



Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década

Luca Ferrari

Instituto de Geología, UNAM, Apdo. Postal 70-296, Cd. Universitaria,
04510 México D.F., luca@geologia.unam.mx

Resumen

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), el arco volcánico construido sobre la margen meridional de la Placa Norteamericana, presenta características peculiares tal como una gran variabilidad del estilo volcánico y de la composición química de sus productos, la oblicuidad de su parte central y oriental con la trinchera y la notable variación del ancho del arco. En esta reseña se sintetizan las principales contribuciones en campo geológico, geoquímico y geofísico sobre este arco volcánico según los artículos publicados durante la década de los noventa. Los mayores avances lo constituyen la reconstrucción de la estructura del sistema de subducción, el establecimiento de la edad y la evolución geológico-tectónica de la FVTM; la reconstrucción de la historia volcánica de los centros activos y la evaluación de su riesgo; y el esclarecimiento de la petrogenesis de los magmas. Sin embargo, a pesar de los avances, no se ha aclarado completamente el origen y la evolución de la FVTM. En el futuro, las investigaciones que pueden contribuir a solucionar los problemas de interpretación de la FVTM tendrán que enfocarse al conocimiento detallado de la geología del arco volcánico y de la estructura físico-química de la corteza y el manto por debajo de él.

Abstract

The Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB), the volcanic arc built on the southern edge of the North America plate, presents several peculiar features such as large arc parallel variation in volcanic style and chemical composition, a slight obliquity with respect to the trench and a significant variation in the arc width. In this review I synthesize the main geologic, geophysics and geochemical contributions on this arc based on papers published during the last decade. Significant advances in this respect were the reconstruction of the structure of the subduction system; the establishment of the age and geologic evolution of the TMVB; the reconstruction of the volcanic history of the active centers, the volcanic hazard assessment; and the deeper insight into the petrogenesis of the magmas. Despite these advances, the origin and the evolution of the TMVB is not completely understood yet. In the future, detailed geologic and tectonic studies of the arc and geophysical and geochemical investigations on the geometry and nature of the crust and underlying mantle may contribute to solve these problems.

INTRODUCCIÓN

La Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) es el arco volcánico que se desarrolla sobre la margen sudoccidental de la Placa de Norteamérica como resultado de la subducción de las Placas Rivera y Cocos a lo largo de la trinchera de Acapulco (Figura 1). Los estudios sobre la FVTM comenzaron de manera puntual en la década de los sesenta. Una muestra representativa de los conocimientos obtenidos en aquella etapa la presenta Mooser (1972) quien también propone el primer modelo de la estructura del arco. En la década siguiente se realizaron los primeros trabajos sistemáticos que culminaron con la importante síntesis regional de Demant (1981). En los ochenta se llevaron a cabo trabajos volcanológicos y geoquímicos que aportaron conocimientos significativos sobre la mayoría de los grandes aparatos y campos volcánicos cuaternarios y se publicaron los primeros modelos sobre la tectónica de la parte occidental de la FVTM. El estado del arte para finales de aquella década fue resumido por Verma (1987) en ocasión de la publicación de un volumen especial de la revista Geofísica Internacional dedicado a la FVTM. En el presente trabajo se pretende sintetizar las contribuciones principales publicadas desde aquel entonces, así como señalar los problemas que quedan por resolver.

CARACTERÍSTICAS DISTINTIVAS DE LA FVTM

La FVTM constituye unos de los arcos volcánicos más complejos y variados de la región circum-Pacífica. Entre sus rasgos peculiares se pueden citar: a) la gran variabilidad del estilo volcánico y composición química a lo largo del arco; b) la presencia de un volcanismo alcalino de tipo intraplaca (asimilado a los Ocean Island Basalt) espacialmente asociado al volcanismo dominante relacionado con la subducción; c) la oblicuidad de su parte central y oriental con la trinchera; y d) la notable variación del ancho del arco (Figura 1).

a) La FVTM se suele dividir en tres sectores: occidental, central y oriental (Figura 2) que presentan diferencias significativas en lo que respecta al tipo de volcanismo y su composición química. En el sector occidental, limitado al este por el rift de Colima, el arco volcánico se sobrepone a la parte norte del bloque Jalisco (BJ) y al límite meridional de la Sierra Madre Occidental (SMO). El volcanismo emplazado en el límite sur de la SMO es claramente bimodal, formado tanto por estratovolcanes y complejos de domos dacítico-riolíticos como por centros monogenéticos basálticos. En cambio, el volcanismo emplazado dentro del BJ

es casi exclusivamente monogenético y de composición basáltico-andesítica.

En el sector central, entre el rift de Colima y el sistema de fallas Taxco-Querétaro (Figura 2), se desarrolla el campo volcánico Michoacán-Guanajuato, formado por centros monogenéticos y pequeños volcanes escudo de composición basáltica o basáltico-andesítica. Los estratovolcanes están completamente ausentes, si se exceptúa el caso del Cerro Tancitaro.

En el sector oriental, al oriente del sistema Taxco-Querétaro, la mayor parte del volcanismo está emplazado en grandes estratovolcanes, calderas y complejos de domos de composición de andesítica a riolítica alineados a lo largo de estructuras corticales, mientras que los volcanes monogenéticos de composición basáltica representan sólo una pequeña fracción del volumen de magma emplazado. En este sector el arco volcánico se emplaza sobre una corteza de edad precámbrica presumiblemente de tipo cratónico (Oaxaquia, Ortega-Gutiérrez et al., 1996).

b) Variedades de rocas volcánicas alcalinas han sido emplazadas a lo largo de toda la FVTM. Sólo una parte de las rocas alcalinas tiene afinidad intraplaca y puede interpretarse como basaltos de isla oceánica (OIB) derivados de un manto no contaminado por la subducción. Lavas OIB se han emplazado desde el Mioceno al Presente a lo largo de toda la FVTM pero más frecuentemente en el sector occidental (Tabla 1).

c) La FVTM no se encuentra a una distancia constante de la trinchera de Acapulco. Mientras que en el sector occidental el frente volcánico es paralelo a la trinchera, en el sector central y oriental tiende a alejarse de ella. Como resultado el frente volcánico tiene un ángulo de aproximadamente 15° con respecto a la trinchera.

d) La tasa de emplazamiento volcánico y el área cubierta por el volcanismo Plio-Cuaternario no son homogéneas en la FVTM. El arco volcánico Plio-Cuaternario tiene un ancho variable entre un máximo de 200 km en la región del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato y un mínimo de 65 km en las regiones de Chapala y Morelia (Figura 1), que corresponden también a las áreas con menor aporte magmático del arco.

