

*ALGUNAS CARACTERISTICAS DE LA FAJA VOLCANICA
MEXICANA Y DE SUS RECURSOS GEOTERMICOS*

S. VENEGAS S.*
J. J. HERRERA F.*
R. MACIEL F.*

RESUMEN

La integración de los trabajos geológicos realizados en la Faja Volcánica Mexicana (FVM) – denominación adoptada en este trabajo para el Eje Neovolcánico – se ha efectuado con el fin de analizar las características e interpretaciones geológicas que sobre esta provincia se han hecho, así como proporcionar una visión más amplia de los aspectos geotérmicos involucrados en ella.

Se presenta una discusión sobre la relación vulcano-tectónica ocurrida desde el inicio del desarrollo de la FVM y el posible origen y características de su basamento, apoyándose en la información de subsuelo dada por los pozos geotérmicos, la geología regional y dataciones tanto de subsuelo como superficiales. Se analiza, además, la correlación y posición de la Faja con respecto a la Sierra Madre Occidental, concluyéndose que el basamento de aquélla es diferente de ésta.

Como resultado de lo anterior, y desde un punto de vista geotérmico, se subdivide y jerarquiza en 10 sectores la provincia de la FVM.

Finalmente se describe la asociación del potencial geotérmico presente con la actividad vulcano-tectónica reciente, así como con las cámaras magmáticas someras.

* *Comisión Federal de Electricidad, Depto. de Exploraciones Geotérmicas, Morelia, Mich.
MEXICO.*

ABSTRACT

The integration of the geological works concerning the Mexican Volcanic Belt (FVM) - the title adopted in this report for the Neo-Volcanic Belt - has been developed to analyze the geological characteristics of this province and the interpretations proposed in order to provide a wider view on the geothermal aspects observed therein.

The volcano-tectonic relationship since the beginning of the evolution of the FVM and the possible origin and characteristics of its basement, in the light of the subsurface information obtained through geothermal well exploration, the general geology and both surface and subsurface data, are discussed in this paper. The correlation and position of the belt with respect to the Sierra Madre Occidental are analyzed, concluding that the basement of the first one is different from that of the second.

As a result of our studies and from the geothermal point of view the FVM province is subdivided and classified in 10 sectors.

Finally, the association of the geothermal potential with the recent volcano-tectonic activity and the shallow magmatic chambers is also described.

1. INTRODUCCION

A medida que se conoce más - y mejor - la geología de México, se observa que algunos conceptos que tradicionalmente han denotado provincias geológicas aparentemente bien definidas, resultan cada vez más insuficientes. Uno de esos conceptos es el del Eje Neovolcánico Mexicano, sobre el cual, en el presente, ha sido clara una tendencia a revisarlo todo, desde sus características vulcanológicas hasta su propia denominación. Esto, por supuesto, no tiene nada de sorprendente, ya que es parte del proceso de retroalimentación que nutre y vivifica a cualquier ciencia.

El trabajo que se presenta a continuación no pretende, evidentemente, resolver los múltiples aspectos que deben ser discutidos y aceptados sobre el Eje Neovolcánico; su objetivo es solamente someter a discusión algunas características e interpretaciones - haciendo énfasis en su potencial geotérmico, que, a lo largo de cinco años, se han venido registrando en los diversos trabajos geológicos que se han efectuado sobre áreas pertenecientes, de una u otra forma, a esa provincia. Este artículo es, por tanto, producto de un trabajo colectivo, del que los autores que lo firman son solamente los integradores.

Y, antes de entrar propiamente en materia, parece conveniente aclarar que el término de "eje" no se ajusta a las características del conjun-

to de derrames y aparatos volcánicos de esta provincia, como ha sido señalado por diversos autores (Mooser, 1972; Flores, 1980), por lo que es más adecuada la denominación de Faja Volcánica Mexicana - ya que, adicionalmente, el vulcanismo presente en la misma, tampoco es tan nuevo como implica la denominación tradicional.

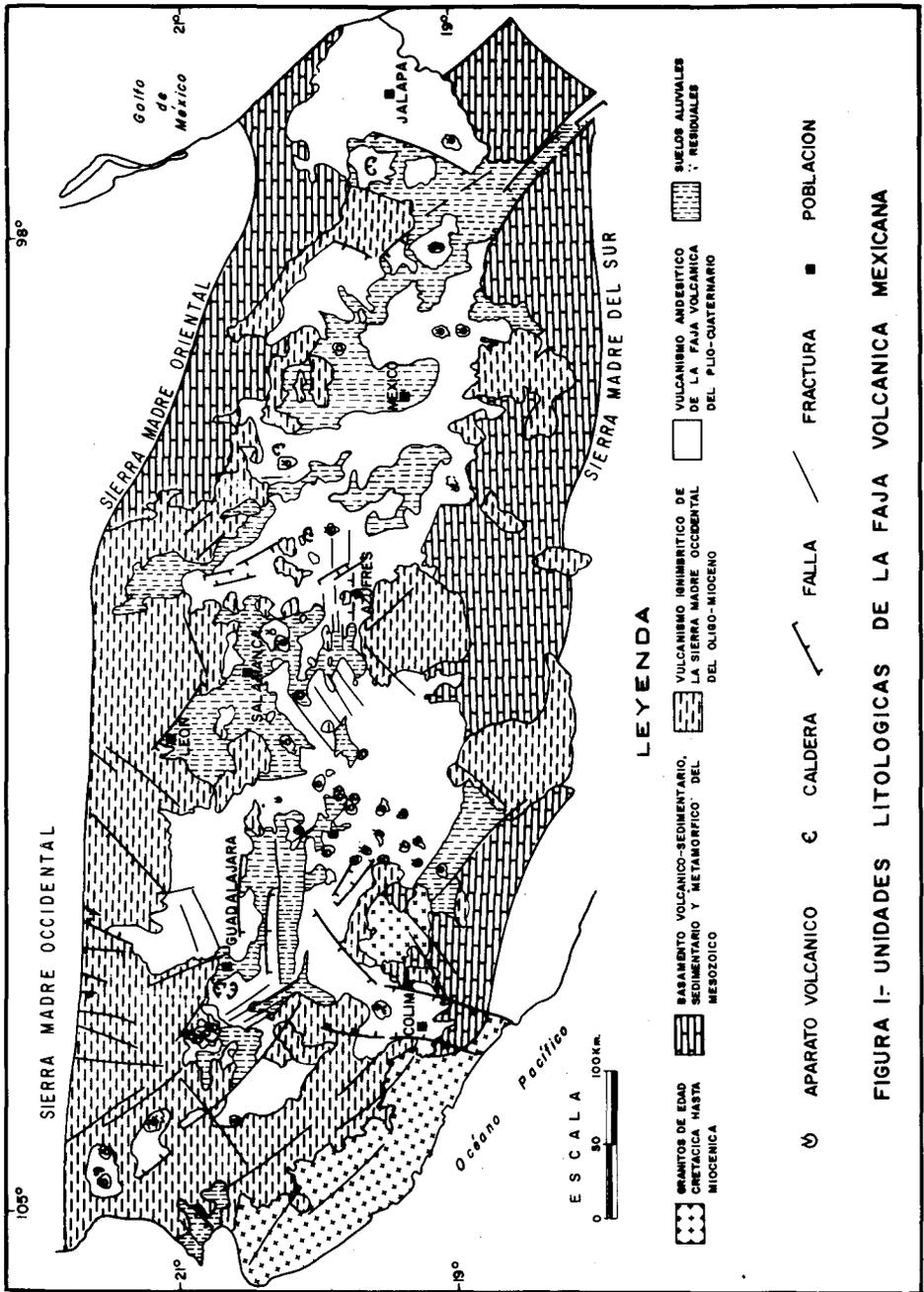
2. DEFINICION, EXTENSION Y SUBDIVISION DE LA FAJA VOLCANICA MEXICANA (FVM)

Se acostumbra referirse a la FVM como una cadena montañosa de origen volcánico, con orientación general E-W, que atraviesa México de costa a costa y que se extiende *grosso modo* entre los paralelos 19° y 21° de latitud norte. Sin embargo, en términos rigurosos, dentro de la franja delimitada por esas fronteras, si bien predominan los productos volcánicos, es evidente que son muy diferentes tanto en edad como en composición y tipo.

Una cartografía regional de la zona comprendida entre los límites mencionados, revela que coexisten en ella diferentes unidades volcánicas, lo cual, para definir a la FVM, obliga a introducir un elemento adicional a fin de remediar la heterogeneidad resultante. Si se acepta que los productos volcánicos típicos de la FVM tienen una edad cuaternaria y un carácter calcoalcalino (Demant y Robin, 1975), habrá que restringir la misma a las unidades volcánicas cartografiadas dentro de los límites establecidos, que posean una edad - relativa o absoluta - comprendida en ese rango y que presenten una composición de aquel tipo.

Con tales restricciones adicionales, e integrando la cartografía inédita efectuada con objetivos geotérmicos en áreas que cubren casi por completo a la FVM, se elaboró un plano de la misma que, en forma resumida, se presenta en la figura 1. En ella se ha unificado a las diversas unidades litológicas que afloran en la faja central del país en cinco grandes grupos, de acuerdo con sus distintas edades y tipos. Así, el grupo intrusivo aparece notoriamente restringido al sector occidental, prácticamente en lo que constituye el llamado Bloque de Jalisco; las rocas que lo constituyen, de granitos hasta dioritas, tienen edades que van desde el Cretácico hasta el Mioceno.

El grupo mesozoico, por su parte, constituye un antiguo basamento de origen vulcano-sedimentario, sedimentario y metamórfico, cuya edad



abarca prácticamente toda la era, desde el Triásico hasta fines del Cretácico y, localmente, inclusive inicios del Terciario. Incluye una amplia variedad de rocas entre las que resaltan las calizas, las areniscas, las lutitas, las tobas de múltiples tipos y los esquistos.

