

## COMPOSICION QUIMICA (ELEMENTOS MAYORES) DE LOS MAGMAS EN EL CINTURON VOLCANICO MEXICANO

V. H. AGUILAR-y-VARGAS\* \*\*  
S. P. VERMA\*

### RESUMEN

Se presenta una recopilación de 1797 análisis geoquímicos de elementos mayores sobre las rocas ígneas del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM). Se analiza el significado geológico de estos datos geoquímicos mediante una serie de histogramas y diagramas (bivariados y ternarios) de acuerdo con una subdivisión de la provincia volcánica en 10 bloques morfológicos. A pesar de que existe un incremento espectacular en el número de análisis de elementos mayores desde la primera compilación realizada por Pal *et al.* (1978), ya que desde entonces este número aumentó de 330 a 1797 en el año 1985, se hace evidente la gran escasez de estos datos geoquímicos en ciertas zonas del CVM (ej., bloques V, VII y VIII).

A partir de esta recopilación y análisis, se observa que en los extremos occidental y oriental del CVM se han extruido magmas de tipo calci-alcalino y alcalino, mientras que en la parte central de esta provincia volcánica predominan los productos volcánicos de carácter calci-alcalino. Asimismo, a diferencia de las demás provincias volcánicas de la Cadena Circum-Pacífico, en el CVM no es distinguible una variación lateral en sus productos volcánicos, considerando que no se observa un incremento gradual en su contenido de álcalis conforme aumenta la distancia entre el arco magmático y la zona de subducción.

Por otra parte, los productos volcánicos de los grandes estrato-volcanes presentan series de evolución similares, de acuerdo con los diferentes diagramas, sugiriendo procesos de diferenciación magmática dominados principalmente por la cristalización fraccional, acompañada por la mezcla de magmas en algunas de las etapas de su evolución.

### ABSTRACT

A compilation is presented of 1797 major-element analyses of igneous rocks belonging to the Mexican Volcanic Belt (MVB). The geological significance of these geochemical data is inferred from a series of histograms and diagrams (bivariate and ternary) following a subdivision of this volcanic province into 10 morphological blocks. Although there has been a spectacular increase in the number of major-element analyses since the first compilation by Pal *et al.* (1978) having that number increased from 330 to 1797 in the year 1985, it is evident that there still exists a great scarcity of such geochemical data in certain zones of the MVB (e.g., blocks V, VII and VIII).

\* *Departamento de Geotermia, División Fuentes de Energía, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Apdo. Postal 475, Cuernavaca, Mor., 62000, México.*

\*\* *Becario de CONACYT.*

From the present compilation and analysis it is observed that both calc-alkaline and alkaline magmas have erupted in the western and eastern extremes of the MVB, whereas calc-alkaline products dominate in the central part of the Belt. Thus in contrast with the other circum-Pacific volcanic provinces the MVB does not show a lateral variation in its volcanic products because a gradual increase in their alkali-contents is not observed as the distance between the magmatic arc and the subduction zone increases.

On the other hand, the volcanic products of all the important strato-volcanoes show a somewhat similar evolution as judged from the various binary and ternary diagrams, suggesting the existence of magmatic differentiation dominated mainly by fractional crystallization and accompanied by magma mixing at some stage of their evolution.

### INTRODUCCION

Uno de los elementos morfo-estructurales más conspicuos de la geología de México lo constituye la provincia geológica conocida comúnmente como Eje Neovolcánico (Demant, 1981; López-Ramos, 1983), a la cual se ha denominado en este trabajo como Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), puesto que, como ha sido señalado por varios autores (Mooser, 1969, 1972; Venegas-S. *et al.*, 1985), la forma que presenta esta provincia al cruzar la República Mexicana es bastante irregular, y no se ajusta al término de "eje". Asimismo, la aplicación del término "neo" a dicha provincia geológica es debatible, ya que existe un desacuerdo entre los diversos autores que la han estudiado, en lo referente a la edad del inicio de la actividad volcánica en esta provincia. De esta manera, para algunos, los productos volcánicos típicos del CVM poseen una edad que va desde el Plioceno Tardío al Reciente (Demant, 1978, 1981; Silva-Mora, 1979; Thorpe, 1977; Robin, 1982a, 1986; Nixon *et al.*, 1986); en tanto que para otros autores, los productos atribuibles al CVM han sido emitidos desde el Oligoceno Tardío - Mioceno Temprano hasta el Reciente (Mooser, 1969, 1972; Gunn y Mooser, 1970; Negendank, 1972, 1973; Bloomfield, 1975; Verma, 1985a; Verma *et al.*, 1985).

Se acostumbra definir al CVM como una estructura de 20 a 150 km de ancho y de aproximadamente 1 000 km de longitud, que presenta una orientación general E-O, situándose aproximadamente entre los paralelos 19° y 21°N y extendiéndose desde Veracruz en las costas del Golfo de México hasta cerca de Puerto Vallarta en las costas del Océano Pacífico (Mooser, 1969, 1972; Demant y Robin, 1975; López-Ramos, 1983) (fig. 1). De esta manera, el CVM se encuentra constituido por cerca de 8 000 centros eruptivos (Robin, 1982a), de los cuales los más conocidos son los grandes estrato-volcanes (Pico de Orizaba, Popocatepetl, Iztaccíhuatl, Nevado de Toluca, Volcán de Colima, etcétera), aunque los más abundantes son los volcanes monogenéticos, siendo el más célebre de todos ellos el Volcán Parícutín. En conjunto,

todos estos centros volcánicos han dado origen a rocas ígneas de composiciones que abarcan desde basaltos hasta riolitas, siendo los productos volcánicos de composición intermedia (andesitas y andesitas-basálticas) los más abundantes (Robin, 1982a).

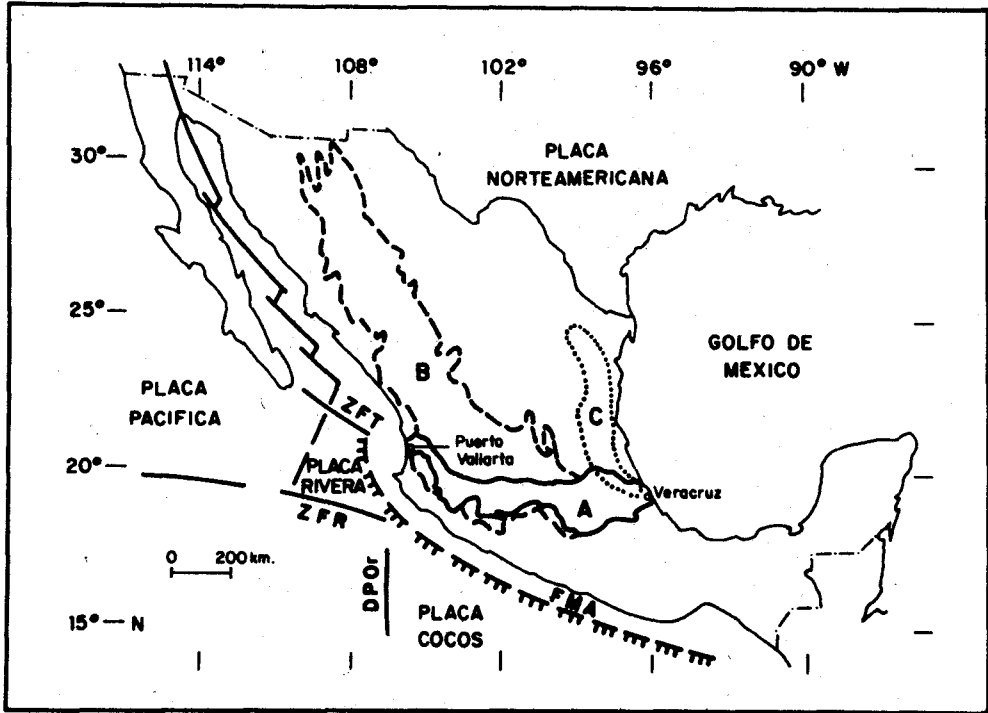


Fig. 1. Mapa de localización y marco tectónico del CVM, modificado de Atwater (1970), Demant y Robin (1975), y López-Ramos y Sánchez-Mejorada (1976). A = Cinturón Volcánico Mexicano. B = Sierra Madre Occidental. C = Provincia Oriental. FMA = Fosa Meso-Americana. DPO = Dorsal del Pacífico Oriental. ZFR = Zona de Fracturas Rivera. ZFT = Zona de Fracturas Tamayo.

Considerando esta heterogeneidad en la composición química de los productos volcánicos, y la morfología del CVM, en el presente trabajo se le dividió en 10 bloques o secciones (fig. 2). Esta división se basa principalmente sobre un estudio de Demant (1981) quien emplea un criterio morfológico, corroborado por estudios petrográficos y geoquímicos para distinguir diversos sectores en esta provincia volcánica. Aunque esta subdivisión en bloques morfológicos puede ser cuestionable y lejos de ser perfecta, es bastante conveniente utilizarla ya que, por un lado, nos permite manejar la gran cantidad de información geoquímica disponible actualmente y por otro, ayuda a resaltar en forma gráfica las similitudes y diferencias entre la geoquímica de las diferentes áreas geográficas del CVM. Además de los criterios de Demant

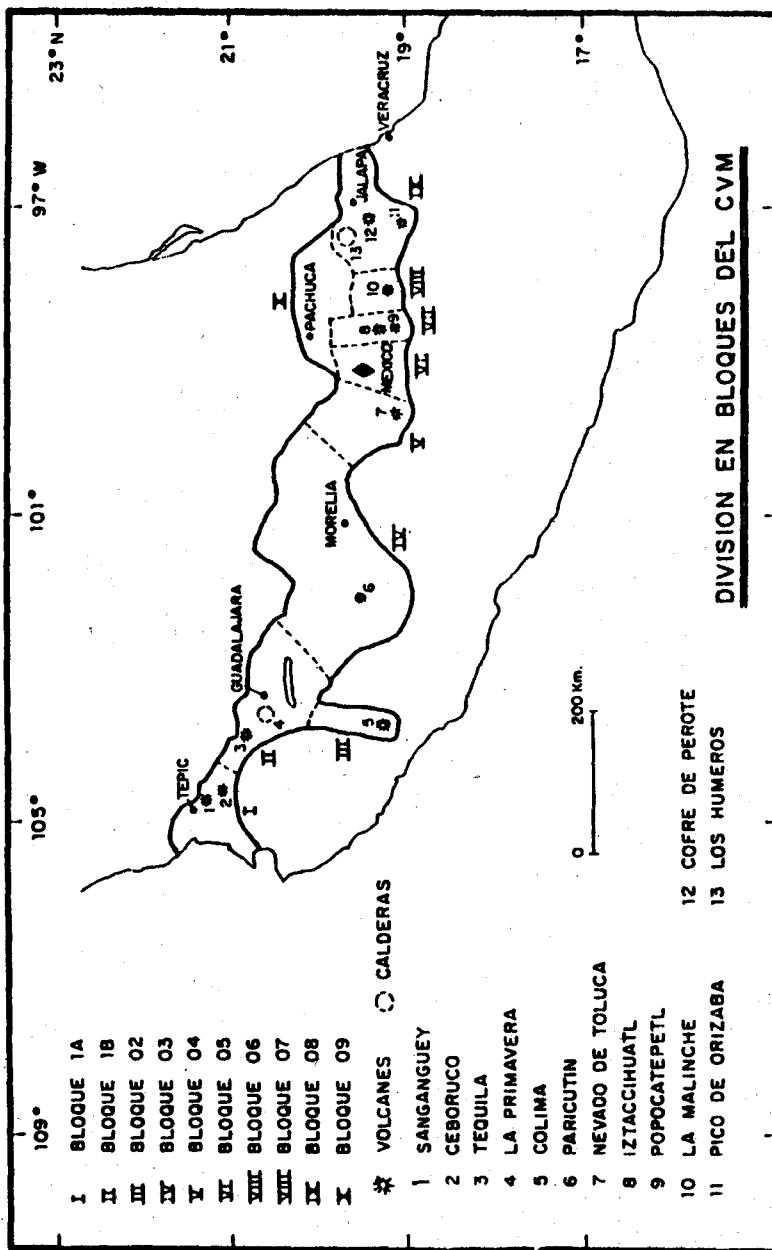


Fig. 2. Mapa mostrando la división por bloques establecida en este trabajo y la localización de los centros eruptivos más conocidos en el CVM.