A diferencia de otros arcos volcánicos los rasgos peculiares descritos arriba no se relacionan directamente con la edad y la estructura térmica de las placas en subducción. La litósfera oceánica en

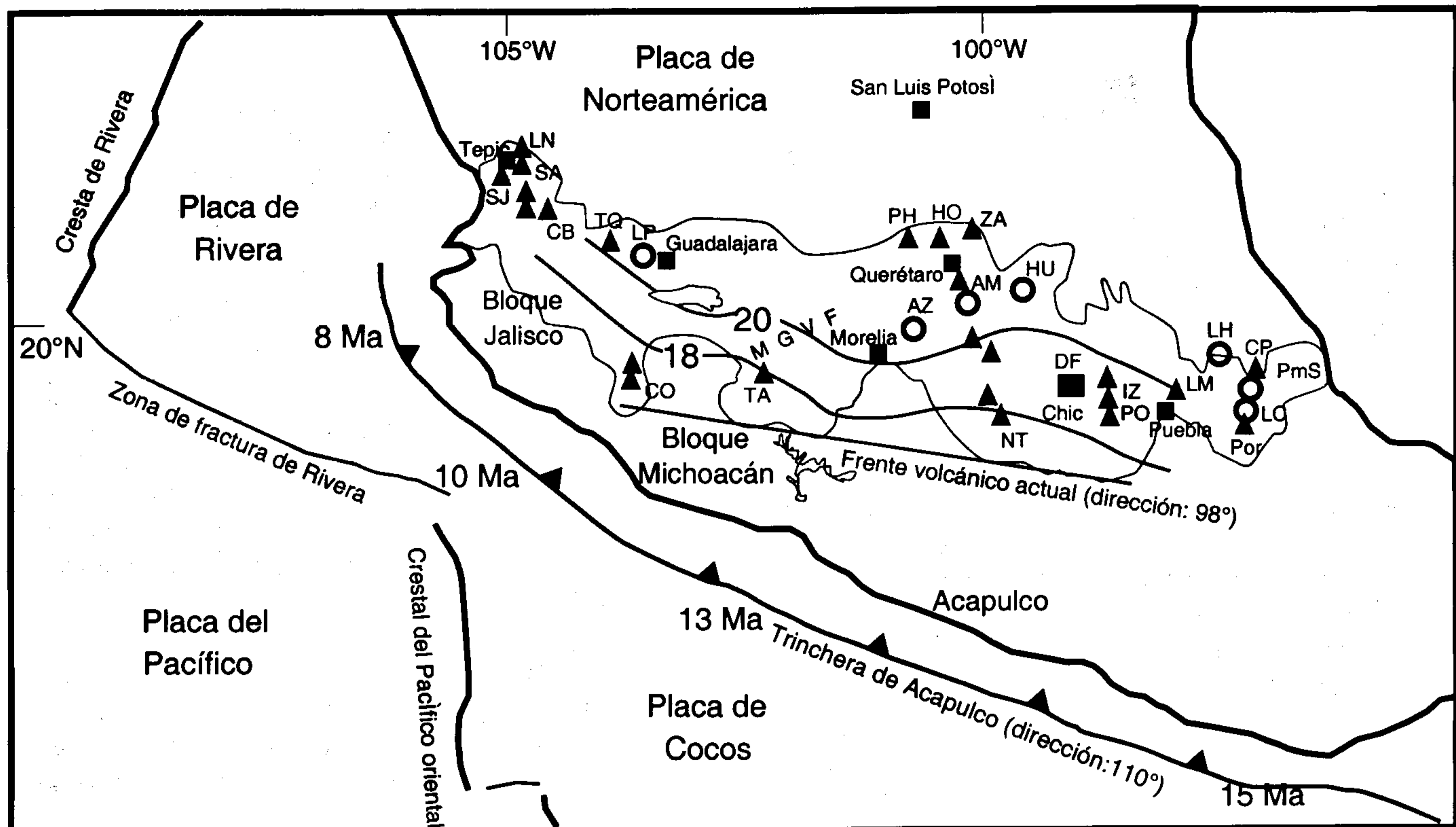


Figura 1. Entorno tectónico y principales centros volcánicos de la Faja Volcánica Transmexicana. Las edades en la trinchera se refieren a la placa que entra en la zona de subducción. Las líneas interrumpidas representan la posición de las isócronas de la placa subducida, cuyas edades se indican (basado en Kostoglodov y Bandy, 1995, corregido por la inclinación del plano de Benioff de acuerdo a la estimación de Pardo y Suárez, 1995). Los triángulos indican los principales estrato-volcanes; los mencionados en el texto son: LN = Las Navajas; SA = Sangangüey; SJ = San Juan; CB = Ceboruco; TQ = Tequila; CO = Volcán de Colima; TA = Tancítaro; PH = Palo Huérfano; HO = La Joya; ZA = El Zamorano; NT = Nevado de Toluca; IZ = Iztaccíhuatl; PO = Popocatepetl; LM = La Malinche; CP = Cofre de Perote; Por = Pico de Orizaba. Los círculos indican las calderas; las mencionadas en el texto son: LP = La Primavera; AZ = Los Azufres; AM = Amealco; HU = Huichapan; LH = Los Humeros; LC = La Cumbre. Los principales campos volcánicos mencionados en el texto son: MGVF = campo volcánico Michoacán-Guanajuato; Chic = Sierra Chichinautzin; PmS = Chiconquiaco-Palma Sola.

subducción en la trinchera tiene edades variables entre 8 y 15 Ma pero por debajo del arco volcánico Plio-Cuaternario se encuentra una placa de edad uniforme de entre 18 y 20 Ma (Bandy y Kostoglodov, 1995) (Figura 1).

AVANCES EN LA ÚLTIMA DÉCADA

Edad y evolución geológica de la FVTM

La edad de la FVTM ha sido un tema controversial. En el pasado se habían sugerido fechas variables desde Cuaternario (Demant, 1978; 1981), Plioceno tardío (Cantagrel y Robin, 1979), Plioceno temprano (Nixon *et al.*, 1987) hasta Oligoceno (Mooser, 1972). Sin embargo, en la última década, la cartografía geológica apoyada en un gran número de nuevas edades isotópicas, ha llegado a esclarecer la evolución espacio-temporal del volcanismo en México central. La recopilación y el análisis de varios centenares de edades ha permitido visualizar la reorientación

progresiva del volcanismo continental desde la Sierra Madre Occidental a la FVTM, indicando que un arco volcánico con la orientación y las características químicas de esta última existía ya desde el Mioceno superior (Ferrari *et al.*, 1994a, y 1999a) (Figura 2). Desde entonces el frente volcánico ha migrado hacia la trinchera, sobre todo en la parte occidental y central de la FVTM (Ferrari *et al.*, 1994a; Delgado *et al.*, 1995).

