

## LAS FASES DEL VULCANISMO EN MÉXICO; UNA SINTESIS EN RELACION CON LA EVOLUCION GEODINAMICA DESDE EL CRETÁCICO

Demant A.\* — Robin C.\*\*

Las rocas volcánicas cubren en México aproximadamente las 2/3 partes del territorio; a pesar de eso casi no existen trabajos sintetizados sobre el magmatismo. Los únicos conocimientos petrográficos en la parte Este, se encuentran en la zona minera de Pachuca (Geyne A, R. Fries C. 1963), o en las planicies del Golfo de México (Heim A. 1934 - Muir J. 1936 Watson E. H. 1937). En la parte occidental existen algunos reconocimientos muy generales sobre todo en Baja California. (Lindgren W. 1888 Darton N. H. 1921 - Beal M. C. 1948). Pero los únicos datos químicos válidos se encuentran en la zona del Valle de México y sobre el Eje Neo-volcánico (Gunn B. M. Mooser F. 1970 - Negendank J. 1972); las erupciones recientes del Parícutín dieron por otra parte lugar a numerosos datos (Williams H. 1950 Wilcox R. 1954).

Desde hace 3 años, en el seno de un programa de investigación del Instituto de Geología de la U.N.A.M. se desarrollaron estudios sobre la petrología y la geoquímica de las rocas volcánicas en dos zonas claves; la región Este de México, de la Sierra Madre al Atlántico (fig. 1) y al nivel del margen continental pacífico. 350 análisis químicos nuevos fueron realizados en el Departamento de Geoquímica, que hacen un total de 500 análisis que sirvieron de base a la elaboración de esta síntesis.

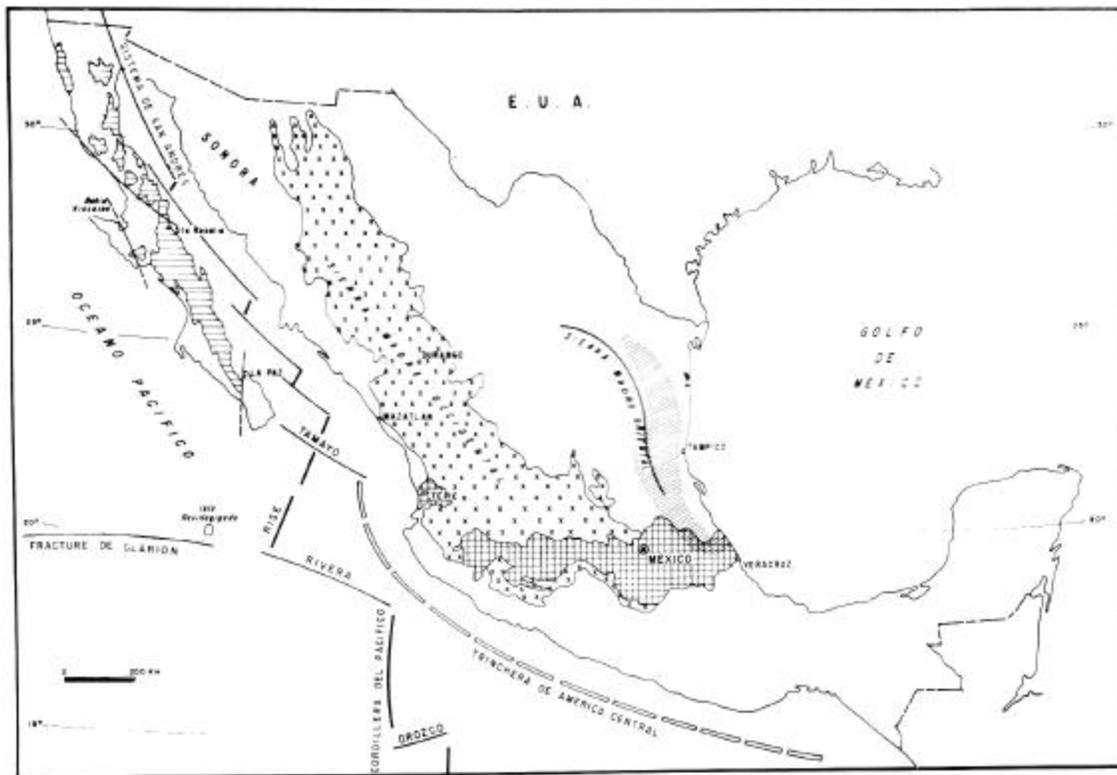


Fig. 1: Localización de las provincias volcánicas y elementos tectónicos actuales al nivel del Pacífico:

- \*Rayado horizontal = Provincia californiana.
- \*Cruces = Provincia de la Sierra Madre Occidental.
- \*Cuadrícula = Eje neovolcánico Transmexicano.
- \*Rayado oblícuo = Provincia Oriental.

\* Investigador del Instituto de Geología, UNAM; Laboratorio de Geología Dinámica. Universidad Aix Marseille III Francia.

\*\* Centro de Investigaciones Geodinámicas 06230 VilleFranche mer, Francia.

## INTRODUCCION

Gunn B. M. y Mooser F. (1970) hablan definido en México dos grandes provincias magmáticas (fig. 1):

- La provincia de la Cordillera Occidental o Sierra Madre Occidental.
- El Eje volcánico Trans-mexicano.

Los trabajos realizados por los autores tanto en el lado atlántico como al nivel Golfo de California-Pacífico, permiten introducir dos unidades suplementarias. Se trata de la provincia alcalina oriental y de la provincia de California (fig. 1). Eso permite completar el esquema magmático de esta parte de continente Norteamericano e interpretar estas diferentes provincias en función de las relaciones placa americana-placa pacífica.

En primer término definiremos las cuatro provincias magmáticas antes de considerar todos los eventos magmáticos en un esquema geodinámico evolutivo del Cretácico al actual.

### I. EL EJENEO -VOLCANICO TRANS -MEXICANO

Esta zona volcánica de orientación Este-Oeste, que se prolonga desde Veracruz hacia Tepic, es uno de los elementos estructurales mayores de la geología de México. La actividad volcánica principió en este sector en el Oligo-Mioceno (Gunn B. M. - Moose, 1970-Negendank J. 1972) y se prolongó hasta el Cuaternario. Los volcanes mayores de México (Citlaltépetl, Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Nevado de Toluca ... ) se extiende a lo largo del Eje. Este se encuentra fragmentado por un sistema de Grabens N.S. o NW-SE, el más importante es el "Valle de México", originando depresiones donde se acumularon productos aluviales y lacustres.

Los estudios realizados en el sector de Pachuca (Geyne A. R. - Fries C. 1963), en el Valle de México (Schlaepfer C. 1968 - Gunn B. M. Mooser F. 1970 - Negendank J. 1972), en el Nevado de Toluca (Bloomfield K. 1974 Villaseñor G. 1974), en la región de Guadalajara (Gunn B. M. - Mooser F. 1970), y del Parícutín (William H. 1950 - Wilcox R. 1954) demuestran el carácter calco-alcalino de estas lavas.

Hemos agrupado en la Tabla 1 medias de los análisis publicados sobre el Valle de México Por diferentes autores; la clasificación usada para distinguir entre basaltos calco-alcalinos (<53% de sílice), "Low-Si" andesitas (53-57% SiO<sub>2</sub>), andesitas (57-63%) dacitas (63-67%) y riolitas (>67% SiO<sub>2</sub>) es la de Taylor S. R. et al. (1968).