(1981), hemos tomado en cuenta el reciente trabajo de Nègendank *et al.* (1985) para subdividir la parte oriental del CVM. De esta manera, los bloques en los que dividimos al CVM son:

- Bloque I - Graben de Tepic-Chapala (Región de Nayarit)
- Bloque II - Graben de Tepic-Chapala (Región de Jalisco)
- Bloque III - Graben de Colima
- Bloque IV - Región de Michoacán-Guanajuato
- Bloque V - Nevado de Toluca y áreas circundantes
- Bloque VI - Cuenca de México
- Bloque VII - Sierra Nevada
- Bloque VIII - Volcán La Malinche y sus alrededores
- Bloque IX - Región Pico de Orizaba-Cofre de Perote-Palma Sola
- Bloque X - Región del estado de Hidalgo (zona norte del CVM)

#### MODELOS PROPUESTOS

Cabe señalar que, aunque al CVM se le considera como parte de la cadena volcánica Circum-Pacífica, no es paralelo a la zona de subducción (Fosa Meso-Americana, FMA), como lo son las demás provincias volcánicas que pertenecen a esta cadena Circum-Pacífica, sino que forma un ángulo de alrededor de 15° con respecto a la FMA (Molnar y Sykes, 1969). Por consecuencia, la distancia entre las estructuras volcánicas del CVM y la FMA varía de 150-220 km en el Oeste a 350-500 km en el Este (Robin, 1982b, 1986; López-Ramos y Sánchez-Mejorada, 1976). Debido a esta oblicuidad tan singular del CVM, se ha propuesto una gran cantidad de modelos tectónicos para explicar su origen y evolución, sin haberse desarrollado hasta el momento un modelo de evolución que sea aceptado por la mayoría. Estos modelos se pueden separar en tres grupos principales:

##### 1) Modelos relacionados con grandes fallas

Dentro de este grupo se encuentra la primera hipótesis desarrollada para explicar la alineación de los grandes volcanes del CVM, la cual fue propuesta por Alexander von Humboldt (Humboldt, 1808, citado en Verma, 1985a; Humboldt, 1867, citado en Mooser, 1972), quien propuso la existencia de una fractura cortical que disectaba a la República Mexicana a lo largo del paralelo 19°N desde el Golfo de México hasta el Océano Pacífico, en donde las manifestaciones volcánicas de las Islas Revillagigedo eran consideradas como el producto de esta misma fractura gigante.

Con el descubrimiento de la gran falla de transformación de la Dorsal del Pacífico Oriental (DPOr), denominada Fractura Clarión (Menard, 1955), se revivió la idea planteada por Humboldt en el siglo anterior, proponiéndose que el volcanismo del CVM representaba la extensión continental de esta falla de transformación (Menard, 1955; Mooser y Maldonado-Koerdell, 1961). Además, Mooser y Maldonado-Koerdell (1961) propusieron otro alineamiento (Línea Chapala-Acambay), el cual fue considerado como la extensión continental de una falla perteneciente al sistema de fallas de transformación del Golfo de California, y que junto con la extensión continental de la Fractura Clarión (Línea Humboldt), producían el fracturamiento y volcanismo del CVM, considerándolo como un antiguo "geotumor". Posteriormente, Mooser (1969) propone un mecanismo de "calentamiento diferencial de la corteza" para la generación de los magmas debajo de esta "geosutura". Asimismo, para Gástil y Jensky (1973), el CVM representa la prolongación continental del sistema de fallas de transformación del Golfo de California, por lo que suponen la existencia de movimientos horizontales (strike-slip) dextrales debajo de la parte occidental del mismo, explicando de esta manera el desplazamiento del batolito Mesozoico en esta parte del CVM. Recientemente, Cebull y Shurbet (1987) proponen una variante de esta hipótesis.

## *2) Modelos relacionados con la subducción de placas oceánicas*

Con el desarrollo actual de la teoría de la tectónica de placas, se han propuesto varios modelos que consideran al magmatismo del CVM estrechamente relacionado, en una u otra forma, con los procesos de subducción que se llevan a efecto frente a las costas mexicanas en el Océano Pacífico a lo largo de la FMA. Sin embargo, aunque la mayoría de los autores de estos modelos coinciden en que son estos procesos los que han dado origen al CVM, existen entre ellos divergencias con respecto a la forma en la que funcionan dichos mecanismos para provocar la ausencia de paralelismo entre el arco volcánico continental y la zona de subducción.

De esta manera, Mooser (1972) considera al CVM como una antigua zona de debilidad o "geosutura", la cual ha sufrido una reapertura desde el Terciario Medio, a través de la cual han ascendido los magmas derivados por los procesos de subducción de la placa de Cocos a lo largo de la FMA. Por otra parte, Urrutia y del Castillo (1977) tratan de explicar la falta de paralelismo del CVM con la FMA por medio de un modelo que involucra una disminución constante en el ángulo de subducción unido a un incremento en la velocidad de hundimiento, de oeste a este, de la placa de Cocos debajo de la placa de Norteamérica a lo largo de la FMA. Por otra parte, para explicar la oblicuidad del CVM, Demant (1978, 1981) hace una distinción entre el marco es-

tructural en el cual se desarrolla el volcanismo y los procesos de subducción que, en su opinión dan origen a dicho magmatismo, aclarando que el primero es el producto de la evolución geodinámica de la parte meridional de la Placa Norteamericana desde el Terciario Medio, y no de los procesos de subducción actuales entre la Placa de Cocos y la Placa Norteamericana, considerando al volcanismo actual de la parte occidental y de la zona centro-oriental del CVM, como el producto directo de los procesos de deslizamiento de las placas de Rivera y Cocos, respectivamente, debajo de la Placa de Norteamérica.

En general, existen otros autores que vinculan directamente al magmatismo del CVM con los mecanismos de subducción que se efectúan entre la Placa Norteamericana y las de Rivera y Cocos (Molnar y Sykes, 1969; Demant y Robin, 1975; Pichler y Weyl, 1976; Pal y Urrutia Fucugauchi, 1977; Thorpe, 1977; Hanus y Vaněk, 1978; Pal *et al.*, 1978; Negendank *et al.*, 1981; Lomnitz, 1982; Nixon, 1982; Robin, 1982a).

### 3) Modelos relacionados con un rompimiento (*rifting*) continental.

Existen varios autores que involucran un proceso de rompimiento continental, ya sea junto con un proceso de subducción o independientemente de éste, para explicar el magmatismo del CVM. De esta manera, basados sobre estudios sísmicos, Shurbet y Cebull (1984) postulan que el CVM es en gran parte independiente de los procesos de subducción, y que en realidad representa el límite septentrional no completamente desarrollado (posiblemente abortado) de una microplaca en desarrollo. Asimismo, con base en los datos isotópicos de Sr y Nd y de elementos trazas, algunos autores han considerado que en diversas zonas del CVM se han extruido magmas cuyo origen se supone a partir de una fusión parcial del manto superior, con escasa o ninguna contribución de material síalico (Cantagrel y Robin, 1978; Robin y Nicolas, 1978; Verma, 1983, 1984). De esta forma, Robin (1976b, 1982a, 1982b) propone un modelo que involucra un rompimiento continental a lo largo de la planicie costera del Golfo de México junto con los procesos de subducción a lo largo de la FMA con el objeto de explicar el vulcanismo de la parte oriental del CVM.

Por otra parte, Allan (1984) y Luhr *et al.* (1985) postulan la existencia de un proceso de rompimiento continental actualmente activo en la parte occidental del CVM, al cual le atribuyen la formación de los grábenes de Tepic, Chapala y Colima, proponiendo que este último representa la manifestación incipiente de un salto de la DPOR por debajo de la Placa Norteamericana, iniciándose de esta manera la posible separación de la parte suroccidental de México del resto del continente.

## IMPORTANCIA Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

El CVM presenta varios aspectos importantes - desde el científico, pasando a través del económico, hasta el meramente social.

En lo que se refiere a lo económico, el CVM se presenta como una región con alto potencial geotérmico, puesto que es la zona del país en donde se ha concentrado con mayor intensidad la actividad volcánica reciente, donde se presenta una gran abundancia de estructuras (fracturas y/o fallas), y donde se encuentra la mayor densidad de manifestaciones termales superficiales (sumando más de mil, Venegas-S. *et al.*, 1985). Por tanto, en el presente se tienen perforadas tres áreas en esta provincia: Los Humeros, Pue.; La Primavera, Jal.; y Los Azufres, Mich.; de las cuales, esta última genera en la actualidad energía eléctrica. En cuanto a los recursos minerales asociados al CVM, se presentan algunos distritos mineros importantes como los de Real del Monte-Pachuca, Hgo. (primer productor de plata en México, López-Ramos, 1983); El Oro-Tlalpujahuá, Mich.-Edo. de Méx. (máximo productor de oro en el país a principios de este siglo, Flores, 1920, citado en López-Ramos, 1983); y en algunos casos, el distrito minero de Guanajuato es considerado también como asociado al CVM (Mooser, 1972).

La importancia del CVM desde el aspecto social radica en que una gran cantidad de población se encuentra asentada en ciudades importantes (México, D. F., Guadalajara, Puebla, Cuernavaca, Toluca, Pachuca, etcétera) que se localizan dentro de él. Por lo consiguiente, en los últimos años se ha desarrollado una serie de trabajos tendientes a evaluar las zonas con mayor probabilidad de ser afectadas por erupciones y los posibles efectos del volcanismo sobre la región (Cantagrel *et al.*, 1981; Robin, 1982a, b, 1984; Robin y Cantagrel, 1982; Martín del Pozzo, 1982; Robin *et al.*, 1983; Nelson, 1984; Boudal y Robin, 1984; Robin y Boudal, 1984; Cantagrel *et al.*, 1985; Lugo-H. *et al.*, 1985).

A pesar de la existencia de una buena cantidad de trabajos publicados sobre el CVM, es necesario que se desarrolle un mayor número de estudios detallados con el fin de obtener un conocimiento más profundo de los mecanismos que dan origen al vulcanismo de esta provincia geológica, obteniéndose así un logro muy valioso para cualquiera de los aspectos anteriormente expuestos. De esta manera, el presente trabajo pretende contribuir a un mejor entendimiento de los procesos que originan al CVM, mostrando las diferencias que presenta el magmatismo a todo lo largo de él, a través de las variaciones de sus elementos mayores.



## RECOPIACION DE DATOS DE ELEMENTOS MAYORES EN LAS ROCAS IGNEAS DEL CVM

La presente recopilación de elementos mayores es el resultado de una revisión exhaustiva de la literatura (hasta 1985) publicada y en proceso de publicación sobre el CVM, la cual dio como resultado un total de 1797 análisis. Sin embargo, se encontraban disponibles algunos análisis más sobre el CVM, los cuales no pudieron ser incluidos en esta compilación debido a que su adquisición fue posterior a la conclusión de este trabajo. Dichos datos se encuentran reportados en los trabajos de Erffa *et al.* (1977) y Boudal y Robin (1984).

## A) Manejo de la información

Para el mejor manejo de la información que se obtuvo, se desarrollaron diferentes programas de computación con diversos objetivos (Aguilar-y-Vargas, 1985, M. P. Verma *et al.*, 1986).

Primeramente se elaboró un programa que crea un archivo con índice en el que cada análisis geoquímico consta de 27 variables para su identificación. De esta forma, además de registrarse los parámetros de elementos mayores y su suma (14 variables), se registraron también los datos concernientes al nombre de la muestra, localización (longitud, latitud, estado de la república, y número de carta geológica de DETENAL, del lugar en donde fue tomada la muestra, nombre del lugar de recolección, número de bloque a que pertenece), tipo de roca, volumen de roca emitido por el evento que le dio origen, edad en millones de años, época geológica, nombre del autor del artículo en donde aparece el análisis y el año de su publicación. Asimismo se elaboró un programa, basado en Stewart *et al.* (1983), que detecta los posibles errores cometidos al transcribir al archivo los datos de elementos mayores de la literatura. Posteriormente, se desarrolló un programa que calcula la norma C.I.P.W., siguiendo el método de Kelsey (1965), del cual Hutchinson (1974) hace una reproducción detallada. Además de la norma C.I.P.W., este programa calcula el índice de cristalización (Poldervaart y Parker, 1964), el índice de diferenciación (Thornton y Tuttle, 1960), el índice de solidificación (Kuno, 1959), la proporción de alcalinidad (Wright, 1969), el "valor de magnesio", la suma de los minerales normativos sílicos y la suma de los minerales normativos félicos. También se desarrolló un programa que ordena en tablas los datos de elementos mayores de cada muestra junto con su correspondiente norma C.I.P.W., así como con algunos datos para su identificación. Las tablas generadas mediante este programa constituyen el apéndice A\* de Aguilar-y-Vargas (1985).