Estos estudios han permitido además reconocer que el volcanismo de la FVTM se caracteriza por pulsos de mayor intensidad separados por periodos de actividad reducida (Figura 3). El primer pulso tuvo lugar al inicio del Mioceno tardío (10-9 Ma), cuando la FVTM se caracteriza por el emplazamiento de grandes mesetas andesítico-basálticas en el sector occidental y central (Moore *et al.*, 1994; Ferrari *et al.*, 1994b, 1999c; Richter *et al.*, 1995) y de estratovolcanes andesíticos como el Zamorano (Carrasco-Núñez *et al.*, 1989) Palo Huérfano (Pérez-Venzor *et al.*, 1997), La Joya (Valdez-Moreno *et al.* 1996) y Cerro Grande (Carrasco-Núñez *et al.*, 1997) en el oriente. Posteriormente a los 8 Ma, se observa

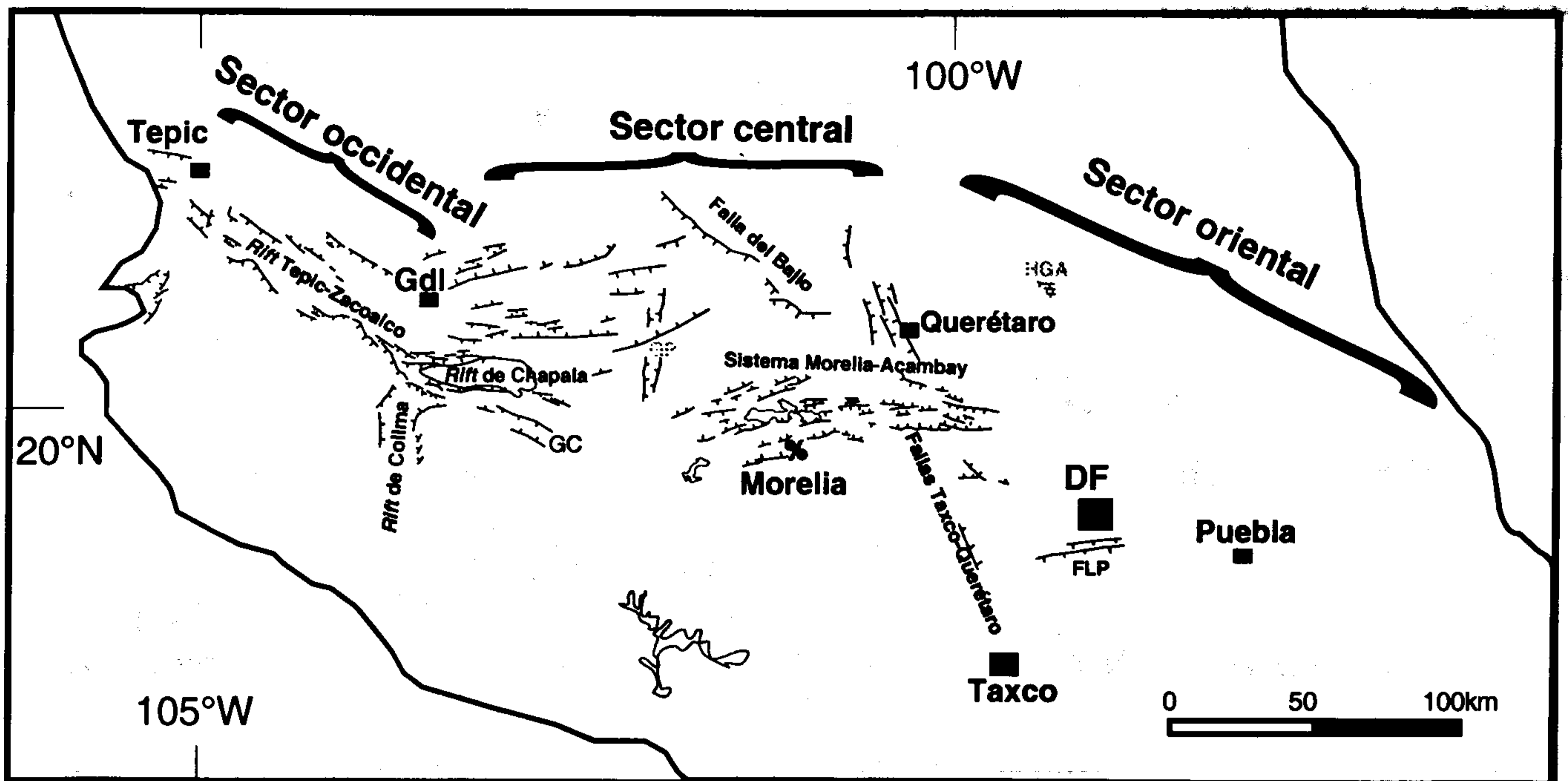


Figura 2. Principales sistemas de fallas con edades inferiores a los 10 Ma que afectan a la Faja Volcánica Transmexicana (basados en Ferrari y Rosas-Elguera, 1999a; Ferrari *et al.*, 1999c; Alaniz-Álvarez *et al.*, 1998). GC = Graben de Cotija; GP = Graben de Penjamillo; HGA = Semigraben de Aljibes; FLP = Falla de La Pera. Nótese la ausencia de fallamiento en la parte oriental de la FVTM.

una disminución del volcanismo a lo largo de toda la FVTM. En el Plioceno inferior (5-3 Ma) el volcanismo se vuelve marcadamente bimodal: complejos de domos riolíticos se emplazaron entre Tepic y Guadalajara (Gilbert *et al.*, 1985; Richter *et al.*, 1995; Ferrari *et al.*, 1997, 1999b) y en el sector central de la FVTM (Pasquaré *et al.*, 1991), donde además se formaron las calderas de Los Azufres, Amealco y Huichapan (Ferrari *et al.*, 1991; Aguirre-Díaz, 1997; Aguirre-Díaz *et al.*, 1997). En el sector occidental el comienzo de este volcanismo pliocénico está marcado por el emplazamiento de basaltos alcalinos entre Tepic y Guadalajara (Moore *et al.*, 1994; Richter *et al.*, 1995) y en la parte norte del rift de Colima (Allan, 1986). Un último pulso volcánico parece caracterizar el Plioceno tardío-Cuaternario (Figura 3), cuando la composición dominante de los productos se vuelve otra vez intermedio-máfica.

Marco geodinámico y tectónico

La relocalización precisa de los sismos de subducción bajo México central junto con estudios magneto-telúricos han permitido reconstruir la geometría de las placas en subducción, evidenciando que el frente volcánico Cuaternario se encuentra en correspondencia de los 80-100 km de profundidad del plano de Benioff. De acuerdo a estos datos el ángulo de $\sim 15^\circ$ que guarda el frente volcánico de la FVTM

respecto a la trinchera de Acapulco resultaría ser una consecuencia de la variación de la inclinación de la placa en subducción. En particular, el plano de Benioff que define la placa de Rivera por debajo del bloque Jalisco tendría un ángulo de $45-50^\circ$ (Pardo y Suárez, 1993; 1995), se volvería progresivamente más somero en correspondencia de Michoacán hasta volverse subhorizontal en Guerrero y Oaxaca (Pardo y Suárez, 1995; Arzate *et al.*, 1995). El ángulo aumentaría otra vez en correspondencia de la región ístmica y centroamericana (Pardo y Suárez, 1995). Sin embargo, los sismos son casi ausentes por debajo de la FVTM, lo que deja mucha incertidumbre sobre la geometría de la placa en subducción en esta región. El análisis de los eventos recopilados en el catálogo sísmico del Servicio Sismológico Nacional (R. Zúñiga, comunicación personal) sugiere que la placa podría hundirse con alto ángulo en correspondencia de la FVTM.

