 4. Esquema de localización de los signos geodésicos y perfil morfoestructural y de las velocidades de los movimientos tectónicos verticales recientes en el contexto del sistema del horst de Santa María Tixmadejé y del graben de Acambay.

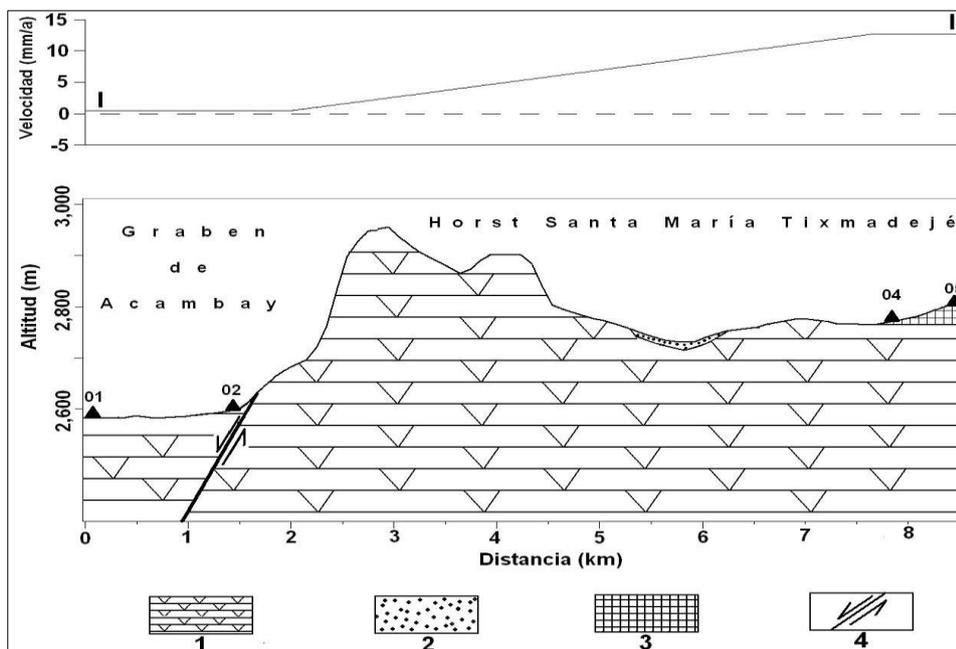


Figura 5. Perfiles morfoestructural del relieve (abajo) y geodinámico (arriba): 1. Tobas volcánicas del Mioceno medio-superior; 2. Depósitos aluviales del Holoceno; 3. Basaltos del Pleistoceno-Holoceno; y 4. Falla normal de desplazamiento dextral Acambay-Tixmadejé.

4. CONCLUSIONES

- El empleo de métodos geodésicos instrumentales de precisión permitió revelar y evaluar cuantitativamente las correlaciones entre los movimientos tectónicos verticales recientes y la diferenciación morfoestructural del relieve del sector oriental del sistema de horst y graben. Singular interés representa la aplicación de la metodología geodésica para morfoestructuras regionales y locales en México y, en especial, en la región de Acambay, donde existen regímenes neotectónico y sismotectónico activos, notables deformaciones endógenas y exógenas de los morfoelementos del relieve y evidentes desplazamientos verticales de sus estructuras.
- Las velocidades de los movimientos tectónicos verticales recientes reflejaron la tendencia neotectónica de las estructuras de horst y graben de Acambay, el estilo morfoestructural tridimensional de su relieve y el gradiente geodinámico de la falla Acambay-Tixmadejé, señalada por muchos autores referidos en el trabajo. Los valores de ascenso revelados en este estudio oscilan entre +7,3 mm/año a +12,8 mm/año, en el horst septentrional Santa María Tixmadejé; mientras que en el graben central de Acambay los ascensos son muy débiles, del orden de +0,4 mm/año a +0,5 mm/año.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Facultad de Geografía de la UAEMex y al Instituto de Geografía de la UNAM, su apoyo en las investigaciones de campo y gabinete. Al Instituto Nacional de Estadística y Geografía por los datos de las nivelaciones de los años 1998 y 2003 y a Jesús Emmanuel Bustamante Fernández por el apoyo tecnológico. A los árbitros anónimos y editores, por sus valiosos señalamientos y comentarios.

6. REFERENCIAS

- AGUAYO, J. E. & TRÁPAGA, R. 2013: *Geodinámica de México y minerales del mar*. Fondo de Cultura Económica, México, D. F.
- AGUIRRE, G. J. 1995: La Toba Amealco y su correlación con la formación Las Américas a través del graben de Acambay, parte central de la Faja Volcánica Mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 12(1): 17-21.
- ARGUS, D. F. & GORDON, R. G. 2001: Present tectonic motion across the Coast Ranges and San Andreas Fault system in central California. *Geological Society of America Bulletin* 113(12): 1580-1592.