---

\* Una copia de estos datos podrá solicitarse a S. P. Verma.

---

Por último, se elaboraron los programas de graficación, en donde se representan los datos de elementos mayores por medio de (i) las gráficas bivariadas, (ii) los triángulos Alcalis-Fierro-Magnesio (AFM), (iii) los de Magnesio-Fierro-Aluminio de Pearce *et al.* (1977).

## B) Fuente de los datos

Los datos de elementos mayores en las rocas ígneas de los diferentes bloques del CVM fueron obtenidos de:

### Bloque I (124 análisis)

Gunn y Mooser (1971); Thorpe y Francis (1976); Gastil *et al.* (1979); Demant (1979, 1981); Nelson (1980, 1984); Nixon (reportados en Demant, 1981); y Nelson y Carmichael (1984).

### Bloque II (142 análisis)

Gunn y Mooser (1971); Watkins *et al.* (1971); Mahood (1977, 1981); Demant (1979, 1981); Nixon (reportados en Demant, 1981); Robin (1982a); Allan (1984); Luhr y Lazzar (1985); Gilbert *et al.* (1985); Nieto-Obregón *et al.* (1985); y Verma *et al.* (1985).

### Bloque III (136 análisis)

Demant (1979, 1981); Luhr y Carmichael (1980, 1981, 1982); Negendank *et al.* (1981); Nixon (reportados en Demant, 1981); Robin (1982b); y Allan (1984).

### Bloque IV (590 análisis)

Williams (1950); Wilcox (1954); Foshag y González (1956); Fries *et al.* (1965); Gunn y Mooser (1971); Silva-Mora (1979); Aumento y Gutiérrez (1980, reportados en Cathelineau *et al.*, 1987); Demant (1981); Combredet (1983); Dobson (1984); Hasenaka (comunicación escrita, 1984); Hasenaka y Carmichael (1985); Luhr y Carmichael (1985a); y Cathelineau *et al.* (1987).

### Bloque V (28 análisis)

Gunn y Mooser (1971); Bloomfield (1973, 1975); Whitford y Bloomfield (1976); Silva-Mora (1979); Cantagrel *et al.* (1981); y Whitford (reportados en Demant, 1981).

#### Bloque VI (141 análisis)

Gunn y Mooser (1971); Negendank (1972); Bloomfield (1975); Pérez *et al.* (1979); Negendank *et al.* (1981); Nixon (reportados en Demant, 1981); Whitford (reportados en Demant, 1981); y Robin (1982a).

#### Bloque VII (76 análisis)

Gunn y Mooser (1971); Negendank (1972); Erffa *et al.* (1977, reportados en Demant, 1981); y Robin (1982a).

#### Bloque VIII (17 análisis)

Erffa *et al.* (1977, reportados en Demant, 1981); Nixon (reportados en Demant (1981); y Robin (1982a).

#### Bloque IX (429 análisis)

Maupomé *et al.* (1975); Erffa *et al.* (1977, reportados en Demant, 1981); Demant (1981); Nixon (reportados en Demant, 1981); Robin (1976a, 1982a); Robin y Cantagrel (1982); Verma y López (1982); Ferriz (reportados en Verma y López, 1982); Ferriz y Mahood (1984); Ferriz (1985); Cantagrel *et al.* (1985); Kudo *et al.* (1985); y Negendank *et al.* (1985).

#### Bloque X (114 análisis)

Geyne *et al.* (1963); Gunn y Mooser (1971); Pérez *et al.* (1979); y Robin (1976a, 1982a).

### ANALISIS GRAFICO Y ESTADISTICO DE LOS DATOS RECOPIADOS

Existen actualmente numerosos diagramas que utilizan los elementos mayores constitutivos de las rocas ígneas para mostrar sus características químicas y las relaciones que guardan entre ellas. En este trabajo sólo se presentan los diagramas que mues-

tran tales relaciones de una manera significativa, utilizando para ello 1 786 análisis geoquímicos de los 1 797 recopilados\*. Los datos se manejan de acuerdo con la división por bloques que se estableció anteriormente para el CVM, exhibiendo de esta manera la variación química existente en los productos volcánicos emitidos en las diferentes zonas que componen esta provincia volcánica.

### A) Histogramas

En la figura 3 se muestran, para su comparación, los histogramas de distribución de los tipos de rocas volcánicas extruidas en los distintos bloques del CVM. La nomenclatura utilizada para designar a cada roca está tomada de Peccerillo y Taylor (1976), quienes siguen un criterio basado sobre el contenido de  $\text{SiO}_2$  en las rocas volcánicas para la clasificación propuesta. De esta manera, denominan basaltos a las rocas con contenidos menores del 52%; andesitas-basálticas del 52.01 al 56%; andesitas del 56.01 al 63%; dacitas del 63.01 al 70%; y riolitas con contenidos mayores del 70%. Además, debido a que muchos de los autores (ej., Geyne, 1963; Negen-dank, 1972; Nelson, 1980, 1984; Ferriz y Mahood, 1984) que reportan análisis de elementos mayores emplean el término riodacita para designar a las rocas cuya composición varía del 67.01 al 70% de sílice, se dividió al rango originalmente establecido para la dacita, llamando únicamente dacitas a las rocas cuyos contenidos en sílice varían del 63.01 al 67%. De esta manera, se puede apreciar en la figura 3 que si bien predominan los productos volcánicos de carácter intermedio (andesitas y andesitas-basálticas) en el CVM, existen zonas en donde se han emitido cantidades apreciables de magmas de composición básica, principalmente en ambos extremos del mismo (bloques I, II y III en la parte occidental y IX y X en la parte oriental). En cuanto a los productos volcánicos de composición ácida, su presencia es escasa en el CVM, con excepción de algunos centros específicos en donde se han emitido volúmenes importantes de este tipo, como en Los Humeros, Pue.; Los Azufres, Mich.; y La Primavera, Jal. Este último representa un complejo riolítico, estructuralmente en forma de caldera, muy peculiar debido al carácter químico de sus constituyentes, esto es, rocas silíceas metalumínicas y moderadamente peralcalinas (riolitas potásicas y comenditas, respectivamente, Mahood, 1980, 1981), las cuales son raras en ambientes tectónicos de margen continental.

---

\* Debido a que los análisis de elementos mayores reportados por Combredet (1983) presentan diferencias notables en comparación con los análisis reportados sobre el mismo lugar por otros autores, ya que son muestras alteradas tomadas de un pozo geotérmico, fueron excluidos de todos los cálculos y diagramas.

---

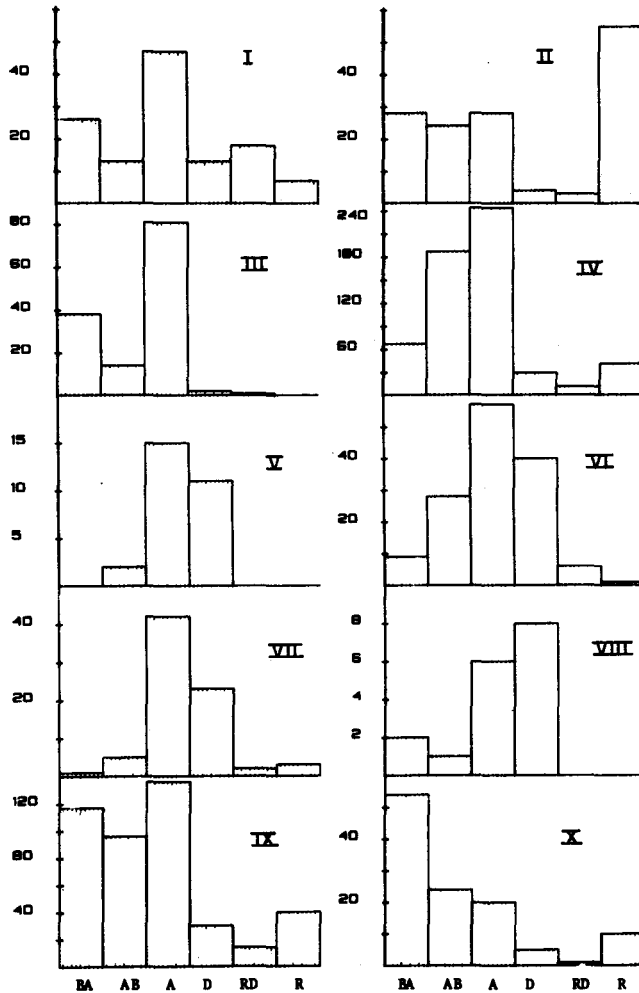


Fig. 3. Histogramas de distribución de las rocas ígneas en los bloques del CVM. BA = Basalto. AB = Andesita-basáltica. A = Andesita. D = Dacita. RD = Riodacita. R = Riolita.

Con el fin de resaltar las similitudes o diferencias químicas entre diferentes regiones del CVM, se presentan, en las figuras de la 4 a la 13, los histogramas que muestran la frecuencia de distribución de una gran parte de los elementos mayores en las rocas ígneas de los diez bloques morfológicos. Como se aprecia en estas figuras, pocos elementos presentan una distribución de tipo normal, mostrando la mayoría de ellos, distribuciones de tipo polimodal o de tipo asimétrico. En general, en la mayoría de los bloques se presentan distribuciones muy variadas para los elementos mayores de las rocas volcánicas a las que agrupan. Sin embargo, en algunas zonas se presentan distribuciones menos variadas. Por ejemplo, en los histogramas para el bloque

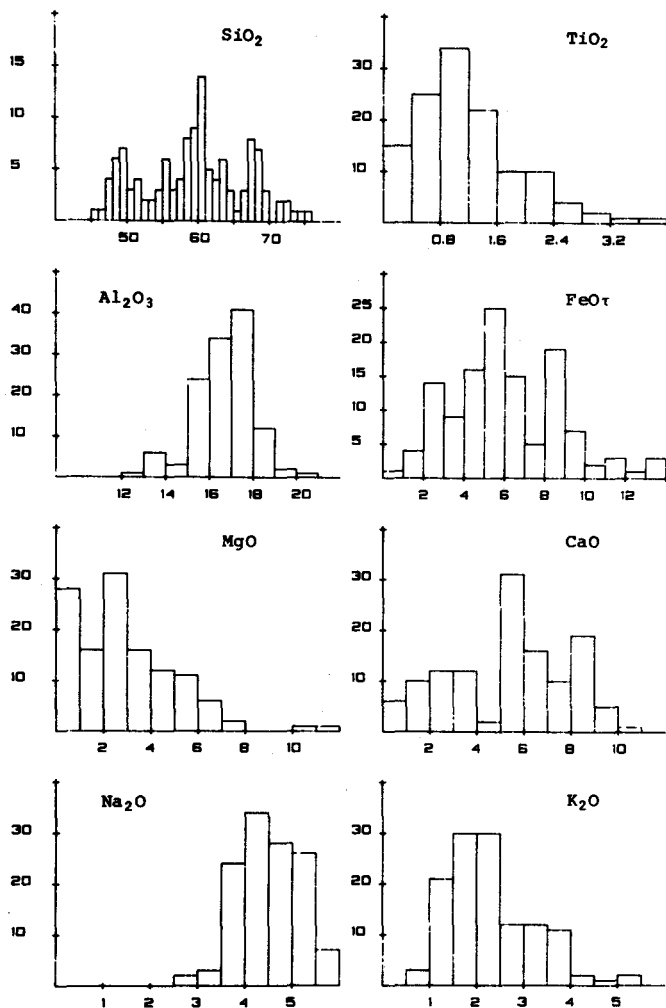


Fig. 4. Histogramas de frecuencia de algunos de los elementos mayores en las rocas ígneas del bloque I. FeOt= Fierro total como FeO.