Datos gravimétricos (Urrutia-Fucugauchi y Flores-Ruiz, 1996) indican que el espesor cortical de la placa superior es máximo en la parte oriental de la FVTM, donde llega a los 50 km. En esta región se infiere la existencia de un núcleo de basamento Precámbrico (Ortega-Gutiérrez *et al.*, 1995). Hacia el occidente el espesor disminuye considerablemente, hasta llegar a 28 km en Arteaga (Pérez-García y Urrutia-Fucugauchi, 1997), al suroeste del campo volcánico Michoacán-Guanajuato.

Tabla 1 - Edad y localización del volcanismo tipo isla oceánica (OIB) e inicio de la extensión intra-arco en la FVTM

Volcanismo OIB	Edad (Ma)	Longitud W	Referencia
Costa de Nayarit	3.3 – 1	105°15'	Righter et al., 1995
Amatlán de Cañas-Atenguillo (parte norte del bloque Jalisco)	3.6 - 0.65	104°30'	Righter et al., 1995
Norte de Tequila (frontera norte del Bloque Jalisco)	3.7 - 0.36	~104°	Moore et al., 1994
Región de Guadalajara	4.7 - 3.7	103°15'	Moore et al., 1994
Campo volcánico Michoacán- Guanajuato	Plioceno tardío – Cuaternario	~101°45'	Hasenaka y Carmichael, 1995
Sierra Chichinautzin	Cuaternario	~99°	Márquez et al., 1999; Wallace y Carmichael, 1999
Chiconquiaco-Palma Sola	Mioceno tardío	~96°30'	Negendank et al., 1997
Inicio de la extensión			
Este de Tepic	Mioceno tardío	104°30'	Ferrari et al., 1997, 1999
Región del Ceboruco	Mioceno tardío	104°30'	Ferrari et al., 1997, 1999
Lago de Chapala	Mioceno tardío	~103°	Rosas-Elguera y Urrutia-Fucugauchi, 1998
Lago de Cuitzeo	Mioceno tardío	~101°	Israde-Alcántara, 1997

La deformación en la placa superior se concentra principalmente a lo largo de sector occidental y central de la FVTM. Una tectónica transcurrente y/o transtensional caracteriza estas regiones en el Mioceno medio y tardío (Ferrari, 1995; Ferrari et al., 1994a, 1994c, 1997, 1999c). Sin embargo, desde finales del Mioceno, ha actuado una extensión casi perpendicular al arco volcánico. Suter et al. (1992 y 1995a y b) han documentado en detalle la extensión intra-arco reciente y activa en la parte central de la FVTM, calculando tasas de extensión entre 0.7 y 0.4 mm/año. De manera similar, en la parte occidental de la FVTM, se ha reconocido una extensión perpendicular al arco con tasas de extensión inferiores al mm/año activa desde el Mioceno tardío (Barrier et al., 1990; Nieto-Obregón et al., 1992; Ferrari et al., 1994c; Suárez et al., 1994; Ferrari y Rosas, 1999a). La ausencia de fallamiento transcurrente derecho en el Plio-Cuaternario a lo largo del rift Tepic-Zacoalco y la baja tasa de deformación de estos sistemas de fallas han puesto en duda el modelo de rifting hacia el noroeste del bloque Jalisco por efecto de un “brinco” hacia el este de la cresta de Pacífico oriental (Luhr et al., 1985; Allan et al., 1991), que había dominado en la literatura en la década de los ochenta. En la actualidad, se considera más probable que la

tectónica extensional del la FVTM occidental estuvo relacionada con la reactivación de las fronteras del bloque Jalisco inducida por las fuerzas aplicadas en los límites de placas y, en particular, por la diferente geometría de las placas de Rivera y Cocos subducidas bajo esta parte de México (Bandy et al., 1995; Rosas et al., 1996).

Un modelo que relaciona la tectónica con el estilo del volcanismo ha sido recientemente propuesto por Alaniz-Alvarez et al. (1998, 1999), quienes, partiendo del modelo teórico de Takada (1994), propusieron que los centros poligenéticos mayores de la FVTM están alineados a lo largo de las estructuras transversales al arco debido a que estas últimas tienen una baja tasa de deformación. Este modelo fue cuestionado por Suter (1999), Contreras y Gómez Tuena (1999) y Siebe et al. (1999) quienes pusieron en duda la aplicabilidad del modelo de Takada a la FVTM y la simplificación de la tectónica de la región propuesta por Alaniz-Álvarez et al. (1998). Sin embargo, considerando que la deformación puede ser liberada por el magmatismo (Alaniz-Álvarez et al., 1999) y que no se cuestionó que la velocidad de extensión en zonas transversales al arco debe ser muy pequeña, se puede decir que el