TABLA I														
	SCHLAEPFER C. J. 1968				GUNN B. M. - MOOSER F. 1970					NEGENDANK J. 1972				
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
SiO <sub>2</sub>	51.41	56.43	60.82	64.21	69.98	51.38	55.08	60.75	64.89	72.81	55.09	60.25	65.24	70.35
TiO <sub>2</sub>	0.97	0.14	0.79	0.58	0.93	1.58	1.30	0.86	0.70	0.22	1.02	0.65	0.51	0.41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.29	21.71	18.70	18.26	14.36	15.87	16.65	16.29	16.32	14.33	17.42	17.36	17.31	15.98
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.85	2.00	1.45	1.50
FeO	5.09	4.67	3.93	3.30	3.15	7.72	5.81	4.00	2.71	0.70	5.78	3.60	2.47	1.44
MnO	0.08	0.18	0.05	0.08	0.02	0.15	0.13	0.09	0.08	0.05	0.17	0.13	0.42	0.06
MgO	9.35	1.99	2.49	1.08	0.64	7.84	5.66	3.98	2.28	0.57	5.70	4.35	2.32	0.89
CaO	5.18	6.11	5.13	4.39	3.76	8.40	7.77	5.90	4.60	1.72	7.95	6.27	4.27	3.19
Na <sub>2</sub> O	5.73	4.93	4.38	4.25	2.79	3.41	3.78	4.03	4.23	4.14	3.63	3.80	4.08	3.51
K <sub>2</sub> O	1.94	1.93	2.05	2.11	2.27	1.02	1.28	1.89	2.21	3.79	1.21	1.63	2.09	2.56
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.25	0.17	0.21	0.18	0.33	0.23	0.36	0.20	0.15	0.05	0.13	0.08	0.09	0.08
Total	99.79	99.76	100.05	99.94	99.73	99.10	99.32	99.49	99.67	99.88	99.95	100.12	100.25	99.97

Se puede notar una buena concordancia entre los resultados de Gunn B. M. Mooser F. y los de Negendank; consideramos con cierta reserva los datos de Schiaepfer C., sobre todo por los valores en MgO y Na<sub>2</sub>O - K<sub>2</sub>O. Por eso no hemos incluido esos análisis en las medias (105 análisis) del Valle de México (Tabla II). En esta Tabla II, fueron reportados también datos de la región de Guadalajara (20 análisis) (Gunn B. M. Mooser F. 1970), y del Parícutín (41 análisis) (Williams H. 1950 - Wilcox R. 1954).

	PARICUTIN		VALLE DE MEXICO					GUADALAJARA		
SiO <sub>2</sub>	55.83	59.63	51.38	55.99	60.50	65.06	71.58	49.25	55.07	60.32
TiO <sub>2</sub>	0.96	0.79	1.58	1.16	0.75	0.60	0.31	2.32	1.25	1.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.12	17.75	15.87	17.03	16.82	16.81	15.15	15.78	17.73	17.24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.77	1.67	1.50	1.67	1.75	1.48	1.50	1.50	1.50	1.50
FeO	5.25	4.15	7.72	5.80	3.80	3.23	1.07	9.72	6.08	4.53
MnO	0.12	0.10	0.15	0.15	0.11	0.10	0.05	0.16	0.11	0.11
MgO	5.38	3.81	7.84	5.68	4.16	2.30	0.73	6.13	4.48	2.27
CaO	7.27	6.38	8.40	7.86	6.08	4.43	2.45	8.85	7.78	5.22
Na <sub>2</sub> O	3.83	3.81	3.41	3.70	3.91	4.15	3.82	3.48	3.51	4.61
K <sub>2</sub> O	1.12	1.60	1.02	1.24	1.76	2.15	3.17	1.46	1.57	2.39
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.33	0.26	0.23	0.24	0.14	0.12	0.06	0.20	0.20	0.20
Total	99.88	99.95	99.10	100.52	99.88	100.43	99.89	98.85	99.28	99.46

En esta tabla se puede notar una variación bastante significativa en los valores en K<sub>2</sub>O; para SiO<sub>2</sub> = 55% y SiO<sub>2</sub> = 60% son los siguientes:

Parícutín	1.12	1.60
Valle de México	1.24	1.76
Guadalajara	1.57	2.39

Se conoce el papel que juega el K<sub>2</sub>O para relacionar el origen de los magmas con la profundidad del Plano de Benioff (Dickinson W. R. 1968 - Dickinson W. R. - Hatherton T. 1967) (crece el tenor en K<sub>2</sub>O con la profundidad del Plan de Benioff). Se propone en un próximo artículo ver esta relación por el vulcanismo Plioceno y Cuaternario a lo largo de todo el Eje Trans-mexicano.

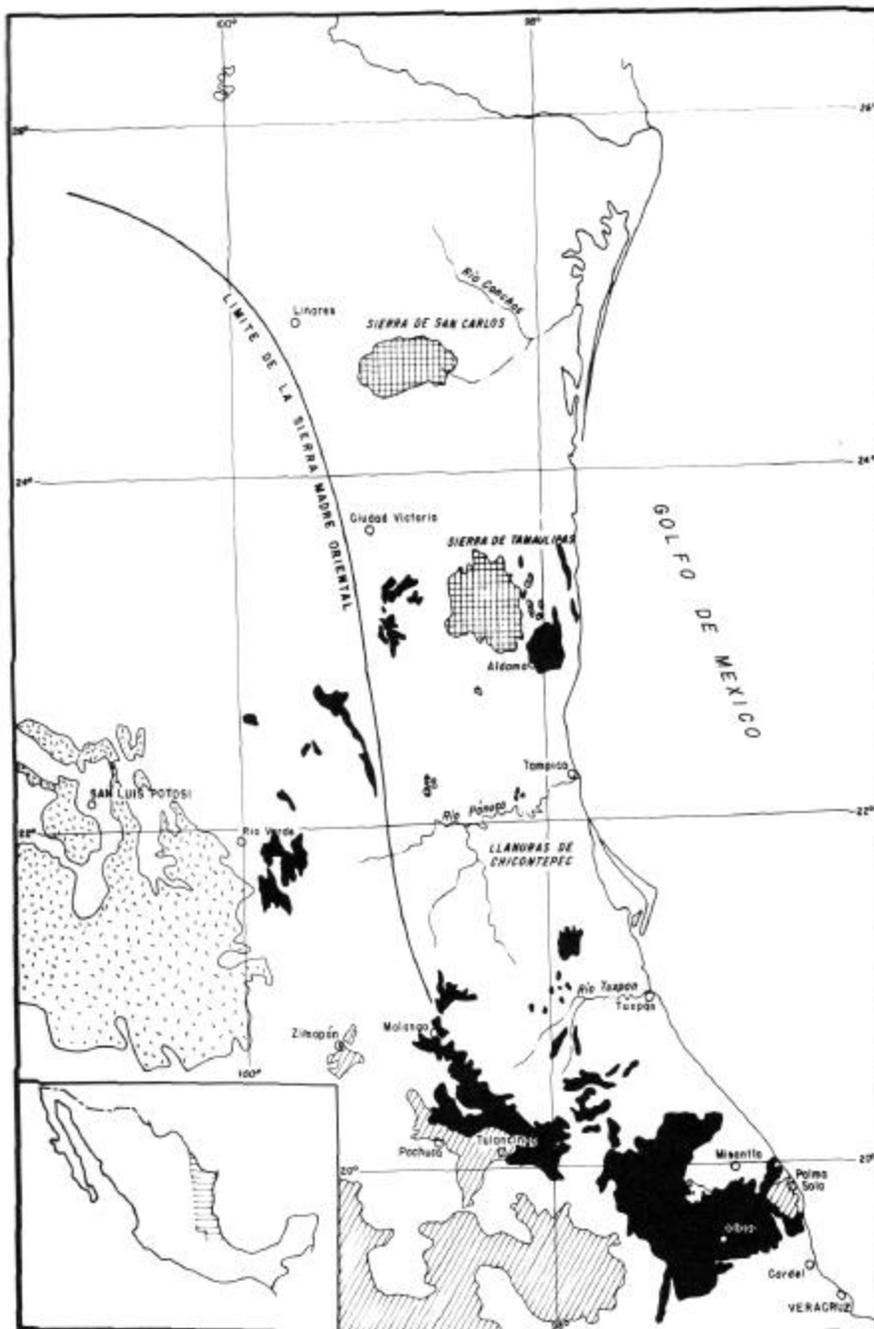
Se puede notar también la predominancia de las andesitas y de las dacitas en esta línea evolutiva; los basaltos; calco-alcalinos son muy escasos, pero su presencia es de gran importancia para saber más del magma primario: en esta línea las riolitas también son pocas.