El grupo Sierra Madre Occidental, con una distribución amplia y variada en la zona central que se discute, es típicamente de origen volcánico y edad terciaria; incluye productos ignimbríticos y riolíticos, con cantidades menores de andesitas y basaltos, eventual y localmente separados por depósitos lacustres, de espesores prácticamente insignificantes comparados con los de las rocas volcánicas, todos ellos de edad oligomiocénica, pero predominantemente oligocénica.

Posteriormente a todos esos grupos, está el grupo de la FVM, representado en blanco en la figura 1. Respetando las características establecidas arriba, este grupo está constituido por afloramientos de rocas predominantemente andesíticas, con cantidades subordinadas de términos ácidos y básicos, de edad pliocuaternaria; el vulcanismo que les ha dado origen ha ocurrido tanto por fisuras como por aparatos centrales, generalmente compuestos, y alineados regionalmente en dirección E-W. Finalmente, esos productos han formado diversas sierras y cadenas montañosas - con sus respectivos valles intermontanos - con una orientación general también E-W, que representan la expresión fisiográfica del grupo de la FVM, y constituyen el rasgo más conspicuo de ésta, lo que motivó su diferenciación como una provincia fisiográfica bien definida.

La última unidad cartografiada en la figura 1 es la constituida por suelos aluviales y/o residuales.

Si se considera que los aluviones aflorantes en el interior de las unidades volcánicas que conforman la FVM son parte integrante de ésta, dado que provienen en su mayoría de aquéllas, podrá apreciarse que la expresión superficial de la FVM constituye una franja irregular que no tiene el menor parecido con un "eje". Esta faja ciertamente se inicia en la costa oriental de México, pero termina bastante antes de llegar a la costa occidental, separada de ésta, tanto por la Sierra Madre Occidental como por el macizo granítico de Jalisco (figura 1).

Puede observarse también, tomando en cuenta sólo la cartografía ex-

puesta en la figura 1, que la FVM aparece bien dividida en varios sectores, justamente por los depósitos aluviales; éstos, obviamente se han depositado en zonas donde la actividad volcánica pliocuaternaria ha sido más antigua o menos intensa, y su distribución regional subdivide naturalmente la Faja.

Así, independientemente de sus características composicionales, la FVM puede ser subdividida en diez amplios sectores que de oriente a occidente, serían: Jalapa u oriental, México, Los Azufres, Michoacano, NE de Guadalajara, Colima, La Primavera-Tequila, SW de Tequila, Ceboruco, y Sangangüey-San Juan.

Debe insistirse en que esta subdivisión sectorial de la FVM está planteada meramente por la distribución espacial, cartografiable, de la misma, sin mayores consideraciones vulcanológicas o genéticas. De hecho, debe decirse también que algunos de estos sectores habían sido reconocidos e identificados por otros autores (Demant *et al.*, 1976) sobre bases más bien petrológicas.

Por otro lado, el objetivo de esta subdivisión, más que complicar las cosas - como podría suponerse - es intentar jerarquizar las zonas de mayor interés desde el punto de vista geotérmico, como se explicará más adelante.

3. LA FVM Y LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL (SMO)

¿Qué hay debajo de los productos volcánicos de la FVM, definida y delimitada como se hizo en el capítulo precedente? A primera vista, y considerando que el vulcanismo de la Sierra Madre Occidental (SMO) parece rodear casi por todas partes a la FVM, podría considerarse que el "basamento" de ésta, es justamente la SMO (McDowell y Clabaugh, 1979; Demant, 1978). Así, parecería lógico suponer que antes del inicio de la actividad de la Faja, la zona central de México estaba ocupada principalmente por las rocas volcánicas de la SMO, mismas que aún actualmente afloran al sur de la FVM y en muchas localidades interiores, según se ha constatado en los trabajos de campo (figura 1).

Sin embargo, examinando la situación con más detalle se encuentran algunos elementos incongruentes. En primer término, si se observara con detenimiento un mapa altimétrico de la misma zona mostrada en la figura 1 (Maciel, 1984, inédito) (que no pudo reproducirse en el pre-

sente trabajo) se encontraría que las alturas de toda la unidad definida como SMO son comparables e incluso superiores a las de la FVM, lo que no pasa con las demás unidades agrupadas en la figura mencionada. Para explicar, entonces, que la SMO se encuentre abajo de la FVM, con las enormes diferencias de elevación que habría entre las partes aflorantes y las supuestamente sepultadas bajo la Faja, habría que recurrir a la existencia de grandes fallas o grábenes de dirección paralela a la predominante en la FVM, que hubiesen propiciado el hundimiento de la SMO justamente donde después se emplazaría el vulcanismo de aquélla. Resultaría, en síntesis, que la FVM se formó en un enorme graben continental, cuyas fallas limítrofes tendrían saltos considerables de cientos y hasta miles de metros, y cuyo origen habría ocurrido entre el final del vulcanismo de la Sierra y el principio del de la Faja.

Evidentemente, la conclusión anterior no tiene por qué descartarse *a priori*; la existencia de un graben continental mio-pliocénico tal podría aceptarse como probable. Pero no hay evidencias que la sustenten y sería difícil aceptar que estructuras tan importantes y no tan antiguas hayan perdido su expresión superficial, como lo prueba la cartografía actual (figuras 4 y 5).

Por otro lado, considérese la composición de la SMO y la de los productos encontrados debajo del vulcanismo de la Faja. De acuerdo con McDowell y Clabaugh (1979), aquélla presenta una composición esencialmente silícica - ignimbrítica - y habría terminado con la extinción de la Placa Farallón hace unos 26 m.a. Las rocas volcánicas cortadas por diversos pozos exploratorios practicados por la CFE en varias partes de la FVM, sin embargo, ni son silícicas ni son tan antiguas.

Por ejemplo, en Los Azufres, Mich. (ubicación en las figuras 1 y 9), el pozo A-44 atravesó más de 3 500 m de rocas volcánicas (figura 2), de los cuales más de 3 000 corresponden a andesitas miocénicas a mio-pliocénicas, previas a la FVM, con edades que según muestras datadas en otros pozos van de los 5.9 a los 10.1 m.a. (Aumento y Gutiérrez N., 1980). Como se ve en la figura 2, la columna litológica de este pozo es de intermedia a básica, notablemente distinta de la SMO; otros pozos - se han perforado más de 40 - en Los Azufres, presentan una litología semejante, si bien sus profundidades son menores (un promedio de 2 000 m).

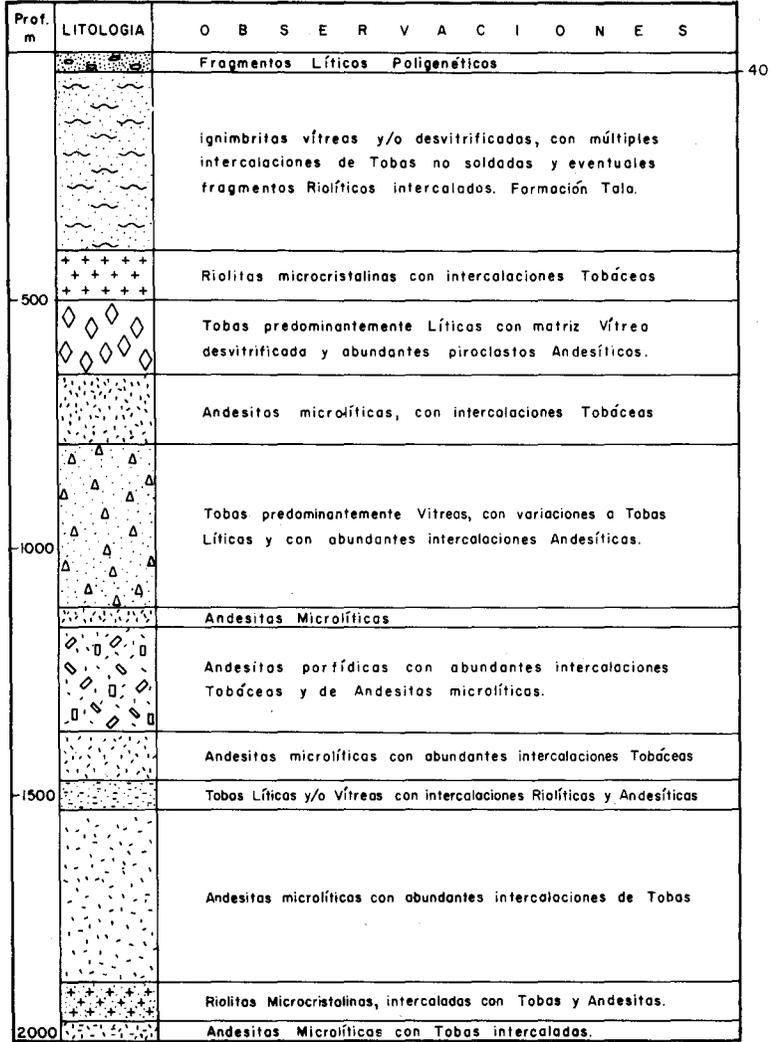
COLUMNA LITOLOGICA DEL POZO AZUFRES 44(A-44)

Prof. m	LITOLOGIA	OBSERVACIONES
	+++++	Biolitas Vítreas Esferulíticas
		Andesitas de Augita
500	=====	Andesitas Silicificadas
	△△△	Andesitas de Augita-Andesitas Basálticas o Basalto y Ocasionales Dacitas
1000	○●○	Andesitas de Piroxenos con Tobas Líticas intercaladas
1500	□□□	Andesitas de Augita y Hornblenda, con intercalación de Tobas Líticas Cristalinas en su Base
2000	○○○	Andesitas Vítreas, Andesitas Porfídicas y Basaltos de Augita
		Andesitas de Augita
2500		Andesitas de Augita
	■●■	Basalto de Augita
3000	~~~~~	Andesita Basáltica de Augita
	■●■	Basalto de Augita
		Andesita de Augita
3500	~~~~~	Andesita Basáltica de Augita

Tomado de: Viggiano G. (1983, C.F.E.) ESCALA 1:10,000

FIGURA 2

COLUMNA LITOLÓGICA DEL POZO PRIMAVERA 2 (PR-2)



Tomada de : Gutiérrez N. (1981 CFE)

ESCALA: 1:10,000

FIGURA 3

En La Primavera, Jal., el pozo PR-2, con casi 2 000 m de profundidad, presenta, abajo de las rocas asociadas con la formación de la caldera (Formación Tala y riolitas subyacentes), una alternancia de andesitas y rocas piroclásticas - con escasas riolitas hacia su base - que aunque no se han datado radiométricamente no tienen mayor relación con los relativamente cercanos afloramientos de la SMO (ver figura 1). La columna litológica resumida de este pozo se presenta en la figura 3; otros pozos en la zona han mostrado una secuencia similar.