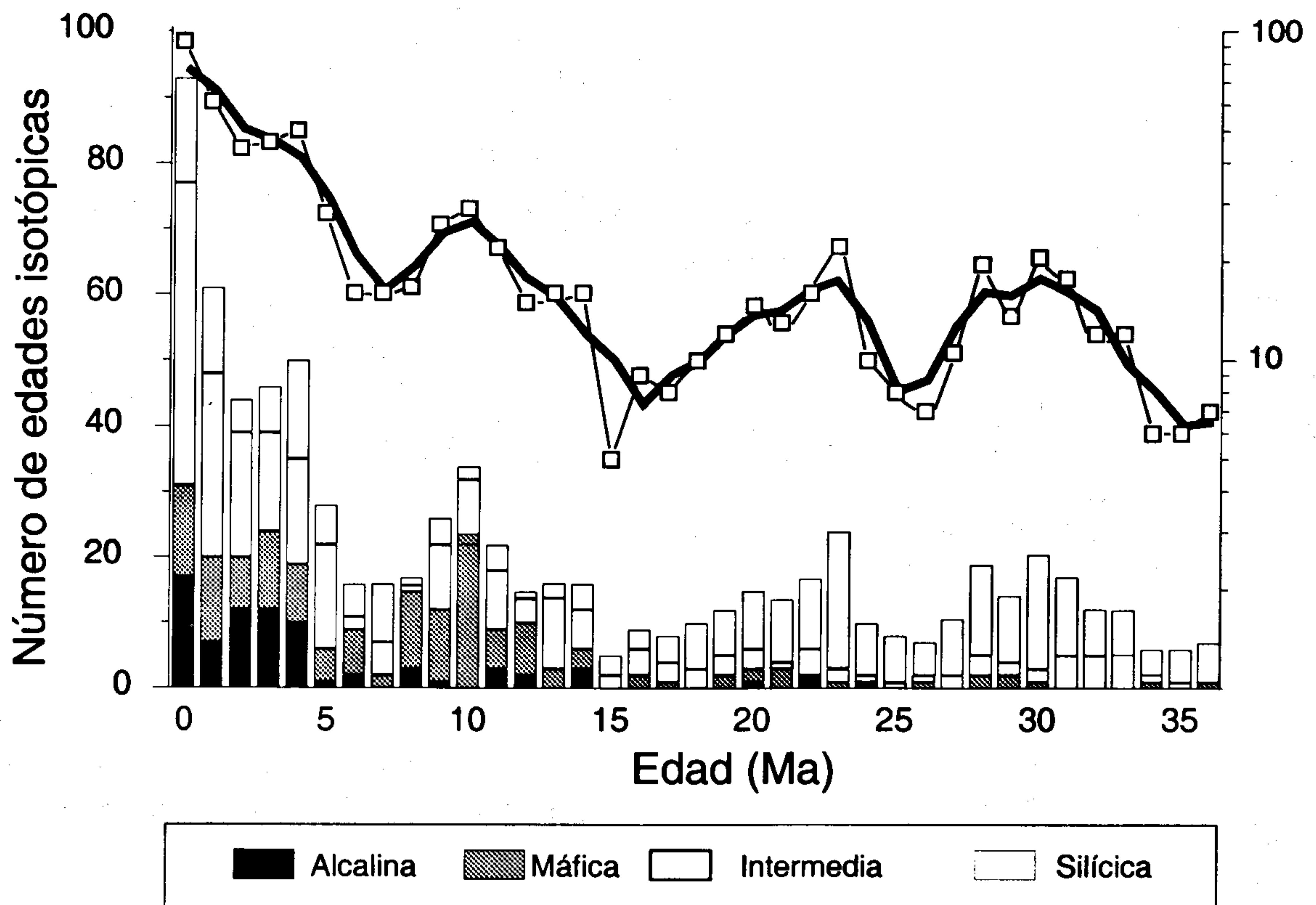


Figura 3. Distribución en valores absolutos (escala en la izquierda) y logarítmicos (escala en la derecha) de 771 edades radiométricas para México central por intervalos de 1 Ma. La distribución multimodal sugiere que el volcanismo haya ocurrido en pulsos. La línea gruesa se obtuvo promediando dos valores adyacentes. Tomado de Ferrari *et al.* (1999a).

modelo de Alaniz-Alvarez y colaboradores (1998) explica la distribución peculiar del volcanismo monogenético y poligenético de la FVTM.

Geología regional y local

Muchos estudios volcanológicos y geológicos se han concentrado sobre los centros volcánicos que presentan mayor riesgo para la población. En este campo, la contribución mayor de la década ha sido probablemente la de reconocer que la mayoría de los grandes estratovolcanes andesítico-dacíticos de la FVTM tuvieron uno o más colapsos sectoriales durante el Holoceno. Depósitos de avalancha de escombros relacionados con estos fenómenos cataclísmicos han sido detectados en los volcanes Colima (Luhr y Prestegard, 1988; Stoopes y Sheridan, 1992), Jocotitlán (Siebe *et al.*, 1992), Nevado de Toluca (Macías *et al.*, 1997), Popocatepetl (Robin y Boudal, 1987; Siebe *et al.*, 1995) y Pico de Orizaba (Carrasco-Núñez *et al.*, 1993; Höskuldsson y Robin, 1993, Carrasco-Núñez y Gómez-Tuena, 1997).

Además, han sido publicados mapas geológicos con diferente grado de detalle de los volcanes Colima

(Rodríguez-Elizarrarás, 1995), Las Navajas (Nelson y Hegre, 1990), Nevado de Toluca (Macías *et al.*, 1997); Iztaccíhuatl (Nixon, 1989) y Pico de Orizaba (Carrasco-Núñez y Ban, 1994). Sin embargo, volcanes importantes como el Cofre de Perote, el Volcán San Juan, La Malinche y, en parte, el mismo Popocatepetl carecen de un mapa geológico completo. También se han realizado estudios geológicos y geocronométricos detallados de las calderas y complejos dómicos de edad Plioceno de la parte central de la FVTM (Amealco, Huichapan, Los Agustinos, etc.) (Aguirre-Díaz, 1997; Aguirre-Díaz *et al.*, 1997). Estudios similares de otros complejos caldéricos, como Los Azufres (Ferrari *et al.*, 1991; Pradal y Robin, 1994; Campos-Enríquez y Garduño-Monroy, 1995) y Zitácuaro (Capra *et al.*, 1997), han mostrado que éstos se caracterizan por una historia más larga, iniciada posiblemente en el Mioceno y caracterizada por varias reactivaciones hasta el Cuaternario.

La geología regional de la parte central y occidental de la FVTM ha sido sintetizada en los trabajos cartográficos de Pasquaré *et al.* (1991), Ferrari *et al.* (1999b) y Rosas-Elguera *et al.* (1997). Estos trabajos han contribuido a establecer los límites entre

Norteamérica y los bloques Jalisco y Michoacán y han demostrado que el volcanismo Terciario de la Sierra Madre Occidental no afecta a la zona que ocupa el bloque Jalisco pero sí a la zona de Michoacán.

Origen de los magmas de la FVTM

En el campo petrológico, el debate se ha centrado sobre el significado del volcanismo alcalino de la FVTM. En la parte occidental de la FVTM se ha detectado la existencia inusual de un frente volcánico potásico (Lange y Carmichael, 1991); en éste, como en otros casos, los patrones de elementos traza indican que los magmas alcalinos provienen de un manto modificado por la subducción (ejemplos en Besch et al., 1988; Luhr et al., 1989; Righter et al., 1995; Luhr, 1997) y que su ocurrencia se debe a la extensión que afecta la placa superior (Carmichael et al., 1996). Sin embargo, en la parte noroccidental de la FVTM (Verma y Nelson, 1989; Wallace et al., 1992; Righter y Carmichael, 1992), en el extremo oriental (Palma Sola, Negendank et al., 1987) así como en la Sierra Chichinautzin, ubicada en el frente volcánico de la parte central (Márquez et al., 1999; Verma, 1999; Wallace y Carmichael, 1999) existen lavas que se parecen a los basaltos de isla oceánica (OIB), lo que implicaría un manto no contaminado por la subducción. Basándose sobretodo en estas ocurrencias, Márquez et al. (1999) propusieron un modelo provocativo en el cual los magmas OIB serían la expresión de una pluma del manto que estaría moviéndose de oeste a este desde el Mioceno tardío, por debajo de la FVTM. El problema principal de este modelo lo representa la evolución temporal del fallamiento y del volcanismo OIB en la FVTM, que no muestra la propagación predicha por el modelo (Tabla 1) y el volumen de las lavas OIB que resulta ser muy por debajo a lo esperado si existiera una pluma del manto (Ferrari y Rosas-Elguera, 1999b). Un modelo alternativo ha sido propuesto en forma general por Luhr (1997), quien sugiere que la ocurrencia de lavas OIB pueda relacionarse con un flujo de material no contaminado desde la zona de retroarco inducido por la subducción.