II (fig. 5) se hace patente una distribución bimodal para todos los elementos mayores excepto para el sodio. Dicha distribución hace que se distingan dos agrupaciones principales, una hacia las composiciones básicas y la otra hacia las composiciones ácidas, observándose una escasez de productos intermedios-ácidos (dacitas y riodacitas). Esta bimodalidad es principalmente notable en los histogramas para el potasio y para el aluminio. Asimismo, en los histogramas para el bloque III (figura 6) se observa también una ligera distribución bimodal para la mayoría de los elementos ma-

tores de esta zona, principalmente para el  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ . Esta bimodalidad es debida a la escasez de productos de composiciones entre básicas e intermedias (andesitas-basálticas), y a la ausencia de productos ácidos.

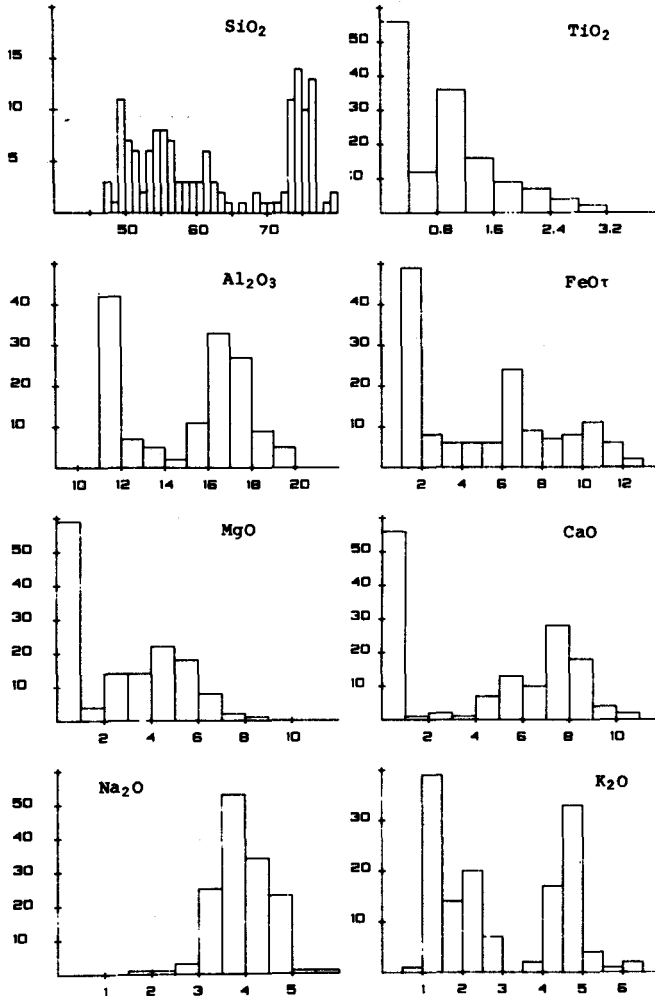


Fig. 5. Histogramas de frecuencia de algunos de los elementos mayores en las rocas ígneas del bloque II. FeOt = Hierro total como FeO.

Por otra parte (a diferencia de otros bloques), el bloque VII presenta distribuciones muy cercanas al tipo normal o gaussiano, en todos sus elementos (figura 10).

#### B) Diagramas triangulares Alcalis-Hierro(total)-Magnesio (AFM)

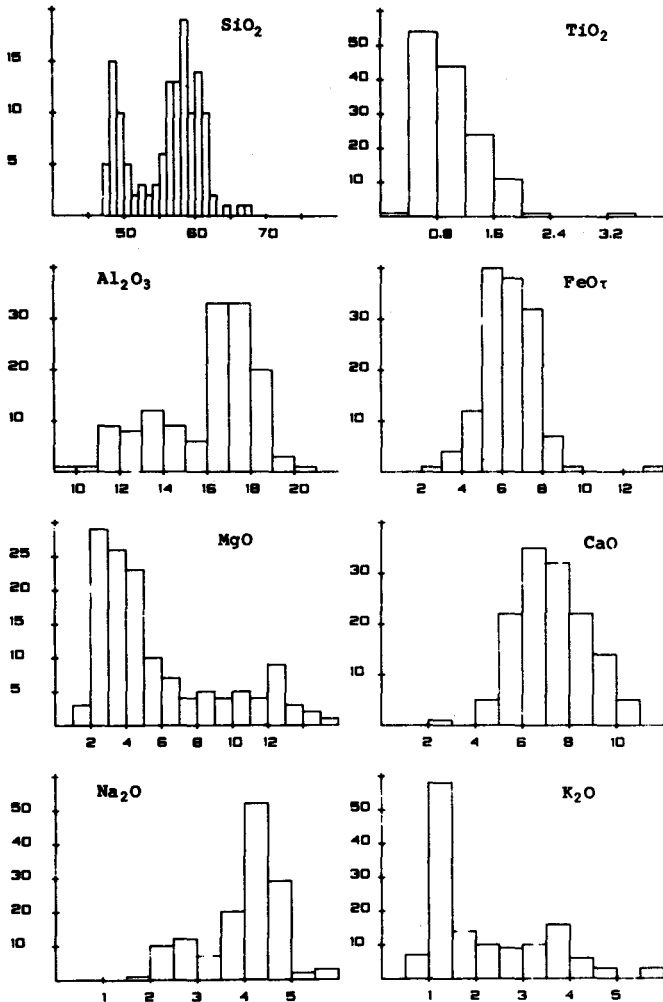
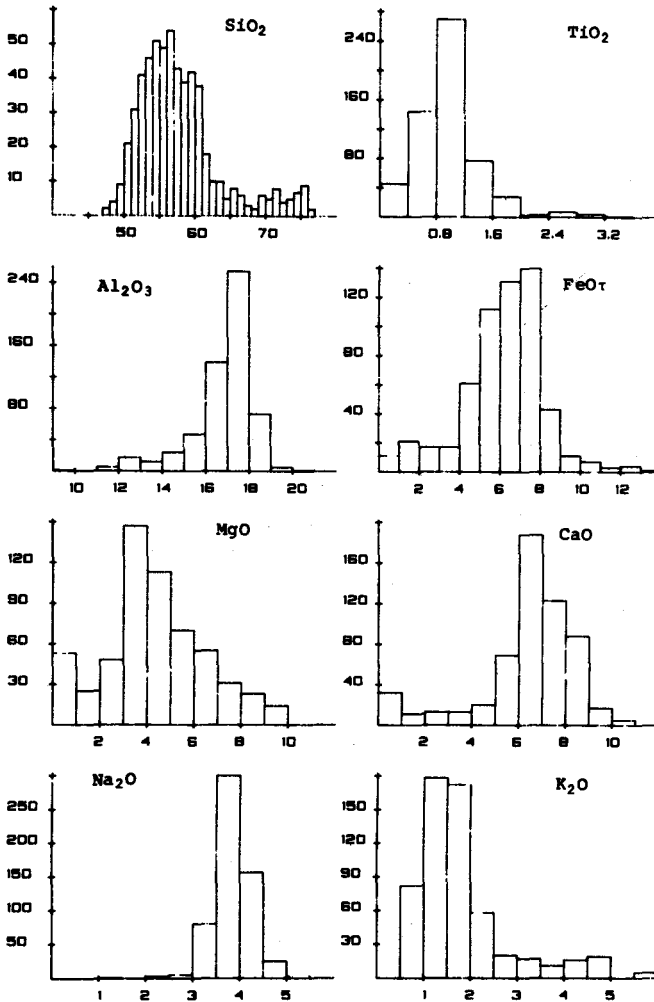


Fig. 6. Histogramas de frecuencia de algunos de los elementos mayores en las rocas ígneas del bloque III. FeO<sub>τ</sub> = Hierro total como FeO.

En las figuras de la 14 a la 19 (dentro de los diagramas ternarios AFM) se muestran las curvas de evolución de las rocas ígneas para los distintos bloques del CVM, en los cuales se han incluido para su comparación las áreas de evolución para las series pigeonítica y de hiperestena de las rocas volcánicas del Japón (Kuno, 1968). Estas curvas sirven principalmente para fines de referencia, resaltando así las similitudes y diferencias entre diferentes bloques del CVM. Cabe señalar que los símbolos utilizados en todos los diagramas son los mismos que en las figuras 14 - 19.





Como se puede observar en estos diagramas, los productos volcánicos de la mayoría de los bloques muestran una evolución neta hacia el vértice alcalino, no señalando algún enriquecimiento aparente en hierro, lo cual es característico de las series calci-alcalinas (Wager y Deer, 1939, citado en Gill, 1981; Irvine y Baragar, 1971; Cawthorn y O'Hara, 1976; Chen, 1978). Sin embargo, se presentan zonas en las que los magmas extruidos no siguen el comportamiento general antes descrito, principalmente en los bloques I, III, IX y X. De esta manera, en el diagrama AFM para el blo-

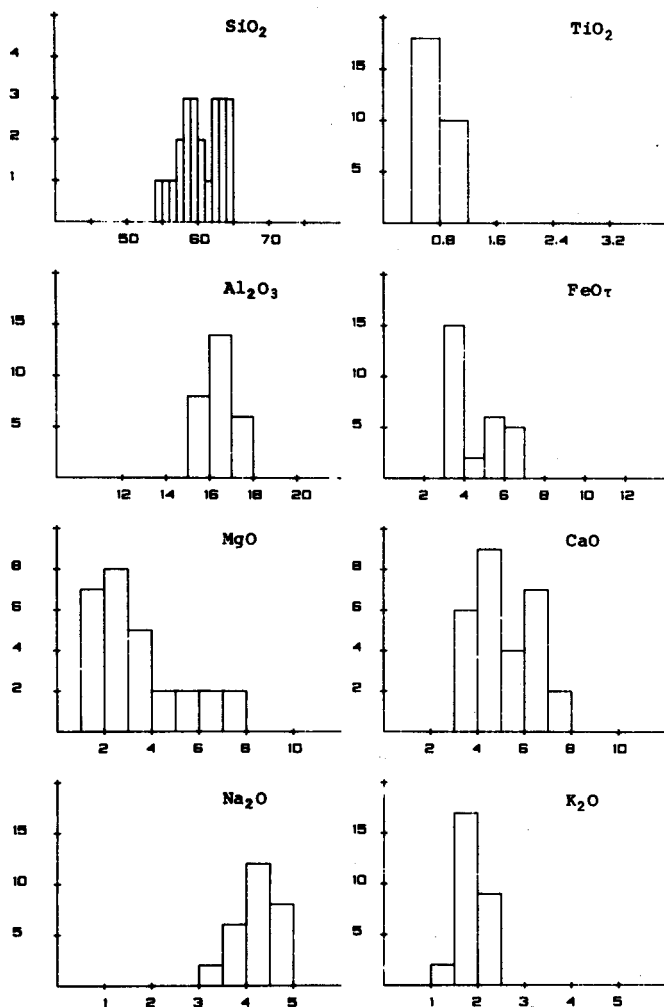


Fig. 8. Histogramas de frecuencia de algunos de los elementos mayores en las rocas ígneas del bloque V. FeO= Hierro total como FeO.

que I (fig. 14) se aprecia que los magmas de los volcanes monogenéticos de la región del volcán Sangangüey presentan una evolución que, proveniente de composiciones altas en magnesio, tiende hacia un ligero enriquecimiento en fierro. Asimismo, en el diagrama ternario para el bloque III (fig. 15) se distingue, aparte de la moderada tendencia hacia el vértice alcalino por parte de la mayoría de los magmas extruidos por los grandes estrato-volcanes (Volcán de Colima y Nevado de Colima), una agrupación de magmas básicos con altos contenidos de magnesio, representada por los volcanes monogenéticos del interior del graben de Colima. Dicha agrupación no