En San Marcos, Jal., ubicado al sur de La Primavera, el pozo SM-1 atravesó, después de 750 m de sedimentos lacustres atribuibles a la Laguna de San Marcos, unos 1 000 m de rocas volcánicas esencialmente andesíticas - con derrames basálticos intercalados y riolitas en su base - para llegar al basamento sedimentario mesozoico, constituido en este caso por areniscas arcóicas (figura 6). De nuevo, de los sedimentos lacustres y de las primeras coladas cuaternarias se pasa a andesitas, basaltos, tobas y riolitas del Plioceno y del Mioceno Medio-Superior (Gutiérrez-N., 1984) y de ahí al Cretácico, sin que aparezcan unidades atribuibles a la SMO. Algo semejante puede decirse del pozo SM-2 (separado unos 5 km del SM-1), donde las rocas miocénicas están cortadas por diques y cuerpos intrusivos ácidos a intermedios, en una secuencia litológica bastante diferente de la de la SMO.

En el otro extremo de la FVM, en la caldera de Los Humeros, Pue. (figuras 1 y 4), el pozo con mayor profundidad, el H-7, atravesó 920 m de rocas cuaternarias relacionadas con la formación de las diversas estructuras caldéricas; abajo de ellas, cortó casi 1 400 m de andesitas con eventuales horizontes tobáceos intercalados y basaltos hacia su base (figura 5). Esas andesitas parecen corresponder con las de la Formación Teziutlán, de edad pliocénica (Gutiérrez N., 1983). Por otra parte, el cercano pozo H-2, cortó a 1 144 m de profundidad las calizas de la Formación Tamaulipas Inferior, de edad Cretácico Inferior. De nuevo, debajo del vulcanismo cuaternario de la FVM no hay nada parecido ni en edad ni en composición al vulcanismo de la SMO, pasándose en este caso (al igual que en San Marcos, Jal.) directamente al Mesozoico.

Los ejemplos enumerados hasta aquí son, ciertamente, escasos para emitir una opinión definitiva. De hecho, debe considerarse que el basamento de las ignimbritas de la SMO es andesítico - si bien de una edad

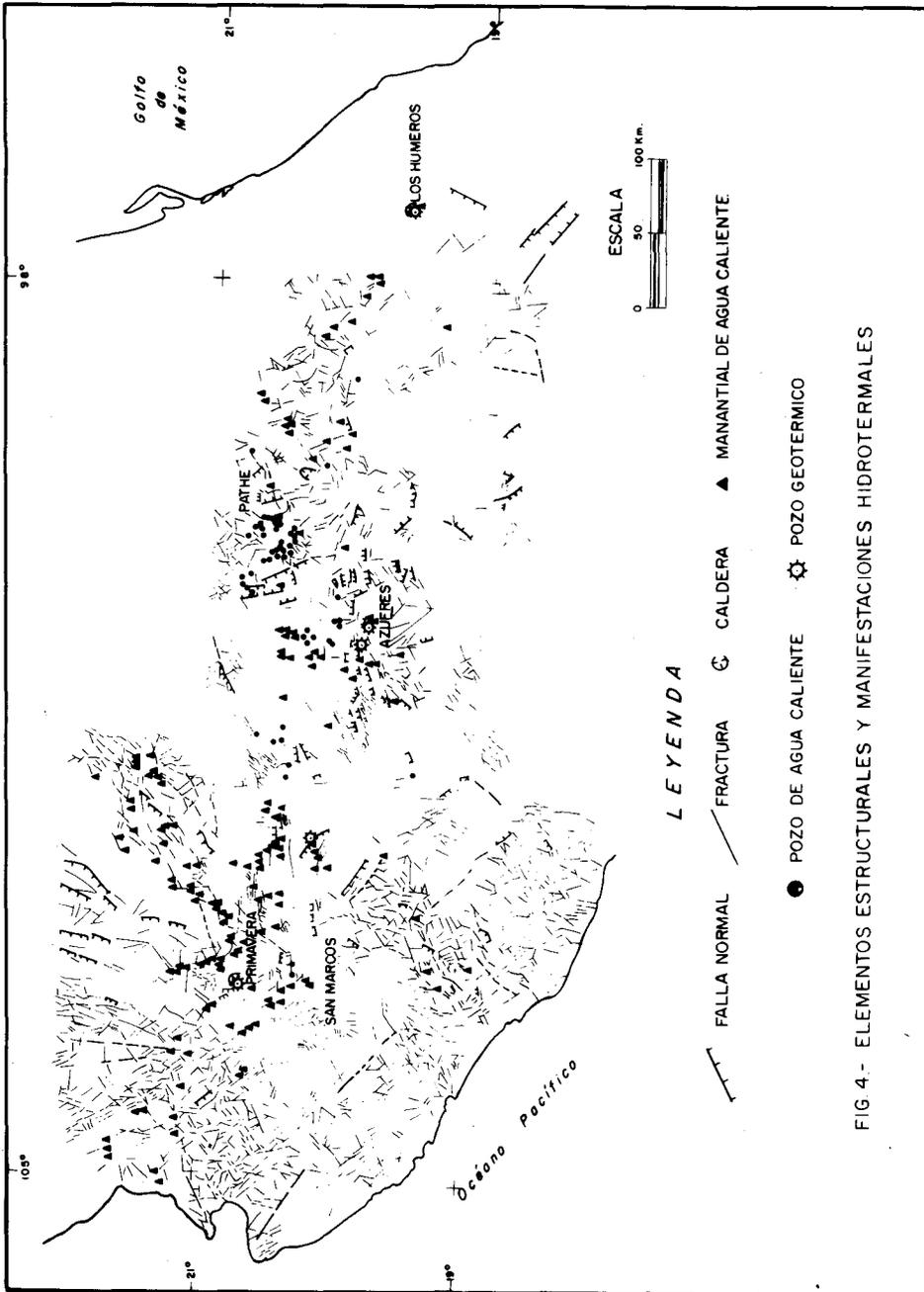
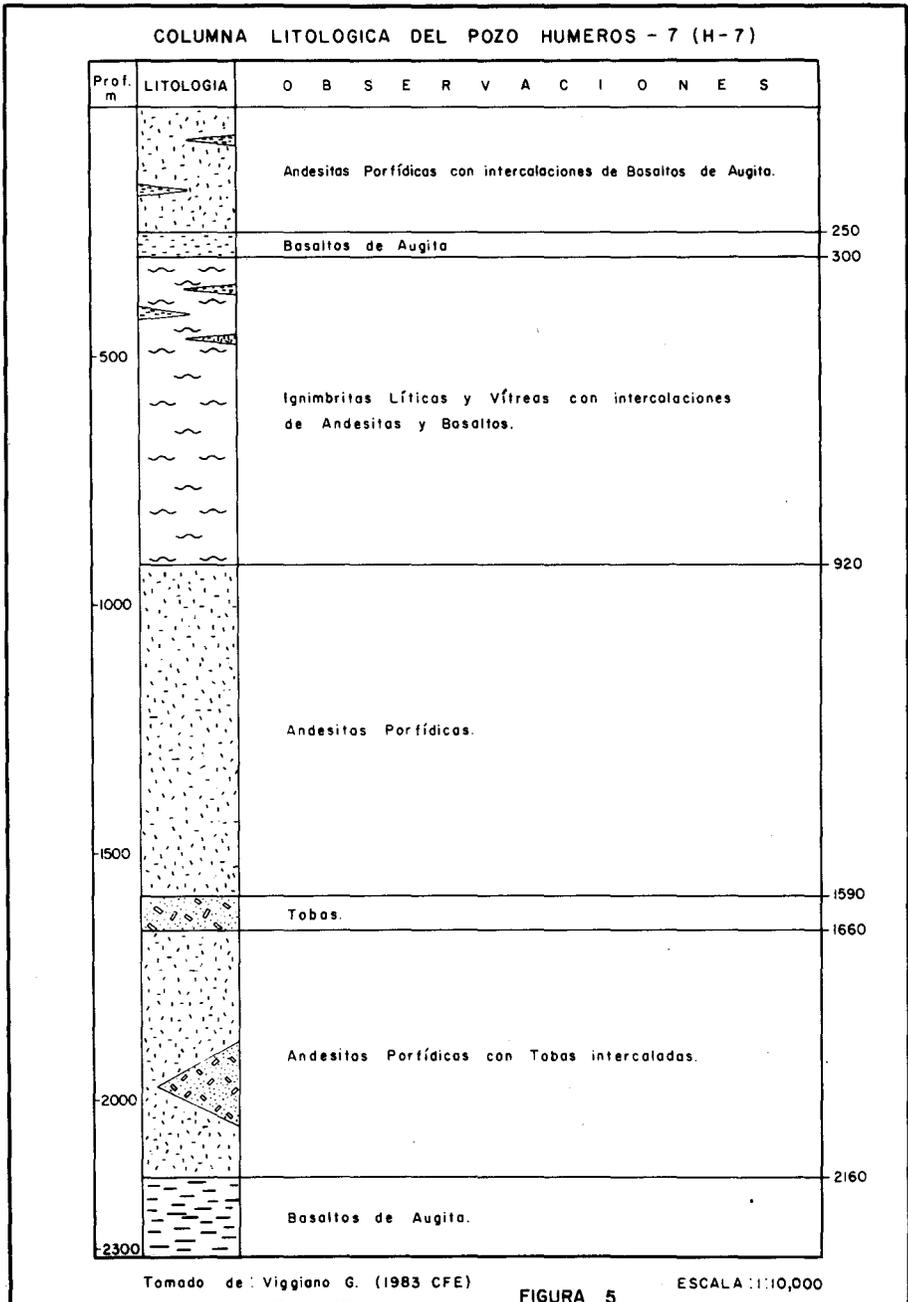