OPORTUNIDADES DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

En general, los problemas de interpretación de la FVTM derivan de la falta de un conocimiento detallado de la geología del arco volcánico y de la estructura físico-química de la corteza y el manto por debajo de ella. Falta todavía cartografía geológica y estratigrafía sistemática que abarque toda la FVTM y que permita la estimación de las tasas de efusión volcánica por áreas

en el tiempo y de las tasas de deformación de los diferentes sistemas de fallas. Estudios geodésicos que utilizan redes satelitales serán también fundamentales para obtener velocidades de deformación instantáneas. Se requieren además investigaciones de carácter geofísico (métodos potenciales, sísmica de refracción, tomografía sísmica) y geoquímico (estudios isotópicos) para conocer con más precisión la naturaleza geológica y el espesor de la corteza, así como la extensión y la geometría de las placas en subducción y la composición del manto.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha beneficiado de las investigaciones llevadas a cabo por el autor durante la última década y financiadas por el CONACyT, el programa UNAM-PAPIIT, el Instituto de Geología de la UNAM y la Universidad de Milán, Italia. La revisión crítica de A. Nieto Samaniego, G. Carrasco-Núñez y S. A. Alaniz estimuló una ampliación del manuscrito original que redundó en un trabajo más completo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre-Díaz, G., 1997, Volcanic stratigraphy of the Amealco Caldera and vicinity, central Mexican Volcanic Belt: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 13, p. 10-51.
- Aguirre-Díaz, G. J.; Nelson, S. A., Ferrari, L., y López-Martínez, M., 1997, Ignimbrites of the central Mexican Volcanic Belt-Amealco y Huichapan calderas, states of Querétaro and Hidalgo: *Magmatism and tectonics of central and northwestern Mexico. A selection of the 1997 IAVCEI General Assembly Excursions. Instituto de Geología, UNAM*, 1-39.
- Alaniz-Álvarez, S.A.; Nieto-Samaniego, A.F., y Ferrari, L., 1998, Effect of strain rate in the distribution of monogenetic and polygenetic volcanism in the Transmexican Volcanic Belt. *Geology*, 26, p. 591-594.
- Alaniz-Álvarez S. A., Nieto-Samaniego A.F., y Ferrari L., 1999, Effect of the Strain Rate in the Distribution of Monogenetic and Polygenetic Volcanism in the Transmexican Volcanic Belt. Reply to comments by M. Suter, Contreras y Gómez-Tuena; Siebe et al., *Geology*, 27, p. 573-575.
- Allan J. F., Nelson S.A., Luhr J. F., Carmichael I.S.E., Wopat M. y Wallace P.J., 1991, Pliocene-recent rifting in SW Mexico and associated volcanism: an exotic terrain in the making: *American Association of Petroleum Geologists, Memoir 47*, p. 425-445.
- Arzate, J. A.; Mareschal, M., y Livelybrooks, D., 1995, Electrical image of the subducting Cocos plate from magnetotelluric observations: *Geology*, 23, p. 703-706.
- Bandy, W.L., Mortera-Gutierrez, C.A., Urrutia-Fucugauchi, J., y Hilde, T.W.C., 1995, The subducted Rivera-Cocos plate boundary: where is it, what is it and what is its relationship to the Colima rift?: *Geophysical Research Letters*, 22, p. 3,075-3,078.
- Barrier, E., Bourgeois, J., y Michaud F., 1990, Le système de rift actifs du point triple de Jalisco—vers un proto-golfe de Jalisco: *C. R. Acad. Sci. Paris*, 310, p. 1,513-1,520.
- Besch, T.H., Negendank, J.F.W., Emmermann, R., y Tobschall, H.J., 1989, Geochemical constraints of the origin of calcalkaline and alkaline magmas of the eastern transmexican volcanic belt: *Geofísica Internacional*, 27, p. 641-663.