La evolución petrográfica y química del vulcanismo del Eje Trans-mexicano es característica de un magmatismo de zonas en compresión al nivel de un Plano de Benioff (subducción) aunque ciertos autores han propuesto otras explicaciones (Negendank J. 1972). Este vulcanismo de margen continental está relacionado con los movimientos respectivos de las placas americana y pacífica en la zona Sur-Oeste del país. (ver parte síntesis).

## II. LA PROVINCIA ORIENTAL

Los términos petrográficos son bastante variados en esta región; sin embargo el carácter alcalino de las lavas y por otra parte el contexto tectónico donde se localiza este vulcanismo unifica esta provincia.

Desde el Norte del Estado de Tamaulipas hasta Veracruz, una serie de intrusiones y extrusiones volcánicas se encuentran en las planicies costeras (fig. 2). A esta zona volcánica de orientación NNW-SSE se pueden unir las manifestaciones fisurales ácidas que cubren en parte una paleotopografía constituida por los sedimentos mesozoicos y cenozoicos plegados de la Sierra Madre Oriental. Al Sur, las manifestaciones volcánicas ligadas al Eje Neo-volcánico complican un poco la disposición, mientras que al Oeste, sobre el altiplano (entre Río Verde y Pachuca, fig. 2) se pueden notar al mismo tiempo influencias del dominio calco-alcalino y de la provincia ignimbrítica.



**Fig. 2: Provincia Oriental — esquema geológico.**

- Rayado oblicuo: vulcanismo del Eje Neo-volcánico.
- Puntitos: Ignimbritas.
- Negro: Vulcanismo del altiplano.
- Cuadrado: Vulcanismo de las planicies.

Sin embargo la presencia de testigos del vulcanismo alcalino a lo largo de la Sierra Madre constituye un rasgo característico de esta provincia oriental.

En las planicies se localizan, de Norte a Sur, macizos volcánicos alcalinos (sobresaturados y subsaturados); el más importante en superficie es la Sierra de Tamaulipas (fig. 2). En esta zona fueron descritas riolitas, traquitas, sienitas y fonolitas (Watson E. H. 1937 - Robin C. 1974). La actividad volcánica empezó en el Oligoceno; se desarrolló en el Mioceno con predominio de rocas subsaturadas y en el plio-cuaternario con emisiones basálticas.

Al Oeste y al Sur de Tampico el vulcanismo agrupa una serie diferenciada (nefelinitas-basanitas-basaltos alcalinos-hawaitas mugearitas) (Robin C. Demant A. 1974 Robin C. 197-15) de edad miocénica y pliocénica. Unos cerros aislados se semejan al magmatismo de las Sierras de San Carlos y de Tamaulipas.

Más al Sur, en Veracruz, la zona de Palma Sola, presenta dos líneas magmáticas distintas: Una serie calco-alcalina con predominancia de andesitas básicas de olivino acompañadas por andesitas, dacitas e intrusiones microdioríticas. Esta fase de actividad relacionada con la actividad miocénica del Eje Trans-mexicano, está recubierto por derrames basálticos que se parecen a las series de las planicies (basanitas) o a los "trapps" del altiplano.

Estos derrames presentan en la región Noroeste de Veracruz, un espesor que puede alcanzar 1500 m. Ellos se intercalan a veces con rocas sedimentarias; así las primeras emisiones (basaltos de olivino) afloran en el seno de calizas miocénicas. Los derrames sobrepuestos que vienen después presentan una cierta variación química según la localización geográfica. Cerca de Misantla por ejemplo, se reconocen en la base andesitas básicas Y. después, la mayoría de la serie es alcalina diferenciada (traquibasaltos). En el corte Jalapa-Cardel (fig. 2) las lavas de carácter intermedio con sílice o hiperstena normativos son las más abundantes.

En Hidalgo, las lavas ácidas están representadas por alternancias de basaltos e ignimbritas que se formaron en el Mioceno y el Plioceno; estas manifestaciones recubrieron las fallas que bordean la sierra y por movimientos posteriores se han fracturado. Entre Tulancingo y Huejutla, en forma esquemática, se puede definir un primer período miocénico, principalmente basáltico; después una fase ignimbrítica cubierta por emisiones básicas que yacen en otros lugares sobre sedimentos lacustres pliocénicos (Geyne A. R. - Fries C. 1963). Estudios de detalle ya realizados (Robin C. - Demant A. 1974 - Robin C. - Bobier C. 1974) demuestran que en el seno de esta línea básica se pueden diferenciar tendencias toleíticas intermedias y alcalinas.

Por otra parte, en el Mioceno se puede notar una interferencia con el vulcanismo calco-alcalino del Eje Trans-mexicano (región de Tulancingo).

### III. LA PROVINCIA DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL

Es un sistema montañoso que bordea al Golfo de California y al Pacífico con una longitud de más de 2,000 km. Está constituido en su gran mayoría por rocas ácidas que representan la más imponente cobertura ignimbrítica continua en el mundo. Las unidades de tobas y lavas ignimbríticas se presentan ya sea horizontales o ligeramente inclinadas. Las dotaciones K/Ar realizadas en algunos puntos de la Sierra dan por las riolitas una edad Mioceno temprano a medio (29 a 22 mA) (MacDowell F. W. - Ciabough S. E. 1972). En la región de Durango derrames basálticos cubren a esas ignimbritas. Este vulcanismo de tipo alcalino es de edad Plio-cuaternaria (Mac Dowell F. W. comunicación personal); está relacionado con los movimientos tectónicos verticales del fin del Terciario (Frerfrikson G. - Henry C. D. 1972) que han provocado la fracturación de las unidades ignimbríticas.

El basamento de esta secuencia ácida aflora al pie de la Sierra, al dirigirse hacia las Planicies costeras, a una altura de cerca de 1200 m; en su mayoría se encuentran andesitas, de edad oligocénica (Fredrikson G. - Henry C. D. 1972 - Ruiz R. 1975), cubriendo una paleotopografía cretácica. Rocas plutónicas (de tipo granodioritas y gabros) intrusionan esta serie cretácica; medidas efectuadas en la región de Mazatlán han dado edades de 90 a 150 mA (Henry C. D. - Fredrikson G. 1972 - Fredrikson G. 1974).

Hacia el Norte, en el Estado de Sonora (fig. 1) el basamento pre-ignimbrítico aflora más; todas las unidades se encuentran sin embargo afectadas por la tectónica pliocuaternaria relacionada con el sistema Golfo de California-San Andrés, que da a toda esta región su aspecto característico en "basin and range". Un zócalo precámbrico se encuentra en la región de Caborca. Series vulcano-sedimentarias cretácicas fueron descritas en muchos lugares de Sonora: Santa Ana (Salas G. A. 1968), zona Sur de Hemosillo (Wilson I. F. - Rocha V. S., 1946), Guaymas (Anderson T. S. - Silver L. T. - Córdoba D. A. 1969). Un vulcanismo de edad oligocénica está también bien desarrollado.

Los batolitos, por sus edades, se pueden atribuir a las fases terminales de la tectónica albo-cenomaniana. Las dotaciones U/Pb demuestran por otra parte una evolución regular en las edades de los plutones desde 100 mA para las zonas costeras hasta 60 mA para los intrusivos localizados al pie de la Sierra Madre Occidental (Anderson T. H. - Silver L. T. 1973).