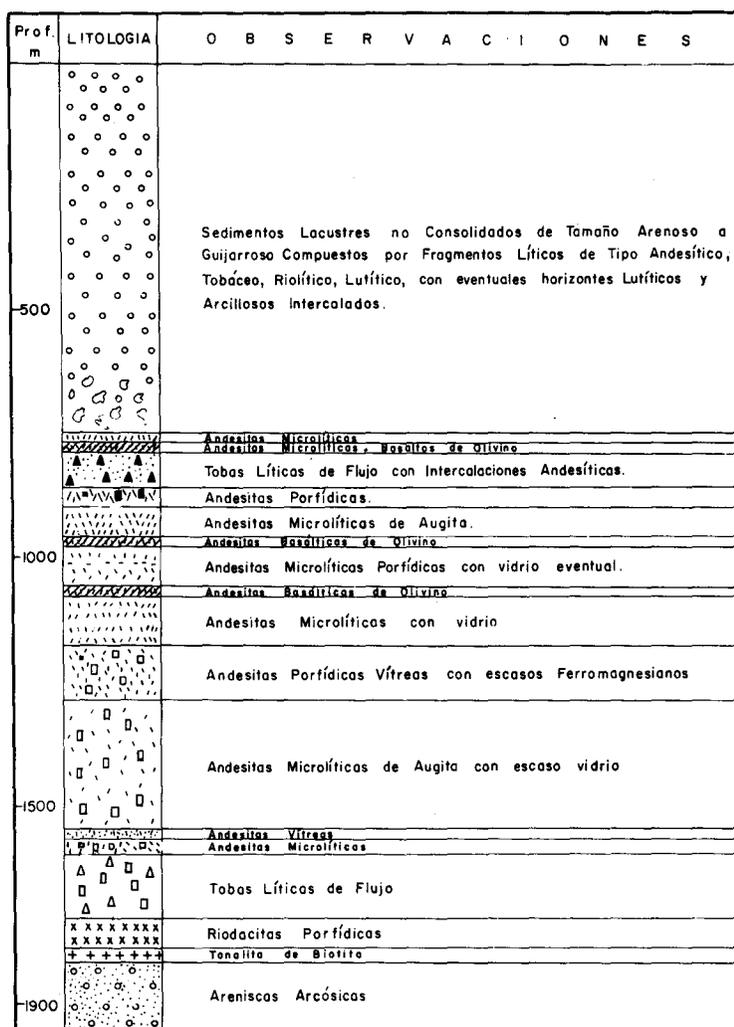
FIG 4- ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y MANIFESTACIONES HIDROTHERMALES

oligocénica (McDowell y Clabaugh, 1972, 1979; Demant *et al.*, 1976) - y podría quizá suponerse que por alguna extraña razón debajo de la

FVM sólo se presenta el basamento de la SMO aunque no su parte superior ignimbrítica. No obstante, los dos elementos fundamentados aquí - la altimetría de la región y los resultados de pozos profundos en



COLUMNA LITOLÓGICA DEL POZO SAN MARCOS-1 (SM-1)



Tomada de: Gutiérrez N. (1984 C.F.E.)

ESCALA 1:10,000

FIGURA 6

La Primavera-San Marcos, Los Azufres y Los Humeros - parecen indicar que, con toda probabilidad, la SMO no continúa debajo de la FVM y que, por tanto, el "basamento" de ésta no tiene nada que ver con aquélla.

4. EL "BASAMENTO" DE LA FVM

¿Cuál es, entonces, el basamento de la FVM? Como se anotó arriba, las perforaciones efectuadas en diferentes partes de ella revelan que debajo de las emisiones volcánicas cuaternarias existen paquetes de espesor variable, pero en general potentes, de rocas esencialmente andesíticas, con cantidades subordinadas de basaltos, riolitas, dacitas y sus tobas asociadas. La edad de estas rocas, que se conoce con precisión absoluta en Los Azufres y con razonable certeza en Los Humeros, San Marcos y La Primavera, es Mioceno Superior-Plioceno Inferior, entre unos 10 y 4 m.a. Otros autores han reconocido también la presencia de este basamento, aunque lo consideran mucho más antiguo: del Oligo-mioceno (Mooser, 1969; Gunn y Mooser, 1970; Negendank, 1972; Bloomfield, 1975; Demant *et al.*, 1976) y, adicionalmente, lo han considerado como parte o continuación (Demant, 1978) de la SMO - como ha quedado dicho.

Por otra parte, dataciones de muestras superficiales que corresponderían al basamento del vulcanismo pliocuaternario dentro de la FVM, revelan que esas andesitas predominantes que lo constituyen son, ciertamente, más antiguas que los 10 m.a. que se han obtenido en el fondo de los pozos profundos de Los Azufres, así como menos recientes (Tabla 1). De hecho, puede establecerse que, en general, el rango cronológico del vulcanismo basamental de la FVM, previo al vulcanismo pliocuaternario, va de los 21 a los 5 ó 4 m.a., es decir, del Mioceno a inicios del Plioceno.

Así, puede decirse que el vulcanismo calcoalcalino pre-pliocuaternario que funciona como basamento del vulcanismo definido como típico de la FVM, es un vulcanismo específico de esta zona del país, no correlacionable con el de la SMO ni con el de algún otro evento magmático, salvo quizá con la zona calcoalcalina que Demant *et al.* (1976) postulan como parte de la Provincia Mágmatca Oriental, y que aquí se ha considerado más bien como la del sector Jalapa de la FVM. En síntesis, se diría que el vulcanismo basamental de la FVM es el vulcanismo de una "Paleofaja" Volcánica Mexicana.

Esta aparente tautología sólo significa que debajo de la FVM no existiría la prolongación de ninguna otra provincia magmática o grupo volcánico. Es decir, que en la FVM el vulcanismo miopliocénico basamen-

tal es petrográficamente semejante al vulcanismo pliocuaternario superior, siendo su única diferencia el periodo de tiempo en el que ocurrió cada uno, separados claramente por un *hiatus* en la actividad volcánica.

Este *hiatus* volcánico es muy importante. Su período varía de una a otra región o sector de la FVM, pero siempre está presente marcando el fin de la primera etapa volcánica y el inicio de la segunda. Así, en la región de Los Humeros, las andesitas que subyacen a los depósitos ignimbríticos cuaternarios, relacionados con la formación de los diversos eventos caldéricos, pertenecen a la Formación Teziutlán, cuya edad va de los 3.5 a los 5 m.a. (Tabla 1); desde esos 3.5 m.a. cesa la actividad volcánica en esa región para reiniciarse hace un millón de años con la erupción de la Ignimbrita Xáltipan que, en los pozos (figura 5), sobreyacen a las andesitas pliocénicas. El *hiatus* en la actividad volcánica en este sector de la FVM, parece extenderse, por tanto, entre 3.5 y 1 millón de años y señala el intervalo entre el final del vulcanismo andesítico "basamental" y el principio del vulcanismo de la FVM.

Evidentemente, puede considerarse a las Andesitas Teziutlán no como parte del basamento, sino como parte integrante, con todo derecho, de la FVM debido a su edad pliocénica. En tal caso, la función basamental estaría representada por las Andesitas Alseseca, del Mioceno Superior, aunque su presencia en los pozos perforados no ha sido establecida con precisión. Habría, de cualquier modo, otro *hiatus* volcánico entre las Andesitas Alseseca (con unos 11 m.a. de edad; Tabla 1) y las Teziutlán (con edades máximas de 5 m.a.).

Debe recordarse, por cierto, que en el caso de Los Humeros no existe vulcanismo más antiguo que el pliocénico - o, en todo caso, el del Mioceno Superior, si llega a probarse la presencia de las Andesitas Alseseca debajo de las Teziutlán - antes de llegar al basamento sedimentario. En efecto, los pozos H-2 y H-5 pasaron directamente de las andesitas pliocénicas a las calizas del Cretácico Inferior de la Formación Tamaulipas Inferior (Gutiérrez N., 1983), lo cual - de paso - comprueba que al menos en esta región el basamento volcánico de la FVM es ella misma, con productos volcánicos más antiguos.

Por otra parte, el *hiatus* entre el basamento y los productos más recientes de la FVM es también muy evidente en el sector de Los Azufres. Aquí, las edades más recientes de las andesitas basamentales son

Tabla 1. Datos geocronométricos de la Faja Volcánica Mexicana (*).
 Dataciones de rocas magnéticas pertenecientes a la Faja Volcánica Plio-cuaternaria, comprendidas en el intervalo de 4 m.a. al presente.