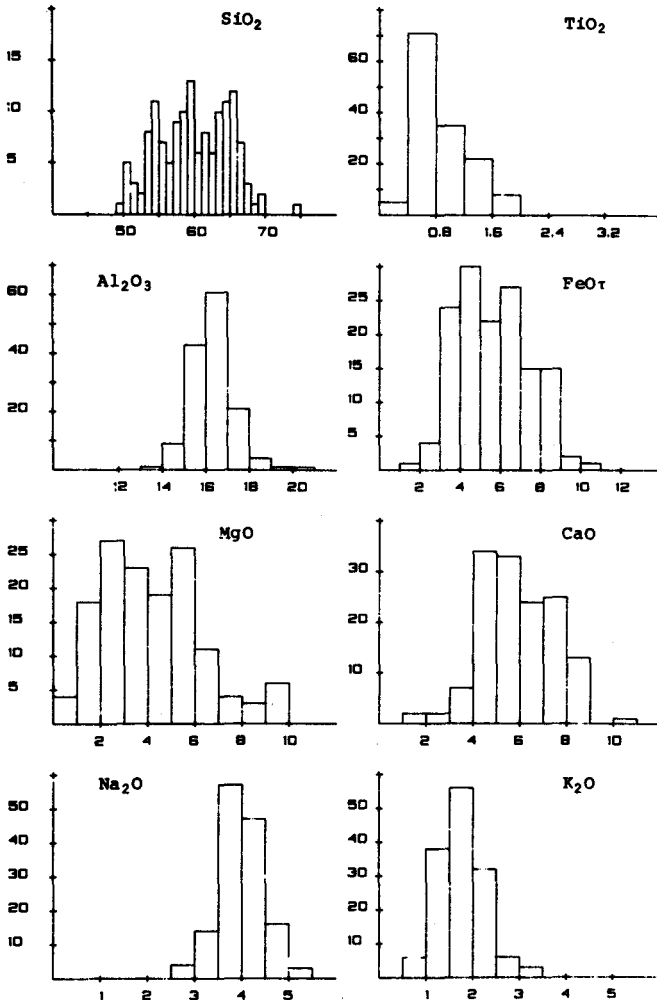


Fig. 9. Histogramas de frecuencia de algunos de los elementos mayores en las rocas ígneas del bloque VI. FeO= Fierro total como FeO.

muestra tendencias hacia un enriquecimiento en fierro, y mucho menos una curva de evolución hacia el vértice alcalino, sino que tiende a permanecer cercana al vértice de magnesio. Por otra parte, en los diagramas AFM para los bloques IX y X (fig. 18 y 19 respectivamente) se observan productos volcánicos que muestran una tendencia neta hacia el vértice de fierro (característica de los magmas toleíticos; ver p.e., Mac Donald y Katsura, 1964; Gill, 1981). Estos productos corresponden a las zonas de Palma Sola-Chiconquiaco-Jalapa en el bloque IX, y a la región de Zacuáltipan en el bloque X.

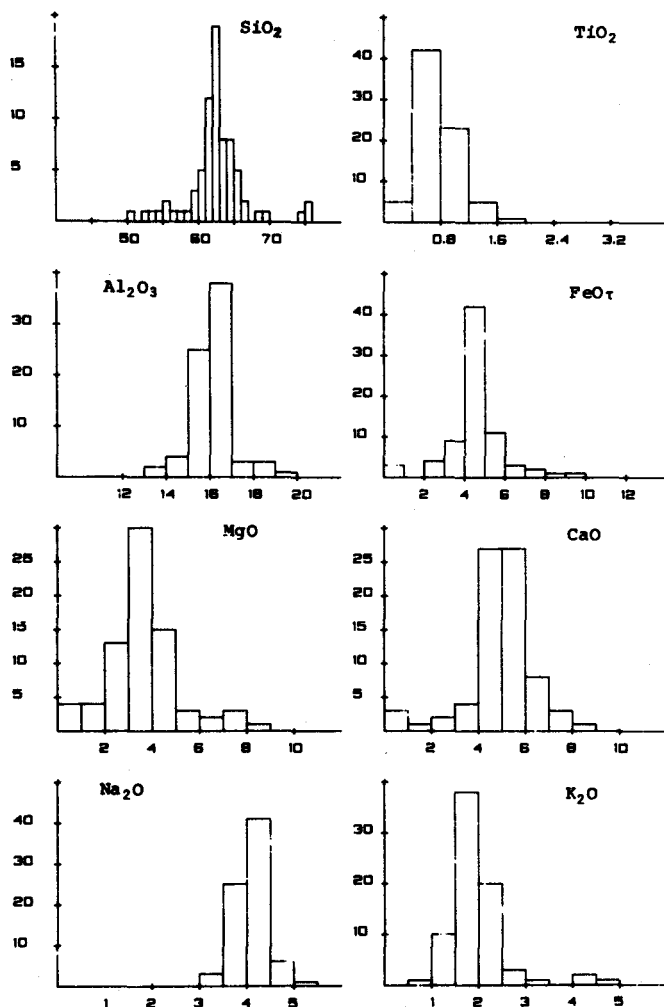


Fig. 10. Histogramas de frecuencia de algunos de los elementos mayores en las rocas ígneas del bloque VII. FeOt= Hierro total como FeO.

La figura 20 muestra el diagrama AFM para los grandes estrato-volcanes del CVM, los cuales muestran una evolución magnética parecida entre ellos, describiendo una curva similar a la serie de hiperstena de Kuno (1968), aunque con un menor enriquecimiento en hierro. Consideraciones más críticas señalan pequeñas diferencias (menos enriquecimiento en álcalis y mayor en hierro) para el volcán y Nevado de Colima en comparación con otros estrato-volcanes.

C) Diagramas  $K_2O$  vs.  $SiO_2$  y  $Na_2O + K_2O$  vs.  $SiO_2$ 

El diagrama  $K_2O$  vs.  $SiO_2$  que se muestra en las siguientes figuras (21-32; la simbología utilizada está dada en la explicación de la figura 21) fue utilizado por Peccerillo y Taylor (1976) para clasificar las rocas volcánicas, principalmente de arco insular y de margen continental, basados sobre la variación significativa entre los contenidos de potasio y sílice que muestran las rocas de estos ambientes tectónicos. Junto con este diagrama, se presenta el de  $Na_2O + K_2O$  vs.  $SiO_2$  utilizado por Kuno (1966) para diferenciar las series volcánicas del Japón y de las áreas adyacentes, el cual fue com-

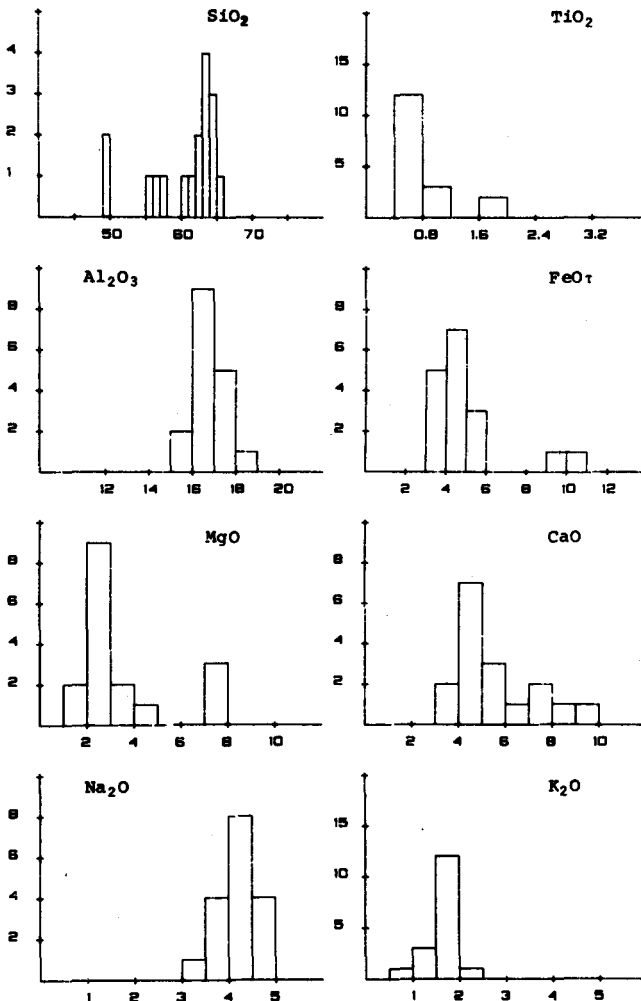


Fig. 11. Histogramas de frecuencia de algunos de los elementos mayores en las rocas ígneas del bloque VIII. FeOt= Fierro total como FeO.

plementado por Schwarzer y Rogers (1974). Estos últimos autores subdividieron el área asignada para las series alcalinas, en fuertemente alcalinas y moderadamente alcalinas, de acuerdo con la división de Saggerson y Williams (1964, citados en Schwarzer y Rogers, 1974) para las rocas alcalinas del sur de Kenia. Las razones principales de presentar ambos diagramas (o sea,  $K_2O$  vs.  $SiO_2$  y  $Na_2O + K_2O$  vs.  $SiO_2$ ) son: (1)

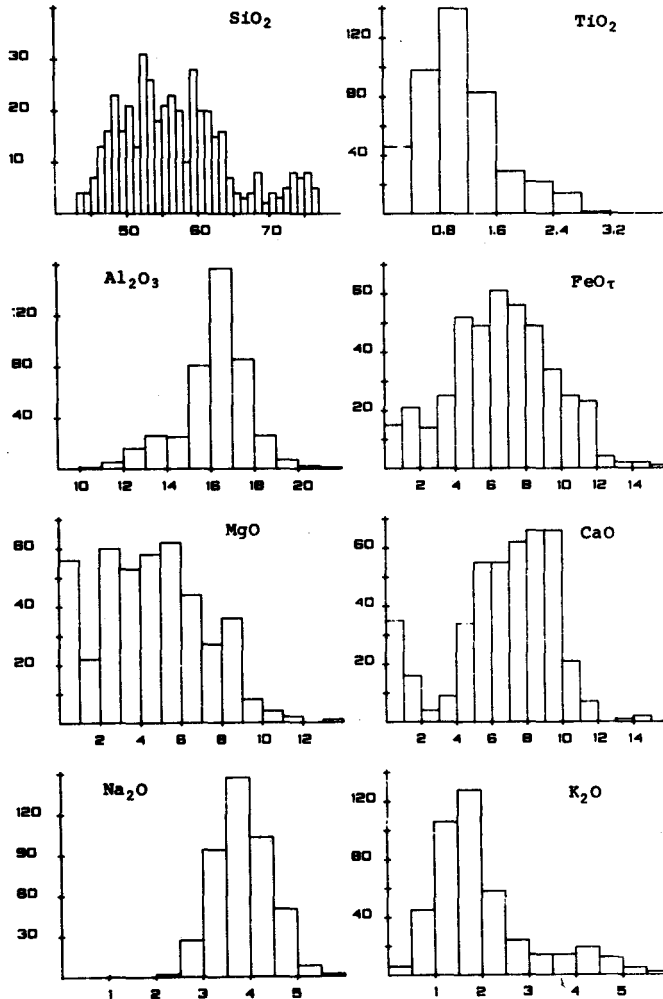


Fig. 12. Histogramas de frecuencia de algunos de los elementos mayores en las rocas ígneas del bloque IX. FeOt= Fierro total como FeO.

a pesar de que el comportamiento de  $K_2O$  y  $Na_2O$  es similar, el aumento de  $Na_2O$  con el  $SiO_2$  es generalmente menos pronunciado que el de  $K_2O$  contra  $SiO_2$  (Gill, 1981), presentándose algunas diferencias en el comportamiento de estos diagramas, y (2) en algunos arcos, el  $Na_2O + K_2O$  demuestra mayor correlación con  $SiO_2$  que el  $K_2O$  con  $SiO_2$  solamente (Arculus y Johnson, 1978).