Esta provincia occidental se prolonga hacia el Sur en la región Tepic-Guadalajara y al Oriente hacia Tulancingo. En esta parte meridional las ignimbritas se encuentran muchas veces recubiertas por las emisiones "andesíticas" del eje neo-volcánico. Por otra parte, la región de Tepic constituye un nudo importante para la evolución de la provincia Californiana.

La actividad magmática en esta provincia se puede así resumir de la manera siguiente:

- Fase calco-alcalina cretácica.
- Vulcanismo calco-alcalino oligocénico.
- Emisiones ignimbríticas del Mioceno.

Las emisiones basálticas alcalinas que se observan en ciertos lugares (Pinacate-Magdalena en Sonora, Mazatlán-Choix en Sinaloa) se relacionan con los movimientos plio-cuaternarios del Golfo; por eso los consideramos en la Provincia Californiana.

Hay muy pocos datos químicos sobre las rocas "andesíticas" como sobre las ignimbríticas; los pocos que figuran en G. A. Salas 1968 y Gunn B. M. - Mooser F. 1970 no permiten definir por el momento el carácter de estas fases volcánicas.

#### IV. LA PROVINCIA CALIFORNIANA O PACÍFICA

Incluimos en esta definición las rocas ígneas de Baja California, así como las manifestaciones volcánicas que afloran en el margen oriental del Golfo de California en Sonora y Sinaloa. De una manera general consideramos como formando parte de esta provincia todas las manifestaciones plio-cuaternarias basálticas que están ligadas a los movimientos del Golfo de California-San Andrés.

Desde el punto de vista geológico, Baja California se puede dividir en dos sectores:

- 1) Un eje "granítico" ocupa las 2/3 partes de la porción Norte de la Península. Petrográficamente estas rocas plutónicas se dividen en gabros-granodioritas-dioritas y granitos (Gastil G. et al. 1971). Estructuras de tipo anulares fueron reconocidas (Duffield W. A. 1969). Estos plutones constituyen la terminación Sur de los grandes batolitos californianos.

Formaciones metamórficas de tipo esquistos y gneiss bordean en algunos lugares los granitos. Este metamorfismo está atribuido al Cretácico temprano; en ciertos casos, como en la Sierra de los Pescadores (fig. 3), se trata de un metamorfismo más antiguo que puede ser correlacionado con la secuencia paleozoica y precámbrica que forma el zócalo de Caborca (Merriam R. 1972).

Las rocas prebatolíticas tienen una edad jurásica a cretácica (Silver L. T. et al. 1963; Hawkins J. 1970, Gastil G. et al. 1971); se puede observar desde esta época la existencia de un vulcanismo de tipo calco-alcalino. Esta formación "Alisitos" sufrió un metamorfismo ligado a las intrusiones plutónicas de la fase albo-cenomaniense (120 a 100 mA) (Silver L. T. et al. 1963).

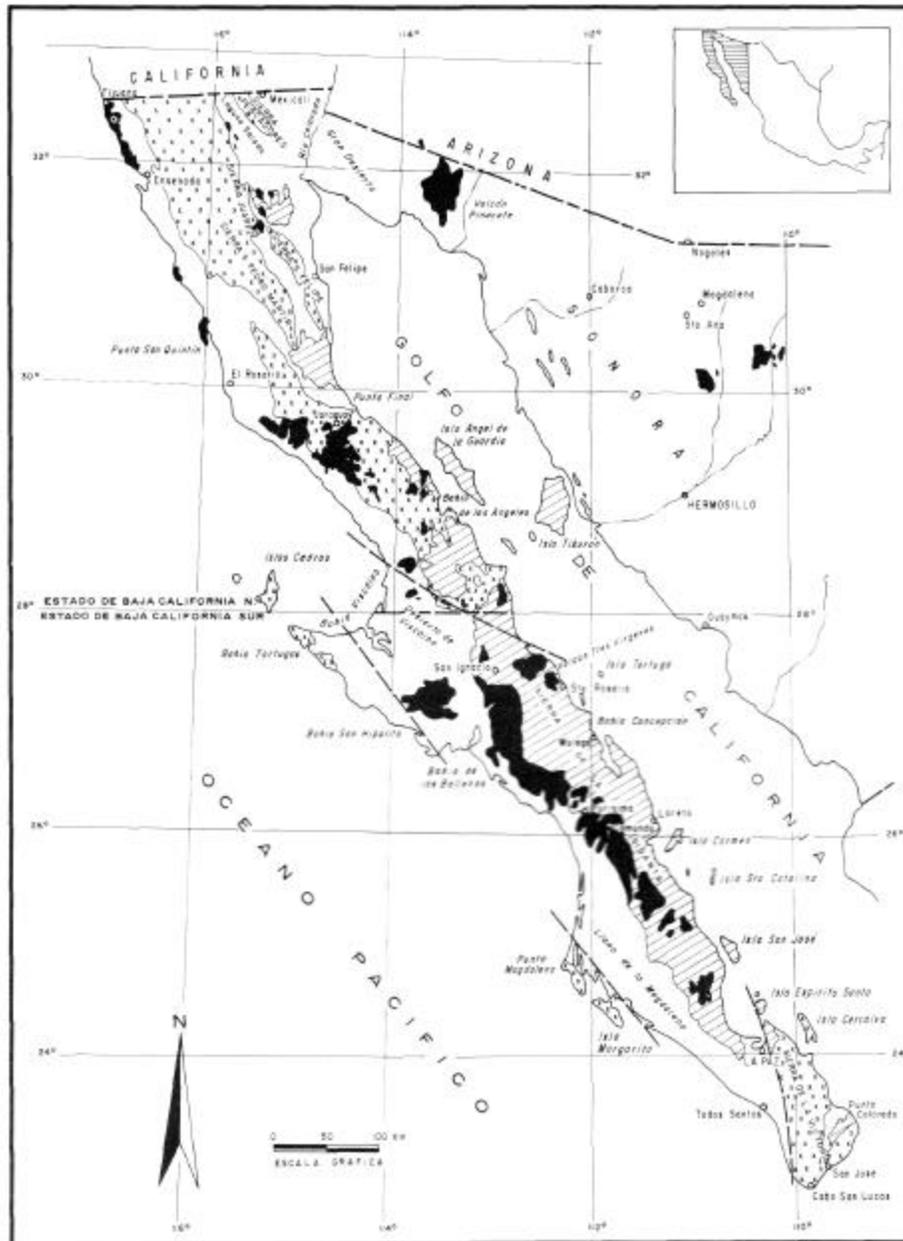
El vulcanismo cenozoico está representado en su mayoría por andesitas, dacitas y riolitas; (región de San Felipe; Isla Angel de la Guarda, Isla Tiburón, fig. 3). Algunas mesetas "basálticas" pertenecen a esta fase (Sur de Bahía de los Angeles) (Gastil G. et al. 1971). Por otra parte, rocas con tendencia toleítica fueron descritas en la región de Tijuana (Hawkins J. 1970 b).

La fase plio-cuaternaria está caracterizada más bien por grandes derrames basálticos de tipo alcalino; existen unos aparatos volcánicos en la región de San Quintín y al Norte de San Felipe, pero están más desarrollados en el sector de Jaraguay (Fig. 3). Se pueden incluir a esta fase el volcán de Pinacate (Sonora) y las manifestaciones de la frontera con Arizona, así como los basaltos de Magdalena (fig. 3); todas estas manifestaciones se relacionan con la tectónica reciente a la junción Golfo de California sistema de San Andrés.

Esta provincia norte de Baja California se encuentra limitada en su parte meridional por un gran accidente tectónico subrayado por las anomalías magnéticas; la falla de Sta. Rosalía.