Muestra	Localidad y estado	Litología	Método	Referencia	Fecha m.a.
1. Ped-7	Cascada el Salto, Jalisco	Andesita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	1.7 ± 0.06
2. Ped-20	Achio, Jalisco	Basalto	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	2.5 ± 0.06
3. Ped-23	Mesa Mixtoneque, Jalisco	Basalto	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	3.7 ± 0.06
4. Ped-24	Mesa Mixtoneque, Jalisco	Basalto	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	3.8 ± 0.09
5. Ped-26	S. El Travesaño, Jalisco	Basalto	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	4.33 ± 0.09
6. Ped-2	Ixtlahuacan del Río, Jalisco	Ignimbrita ácida	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	4.7 ± 0.11
7. Ped-21	Achio, Jalisco	Toba de hornblenda	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	4.7 ± 0.17
8.	Los Humeros, Puebla	Andesita Teziutlán	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	7	3.5 ± 0.3
9.	Los Humeros, Puebla	Ignimbrita Xáltipan	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	7	1.0 ± 0.2
10.	Los Humeros, Puebla	Domas riolíticos Oyameles	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	7	1.0 ± 0.2
11. ROE-144	Cerro Encinal, Mich.	Andesita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	4	3.3 ± 0.3
12. GN-10	Ucareo, Mich.	Obsidiana	Trazas de fijación	5	1.6 ± 0.17
13. 452	Tuxpan, Mich.	Riodacitas	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	5	0.05 ± 0.03
14. -	C. Zirahuato, Michoacán	Riodacita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	5	0.05 ± 0.03
15. 455	C. Peluquín, Mich.	Basaltos	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	5	0.36 ± 0.08
16. 230	Oeste de Cuto de la Esperanza, Mich.	Andesita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	5	0.55

Tabla 1. Continuación (2).

Muestra	Localidad y estado	Litología	Método	Referencia	Fecha m.a.
17. 232	Capula, Mich.	Andesita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	5	0.54 ± 0.027
18. 129	Suroeste de Las Cruces, Mich.	Andesita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	5	0.51
19. 138	Suroeste de Las Cruces, Mich.	Dacita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	5	2.90
20. 126	Morelos, Michoacán	Dacita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	5	0.77
21. 116	La Ordena, Michoacán	Dacita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	5	2.20
22. 211	Sur de Ucareo, Mich.	Basalto	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	5	0.75
23. 219	Oeste de Ucareo, Mich.	Basalto	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	5	0.87
24. 220	Oeste de Ucareo, Mich.	Riolita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	5	1.6 ± 0.15
25. AR-2	Zinapécuaro, Mich.	Riolita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	5	1.14
26. AR-1	Zinapécuaro, Mich.	Riolita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	5	1.50
27. AR-3	Zinapécuaro, Mich.	Riolita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	5	1.21
27. AR-4	Zinapécuaro, Mich.	Riolita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	5	1.19
29. GN-A	La Primavera, Jal.	Obsidiana	Trazas de fi- sión	5	0.15 ± 0.07
30. GN-2	La Primavera, Jal.	Obsidiana	Trazas de fi- sión	5	0.17 ± 0.05
32. GN-5	La Primavera, Jalisco	Obsidiana	Trazas de fi- sión	5	1.01 ± 0.33
33. GN-6	La Primavera, Jalisco	Obsidiana	Trazas de fi- sión	5	4.49 ± 0.17
34. GN-7	La Primavera, Jalisco	Obsidiana	Trazas de fi- sión	5	0.40 ± 0.10

Tabla 1. Continuación (3)

Muestra	Localidad y estado	Litología	Método	Referencia	Miles de años
35. GN-8	Los Azufres, Michoacán	Obsidiana	Trazas de fisión	6	1.42 ± 0.48
36. GN-9	Los Azufres, Michoacán	Obsidiana	Trazas de fisión	6	1.29 ± 0.40
38. -	La Primavera, Jal.	Lavas del Arco Su- reste: Vidrio	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	10	25.5 **
39. -	La Primavera, Jal.	Lavas del Arco Su- reste: Vidrio	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	10	26.8 **
40. -	La Primavera, Jal.	Lavas del Arco Su- reste: Vidrio	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	10	30.1 **
41. -	La Primavera, Jal.	Lavas del Arco Su- reste: Vidrio	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	10	31.9 **
43. -	La Primavera, Jal.	Lavas del Arco Su- reste: Vidrio	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	10	149.6 **
44. -	La Primavera, Jal.	Lavas Pre-Caldera: Vidrio	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	10	143.5 **
45. PED-Jal- 1/78	San Francisco Tesistan, Jal.	Lavas Pre-Caldera: Vidrio	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	2	4.9 ± 0.10
46. PED-Jal- 3/79	El Sombrero, Jal.	Andesita basáltica	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	2	2.8 ± 0.10
47. PED-Jal- 6/79	Sta. Rosa, Jal.	Andesita basáltica	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	2	1.34
48. PED-Jal-	Tequicizintla	Basalto de olivino	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	2	0.91 ± 0.22

Millones de años

Tabla 1. Continuación (4).

Muestra	Localidad y estado	Litología	Método	Referencia	Fecha m.a.
49. PED-Jal-4/79	Palomas	Basalto de olivino	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	2	1.095 ± 0.35
50. -	Caldera Los Humeros, Pue., - Ignimbrita Xátipan.	Riolita-riodacita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	11	0.5
51. -	Caldera Los Humeros, Pue., - Toba Faby	Toba de caída aérea-riodacita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	11	0.3
52. -	Caldera Los Humeros, Pue., - Ignimbrita Zaragoza.	Riodacita-andesita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	11	0.1
53. -	Caldera Los Humeros, Pue.	Andesita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	11	0.08 ± 0.06
54. -	Caldera Los Humeros, Pue.	Riodacita-andesitas	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	11	0.04
55. -	Humeros-Derrumbadas, Pue. - Formación Tenamastepec miembro de Arenas	Dacitas y andesitas de piroxenos.	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	7	0.36 ± 0.15
56. -	Humeros-Derrumbadas, Pue. - Formación Tenamastepec, miembro El Lamón	Andesitas, andesitas basálticas y basaltos	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	7	0.58 ± 0.12 2.80 0.30
57. -	Caldera Los Humeros, Pue. Doño Oyameles.	Riolita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	7	1.0 ± 0.2
58. -	Caldera Los Humeros, Pue. Cerro Pizarro.	Riolita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	7	1.0 ± 0.2
59. -	Caldera Los Humeros, Pue.	Ignimbrita Xátipan	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	7	0.56 ± 0.21
60. -	Las Derrumbadas, Pue.	Dacitas	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	7	0.32 ± 0.1
61. -	Formación Teziutlán, Pue.	Andesitas, andesitas-basálticas	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	7	3.5 ± 0.3
				5	0.7

Tabla 1. Continuación (5)

Muestra	Localidad y estado	Litología	Método	Referencia	Fecha m.a.
62. -	Don Guiryo, Hgo.	Toba	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	9	4.2 ± 0.3
63. -	Don Guiryo, Hgo.	Toba	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	9	4.3 ± 0.3
Dataciones de rocas magnéticas pertenecientes a la base de la Faja Volcánica, comprendidas en el intervalo de 20 m.a. a 6 m.a.					
1. -	Grupo San Juan, Hgo.	Basalto	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	9	6.3 ± 0.2
2. -	Grupo San Juan, Hgo.	Basalto	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	9	6.3 ± 0.2
3. -	Grupo San Juan, Hgo.	Basalto	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	9	6.4 ± 0.2
4. -	Grupo San Juan, Hgo.	Basalto	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	9	6.5 ± 0.2
5. -	Cerro Largo Pathé, Hgo.	Riolita porfídica	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	9	6.6 ± 0.1
6. -	Cerro Largo Pathé, Hgo.	Riolita porfídica	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	9	6.7 ± 0.1
7. PED-11	C. Las Higueras, Jalisco	Basalto	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	3	8.02 ± 0.17
8. PED-17	Mistemeque, Jalisco	Basalto	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	3	8.52 ± 0.18
9. PED-12	Lagunillas, Jalisco	Basalto	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	8.02 ± 0.17
10. PED-14	C. La Campaña, Jalisco	Basalto	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	9.97
11. PED-2	San Miguel, Zacatecas	Andesita basáltica	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	10.52 ± 0.22
12. PED-1	Mesa Toyahua, Zacatecas	Andesita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	10.96 ± 0.57
13. PED-13	Río Verde, Zacatecas	Ignimbrita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	15.3 ± 0.32
14. PED-22	La Cortina (S. Rosa), Zac.	Toba ácida	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	16.9 ± 0.5
15. PED-13	Veta Rica, Jalisco	Basalto	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	19.9 ± 0.4

Tabla 1. Continuación (6).

Muestra	Localidad y estado	Litología	Método	Referencia	Fecha m.a.
16. Ped-10	C. El Mexicano, Jalisco	Basalto	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	20.9 ± 0.44
17. Ped-6	S.M. Bolaños, Jalisco	Dique basáltico	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	21.03 ± 0.44
18. -	Los Humeros, Puebla	Andesita Alseseca	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	7	11.0
19. ROE-142	Los Reyes (Zamora), Mich.	Basalto de Olivino y augita.	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	4	8.8 ± 0.80
20. HF-25	Pathé, Hgo.	Riolita esferulítica	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	8	7.8 ± 0.40
21. HF-24	Pathé, Hgo.	Riolita porfídica	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	8	7.6 ± 0.30
22. HF-7	Taxbata, Hidalgo	Andesita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	8	9.0 ± 0.80
23. HF-16	Volcán Sanganguey	Andesita porfídica	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	8	10.9 ± 1.20
24. IS-23	Mil Cumbres, Michoacán	Andesita porfídica	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	5	13.8 ± 0.70
25. -	Mil Cumbres, Choacán	Andesita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	5	18.2
26. PED-Jal-	San Cristóbal La Barranca	Andesita-basáltica	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	10.06 ± 0.32

Dataciones de rocas magmáticas pertenecientes a la Sierra Madre Occidental, comprendidas en el intervalo de 30 a - 22 m.a.