- ASTIZ, L. M. 1980: *Sismicidad en Acambay, Estado de México -el temblor del 22 de febrero de 1979*. Tesis de grado. UNAM, México, D.F. 130 p.
- EGO, F. & ANSAN, V. 2002: Why is the Central Trans-Mexican Volcanic Belt (102-99° W) in transtensive deformation? *Tectonophysics* 359(1): 189-208.
- ENMAN, S. V. & NIKONOV, A. A. 1993: A comparative analysis of maps of vertical crustal movements for European Russia. *Journal of geodynamics* 18(1-4): 33-41.
- FERRARI, L. 2000: Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 53(1): 84-92.
- FINKO, E. A. 1992: The relationship of recent vertical movements to the morphostructural pattern of the Kazakn shield. *Journal of geodynamics* 15(3-4): 209-214.
- GARCÍA, A.; MACIAS, J. L. & GARDUÑO, V. H. 2000: Miocene to recent structural evolution of the Nevado de Toluca Volcano region, Central Mexico. *Tectonophysics* 318(1): 281-302.
- GARDUÑO, V. H.; PÉREZ, R.; ISRADE, I.; RODRÍGUEZ, M. A.; SZYNKARUK, E.; HERNÁNDEZ, V. M.; GARCÍA, M. L.; CORONA, P.; OSTROUMOV, M.; MEDINA, V. H.; GARCÍA, G.; CARRANZA, O.; LOPEZ, E. & MORA, J. C. 2009: Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central Mexico. *Geofísica Internacional* 48(3): 319-335.
- GARDUÑO, V. H.; ARREYQUE, E.; ISRADE, I. & RODRÍGUEZ, G. M. 2001: Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 18(1): 37-54.
- GERI, G.; PERUSINI, P. & ROSSI, A. 1984: Topografic changes in the Travale-Radicondoli geothermal field during the first ten years of exploitation. 3rd. Int. Symp. On Land Subsidence. Venice.
- INSTITUTO DE GEOFÍSICA. 2010: Cien años de sismicidad en México. Consultada: 20 de marzo de 2012. Disponible en: <http://usuarios.geofisica.unam.mx/vladimir/sismos/100a%F1os.html>
- LANGRIDE, M.; WELDON, R.; MOYA, J. & SUÁREZ, G. 2000: Paleoseismology of the 1912 Acambay earthquake and the Acambay-Tixmadejé fault, Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 105(B2): 3019-3037.
- KASSER, M.; RUEGG, J. C. & LOPINE, J. C. 1987: Geodetic measurements on the Asal Rift (Djibouti): twelve years of observations. *Journal of geodynamics* 7(3-4): 221-226.
- LILIENBERG, D. A.; HERNÁNDEZ, J. R.; MARQUÉS, M. E. & RUEDA, J. 1988: General Trends and Regional Differentiation of the Recent Geodynamics of

- Morphostructures of an Island Interplate Zone: Studies in a Complex Polygon at Santiago de Cuba and in an Eastern Cuba Model Area. *Journal of geodynamics* 9(2-4): 305-318.
- LILIENBERG, D. A.; HERNÁNDEZ, J. R.; MARQUES, M. E. & ÁLVAREZ, L. 1993a: *Movimientos tectónicos recientes de Cuba. El polígono geodinámico complejo de Santiago de Cuba*. T. 1. Ed. Academia, La Habana, 453 p.
- LILIENBERG, D. A.; HERNÁNDEZ, J. R.; MARQUES, M. E.; ÁLVAREZ, L. 1993b: *Movimientos tectónicos recientes de Cuba. El polígono geodinámico complejo de Santiago de Cuba*. T.2. Ed. Academia, La Habana, 118 p.
- MAGAZ, A. R.; HERNÁNDEZ, J. R.; DÍAZ, J. L. & HERNÁNDEZ, I. 2006: Formación y consolidación de las morfoestructuras septentrionales de la región centro del archipiélago cubano y su dinámica reciente. *Investigaciones geográficas* 61: 7-23.
- MAPA GEOLÓGICO. 2010: Instituto de Fomento Minero del Estado de México. Escala 1:250000. Toluca, 1 hoja.
- MAPAS TOPOGRÁFICOS. 2009: INEGI. Escala 1:50000. Aguascalientes, 2 hojas.
- MARQUES, A. P. 2003: *Manual de Goniometría*. 2^{da} ed. Editora Manole, São Paulo.
- MÁRQUEZ, B. & DE METS, C. 2009: Deformation of Mexico from continuous GPS from 1993 to 2008. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10(2).
- MOLINA, L. F. 2006: *Campo de velocidades de la falla Boconó a partir de observaciones GPS*. Tesis de grado. Sartenejas. 39 p.
- NIXON, G. T. 1982: The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and the structure of subducted ocean lithosphere. *Geological Society of America Bulletin* 93(6): 514-523.
- NORINI, G.; CAPRA, L.; BORSELLI, F. R.; ZUNIGA, F.; SOLARI, L. & SAROCCHI, D. 2010: Large scale landslides triggered by Quaternary tectonics in the Acambay graben, Mexico. *Earth Surf. Process. Landforms* 35(12): 1445-1455.
- OZENER, H.; ARPAT, E.; ERGINTAV, S.; DOGRU, A.; CAKMAK, R.; TURGUT, B. & DOGAN, U. 2010: Kinematics of the eastern part of the North Anatolian Fault Zone. *Journal of geodynamics* 49(3): 141-150.
- PAPAZACHOS, C. B.; KIRATZI, A. A. & PAPAZACHOS, B. C. 1992: Rates of active crustal deformations in the Aegean and the surrounding area. *Journal of geodynamics* 16(3): 147-179.
- PARDO, M. & SUÁREZ, G. 1993: Steep subduction geometry of the Rivera plate beneath the Jalisco block in western Mexico. *Geophysical research letters* 20(21): 2391-2394.
- PASQUARÉ, G.; FERRARI, L.; GARDUÑO, V. H.; TIBALDI, A. & VEZZOLI, L. 1991: Geologic map of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacan, Mexico. *Geological Society of America*.