- 2) Oponiéndose a esta parte norte, la parte del Estado de Baja California Sur está caracterizada por imponentes emisiones volcánicas cenozoicas y cuaternarias, que han edificado la Sierra de La Giganta (fig. 3). Al Oeste de estos relieves se encuentran dos cuencas que han funcionado del Cretácico al Actual (Mina F. 1957); la cuenca de Vizcaíno, y la de Iray o de Magdalena; están limitadas del lado del Pacífico por formaciones jurásico-cretácicas, que incluyen a rocas ofiolíticas que afloran en las Islas Cedros, Bahía Tortuga, San Hipólito, Punta Magdalena e Isla Margarita (fig. 3). Esta formación se asemeja así a la formación "franciscana" (Mina F. 1957) de California. Rocas plutónicas y metamórficas se encuentran nada más al nivel de la punta meridional, al sur de La Paz (Sierra de la Victoria) y en el Golfo en pequeñas islas como la de Sta. Catalina (fig. 3).

El vulcanismo de esta parte sur de Baja California es el objeto de otras publicaciones (Demant A. 1975; Demant A. et al. 1974). Se puede recordar que se diferenciaron 2 líneas evolutivas:



**Fig. 3: Provincia Californiana — esquema geológico.**

- Cruces — Cuerpos intrusivos con formaciones metamórficas asociadas. En la región de Punta Vizcaíno y Punta Magdalena, rocas del complejo ofiolítico.
- Rayado — Rocas volcánicas de Edad Miocena (Formación Comondú en Baja California Sur).
- Negro — Volcanismo plio-cuaternario.

— Una línea calco-alcalina de edad Mioceno Superior, representada por la formación "Comondú"; se trata de una asociación de brechas, tobas y derrames con diques y mantos tardíos. Eso demuestra la presencia de movimientos compresivos en esta época miocénica.

- Una línea alcalina Pliocena y Cuaternaria formando las mesetas de los oasis de Comundú y La Purísima (fig. 3).

El vulcanismo histórico de Tres Vírgenes, se presenta un poco aparte (Demant A. et al. 1974 - Demant A. 1975 b) del punto de vista evolutivo con primeras emisiones de tipo hiperalcalino y después dacitas.

### V. SINTESIS EN RELACION CON LA EVOLUCION GEODINAMICA

Hemos definido anteriormente los caracteres propios de cada provincia; vamos a proponer en este capítulo una correlación de estos eventos volcánicos del Cretácico tardío al Actual, relacionándolos con los fenómenos geodinámicos que ocurrieron desde esta época cretácica.

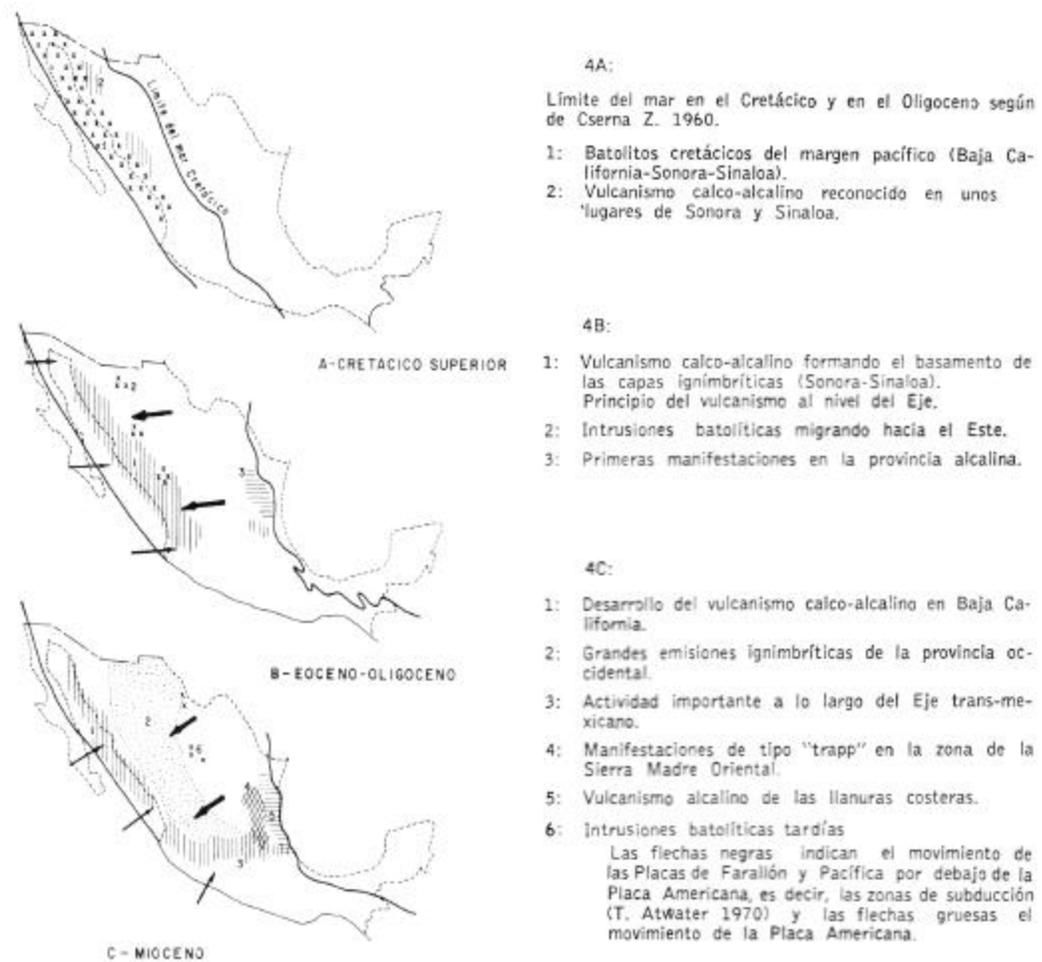
A la escala de un país como México es evidente que pueden coexistir actividades magmáticas distintas por un periodo dado, en función de su localización geográfica, es decir de su ambiente geodinámico. La tabla III presenta un resumen de las fases volcánicas mayores, en las cuatro provincias definidas, permitiendo subrayar las convergencias o diferencias entre ellas desde el Cretácico. Estos eventos magmáticos fueron por otra parte localizados geográficamente en cuatro periodos distintos: Cretácico, Eoceno-Oligoceno, Mioceno y Pliocuaternario, lo que permite relacionarlos con los vectores de la tectónica global actuando en estas épocas (fig. 4-5).

T A B L A III				
	Baja California	Sierra Madre Occidental	Eje Trans-mexicano	Provincia Oriental
Jurásico	Vulcanismo calco-alcalino dentro de la formación "Alisitos" en Baja California Norte.			
Cretácico	Intrusiones de los batolitos en California y Sonora.	Batolitos (dioritas y gabros). Principio del vulcanismo andésítico en Sinaloa.		Pórfidos graníticos (según IM-LAY 1937) en la parte norte.
Eoceno Oligoceno	Vulcanismo calco-alcalino en la parte norte de Baja California.	Actividad máxima al nivel de la cordillera andesítica. Migración de los cuerpos intrusivos hacia el Este.	Principio de la actividad volcánica, visible sobre todo en la parte Este (dacitas-andesitas) en el Oligoceno Superior.	Vulcanismo alcalino sobre-saturado y sub-saturado (riolitas sienitas-fonolitas).
Mioceno	Vulcanismo calco-alcalino del Mioceno tardío en el Estado de Baja California Sur (Formación Comundú).	Emisiones ignimbríticas a lo largo de la costa Occidental.	Actividad importante al nivel de todo el Eje neo-volcánico (dacitas sobre todo).	Series sub-saturadas en las planicies (basanitas). Sobre el altiplano basaltos intermedios e ignimbríticas; en la parte Sur interferencia con el vulcanismo del Eje.
Plioceno y Cuaternario	Vulcanismo alcalino relacionado con el "rift" Golfo de California sistema de San Andrés.	Basaltos alcalinos, cubriendo las ignimbríticas (Durango, Zacatecas, Sonora...) y relacionados con la formación de los "bolsones".	Sigue la actividad calco-alcalina; los términos básicos son más abundantes.	Sobre el altiplano basaltos alcalinos e intermedios. El nivel de las planicies series sub-saturadas (basaltos-fonolitas).