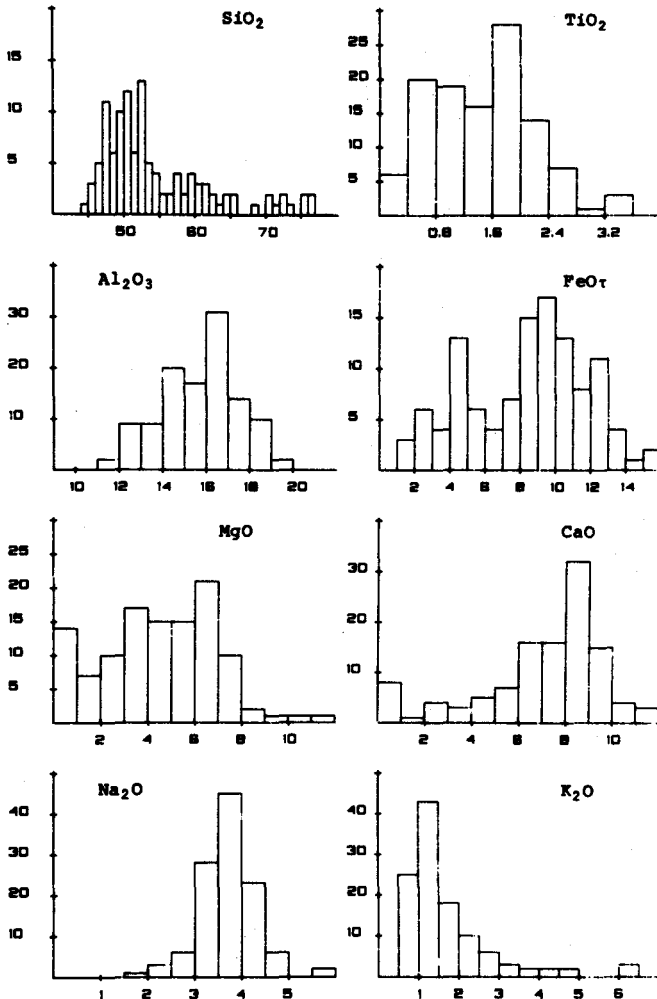


Fig. 13. Histogramas de frecuencia de algunos de los elementos mayores en las rocas ígneas del bloque X. FeOt= Fierro total como FeO.

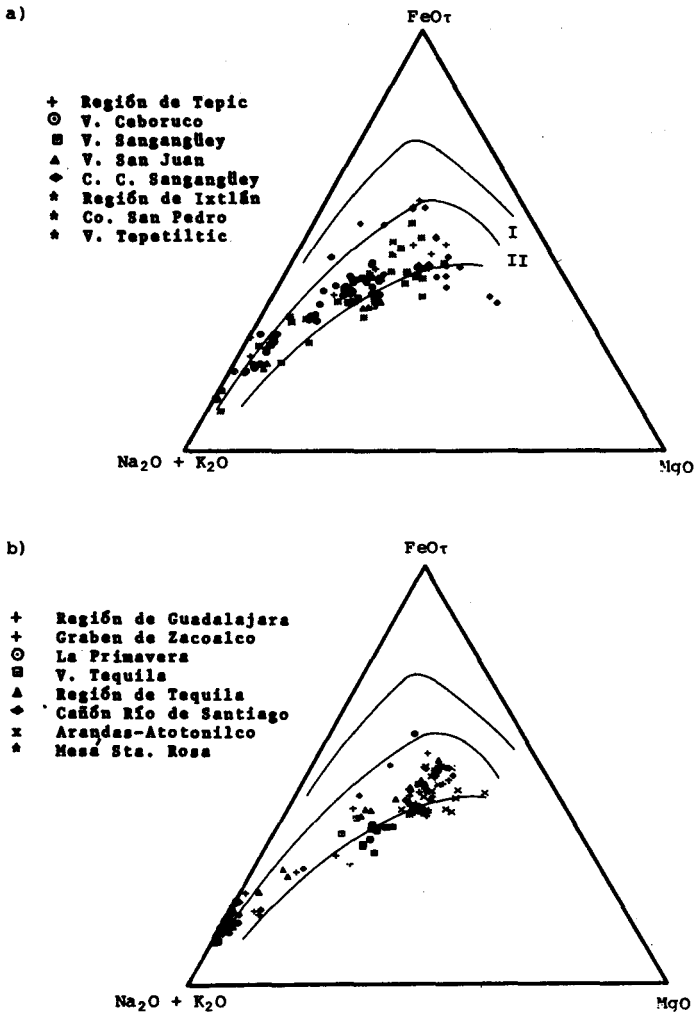


Fig. 14. Diagramas AFM. a) Bloque I. b) Bloque II. I= Serie pigeonítica. II= Serie de Hipèrstená.



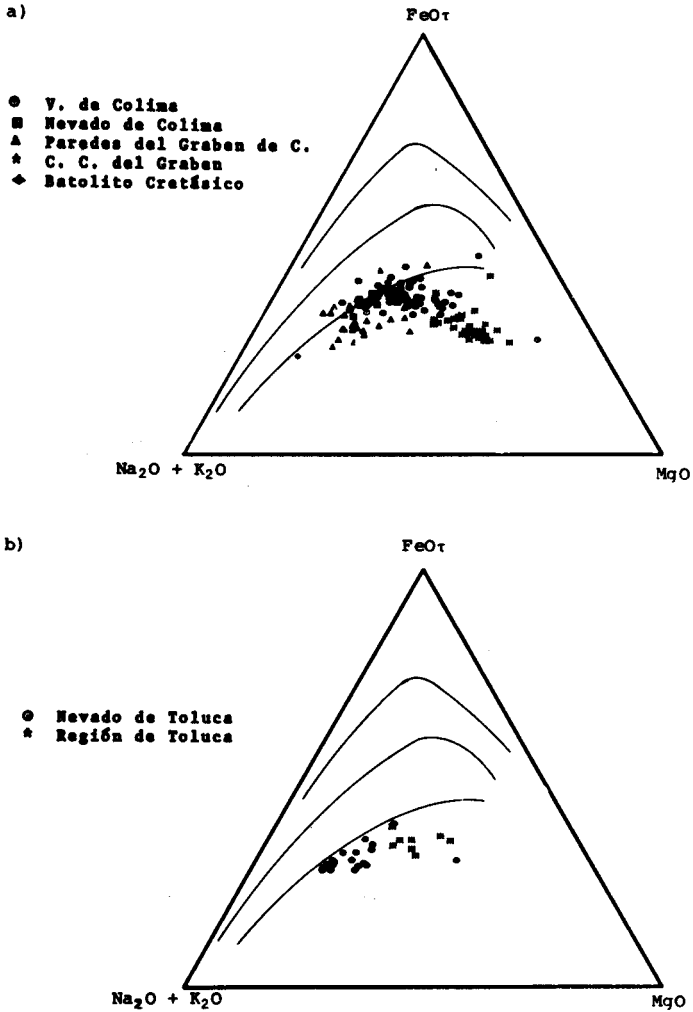


Fig. 15. Diagramas AFM. a) Bloque III. b) Bloque V. Las áreas para las series volcánicas se describen en la fig. 14.

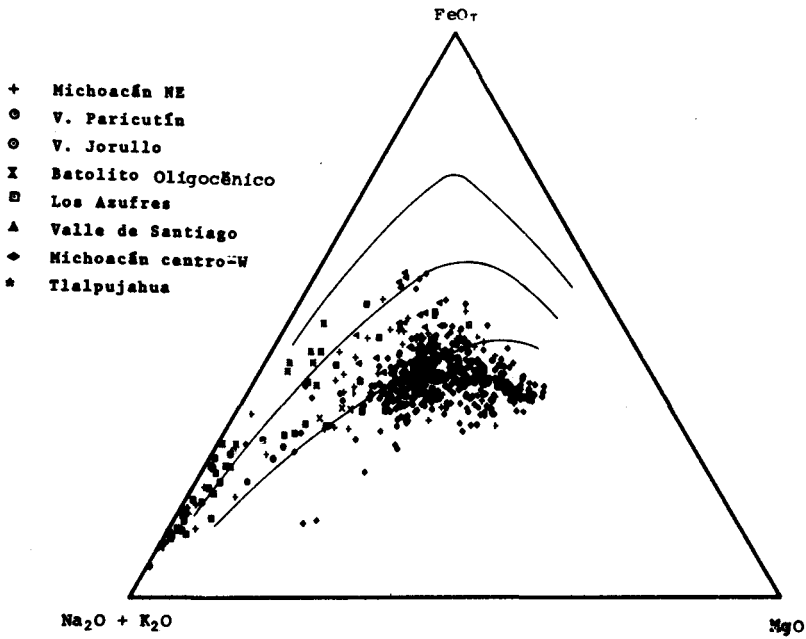


Fig. 16. Diagrama AFM para el bloque IV. Las áreas para las series volcánicas se describen en la fig. 14.

Como se puede observar a partir de estos diagramas, en la mayoría de las zonas del CVM (bloques I, II, III, IV, IX y X) coexisten magmas de tipo calci-alcálico y alcalino, aunque en la parte oriental (bloques IX y X) se presentan también, al parecer, magmas de tipo toleítico. De estos tipos magmáticos, los grandes estrato-volcanes del CVM se componen principalmente del tipo calci-alcálico, y una gran parte de los volcanes monogénicos y de las estructuras de caldera parece estar constituida por magmas de tipo alcalino.

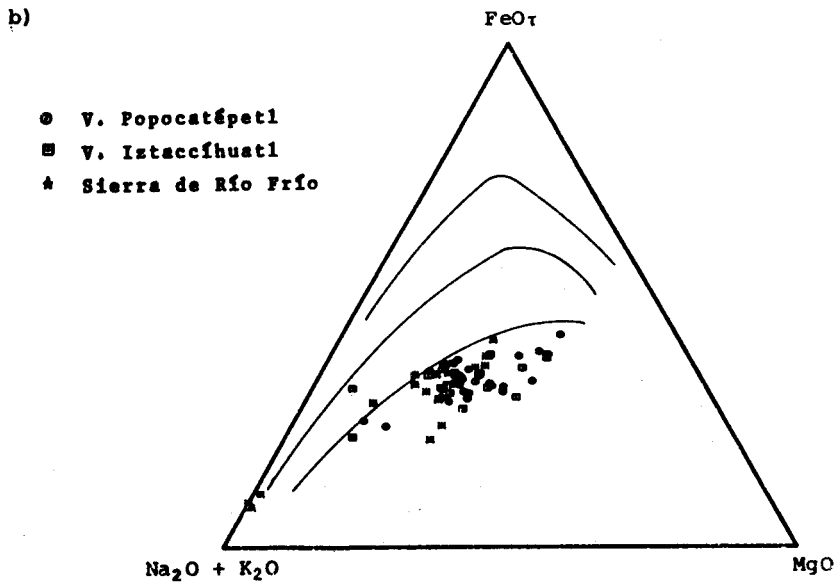
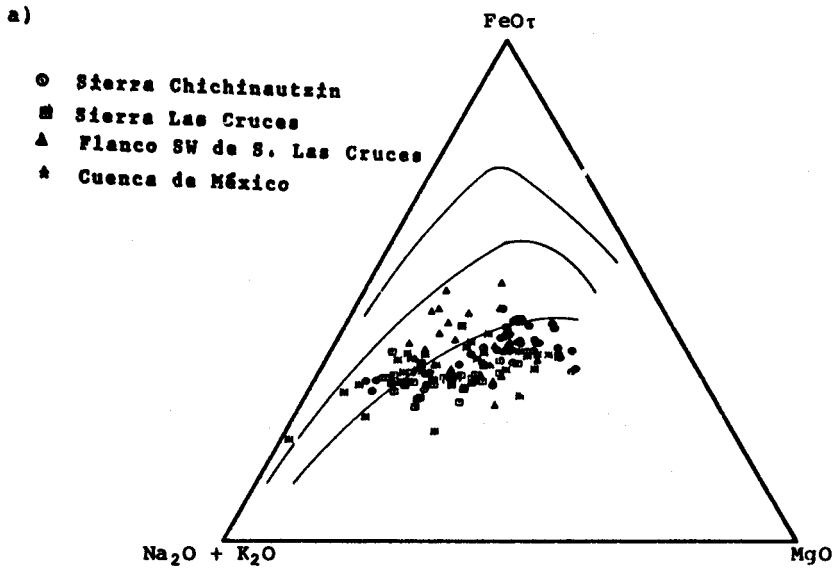


Fig. 17. Diagramas AFM a) Bloque VI. b) Bloque VII. Las áreas para las series volcánicas se describen en la fig. 14.