- PÉREZ, J. L.; HERNÁNDEZ, J. R.; ROSETE, F.; VILLALOBOS, M.; MÉNDEZ, A. P. & NAVARRO, E. 2010: Unidades morfométricas del relieve mexicano, a escala 1:250000. INECC, México, D. F., Hoja E14-2. Consultada: 31 marzo 2014. Disponible en: <http://www2.inecc.gob.mx/emapas/cartas.html>
- PERSAUD, M.; ZÚÑIGA, R.; AGUIRRE, G.; VILLAMOR, P. & LANGRIDGE, R. 2006: Paleoseismology of The Pastores and Venta de Bravo faults, Acambay graben, Trans-Mexican Volcanic belt, Central Mexico. *Geos* 26(1): 61-62.
- PONCE, L.; GAULON, R.; SUÁREZ, G. & LOMAS, E. 1992: Geometry and state of stress of the downgoing Cocos plate in the Isthmus of Tehuantepec, Mexico. *Geophysical Research Letters* 19(8): 773-776.
- QUINTERO, O. 2002: Análisis estructural de fallas potencialmente activas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 55(1): 1-11.
- RAMÍREZ, M. T. 1998: Geomorphic assessment of active tectonics in the Acambay graben, Mexican volcanic belt. *Earth Surface Processes and Landforms* 23(4): 317-332.
- ROLDÁN, J.; AGUIRRE, G. J. & RODRÍGUEZ, J. L. 2011: Depósito de avalancha de escombros del volcán Temascalcingo en el graben de Acambay, Estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 28(1): 118-131.
- RONTOGIANNI, S. 2010: Comparison of geodetic and seismic strain rates in Greece by using a uniform processing approach to campaign GPS measurements over the interval 1994-2000. *Journal of geodynamics* 50(5): 381-399.
- ROSTOM, R. S. 1991: Monitoring recent crustal movements in the Kenya rift valley by global positioning System (GPS): a (GPS) -a proposal. *Journal of geodynamics* 14(1-4): 65-72.
- SECOFI. 1996: Monografía geológico-minera del Estado de México. Consejo de Recursos Minerales, México, D. F., 148 p.
- SUTER, M.; QUINTERO, O. & JOHNSON, C. A. 1992: Active faults and state of stress in the central part of the Trans-Mexican volcanic belt, Mexico, 1, The Venta de Bravo fault. *J. Geophys. Res.* 97: 11983-11994.
- SUTER, M.; CARRILLO, M.; LÓPEZ, M. & FARRAR, E. 1995a: The Aljibes half-graben - Active extension at the boundary between the trans-Mexican volcanic belt and the Basin and Range Province, Mexico. *GSA Bulletin* 107(6): 627-641.
- SUTER, M.; QUINTERO, O.; LÓPEZ, M.; AGUIRRE, G. & FARRAR, E. 1995b: The Acambay graben: active intraarc extension in the TMVB, Mexico. *Tectonics* 14: 1245-1262.
- SUTER, M.; CARRILLO, M. & QUINTERO, O. 1996: Macroseismic study of shallow earthquakes in the central and eastern parts of the Transmexican volcanic belt, Mexico. *Bulletin of the Seismological Society of America* 86(6): 1952-1963.

- SUTER, M.; LÓPEZ, M.; QUINTERO, O. & CARRILLO, M. 2001: Quaternary intra-arc extension in the central Trans-Mexican volcanic belt. *Geological Society of America Bulletin* 113(6): 693-703.
- URBINA, F. & CAMACHO, H. 1913: La zona megasísmica Acamabay-Timaxdejé, Estado de México, conmovida el 19 de noviembre de 1912. *Boletín del Instituto Geológico de México* 32: 175 p.
- VÖLKSEN, C.; ÁRNADÓTTIR, T.; GEIRSSON, H. & VALSSON, G. 2009: Present day geodynamics in Iceland monitored by a permanent network of continuous GPS stations. *Journal of geodynamics* 48(3): 279-283.
- ZEMAN, A. 1988: General trends of normal height changes in Czechoslovakia for a period of approximately 33 years. *Journal of geodynamics* 10(2): 167-174.

Luis Miguel Espinosa-Rodríguez, geo_luismiguel@hotmail.com
Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México

José Ramón Hernández-Santana, santana@igg.unam.mx
Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México

Ana Patricia Méndez-Linares, patym1@igg.unam.mx
Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.