\* Antes del Cretácico es bastante difícil llegar a una reconstitución precisa utilizando los datos del vulcanismo, ya que éstos son escasos; se conoce del lado del Pacífico un vulcanismo jurásico en la formación "Alisitos" (Gastil G. et al. 1971) pero fue afectado por el metamorfismo que acompañó las intrusiones batolíticas.

\* En el Cretácico tardío (fig. 4 a) México era reducido a una especie de "cordillera pacífica"; las intrusiones batolíticas de la parte nor-occidental, prolongación de los grandes cuerpos "graníticos" californianos así como las manifestaciones volcánicas de tipo "arco insular" calco-alcálico (Sonora-Sinaloa) están relacionados con los movimientos de hundimiento (subducción) de la placa de Farallón debajo de la Placa Americana (Atwater T. 1970 - Demant A. 1975). Toda la parte oriental de México estaba entonces inmersa (Cserna Z. de 1960).

**Fig. 4:** Localización de los diferentes eventos magmáticos del Cretácico Superior (A), Eoceno-Oligoceno (B) y Mioceno (C).



Siguiendo los movimientos orogénicos (fase albo-cenomaniana) que provocaron la emersión de la zona central, un vulcanismo andesítico oligocénico se desarrolló a lo largo de toda la costa del Pacífico (fig. 4b). Al nivel de la Sierra Madre Occidental, constituye el basamento de las ignimbritas.

Al fin del Oligoceno empiezan las emisiones calco-alcálicas en la zona del Valle de México (Gunn B. M. - Mooser F. 1970) y de Pachuca (Geyne A. R. et al. 1963). Se puede subrayar así que el vulcanismo "andesítico", en esta época, no está únicamente ubicado paralelamente a la costa del Pacífico; empieza a distribuirse en una dirección Este-Oeste que constituirá el Eje Trans-mexicano, lo que indica un cambio en las direcciones de los esfuerzos tectónicos principiando en esta época oligocena.

Las intrusiones batolíticas se desplazan progresivamente hacia el Este (Anderson T. M. - Silver L. 1973) (Fig. 4b). En el Oligoceno tardío, se manifiestan las primeras emisiones ignimbríticas de la Sierra Madre Occidental.

Cerca de la costa Oriental, en el dominio que corresponde a las planicies actuales, se observan intrusiones de riolitas y traquienitas en forma de diques y mantos en los sedimentos cretácico y cenozoico inferior (Sierra de San Carlos y de Tamaulipas; fig. 2). Con su orientación NNW-SSE estas inyecciones subrayan la presencia de accidentes tectónicos profundos.

Así, desde el Oligoceno tardío, una zonación volcánica se establece de una manera evidente; este fenómeno se irá desarrollando después en el Mioceno hasta el período actual.

La época miocénica (fig. 4c) está caracterizada por una actividad volcánica intensa sobre todo el territorio.

Al nivel pacífico se observan manifestaciones de tipo "andesítico" en la provincia Californiana. La edad de estas rocas disminuye del Norte a Sur de Baja California, en relación con el desplazamiento progresivo de la cordillera oceánica pacífica y la desaparición de la Placa de Farallón. (Atwater T. 1970). Las anomalías magnéticas cambian así de 18 mA hacia 12 mA a lo largo de la península (Atwater T. Menard H. W. 1970). lo que permite fechar el fin del movimiento de subducción.

En la provincia occidental se desarrollaron las grandes manifestaciones ignimbríticas que van a recubrir progresivamente los relieves pre-existentes. El espesor de estas ignimbritas supera en ciertos lugares 1000 m. Esta actividad puede ser interpretada como típica de una zona de "rift" atrás de un arco andesítico, por reacción de la corteza a los movimientos de subducción. El magma nace así de una zona de fusión de la corteza continental encima de la zona de Benioff. (Karig D. - Jansky W. 1972). En una misma época pueden así coexistir un vulcanismo de tipo compresión (andesitas) y un vulcanismo intensivo (ignimbritas); es lo que se observa a lo largo de todo el continente de América Central (MacBirney A. R. - Weill D. F. 1966) y América del Sur (C. Lefevre 1973).

El vulcanismo del Eje Neo-volcánico parece poder relacionarse con este mismo sistema de subducción, nada más que la dirección del hundimiento al nivel de la fosa de Acapulco tiene una orientación diferente SW-NE (Benioff H. 1954).

Atrás de esta línea andesito-ignimbrítica se manifiesta un vulcanismo de tipo intermedio y después alcalino hacia el Este (fig. 4c) (Robin C. 1975 - Robin C. - Demant A. 1974). Una composición química de este tipo lleva a pensar que la zona del Golfo de México funcionaba como una cuenca de hundimiento.

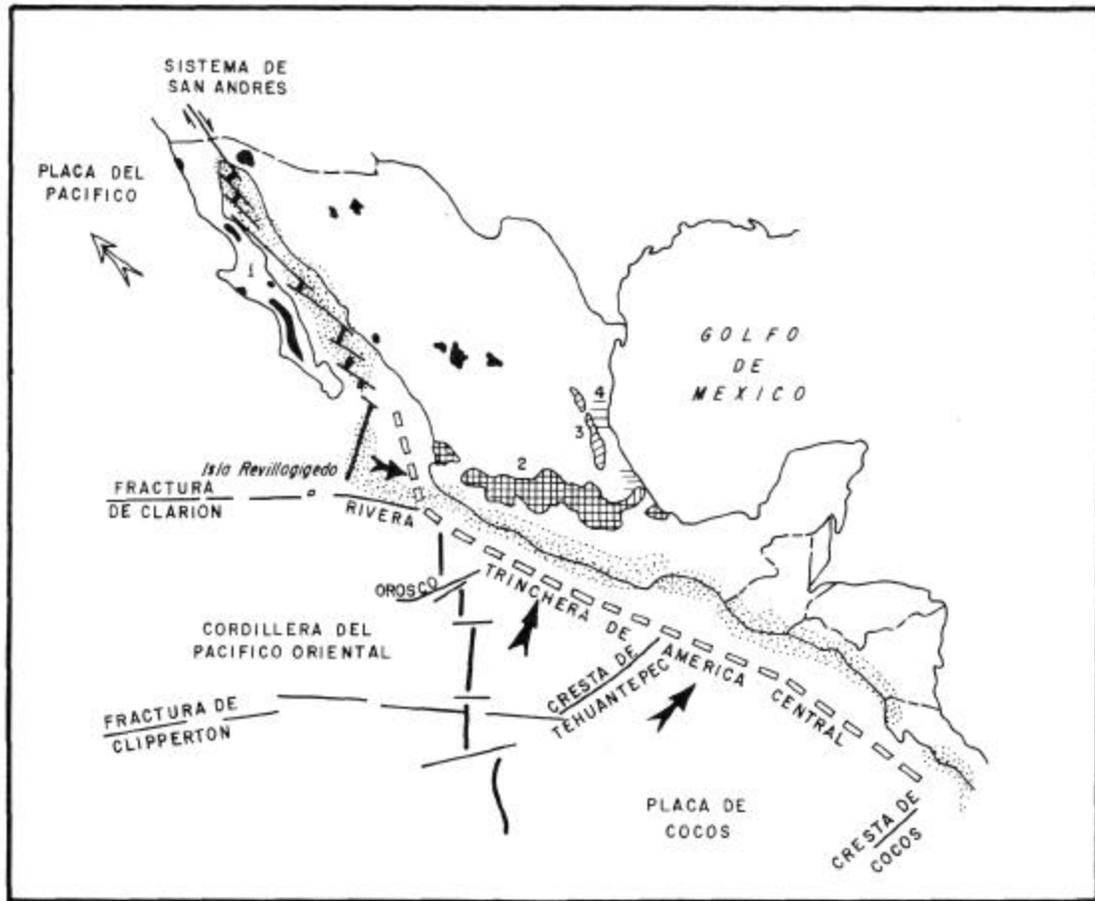
En el Plio-cuaternario (fig. 5) la Placa de Farallón desapareció completamente debajo de la Placa Americana, (Atwater T. 1970). La cordillera oceánica pacífica se localiza así a la entrada del Golfo de Cortés y se prolonga en éste por un sistema de fallas y de zonas en expansión (Sykes L. R. 1968) que se relaciona al Norte con el sistema de San Andrés. Baja California se solidarizó así con la Placa Pacífica, siguiendo el desplazamiento de ésta hacia el NW, desde el Plioceno (Larson R. L. 1972); ciertos autores hablan de un proto-golfo más antiguo (Karig D. E. - Jansky W. 1972 - Gastil G. et al. 1972).