1. Ped-4	Ing. Bolaños, Jalisco.	Ignimbrita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	22.23 ± 0.46
2. Ped-10	S. Pedro Anasco, Jalisco.	Latita calcica	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	22.54 ± 0.47
3. Ped-1	La Carbonera, Bolaños, Jal.	Ignimbrita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	23.23 ± 0.52
4. Ped-15	P. La Cuna, Jalisco.	Ignimbrita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	23.6 ± 0.50
5. Ped-16	Mesa El Mirador, Jalisco	Ignimbrita ácida	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	28.0 ± 1.20

Tabla 1. Continuación (7).

Muestra	Localidad y estado	Litología	Método	Referencia	Fecha m.a.
6. Ped-3	C. Ceballos, Zacatecas	Ignimbrita ácida	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	29.15 ± 0.61
7. Ped-5	Cerro Grande, Zacatecas	Andesita	$^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$	1	34.36 ± 0.70
8. IG-58	Sur de Cuautla, Mor.	Diorita	Pb-Alfa	3	30.0 ± 3.0

(*) Datos de:

**

1. Nieto, O., et al. (1981)
2. Damon, P., et al. (1979)
3. De Cserna (1974)
4. Rosas, E. (1981)
5. Gutiérrez N., y López M. (1983)
6. Aumento y Gutiérrez N. (1980)
7. Yáñez-García, (1980)
8. Herrera, F. y Milán V. (1981, com. per.).
9. Mahood, G., y Drake, E. (1982)
10. Nichols, R.C. (1970)
11. Ferriz, H., y Mahood, G., (1983).

Los errores de estas dataciones varían de 0.003-0.039

de unos 6 millones de años (Aumento y Gutiérrez N., 1980), mientras que la edad de las riolitas sobreyacentes es de alrededor de 1.5 m.a. (Tabla 1); de hecho, la mayor edad de todo el vulcanismo reciente en los alrededores de esta región (y no sólo la de las riolitas de Los Azufres) es de unos 2 m.a. (Tabla 1). Así, es claro que existe una interrupción entre el vulcanismo "basal" y el reciente, en este caso en el período comprendido entre 6 y 2 millones de años, aproximadamente.

Adicionalmente, también puede establecerse ese *hiatus* en La Primavera, Jal. En general, la edad más antigua del vulcanismo reciente vinculado con la caldera de La Primavera es de un millón de años, mientras que la edad más reciente de las andesitas subyacentes es de unos 3 m.a. (Tabla 1). Habría, así, un *hiatus* entre los 3 y 1 m.a. en los alrededores de La Primavera que, de nuevo, puede considerarse que no marca la diferencia entre el "basamento" y los productos recientes de la FVM, pero cuya existencia es evidente.

Lo que hasta aquí se ha mencionado podría justificar la idea de que, en realidad, la FVM se compone de dos grandes sucesos volcánicos, el primero de los cuales funciona como el "basamento" sobre el que ocurrió el segundo. Ambos sucesos, el basal y el reciente, extruyeron productos volcánicos de composiciones y tipos petrográficos comparables y en general semejantes, si bien es notoria una cierta tendencia en el segundo suceso a emitir productos globalmente más ácidos, provenientes de cámaras volcánicas más someras y diferenciadas (La Primavera, Los Humeros). Cada uno de esos sucesos volcánicos tiene edades que varían localmente, pero que tienen como constante una marcada interrupción, un período de tranquilidad en la actividad volcánica; en términos generales, podría establecerse que, pese a sus variaciones locales, el primer suceso basamental ocurrió entre unos 20 y 4 m.a., siendo esencialmente miocénico o a lo más mio-pliocénico, mientras que el segundo suceso ha ocurrido entre los últimos 4 m.a. y el presente, siendo esencialmente pliocuaternario y, localmente en ciertos casos, exclusivamente cuaternario.

Definida de la manera anterior, es evidente que la FVM en su conjunto - esto es, incluyendo su parte basal y su parte reciente - es bastante más antigua del pliocuaternario, como tradicionalmente se le ha considerado. En realidad, puede seguir considerándosele de esta edad, si se toman en cuenta únicamente los productos volcánicos del segundo suce-

so, en cuyo caso habría que buscar otra denominación para la parte basal. Ciertamente, el criterio que finalmente se adopte no es lo importante, sino el reconocimiento del hecho que aquí se ha señalado.

5. MARCO TECTONICO Y EVOLUCION DE LA FVM: DOS SUCESOS VOLCANICOS

Ahora bien, ¿qué ocurrió a inicios del Mioceno como para haber propiciado el inicio del primer suceso en la formación de la FVM? Y, lo que es más importante, ¿qué ha seguido ocurriendo hasta la fecha, con una breve interrupción de un par de millones de años, como para propiciar la formación del segundo suceso de la FVM de hace 4 m.a. a la fecha?

Estos son temas que deben investigarse más minuciosamente y con mayor acopio de datos de los que se han empleado en este trabajo. Por lo tanto, aquí se plantearán meros esbozos sobre los mismos.

El origen del vulcanismo basamental de la FVM coincide prácticamente con el principio del Mioceno. De acuerdo con McDowell y Clabaugh (1979), hacia esta fecha cesó la actividad magnética de la Sierra Madre Occidental - hace unos 26 m.a. - habiéndose extinguido la Placa Farallón debajo de la Americana (figura 8), cuya subducción había sido la alimentadora del vulcanismo ignimbrítico. Y aunque para algunos autores (Demant *et al.*, 1976) el vulcanismo piroclástico habría continuado quizá hasta el Mioceno Medio, es evidente que la consumación y fraccionamiento de la Placa Farallón a fines del Oligoceno, o principios del Mioceno habría propiciado una reorientación mayor en la tectónica de placas del Pacífico, dando lugar a una tectónica distensiva (Atwater, 1970; Coney, 1976; Urrutia, 1984; figura 8).

No es muy claro lo que ocurrió con esa tectónica distensiva, pero es evidente que el cambio de régimen pudo haber propiciado, no sólo el fin del vulcanismo de la SMO, sino también el inicio del vulcanismo basamental de la FVM; este cambio explicaría las diferencias tanto composicionales como de orientación existentes entre la fase ignimbrítica de la SMO y la andesítica-básica de la FVM de edad miocénica o miopliocénica.

COLUMNA LITOLÓGICA CUALITATIVA DEL POZO SAN MARCOS-2(SM-2)

Prof m	LITOLÓGIA	O B S E R V A C I O N E S
		Arena gruesa con Grava e intercalaciones de Basaltos y Paleosuelos
		Andesitas con intercalación de Basaltos, ignimbritas y Paleosuelos
		Andesitas con Colados de Basaltos y Paleosuelos intercalados
		Basaltos
		Tobas
500		Andesitas
		Andesitas con Coladas de Basaltos intercalados
		Andesitas con Paleosuelos intercalados
		Basaltos
		Andesitas
		Basaltos con intercalación de Andesitas
		Andesitas y Basaltos
1000		Dioritas Cuarzíferas
		Andesitas con Basaltos
		Dioritas Cuarzíferas con intercalación de Basaltos y Granitos
1500		Andesitas con intercalaciones de Dioritas Cuarzíferas y Paleosuelo
		Granito
2000		Andesitas con intercalaciones de Dioritas Cuarzíferas
		Dioritas Cuarzíferas
2300		Granito

Tomada de :Viggiano G. (1983 C.F.E.)