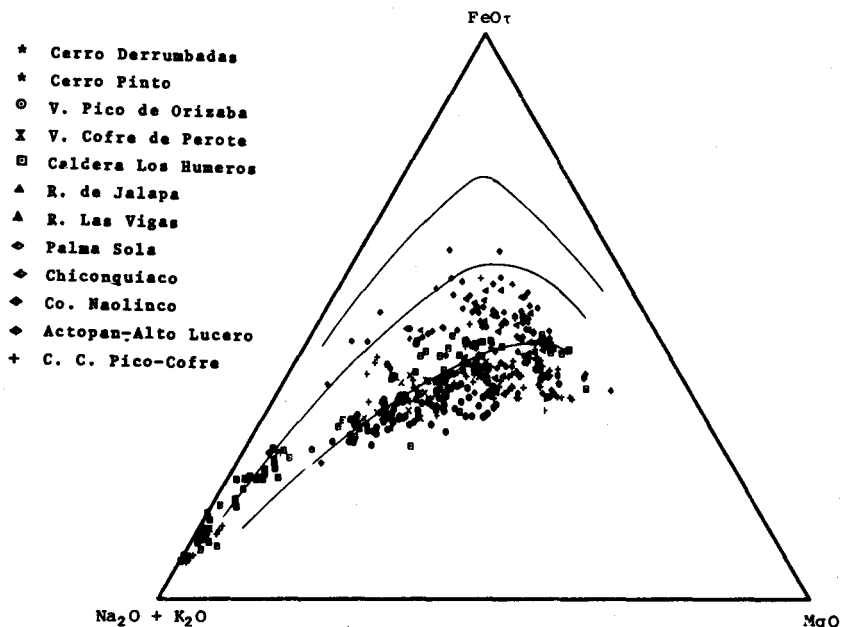


Fig. 18. Diagrama AFM para el bloque IX. Las áreas para las series volcánicas se describen en la fig. 14.

En los diagramas que se presentan para el bloque I (fig. 21) se puede observar que el  $K_2O$  y la suma de álcalis ( $Na_2O + K_2O$ ) muestran una buena correlación con el sílice ( $n = 124$ ;  $r = 0.85$  y  $r = 0.86$  respectivamente, tabla 1). Asimismo, se puede apreciar la línea evolutiva de los magmas extruidos por el Volcán Ceboruco, los cuales muestran un fuerte enriquecimiento gradual de los álcalis, provocando que sus productos más diferenciados se sitúen en el área asignada a las series volcánicas calci-alcalinas ricas en potasio de Peccerillo y Taylor (1976), y dentro del área señalada por Kuno (1966) para las series volcánicas alcalinas. En general, los demás estratovolcanes de esta región muestran una línea evolutiva calci-alcalina, en contraste con la tendencia alcalina que muestra la mayoría de los volcanes monogenéticos de este bloque. El rasgo más notable lo presentan los conos cinerfíticos de la región del Vol-

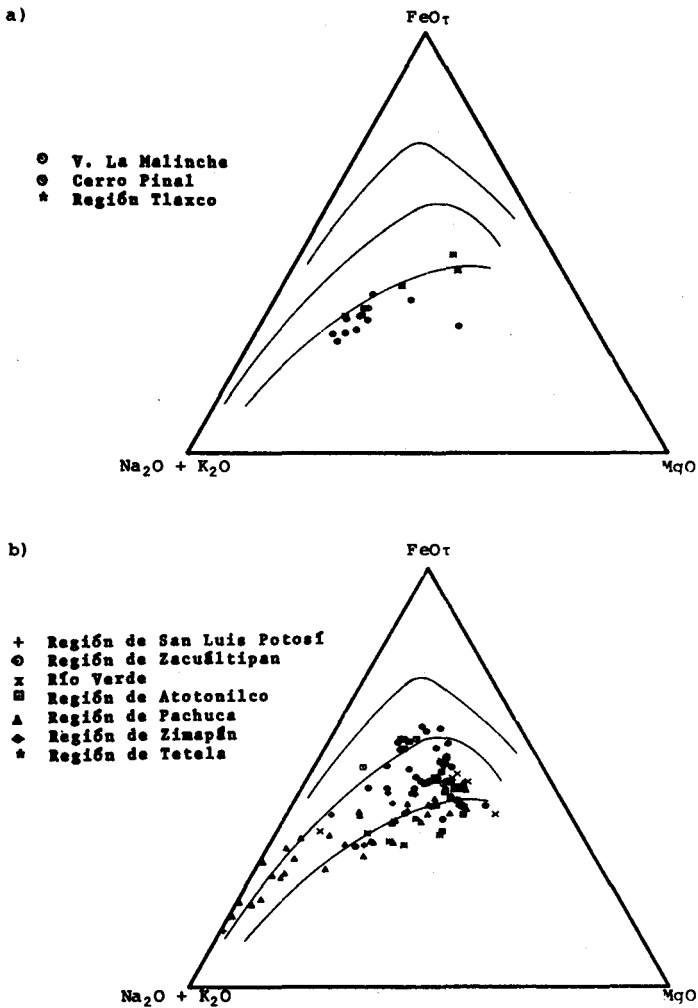


Fig. 19. Diagramas AFM. a) Bloque VIII. b) Bloque X. Las áreas para las series volcánicas se describen en la fig. 14.

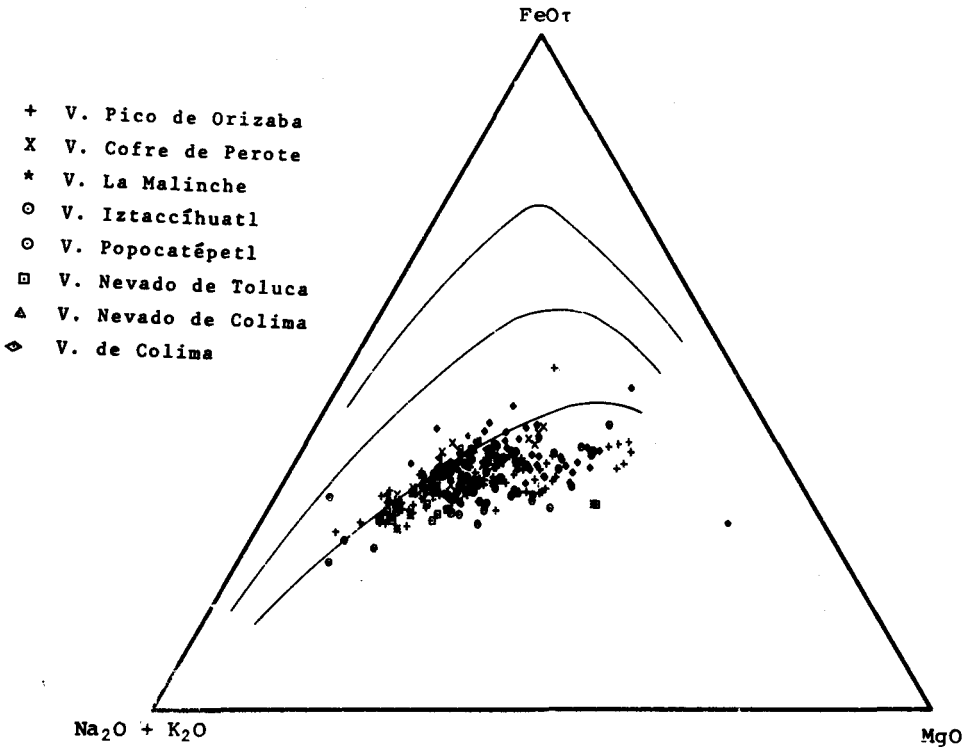


Fig. 20. Diagrama AFM para los grandes estrato-volcanes del CVM. Las áreas para las series volcánicas se describen en la fig. 14.

cán Sangangüey, y, aunque no todos muestran un gran enriquecimiento en potasio, todos ellos presentan un alto contenido en el total de álcalis. Esto significa un fuerte enriquecimiento en sodio, siguiendo la secuencia evolutiva de la serie volcánica alcalina rica en este último elemento (basalto alcalino → hawaiiita → mugearita → benmoreita, Aguilar-y-Vargas, 1985), colocándolos a todos ellos, en el diagrama álcalis vs. sílice, dentro del área de las rocas moderadamente alcalinas de Schwarzer y Rogers (1974). Por otro lado, cabe señalar que esta secuencia alcalina ha sido extruida contemporáneamente con la secuencia calci-alcalina (Nelson y Carmichael, 1984; Luhr *et al.*, 1985), lo cual es muy poco común en arcos volcánicos de margen continental. Sin embargo, no se conoce aún la relación genérica entre ellas.

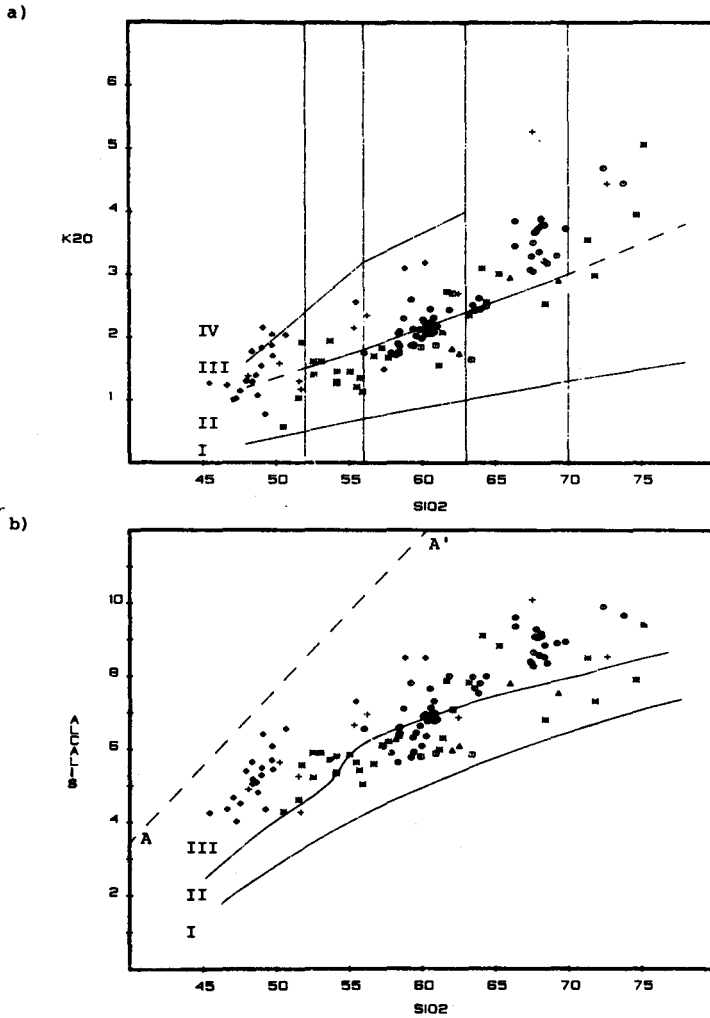


Fig. 21. Diagramas para el bloque I. a) Diagrama de Peccerillo y Taylor. I. Serie toleítica, II. Serie calco-alcalina, III. Serie calco-alcalina rica en potasio, IV. Serie shoshonítica. b) Diagrama de Kuno. I. Serie toleítica, II. Serie de basalto aluminico, III. Serie alcalina. A-A'= línea de Schwarzer y Rogers (1974).

Tabla 1. Matrices de correlación de los óxidos mayores, suma de álcalis (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O; ALC) e índice de diferenciación (I.D., Thornton y Tuttle, 1960), para los diferentes bloques del CVM, 1.1) Bloque I; 1.2) Bloque II; 1.3) Bloque III; 1.4) Bloque IV; 1.5) Bloque V; 1.6) Bloque VI; 1.7) Bloque VII; 1.8) Bloque VIII; 1.9) Bloque IX; y 1.10) Bloque X.