Este movimiento relativo de las placas Americana y Pacífica es responsable por otra parte de la creación del "rift" Golfo de California-Sistema de San Andrés y de la estructura en "Basin and range" (Summer J. R. 1977), que es característica de las zonas de Sonora, Arizona y California, pero que se nota también de Chihuahua hasta Zacatecas a lo largo de todo el margen pacífico de México.

Estos cambios geotectónicos explican la aparición en esta zona californiana de un vulcanismo de tipo distensivo tanto en Baja California como en Sonora (Pinacate-Región de Magdalena) y Sinaloa (Choix-Mazatlán ...). Este vulcanismo alcalino se extiende aún mucho más al interior del país (Chihuahua-Durango-Zacatecas ...) y siempre está muy relacionado con todos los bolsones y la tectónica vertical plio-cuaternaria. La provincia ignimbrítica ha desaparecido y podemos agrupar todo eso en una provincia pacífica.

Más al sur, los movimientos de subducción siguen al nivel de la fosa de Acapulco y son responsables del vulcanismo calco-alcalino que se desarrolla a lo largo del Eje Trans-mexicano. Este no tiene un paralelismo perfecto con la fosa y la zona sísmica, como en América Central por ejemplo (MacBirney A. R. - Weill D. F. 1966). Un estudio de detalle del quimismo de las lavas plio-cuaternarias a lo largo de todo el Eje y sobre todo del K (Dickinson W. R. 1968) permitirá conocer un poco más de la definición del plan de Benioff en este sector.

Al Norte de esta zona "Andesítica" se localiza el vulcanismo de la provincia oriental. La zonación que se puede observar entre el vulcanismo intermedio (basalto y andesitas basálticas de la Sierra Madre) y las formaciones sub-saturadas (basaltos alcalinos-fonolitas) de las planicies, se distribuye de la misma manera que en una cuenca marginal.



**Fig. 5: Elementos tectónicos actuales a lo largo del margen pacífico y localización de las manifestaciones volcánicas Plio-cuaternarias.**

- Movimientos de las placas Pacífica, de Rivera y de Cocos según Atwater T. 1970, MacKenzie D. Parker R. L. 1967.
  - Elementos estructurales en el Golfo de California según Sykes L. R. 1968.
  - Localización de los "shallow earthquakes" (en puntitos la figura) en Sykes L. R. 1967.
1. Provincia magmática Californiana o Pacífica.
  2. Eje Trans-mexicano.
  3. Vulcanismo de "trapp" de la Sierra Madre Oriental.
  4. Vulcanismo de las planicies del Golfo de México.

En conclusión, sobresale de estareconstitución que se manifiesta un cambio progresivo en el sentido del hundimiento de la corteza oceánica debajo del continente americano, en el Cretácico-Eoceno con orientación Oeste-Este, mientras que actualmente subsiste nada m un movimiento casi Sur-Norte al nivel de la parte meridional del país. Desde el Plioceno. Baja California se solidarizó con la placa pacífica, originando el movimiento de este hacia el Nor-Oeste. Este movimiento es responsable de la fase distensiva plio-cuaternaria que ha provocado la estructura en "bolsones", rasgo característico de este margen pacífico de México. La historia volcánica de México depende entonces casi únicamente de los movimientos pacíficos; los fenómenos magmáticos del Golfo de México se relacionan con el nacimiento en el seno de la placa americana de una cuenca marginal, equivalente de la cuenca de Colorado o del Columbia River en Estados Unidos (Christiansen R. L. -Lipman P. W. 1972).

Esta zonación bien definida existe nada más desde el Mioceno, anteriormente el vulcanismo estaba relacionado con los movimientos WE de la placa de Farallón, llegando a un vulcanismo de tipo margen continental con ignimbritas desarrollándose en una zona "en distensión" atrás del frente "andesítico".

En esta reconstitución aparecen dos zonas de interés particular por su localización, la región de Tepic, punto de convergencia de las provincias occidental californiana y del Eje Trans-mexicano, y la región de Tuxtla donde se produjeron interferencias entre la provincia oriental y el vulcanismo calco-alcalino de la zona neovolcánica.

Es evidente que en el seno de cada provincia así definida existen variaciones que son el objeto de estudios detallados. Sin embargo es obvio que estas zonas se correlacionan muy bien con las reconstituciones geodinámicas desde el Cretácico demostrando el lienzo que une el vulcanismo y la tectónica de placas en México.

---

## BIBLIOGRAFIA

- ANDERSON T. S., SILVER L. T. - CORDOBA D. A. 1969.-Mesozoic magmatic events of the northern Sonora Coastal region, Mexico. Geol. Soc. Amer. Abstracts, p. 3-4.
- ANDERSON T. H. - SILVER L. 1974.-Late cretaceous plutonism in Sonora, Mexico and its relationship to circum pacific magmatism. Geol. Soc. Am. Abstracts, p. 484.
- ATWATER T. 1970.-Implication of plate tectonics for the cenozoic tectonic evolution of western north america. Geol. Soc. Amer. Bull., 81, p. 3513-3536.
- ATWATER T. -MENARD H. W. 1970.-Magnetic lineations in the northeast pacific. Earth Planet. Sc. Letters, 7, p. 445-450.
- BEAL H. C. 1948.-Reconnaissance of the Geology and Oil Possibilities of Baja California, Mexico. Geol. Soc. Am., mem. 31.
- BENIOFF H. 1954.-Orogenesis and deep crustal-structure: additional evidence from seismology. Geol. Soc. Amer. Bull., 65, p. 385-400.
- BLOOMFIELD K.-Trabajos inéditos.
- CHRISTIANSEN R. L. - LIPMAN P. W. 1972.-Cenozoic volcanism and plate tectonics evolution of the western United States. II Late Cenozoic. Phil. Trans R. Soc. London, A. 271, p. 249-284.
- CSERNA Z. DE 1960.-Orogenesis in time and space in Mexico. Sond. Geol. Rundschau, 59, p. 595-605.
- DARTON N. H. 1921.-Geologic reconnaissance in Baja California. Jour. Geol., 29, p. 720-748.
- DEMANT A.- ROBIN C. - BOBIER C. - CORDOBA D. A. 1974.-Major chemical characteristics of tertiary and quaternary volcanism in Baja California. Comparison with other volcanic provinces of Mexico. Circum Pacific Energy and Mineral Resource Conference, Honolulu, Abstract p. 16.
- DEMANT A. 1975-a.-Caracteres químicos principales del vulcanismo terciario y cuaternario de Baja California Sur. Relaciones con la evolución del margen continental pacífico de México. Revista del Inst. Geol., este mismo volumen.
- DEMANT A. 1975-b.-Le volcanisme quaternaire de la region du Tres Vírgenes, Santa Rosalía, Baja Cadifornia; Sa significacions dans le contexte geodynamique actuel au niveau du golfe de Californie. Bull. Soc. Geol. France (a paraitre).
- DICKINSON W. R. - HATHERTON T. 1967.-Andesitic volcanism and seismicity around the Pacific. Science, 157, p. 801-803.
- DICKINSON W. R. 1968.-Circum pacific andesite types. J. Geoph. Res., 73, p. 2261-2270.
- DUFFIELD W. A. 1969.-A, concentricity zoned tonalite pluton emplaced by ring fracturing, Baja California. Geol. Soc. Amer., Sp. Papers., 121, p. 83.
- FREDRIKSON G. - HENRY C. D. 1972.-Geología del área de Mazatlán, Sur de Sinaloa, México. II Convención, Soc. Geol. Mex., p. 146-149.