ESCALA 1:10,000

FIGURA 7

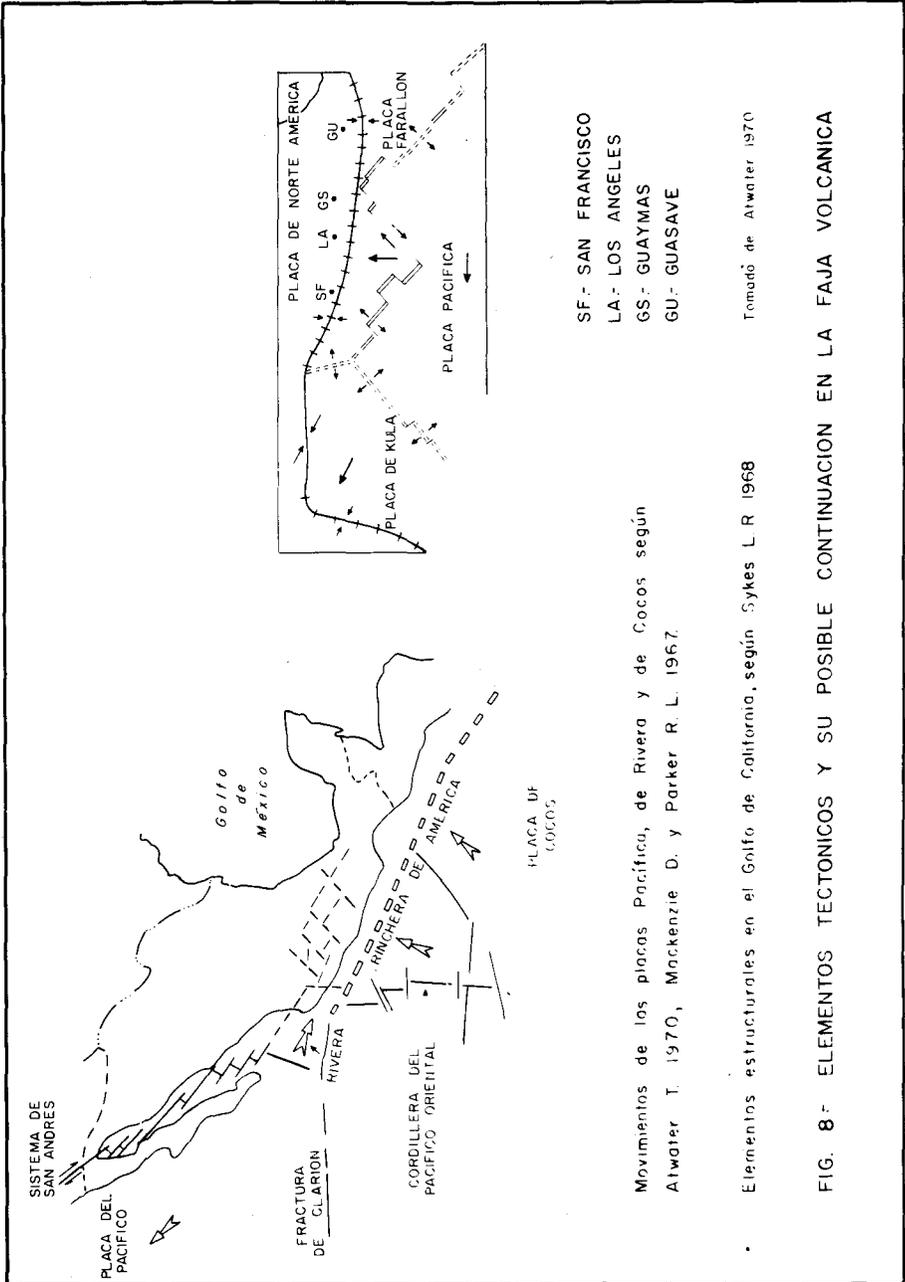


FIG. 8.- ELEMENTOS TECTONICOS Y SU POSIBLE CONTINUACION EN LA FAJA VOLCANICA

El vulcanismo del primer suceso, el basamental, de la FVM, se habría iniciado, entonces, posteriormente a la aparición de grandes fallas generadas por el nuevo régimen distensivo. De hecho, es muy posible que los primeros regímenes volcánicos hayan sido eminentemente fisurales más que centrales, lo que explicaría los notables espesores - aparentemente continuos - de coladas andesítico-basálticas apiladas; más adelante, quizá hacia el final de este suceso, las erupciones habrían tendido a formar predominantemente aparatos centrales compuestos del tipo de los enormes estratovolcanes que tradicionalmente han identificado a la FVM.

La aparición del régimen tectónico distensivo pudo también haber originado poco antes del inicio del vulcanismo, la conjugación de las estructuras para propiciar la formación de grábenos o cuencas tectónicas en las que se apilaron después los gruesos derrames que, probablemente, empezaron siendo emitidos por las mismas fisuras.

El tipo de estructuras que se formaron con el cambio de régimen mencionado, mismas que aparentemente continuaron activas, o fueron reactivadas posteriormente, es también un tema discutible. Si se trató, como se ha señalado, de esfuerzos de distensión predominantemente, las estructuras debieron ser principalmente de tipo normal y probablemente escalonadas, formando quizá las cuencas mencionadas arriba. Sin embargo, otros autores han planteado - aunque para fechas más recientes, pliocénicas concretamente - la presencia de una gran falla transformante que existiría debajo de la FVM (Mooser, 1969; De Cserna, 1970; Gastil y Jensky, 1973; Walper, 1980); esta opción ha sido descartada, entre otros, por Demant (1978) debido a que: ". . . todas las fracturas en el Eje Neovolcánico son fallas normales de tensión." Pese a que esta afirmación no es del todo acertada, ya que hay fallas con desplazamientos laterales dentro de la FVM (por ejemplo, la Falla Uruétaro, al norte de Morelia, donde se han medido pitches horizontales), lo más probable es que, efectivamente, las estructuras principales de la FVM, formadas desde el Mioceno y con posteriores reactivaciones, hayan sido, y sean aún, principalmente de tipo normal.

El final del vulcanismo basamental de la FVM es, como se ha dicho, variable según la localidad o el sector que se estudie. Sin embargo, a ese vulcanismo le sucedió, como también se ha anotado, un período de 2 a 4 millones de años con ausencia de actividad volcánica. En ese perfo-

do de *hiatus*, por lo menos en la parte centro occidental de la FVM parece haberse formado un conjunto de montañas en bloque, afalladas e inclinadas esencialmente por estructuras de dirección E-W a NW-SE; estos bloques son conspicuos particularmente en la Sierra de San Marcos, Jal., y en la Sierra de Pajacuarán, Mich., habiéndose formado justamente en el período comprendido entre el final del vulcanismo "basal" y el principio del vulcanismo reciente.

Posteriormente a esa etapa de fallamiento sin vulcanismo, se inicia la etapa del vulcanismo reciente pliocuaternario que, como se ha repetido insistentemente, tiene fechas variables según la localidad, pero que en general se ha comprendido entre 4 m.a. y el presente. Se trata ahora de la emisión de los productos típicamente identificados como de la FVM; en general, puede repetirse aquí que aunque no existe una diferencia petrográfica marcada con los productos volcánicos del suceso precedente, los de esta etapa tienden a ser más silíceos, sugiriendo la presencia de cámaras magmáticas más diferenciadas.

Algunos autores han sugerido que el vulcanismo de este período puede, a su vez, dividirse en dos subperíodos. Así, Robin y Cantagrel (1978), si bien consideran este período más corto - de 2.5 m.a. a la fecha - lo subdividen en el vulcanismo transicional del norte y la Cadena Actual. El vulcanismo del norte de la FVM estaría representado por formaciones del Plioceno Superior-Cuaternario Inferior, con edades de 2.5 a 1.6 m.a., entre las que incluyen las formaciones Atotonilco y Pachuca-San Juan del Río; lamentablemente, dataciones recientes efectuadas en las dos últimas formaciones revelan que más bien serían parte del vulcanismo basamental, ya que arrojaron edades de 6.3 a 9 m.a. (Tabla 1). La Cadena Actual, por su parte, se habría iniciado de hace unos 1.6 a 1.5 m.a. al presente, marcando una migración del vulcanismo andesítico hacia el sur.

Los datos recopilados para el presente trabajo no permiten apoyar una subdivisión en el vulcanismo reciente de la FVM, ni en los períodos postulados por Robin y Cantagrel (1978) mencionados, ni en otros. Todo lo más que puede decirse, desde el punto de vista del trabajo de campo aquí integrado, es que, como el suceso volcánico que lo precedió, éste también parece haberse iniciado preferentemente con erupciones fisurales, aunque probablemente de menor envergadura, para después variar a erupciones centrales formadoras de aparatos volcánicos aislados

o en complejos (El Ceboruco, Nay.; Nevado de Colima-Volcán de Fuego). Asimismo, puede señalarse que estos aparatos están conspicuamente localizados en intersecciones de sistemas estructurales activos o de reciente actividad (figura 9) - lo cual por otra parte no tiene nada de sorprendente.

6. POTENCIAL GEOTERMICO DE LA FVM

La presencia del segundo suceso volcánico en la Faja, así como la existencia en ella de sistemas estructurales activos o de reciente actividad, implica que en su interior se presentan los dos factores más importantes para la formación de sistemas geotérmicos activos en ambientes volcánicos. Esos factores son la existencia de una fuente que proporcione la temperatura necesaria y la de estructuras que puedan actuar como conductoras de los probables fluidos geotérmicos.

La intensa actividad volcánica reciente evidenciada en la FVM, indica que en su subsuelo pueden existir cámaras magmáticas en proceso de enfriamiento, cuya temperatura quizá no es suficiente para provocar nuevas erupciones pero probablemente sí lo es para generar un sistema hidrotermal activo, eventualmente aprovechable para la instalación de una planta geotermoeléctrica. Por lo tanto, hay mayor probabilidad de encontrar una fuente de calor en regiones volcánicas recientes - y más aún con términos finales ácidos - como es justamente el caso de la FVM.

Por otra parte, no es suficiente con que pueda existir una fuente de calor. En medios volcánicos, donde la porosidad y permeabilidad de la probable roca almacenadora de los fluidos geotérmicos es esencialmente secundaria - producida por fallas y/o fracturas - es vital la existencia de estructuras capaces de actuar como conductoras y colectoras de esos fluidos. La FVM también posee abundantes estructuras - e intersecciones de ellas - (figura 4), lo cual le otorga una importancia adicional desde el punto de vista geotérmico.

En la figura 4 se muestran, además de las estructuras reconocidas en los trabajos de campo, las principales manifestaciones termales (manantiales de agua caliente y pozos termales) encontradas en la FVM; consideradas individualmente, es decir, antes de su agrupación por zonas. se conocen actualmente más de mil manifestaciones en esta región.

Si se compara la figura 4 con la figura 9 - en la que se han marcado los rasgos estructurales con mayor expresión regional de la FVM - se verá que las manifestaciones termales tienden a alinearse según los patrones estructurales predominantes en cada sector. Esto es muy claro en el sector occidental, en los alrededores de La Primavera y San Marcos (figura 4), donde los alineamientos tienden a ser NW-SE, justamente los de las estructuras presentes en ese sector (figura 9). Ocurre algo semejante al oriente de La Primavera, con manantiales termales alineados E-W coincidiendo con las estructuras regionales del Graben de Chapala. Al occidente de Los Azufres (figura 4), donde las manifestaciones presentan un alineamiento NE-SW, también hay coincidencia con las estructuras del denominado Sistema Cuitzeo (figura 9). Todo ello prueba que, efectivamente, las estructuras de la FVM son capaces de actuar como conductos de los fluidos geotérmicos de su subsuelo.