- Campos-Enríquez, O., y Garduño-Monroy, V.H., 1995, Los Azufres silicic center (Mexico)—inference of caldera structural elements from gravity, aeromagnetic and geoelectric data: *Journal of Volcanology and Geothermal research*, 67, p. 123-152.
- Cantagrel, J. M., y Robin, C., 1979, K-Ar dating on Eastern Mexican volcanic rocks—Relations between the andesitic and the alkaline Provinces: *Journal of Volcanological and Geothermal Research*, v. 5, p. 99-114.
- Capra, L.; Macías, J.L., y Garduño, V.H., 1997, The Zitácuaro Volcanic Complex, Michoacán, Mexico—magmatic and eruptive history of a resurgent caldera: *Geofísica Internacional*, 36, p. 161-180.
- Carmichael, I.S.E.; Lange, R.A., y Luhr, J.F., 1996, Quaternary minettes and associated volcanic rocks of Mascota, western Mexico—a consequence of plate extension above a subduction modified mantle wedge: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 124, p. 302-333.
- Carrasco-Núñez, G.; Milán, M., y Verma, S.P., 1989, Geología del volcán El Zamorano, Estado de Querétaro: Universidad Nacional Autónoma de México: Instituto de Geología, Revista, v.8, p. 194-201.
- Carrasco-Núñez, G., Vallance, J.W., y Rose, W.I., 1993, A voluminous avalanche-induced lahar from Citlaltépetl volcano, Mexico—implications for hazard assessment: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59, p. 35-46.
- Carrasco-Núñez, G., y Ban, M., 1994, Geologic map and structure sections of the Citlaltépetl volcano summit area, Mexico: *Cartas Geológicas y Mineras* 9. Instituto de Geología, UNAM.
- Carrasco-Núñez, G.; Gomez-Tuena, A., y Lozano, L., 1997, Geologic map of Cerro Grande volcano and surrounding area, Central Mexico: Geological Society of America Maps and Charts series, MCH 081, 10 p.
- Delgado-Granados, H.; Urrutia-Fucugauchi, J.; Hasenaka, T., y Ban, M., 1995, Southwestward volcanic migration in the western Trans-Mexican Volcanic Belt during the last 2 Ma: *Geofísica Internacional*, 34, p. 341-352.
- Demant, A., 1978, Características del eje neovolcánico transmexicano y sus problemas de interpretación: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 2, p. 172-187.
- Ferrari, L., 1995, Miocene shearing along the northern boundary of the Jalisco block and the opening of the southern Gulf of California: *Geology*, 23, p. 751-754.
- Ferrari L. y Rosas-Elguera J., 1999a, Late Miocene to Quaternary extension at the northern boundary of the Jalisco block, western Mexico—the Tepic-Zacoalco rift revised: *Geological Society America Special Paper #334*, Chapter 03, en prensa.
- Ferrari L., y Rosas-Elguera, J., 1999b, Alkalic (OIB type) and calc-alkalic volcanism in the Mexican Volcanic Belt: a case for plume-related magmatism and propagating rifting at an active margin? Comment a un artículo de Marquez, A., Oyarzun, R., Doblas, M., Verma, S. P., *Geology*, v. 27, p. 1,055-1,056.
- Ferrari, L., Garduño, V.H., Pasquarè, G., y Tibaldi, A., 1991, Geology of Los Azufres caldera, Mexico, and its relations with regional tectonics: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 47, p. 129-148.
- Ferrari, L., Garduño, V.H., Pasquarè, G., y Tibaldi, A., 1994a, Volcanic and tectonic evolution of Central Mexico—Oligocene to Present: *Geofísica Internacional*, 33, p. 91-105.
- Ferrari, L., Garduño, V.H., Innocenti, F.; Manetti, P.; Pasquarè, G., y Vaggelli, G., 1994b, A widespread mafic volcanic unit at the base of the Mexican Volcanic Belt between Guadalajara and Queretaro: *Geofísica Internacional*, 33, p. 107-124.
- Ferrari, L., Pasquarè, G., Venegas, S., Castillo, D., y Romero, F., 1994c, Regional tectonics of western Mexico and its implications for the northern boundary of the Jalisco Block: *Geofísica Internacional*, 33, p. 139-151.
- Ferrari, L.; Nelson, S.A., Rosas-Elguera, J. y Venegas-Salgado, S., 1997, Tectonics and volcanism of the western Mexican Volcanic Belt: Magmatism and Tectonics of central and northwestern Mexico. A selection of the 1997 IAVCEI General Assembly Excursions. Instituto de Geología, UNAM, p. 85-129.
- Ferrari L., López-Martínez M., Aguirre-Díaz G. y Carrasco-Núñez G., 1999a, Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico—from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt: *Geology*, 27, p. 303-307
- Ferrari L., Pasquarè G., Venegas S. y Romero F., 1999b, Geology of the western Mexican Volcanic Belt and adjacent Sierra Madre Occidental and Jalisco block: *Geological Society America Special Paper #334*, Chapter 04, en prensa.
- Ferrari L., Conticelli S., Vaggelli C., Petrone C. y Manetti P., 1999c, Late Miocene mafic volcanism and intra-arc tectonics during the early development of the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Tectonophysics*, en prensa.
- García-Pérez F., y Urrutia-Fucugauchi J., 1997, Crustal structure of the Arteaga Complex, Michoacán, Southern Mexico, from gravity and magnetics: *Geofísica Internacional*, 36, p. 235-244.
- Gilbert C. M., G. Mahood y I. S. E. Carmichael, 1985, Volcanic stratigraphy of the Guadalajara area, Mexico: *Geofísica Internacional*, v. 24, p. 169-191.
- Gómez-Tuena, A., y Carrasco-Núñez, G., 2000, Cerro Grande volcano—the evolution of a Miocene stratocone in the early Trans-Mexican Belt: *Tectonophysics*, en prensa.
- Hasenaka T. y I. S. E. Carmichael, 1985, A compilation of location, size and geomorphological parameters of volcanoes of the Michoacan-Guanajuato volcanic field, central Mexico: *Geofísica Internacional*, v. 24, p. 577-607.
- Hasenaka T., 1994, Size, distribution and magma output rate for shield volcanoes of the Michoacan-Guanajuato volcanic field, central Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63, p. 13-31.
- Hoskuldsson, A., y Robin, C., 1993, Late Pleistocene to Holocene eruptive activity of Pico de Orizaba, eastern Mexico: *Bulletin of Volcanology*, 55, p. 571-587.
- Israde-Alcantara, I., 1997, Neogene diatoms of Cuitzeo Lake, central Trans-Mexican Volcanic Belt and their relations with the volcano-tectonic evolution: *Quaternary International*, v. 43/44, p. 137-143.
- Kostoglodov, V., y Bandy W., 1995, Seismotectonic constraints on the convergence rate between the Rivera and North American plates: *Journal of Geophysical Research*, v. 100, p. 17,977-17,989.
- Lange, R., y Carmichael, I.S.E., 1991, A potassic volcanic front in western Mexico—lamprophyric and related lavas of San Sebastian: *Geological Society of America Bulletin*, 103, p. 928-940.
- Luhr, J., 1997, Extensional tectonics and the diverse primitive volcanic rocks in the western Mexican Volcanic Belt: *The Canadian Mineralogist*, 35, p. 473-500.
- Luhr, J., y Prestegard, K., 1988, Caldera formation at Volcan Colima, Mexico, by a large Holocene volcanic debris avalanche: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 35, p. 335-348.
- Luhr J. F., S. A. Nelson, J. F. Allan y I. S. E. Carmichael, 1985, Active rifting in Southwestern Mexico—manifestations of an incipient eastward spreading-ridge jump: *Geology*, 13, p. 54-57.
- Luhr, J.; Allan, J.; Carmichael, I.S.E., Nelson S.A., y Hasenaka T., 1989, Primitive calc-alkaline and alkaline rock type from the western Mexican Volcanic Belt: *Journal of Geophysical Research*, 94, p. 4,515-4,530.
- Macías, J.L.; García, P. A.; Arce, J.L.; Siebe, C.; Espíndola, J.M.; Komorowski, J.C., y Scott, K., 1997, Late Pleistocene-Holocene cataclysmic eruptions at Nevado de Toluca and Jocotitlan volcanoes, Central Mexico, in Link, K.P., y Kowallis, B.J. (eds.), *Proterozoic to recent stratigraphy, tectonics and volcanology, UTAH, Nevada, southern Idaho and Central Mexico*. Brigham