- FREDRIKSON G. 1974.-Geology of the Mazatlán area, Sinaloa, Western Mexico. Ph. D., University of Texas.
- GASTIL G. - ALLISON E. C. - PHILLIPS R. P. 1971.-Reconocimiento geológico del Edo. de Baja California. Mapa 11250,000.
- GASTIL G. - PHILLIPS R. P. - RODRIGUEZ TORRES R. 1972.-The reconstitution of Mesozoic California 24th. Int. Geol. Congress, Sec. 3, p. 217-229.
- GEYNE A. R. - FRIES C. 1963.-Geología y yacimientos minerales del Distrito de Pachuca, Real del Monte, Edo. de Hidalgo, México. C.R.N.N.R., Pub. 5E, 220 p.
- GUNN B. M. - MOOSER F. 1970-Geochemistry of the volcanics of Central Mexico. Bull. Volc., 34, p.- 577-616.
- HAWKINS J. W. 1970.-Metamorphosed late Jurassic andesites and dacites of the Tijuana Tecate area, Baja California. En Pacific slopes geology of northern Baja California and adjacent Alta California, Am. Ass. Petr. Geol.,
- HAWKINS J. W. 1970b.-Petrology and tectonic significance of late Cenozoic volcanic rocks, Southern California and adjacent Baja California. Geol. Soc. Am. Bull., 81, p. 3323-3338.
- HEIM A. 1934.-El Bernal de Horcasitas, a volcanic plug in the Tampico plain,- México. SEIT. Vulkan., XV, p. 254-260.
- HENRY C. D. - FREDRIKSON G. 1972.-Edades de intrusiones, Sinaloa, México. II Convención, Soc. Mex., p. 155-157.
- IMLAY R. W. 1937.-The Geology and Biology of the San Carlos mountains, Tamaulipas, México. Univ. Michigan Press., 12, p. 207-242.
- KARIG D. E. - JENSKY W. 1972.-The proto-golf of California. Earth Planet Sc. Letters, 17, p. 169-174.
- LARSON R. I. 1972.-Bathymetry, magnetic anomalies and plate tectonic history of the mouth of the Gulf of California. Geol. Soc. Amer. Bull.; 83, p. 3345-3360.
- LEFEVRE C. 1973.-Les caracteres magmatiques du volcanisme plio-quadernaire des Andes dans le Sud du Pérou. Contr. Mineral. Petrol., 41, P. 259-272.
- LINDGREN W. 1888.-Notes on the Geology of Baja California, Mexico. Calif. Acad. Sci., 2a. serie, 1, P. 173-196.
- MacBIRNEY A. R. - WEILL D. F. 1966.-Rhyolite magmas of Central America. Bull. Vale., 29, p. 435-449.
- MacDOWELL F. W. - CIABAUGH S. E. 1972.-Edades Potasio-argón de rocas volcánicas en la Sierra Madre Occidental al Noreste de Mazatlán. II Convención, Soc. Geol. Mex., p. 182-185.
- MacKENZIE D. P. - PARKER D. L. 1967.-The north Pacific an example of tectonic on a sphere Nature, 216, P. 1276-1280.
- MERRIAM R. 1972.-Reconnaissance geologic map of the Sonoyta quadrangle northwest Sonora, Mexico. Geol. Soc. Am. Bull., 83, p. 3533-3536.
- MINA F. 1957.-Bosquejo geológico del Territorio Sur de la Baja California. Bol. As. Mex. Geol. Petrol., 9 No. 3-4, p. 139-270.
- MUIR J. 1936.-Geology of the Tampico region. Am. A&A. Petr. Geol., Tulsa, 280 p.
- NEGENDANK J. F. W. 1972.-Volcanics of the Valley of Mexico. N. Jb. Miner. Abh., 116, p. 308-320.
- ROBIN C. 1974.-Premieres données sur les séries magmatiques alcalines de la Sierra de Tamaulipas (Est Mexicain). C. R. Acad. Sci., 279, p. 1741-1744.
- ROBIN C. - BOBIER C. 1974.-Las fases del vulcanismo de Tamaulipas (Hidalgo) según datos paleo-magmáticos y geoquímicos. Bol. Inst. Geol. U.N.A.M., 95, p. 49-85
- ROBIN C. - DEMANT A. 1974.-Les trapps de l'Est mexicain: coexistence de séries alcalines et tholéitiques; caracteres différentiels entre le volcanisme des plaines et celui des plateaux. C. R. Acad. Sci., 278, p. 2413-2416.
- ROBIN C. 1975.-Los erupciones fisurales de la Sierra Madre Oriental (basaltos e ignimbritas)

- Descripción y caracteres químicos. Revista Inst. Geol. U.N.A.M., (a paraitre).
- RUIZ R. 1975.-Reconocimiento geológico del área comprendida entre los paralelos 23° 15' - 23° 00' y meridianos 105° 20' - 106° 40' del Estado de Sinaloa. Tesis profesional, U.N.A.M.
- SALAS G. A. 1968.-Areal Geology and Petrology of the igneous rocks at the Santa Ana region, northwest, Sonora. Bol. Soc. Geol. Mex., 31, P. 11-63.
- SCHLAEPFER C. J. 1968.-Resumen de la Geología de la Hoja México, Distrito Federal y Estados de México y Morelos. U.N.A.M., serie mapas al 1:110,000.
- SILVER L. T. - STEHLI E. G. - ALLEN C. R. 1963.-Lower cretaceous pre-batholithic rocks of northern Baja California, Mexico. Bull. Am. Ass. Petr. Geol., 47, p. 2054-2059.
- SUMNER J. R. 1972.-Tectonic significance of gravity and aeromagnetic investigations at the head at the Gulf of California. Geol. Soc. Amer. Bull., 83, p. 3103-3120.
- SYKES L. R. 1967.-Mechanism of Earthquakes and nature of faulting on the mid ocean ridge. Jour. Geophys. Res., 72, p. 2131-2153.
- SYKES L. R. 1968.-Seismological evidence for transform faults, sea floor spreading and continental drift. History of the Earth crust., Princeton Univ. Press, p. 120-150.
- TAYLOR S. R. - CAPP A. C. - GRAHAM A. L. - BLAKE D. H. 1969.-Trace elements abundances in andesites II Saipan, Bougainville and Fidji. Contr. Mineral. Petrol., 23, p. 1-26.
- VILLASEÑOR G.-Trabajos inéditos.
- WATSON E. H. 1937.-Igneous rocks of the San Carlos mountains; in Geology and Biology of the San Carlos mountains, Tamaulipas, México. Univ. Michigan Press., Sci. Series, XII, p. 101-156.
- WILCOX R. E. 1954.-Petrology of Paricutin, Mexico. U. S. Geol. Survey, Bull. 965 c., p. 281-353.
- WILLIAMS H. 1950.-Paricutin region, Mexico. U. S. Geol. Survey. Bull., 965, B, p. 165-279.
- WILSON I. F. - ROCHA V. S. 1946.-Los yacimientos de carbón de la región de Sta. Clara, Municipio San Javier, Sonora. Comm. Direct. Invest. Rec. Minerales, 9, 109 p.