Desde el punto de vista de su actividad volcánica, es evidente que las zonas con vulcanismo más reciente de la FVM son las que presentan más probabilidades geotérmicas. Si se recuerda la subdivisión en sectores que se sugirió en el primer capítulo de este trabajo y se observa la figura 1, se notará que entre el sector de Jalapa y el sector de México existe una gran área cubierta por depósitos aluviales; sin embargo, dentro del par de estructuras que delimitan el graben de Libres-Oriental (figura 9), que está relleno por esos depósitos, existen derrames volcánicos aún más recientes. Esa actividad volcánica corresponde a los centros volcánicos de Los Humeros y Las Derrumbadas, y es claro que define un área de reactivación dentro del sector oriental de la FVM, cuyo vulcanismo es aún más nuevo que el que la rodea. Esta situación le confiere a esta área un interés geotérmico adicional, mismo que actualmente se ha visto comprobado por los pozos geotérmicos practicados en Los Humeros.

Pero no es la única parte de la FVM que, a la vista de la figura 1, puede ser catalogada como más reciente que el promedio. Por ejemplo, es claro que el que aquí se denominó sector Colima, relacionado con el complejo volcánico que ahí existe, señala una área de vulcanismo muy joven que amplía y extiende los límites de la FVM hacia el sur. Obviamente, la actividad lávica de hace unos años en el Volcán de Fuego y su continua actividad fumarólica lo confirma y sugiere a esta zona como de alto interés geotérmico.

Por otra parte, los sectores denominados SW de Tequila, Ceboruco y Sangangüey-San Juan, claramente alineados en dirección NW-SE dentro del llamado graben de Tepic-Chapala, denotan zonas aisladas pero de vulcanismo muy reciente que tienden a prolongar la FVM hacia el NW (figura 1). Constituyen también áreas con alto potencial geotérmico, debido a la juventud de su vulcanismo y a la envergadura de las estructuras con las que se relacionan.

Que el potencial geotérmico de la FVM es enorme lo prueban, además, los campos geotérmicos ya perforados de Los Azufres, Mich., Los Humeros, Pue. y La Primavera, Jal., que son actualmente una realidad el primero de ellos generando ya energía eléctrica. Pero no sólo ellos. Pronto podrán probarlo también otros campos geotérmicos, exhaustivamente estudiados con diversas disciplinas - geología, geofísica, geoquímica - por la Comisión Federal de Electricidad y con resultados preliminares altamente alentadores.

Lo anterior no tiene nada de sorprendente, porque la geotermia es el recurso energético más estrechamente relacionado con el vulcanismo. Y en una región del país como la FVM, donde diversos estudios han concluido que la existencia de cámaras magmáticas someras y altamente diferenciadas, por ejemplo en La Primavera (Mahood, 1980; Mahood y Drake, 1982) y en Los Humeros (Ferriz y Mahood, 1983; Verma, 1983) es algo más que una especulación, y donde se concentra la mayor densidad de manifestaciones termales, la mayor superficie de rocas volcánicas recientes y una abundante cantidad de estructuras, *tiene* que existir el mayor potencial geotérmico de todo el país.

BIBLIOGRAFIA

- ATWATER, T., 1970. Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of Western North America. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81, 3513-3536.
- AUMENTO, F. y L. C. A. GUTIERREZ N., 1980. Geocronología de Los Azufres, Mich., Inf. 3-80. Ofna. Expl., Comisión Federal de Electricidad. Inédito.
- BLOOMFIELD, K., 1975. A late Quaternary monogenetic volcano field in central Mexico. *Geol. Rundschau*, 64, 476-497.
- CONEY, P. J., 1976. Plate tectonics and the Laramide orogeny, New Mexico. *Geol. Soc.*, sp. publ. 6, 5-10.

- DAMON, P. E., O. J. NIETO y A. A. L. DELGADO, 1979. Un plegamiento neogénico en Nayarit y Jalisco, y evolución geomórfica del Río Grande de Santiago. Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México. XIII Convención Nacional, p.156-192.
- De CSERNA, Z., 1970. Mesozoic Sedimentation, magmatic activity and deformation in Northern Mexico, in the Geologic framework of the Chihuahua tectonic Belt, *West Texas Geol. Soc.*, 99-117.
- De CSERNA, Z., 1974. Datos geocronométricos terciarios de los estados de México, Morelos y Guerrero. *Bol. Asoc. Mex. Geol. Pet.*, XXVI, 4-6, 263-273.
- DEMANT, A., 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación, UNAM, *Inst. Geología, Revista*, 2, 2, 172-187.
- DEMANT, A. y C. C. ROBIN, 1975. Las fases del vulcanismo en México, una síntesis en relación con la evolución geodinámica desde el Cretácico, UNAM, *Inst. Geología, Revista*, 75, 1, 70-83.
- DEMANT, A., R. MAVVOIS y L. SILVA, 1976. El Eje Neovolcánico Transmexicano. III Cong. Latinoamericano de Geol., Exc. Núm. 4, 1a. Parte. 18.
- FERRIZ, H. and G. A. MAHOOD, 1983. Eruption rates and compositional trends at Los Humeros Volcanic Center, Puebla, México. *EOS*, 64, 45, 833.
- FLORES, L. R., 1980. Estudio tectónico del Eje Neovolcánico utilizando información obtenida por el satélite Landsat 1, proyecto C-1073, Instituto Mexicano del Petróleo, México.
- GASTIL, G. R. and W. JENSKY, 1973. Evidence for strikslip displacement beneath the Trans-Mexican Volcanic Belt, *Stanford Univ. Publ. Geol. Sci.*, 13, 171-180.
- GUNN, B. M. and F. MOOSER, 1970. Geochemistry of the volcanics of central Mexico. *Bull. Volcanol.*, 34, 577-616.
- GUTIERREZ N., L. C. A., 1981. Litología y mineralogía secundaria del Pozo PR-2 de La Primavera, Jal. Informe 19-81, C. F. E., inédito.
- GUTIERREZ N., L. C. A., 1983. Petrografía y mineralogía hidrotermal en los pozos H-1 y H-2 del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Informe Interno CFE, inédito.
- GUTIERREZ N., L. C. A., 1984. Petrografía y mineralogía secundaria en el Pozo SM-1, San Marcos, Jal. Informe 9-84. C. F. E., inédito.
- GUTIERREZ N., L. C. A. y A. LOPEZ M., 1983. Datación por trazas de fisión de obsidias de los campos geotérmicos de La Primavera, Jalisco y Los Azufres, Michoacán. Inf. 64-82 Depto. Expl. C.F.E., inédito.

- MAHOOD, G. A., 1980. The geological and chemical evolution of a late pleistocene rhyolitic center: The Sierra La Primavera, Jalisco, México. Ph. O. Thesis. Univ. Berkeley, Calif. U. S. A.
- MAHOOD, G. A. and R. E. DRAKE, 1982. K-Ar dating young rhyolitic rocks, a case study of the Sierra La Primavera, Jalisco, México. *Geol. Soc. of Amer. Bull.*, 93, 1232-1241.
- McDOWELL, F. W. and S. E. CLABAUGH, 1972. Edades potasio-argón de rocas volcánicas de la Sierra Madre Occidental, al noreste de Mazatlán. II Convención Soc. Geol. Mex., 182-185.
- McDOWELL, F. W. and S. E. CLABAUGH, 1979. Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico, *Geol. Soc. of America*, special paper 180, 113-123.
- MOOSER, F., 1969. The Mexican Volcanic Belt structure and development, formation of fractures by differential crustal heating. México, D. F., Pan. Am. Simp. on the Upper Mantle (1968), pte.2, 15-22.
- MOOSER, F., 1972. The Mexican Volcanic Belt structure and tectonics. *Geof. Int.*, 12, 2, 55-70.
- NEGENDANK, J. F., 1972. Volcanics of the Valley of Mexico, Part 1, Petrography of the volcanics. N. J6, *Miner. Abs.*, 116, 308-320.
- NICHOLS, R. C., 1970. The geology and geochemistry of the Pathe geothermal zone, Hidalgo, Mexico. (Ph D. Thesis), Norman, Oklahoma, U. S. A., Univ. Oklahoma.
- NIETO, O. J., A. L. A. DELGADO y E. P. DAMON, 1981. Relaciones petrográficas y geocronológicas del magmatismo de la Sierra Madre Occidental y el Eje Neovolcánico en Nayarit, Jalisco y Zacatecas. Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, XIV Convención Nacional. p. 327-362.
- ROBIN, C. et J. M. CANTAGREL, 1978. Le volcanism de l'Est mexicain; premières données isotopiques du strontium. Ge. Réunion annuelle Sci. Terre, 1978. p. 337.
- ROSAS E., J. C., 1981. Estudio geológico de las zonas geotérmicas Ixtlán de Los Hervores-Los Negritos. Michoacán. Tesis profesional. Instituto Politécnico Nacional.
- URRUTIA F., J., 1984. Plate reconstruction from Paleozoic paleomagnetism on the tectonic evolution of Mexico. *Geodynamic series*, *Geophys. Union*, 12, 29-44.
- VERMA, S. P., 1983. Alkali and Alkaline Earth Element Geochemistry of Los Humeros caldera, Puebla, Mexico. *J. Volc. and Geoth. Res.*, 20, 21-40.

WALPER, J. L., 1980. Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, in the origin of the Gulf of Mexico and the early opening of the Central North Atlantic, ed. R. H. Pilger, Houston. *Geol. Soc. Contin. Educ. Ser., 1*, 87-98.

YAÑEZ G., C., 1980. Informe geológico del proyecto geotérmico Los Humeros - Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz. C. F. E., área Geología y Minería.

(Recibido: 22 de mayo, 1984)

(Aceptado: 8 de octubre, 1984)

Se recomienda que la referencia a este trabajo se haga en la siguiente forma:

S. Venegas-Salgado, R. Maciel-Flores, y J. Herrera-Franco, 1985. Recursos geotérmicos en la Faja Volcánica Mexicana. *Geofís. Int.*, Volumen Especial sobre el Cinturón Volcánico Mexicano - Parte 1 (Ed. S. P. Verma), Vol. 24-1, pp.