- Young University, *Geology Studies*, 42, part 1, p. 493-528.
- Marquez, A., Oyarzun, R., Doblaz, M., Verma, S. P., 1999, Alkalic (OIB type) and calc-alkalic volcanism in the Mexican Volcanic Belt: a case for plume-related magmatism and propagating rifting at an active margin?: *Geology*, v. 27, p. 51-54.
- Moore, G.; Marone, C.; Carmichael, I.S.E., y Renne, P., 1994, Basaltic volcanism and extension near the intersection of the Sierra Madre volcanic province and the Mexican Volcanic Belt: *Geological Society of America Bulletin*, v. 106, p. 383-394.
- Mooser, F., 1972, The Mexican Volcanic Belt—Structure and tectonics: *Geofísica Internacional*, v. 12, p. 55-70.
- Negendank, J. F., Emmermann, W. R., Krawczyk, R., Mooser, F., Tobschall, H., y Werle, D., 1985, Geological and geochemical investigations on the Eastern Trans-Mexican Belt: *Geofísica Internacional*, v.24, p. 477-575.
- Nelson, S.A., y Hegre, J., 1990, Volcan Las Navajas, a Pliocene-Pleistocene trachyte-peralkaline rhyolite volcano in the Northwestern MVB: *Bulletin of Volcanology*, 52, p. 186-204.
- Nelson S. A. y Hegre J., 1990, Volcan Las Navajas, a Pliocene-Pleistocene trachyte-peralkaline rhyolite volcano in the Northwestern MVB: *Bulletin of Volcanology*, 52, p. 186-204.
- Nieto-Obregón, J.; Urrutia-Fucugauchi, J.; Cabral-Cano, E., y Guzmán de la Campa, 1992, Liric faulting and continental rifting in western Mexico—A paleomagnetic and structural study: *Tectonophysics*, 208, p. 365-376.
- 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: *Geofísica Internacional*, v. 26, p. 109-158.
- Nixon, G.T., 1989, The geology of the Iztaccihuatl Volcano and adjacent areas of the Sierra Nevada and Valley of Mexico: *Geological Society of America Special Paper*, 219, 58 p.
- Ortega-Gutiérrez, F., Ruiz, J., Centeno-García, E., 1995, Oaxaquia, a Proterozoic microcontinent accreted to North America during the late Paleozoic: *Geology*, v. 23, p. 1,127-1,130
- Pardo, M., y Suárez, G., 1993, Steep subduction geometry of the Rivera plate beneath the Jalisco block in western Mexico: *Geophysical Research Letters*, 20, p. 2,391-2,394.
- Pardo, M., y Suárez, G., 1995, Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: seismic and tectonic implications: *Journal of Geophysical Research*, 100, p. 12,357-12,373.
- Pasquarè, G. (direction); Ferrari, L. (compilation) et al., 1991, Geological map of the central sector of Mexican Volcanic Belt, States of Guanajuato and Michoacán. *Geological Society of America Map and Chart series*, MCH 72. Pasquarè G. (direction), Ferrari L. (compilation) et al., 1991. Geological map of the central sector of Mexican Volcanic Belt, States of Guanajuato and Michoacán: *Geol. Soc. Am. Map and Chart series*, MCH 72.
- Pérez-Venzor, J.A.; Aranda-Gómez, J.J.; McDowell, F.W., y Solorio-Munguía, J.G., 1997, *Geología del Volcán Palo Huérfano*, Guanajuato, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, vol. 13, no. 2, p. 174-183.
- Pradal, E., y Robin, C., 1994, Long-lived magmatic phases at Los Azufres volcanic center, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63, p. 201-215.
- Righter, K., y Carmichael, I.S.E., 1992, Hawaiites and related lavas in the Atenguillo graben, western Mexican Volcanic Belt: *Geological Society of America Bulletin*, 104, 1,592-1,607.
- Righter, K.; Carmichael, I.S.E., y Becker, T., 1995, Pliocene-Quaternary volcanism and faulting at the intersection of the Gulf of California and the Mexican Volcanic Belt: *Geological Society of America Bulletin*, 107, p. 612-626.
- Robin, C., y Boudal, C., 1987, A gigantic Bezymianny-type event at the beginning of modern volcan Popocatepetl: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 31, p. 115-130.
- Rodríguez-Elizarrarás, S., 1995, Estratigrafía y estructura del volcán de Colima, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 12, p. 22-46.
- Rosas-Elguera, J.; Ferrari, L.; Garduño-Monroy, V.H., y Urrutia-Fucugauchi, J., 1996, Continental boundaries of the Jalisco block and their influence in the Pliocene-Quaternary kinematics of western Mexico: *Geology*, 24, 10, p. 921-924.
- Rosas-Elguera, J.; Ferrari, L.; López-Martínez, M., y Urrutia-Fucugauchi, J., 1997, Stratigraphy and Tectonics of the Guadalajara Region and Triple Junction Area, Western Mexico: *International Geology Review*, 39, p. 125-140.
- Siebe, C.; Komorowski, J.C., y Sheridan, M.F., 1992, Morphology and emplacement of an unusual debris-avalanche deposit at Jocotitlan volcano, central Mexico: *Bulletin of Volcanology*, 54, p. 573-589.
- Siebe, C., Abrams, M., Macias, J.L., Obenholzner, J., 1996, Repeated volcanic disasters in Prehispanic time at Popocatepetl, central Mexico; past key to the future?: *Geology*, 24, p. 399-402
- Stoopes, Gary R., y Sheridan, Michael F., 1992, Giant debris avalanches from the Colima Volcanic Complex, Mexico—Implications for long-runout landslides (>100 km) and hazard assessment: *Geology*, 20, p. 299-302.
- Suárez, G.; García-Acosta, V., y Gaulon, R., 1994, Active crustal deformation in the Jalisco block, Mexico—evidence for a great historical earthquake in the 16th century: *Tectonophysics*, 234, p. 117-127.
- Suter, M.; Quintero, O., y Johnson, C.A., 1992, Active faults and state of stress in the central part of the Mexican Volcanic Belt—the Venta de Bravo fault: *Journal of Geophysical Research*, 97, p. 11,983-11,994.
- Suter, M.; Quintero, O.; López, M.; Aguirre, G., y Farrar, E., 1995a, The Acambay graben—active intra-arc extension in the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico: *Tectonics*, 14, p. 1,245-1,262.
- 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: *Geological Society of America Bulletin*, 107, p. 627-641.
- Urrutia-Fucugauchi, J., y Flores-Ruiz, J.H., 1996, Bouguer gravity anomalies and regional crustal structure in central Mexico: *International Geology Review*, vol. 38, p. 176-194.
- Valdéz-Moreno, G. y Aguirre-Díaz, G.J., 1996, Volcán La Joya: Un ejemplo de magmatismo inicial del Cinturón Volcánico Mexicano: VI Congreso Nacional de Geoquímica. *Actas INAGEQ*, vol. 2, p. 51-56.
- Verma, S.P., y Nelson, S.A., 1989, Isotopic and trace element constraints on the origin and evolution of alkaline and calc-alkaline magmas in the northwestern Mexican Volcanic Belt: *Journal of Geophysical Research*, v. 94, p. 4,531-4,544.
- Wallace, P.; Carmichael, I.S.E.; Righter, K., y Becker, T., 1992, Volcanism and tectonism in western Mexico: A contrast of style and substance: *Geology*, 20, p. 625-628.
- Wallace, P., y Carmichael, I.S.E., 1999, Quaternary volcanism near the Valley of Mexico: implications for subduction zone magmatism and the effects of crustal thickness variations on primitive magma compositions: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 135, p. 291-314.