## 1.1) BLOQUE I

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ALC	I.D.	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
SiO <sub>2</sub>	1	1.00											
TiO <sub>2</sub>	2	-0.88	1.00										
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	-0.61	0.33	1.00									
FeO <sub>t</sub>	4	-0.92	0.92	0.40	1.00								
MnO	5	-0.64	0.70	0.15	0.79	1.00							
MgO	6	-0.90	0.74	0.50	0.74	0.42	1.00						
CaO	7	-0.95	0.79	0.63	0.86	0.53	0.88	1.00					
Na <sub>2</sub> O	8	0.71	-0.61	-0.33	-0.62	-0.21	-0.81	-0.77	1.00				
K <sub>2</sub> O	9	0.85	-0.67	-0.72	-0.73	-0.41	-0.77	-0.50	0.68	1.00			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10	-0.71	0.79	0.34	0.76	0.68	0.51	0.62	-0.37	-0.55	1.00		
ALC	11	0.86	-0.79	-0.61	-0.75	-0.36	-0.86	-0.92	0.00	0.94	-0.52	1.00	
I.D.	12	0.97	-0.81	-0.66	-0.88	-0.54	-0.91	-0.98	0.80	0.92	-0.64	0.94	1.00

## 1.2) BLOQUE II

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ALC	I.D.	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
SiO <sub>2</sub>	1	1.00											
TiO <sub>2</sub>	2	-0.88	1.00										
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	-0.88	0.67	1.00									
FeO <sub>t</sub>	4	-0.96	0.94	0.75	1.00								
MnO	5	-0.90	0.86	0.71	0.92	1.00							
MgO	6	-0.96	0.83	0.81	0.94	0.88	1.00						
CaO	7	-0.98	0.63	0.90	0.93	0.85	0.96	1.00					
Na <sub>2</sub> O	8	0.53	-0.39	-0.45	-0.51	-0.37	-0.60	-0.58	1.00				
K <sub>2</sub> O	9	0.95	-0.80	-0.89	-0.90	-0.82	-0.93	-0.97	0.52	1.00			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10	-0.75	0.79	0.60	0.74	0.70	0.70	0.69	-0.33	-0.66	1.00		
ALC	11	0.93	-0.77	-0.87	-0.88	-0.78	-0.94	-0.96	0.71	0.97	-0.64	1.00	
I.D.	12	0.99	-0.85	-0.90	-0.95	-0.87	-0.97	-0.99	0.58	0.97	-0.71	0.96	1.00



Tabla 1 (continuación --1)

## 1.3) BLOQUE III

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ALC	I.D.	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
SiO <sub>2</sub>	1	1.00											
TiO <sub>2</sub>	2	-0.78	1.00										
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	0.81	-0.69	1.00									
FeO <sub>t</sub>	4	-0.88	0.71	-0.60	1.00								
MnO	5	-0.66	0.44	-0.52	0.76	1.00							
MgO	6	-0.88	0.54	-0.86	0.74	0.64	1.00						
CaO	7	-0.87	0.51	-0.62	0.80	0.71	0.84	1.00					
Na <sub>2</sub> O	8	0.75	-0.59	0.65	-0.68	-0.50	-0.78	-0.67	1.00				
K <sub>2</sub> O	9	-0.61	0.75	-0.73	0.35	0.19	0.47	0.32	-0.52	1.00			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10	-0.80	0.79	-0.79	0.53	0.34	0.69	0.62	-0.63	0.85	1.00		
ALC	11	-0.14	0.43	-0.36	-0.10	-0.16	-0.04	-0.14	0.15	0.77	0.52	1.00	
I.D.	12	0.76	-0.37	0.46	-0.82	-0.71	-0.80	-0.89	0.72	-0.04	-0.36	0.50	1.00

## 1.4) BLOQUE IV

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ALC	I.D.	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
SiO <sub>2</sub>	1	1.00											
TiO <sub>2</sub>	2	-0.70	1.00										
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	-0.67	0.35	1.00									
FeO <sub>t</sub>	4	-0.90	0.84	0.51	1.00								
MnO	5	-0.80	0.71	0.44	0.85	1.00							
MgO	6	-0.81	0.33	0.42	0.62	0.60	1.00						
CaO	7	-0.94	0.55	0.73	0.78	0.70	0.82	1.00					
Na <sub>2</sub> O	8	-0.05	0.15	0.21	0.11	0.08	-0.14	0.01	1.00				
K <sub>2</sub> O	9	0.80	-0.35	-0.82	-0.63	-0.57	-0.74	-0.87	-0.11	1.00			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10	-0.53	0.73	0.22	0.62	0.52	0.26	0.38	0.21	-0.17	1.00		
ALC	11	0.76	-0.28	-0.71	-0.57	-0.52	-0.77	-0.84	0.20	0.92	-0.00	1.00	
I.D.	12	0.95	-0.54	-0.73	-0.80	-0.72	-0.88	-0.97	0.05	0.91	-0.35	0.90	1.00

## 1.5) BLOQUE V

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ALC	I.D.	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
SiO <sub>2</sub>	1	1.00											
TiO <sub>2</sub>	2	-0.84	1.00										
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	0.03	-0.03	1.00									
FeO <sub>t</sub>	4	-0.86	0.80	-0.18	1.00								
MnO	5	-0.34	0.20	0.15	0.30	1.00							
MgO	6	-0.80	0.69	-0.42	0.88	0.22	1.00						
CaO	7	-0.88	0.74	-0.11	0.96	0.33	0.88	1.00					
Na <sub>2</sub> O	8	0.40	-0.22	0.09	-0.38	-0.11	-0.44	-0.46	1.00				
K <sub>2</sub> O	9	0.12	-0.23	-0.10	-0.02	0.11	-0.13	-0.03	0.33	1.00			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10	-0.58	0.63	-0.28	0.64	0.12	0.47	0.54	-0.01	0.16	1.00		
ALC	11	0.35	-0.27	0.02	-0.29	-0.03	-0.39	-0.35	0.89	0.72	0.07	1.00	
I.D.	12	0.87	-0.74	0.16	-0.92	-0.32	-0.93	-0.95	0.62	0.23	-0.46	0.57	1.00

Tabla 1 (continuación)

## 1.6) BLOQUE VI

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ALC	I.D.	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
SiO <sub>2</sub>	1	1.00											
TiO <sub>2</sub>	2	-0.82	1.00										
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	-0.01	-0.12	1.00									
FeO <sub>t</sub>	4	-0.92	0.86	-0.19	1.00								
MnO	5	-0.57	0.40	-0.08	0.57	1.00							
MgO	6	-0.87	0.72	-0.19	0.78	0.44	1.00						
CaO	7	-0.90	0.74	-0.09	0.94	0.53	0.80	1.00					
Na <sub>2</sub> O	8	0.05	-0.05	-0.20	0.03	-0.11	-0.11	-0.16	1.00				
K <sub>2</sub> O	9	0.68	-0.52	-0.12	-0.64	-0.42	-0.64	-0.69	0.10	1.00			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10	-0.51	0.62	-0.21	0.63	0.36	0.35	0.43	0.12	-0.24	1.00		
ALC	11	0.50	-0.39	-0.21	-0.42	-0.36	-0.51	-0.58	0.74	0.75	-0.09	1.00	
I.D.	12	0.93	-0.76	-0.00	-0.85	-0.53	-0.90	-0.93	0.28	0.76	-0.40	0.70	1.00

## 1.7) BLOQUE VII

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ALC	I.D.	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
SiO <sub>2</sub>	1	1.00											
TiO <sub>2</sub>	2	-0.88	1.00										
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	-0.50	0.31	1.00									
FeO <sub>t</sub>	4	-0.93	0.87	0.33	1.00								
MnO	5	-0.65	0.56	0.26	0.62	1.00							
MgO	6	-0.90	0.80	0.21	0.96	0.63	1.00						
CaO	7	-0.92	0.83	0.41	0.92	0.55	0.81	1.00					
Na <sub>2</sub> O	8	0.32	-0.38	0.12	-0.36	-0.33	-0.47	-0.30	1.00				
K <sub>2</sub> O	9	0.82	-0.62	-0.54	-0.72	-0.38	-0.70	-0.82	-0.03	1.00			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10	-0.33	0.23	0.16	0.36	0.30	0.20	0.35	0.16	-0.76	1.00		
ALC	11	0.89	-0.74	-0.44	-0.82	-0.49	-0.85	-0.88	0.43	0.89	-0.16	1.00	
I.D.	12	0.98	-0.86	-0.44	-0.95	-0.61	-0.93	-0.95	0.40	0.82	-0.28	0.93	1.00

## 1.8) BLOQUE VIII

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ALC	I.D.	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
SiO <sub>2</sub>	1	1.00											
TiO <sub>2</sub>	2	-0.88	1.00										
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	-0.18	0.11	1.00									
FeO <sub>t</sub>	4	-0.95	0.91	0.18	1.00								
MnO	5	-0.94	0.93	0.30	0.97	1.00							
MgO	6	-0.91	0.79	-0.22	0.84	0.78	1.00						
CaO	7	-0.97	0.82	0.17	0.90	0.90	0.90	1.00					
Na <sub>2</sub> O	8	0.71	-0.61	-0.14	-0.66	-0.61	-0.67	-0.72	1.00				
K <sub>2</sub> O	9	0.88	-0.73	-0.50	-0.86	-0.88	-0.67	-0.87	0.64	1.00			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10	-0.23	0.11	0.50	0.32	0.35	-0.03	0.11	0.06	-0.34	1.00		
ALC	11	0.86	-0.73	-0.33	-0.83	-0.81	-0.74	-0.87	0.93	0.88	-0.13	1.00	
I.D.	12	0.98	-0.85	-0.12	-0.93	-0.91	-0.93	-0.99	0.77	0.87	-0.12	0.90	1.00

Tabla 1 (continuación )

## 1.9) BLOQUE IX

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ALC	I.D.	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
SiO <sub>2</sub>	1	1.00											
TiO <sub>2</sub>	2	-0.84	1.00										
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	-0.32	0.24	1.00									
FeO <sub>t</sub>	4	-0.94	0.86	0.15	1.00								
MnO	5	-0.82	0.73	0.21	0.80	1.00							
MgO	6	-0.84	0.61	0.06	0.76	0.66	1.00						
CaO	7	-0.96	0.73	0.27	0.90	0.76	0.86	1.00					
Na <sub>2</sub> O	8	0.52	-0.35	0.06	-0.47	-0.38	-0.65	-0.59	1.00				
K <sub>2</sub> O	9	0.84	-0.60	-0.37	-0.77	-0.62	-0.80	-0.88	0.44	1.00			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10	-0.55	0.66	0.13	0.58	0.51	0.34	0.49	-0.26	-0.34	1.00		
ALC	11	0.84	-0.60	-0.26	-0.77	-0.62	-0.86	-0.90	0.73	0.93	-0.36	1.00	
I.D.	12	0.96	-0.74	-0.32	-0.89	-0.76	-0.91	-0.97	0.62	0.91	-0.46	0.94	1.00

## 1.10) BLOQUE X

	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO <sub>t</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ALC	I.D.	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
SiO <sub>2</sub>	1	1.00											
TiO <sub>2</sub>	2	-0.80	1.00										
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	-0.27	-0.06	1.00									
FeO <sub>t</sub>	4	-0.90	0.87	-0.08	1.00								
MnO	5	-0.58	0.50	0.13	0.64	1.00							
MgO	6	-0.82	0.61	0.12	0.69	0.39	1.00						
CaO	7	-0.92	0.67	0.32	0.78	0.42	0.73	1.00					
Na <sub>2</sub> O	8	-0.09	0.06	0.22	0.01	0.13	-0.16	0.01	1.00				
K <sub>2</sub> O	9	0.76	-0.50	-0.48	-0.60	-0.39	-0.63	-0.83	-0.05	1.00			
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	10	-0.29	0.22	-0.06	0.38	0.22	0.06	0.23	0.17	-0.15	1.00		
ALC	11	0.65	-0.42	-0.32	-0.53	-0.29	-0.64	-0.75	0.44	0.88	-0.05	1.00	
I.D.	12	0.95	-0.71	-0.34	-0.82	-0.51	-0.86	-0.94	0.11	0.85	-0.19	0.82	1.00

En el diagrama de potasio vs. sílice para el bloque II (fig. 22) se observa claramente la dualidad en la composición química de los productos volcánicos emitidos en esta región del CVM. Se tienen, por un lado, productos básicos-intermedios, y por el otro, productos muy ácidos, destacándose de estos últimos, los que constituyen la Caldera de la Primavera. Esta se localiza al occidente de la ciudad de Guadalajara, y en donde, como se mencionó en el inciso anterior, fueron extruidos magmas

silícicos metalumínicos (riolitas potásicas) y moderadamente peralcalinos (comenditas, Mahood, 1980, 1981). La presencia de este tipo de rocas alcalinas es poco usual en arcos volcánicos continentales y generalmente se encuentran asociadas a zonas de rompimiento (*rifting*) continental (Carmichael *et al.*, 1974; MacDonald, 1974). En general, las manifestaciones volcánicas ácidas en este bloque presentan alto contenido

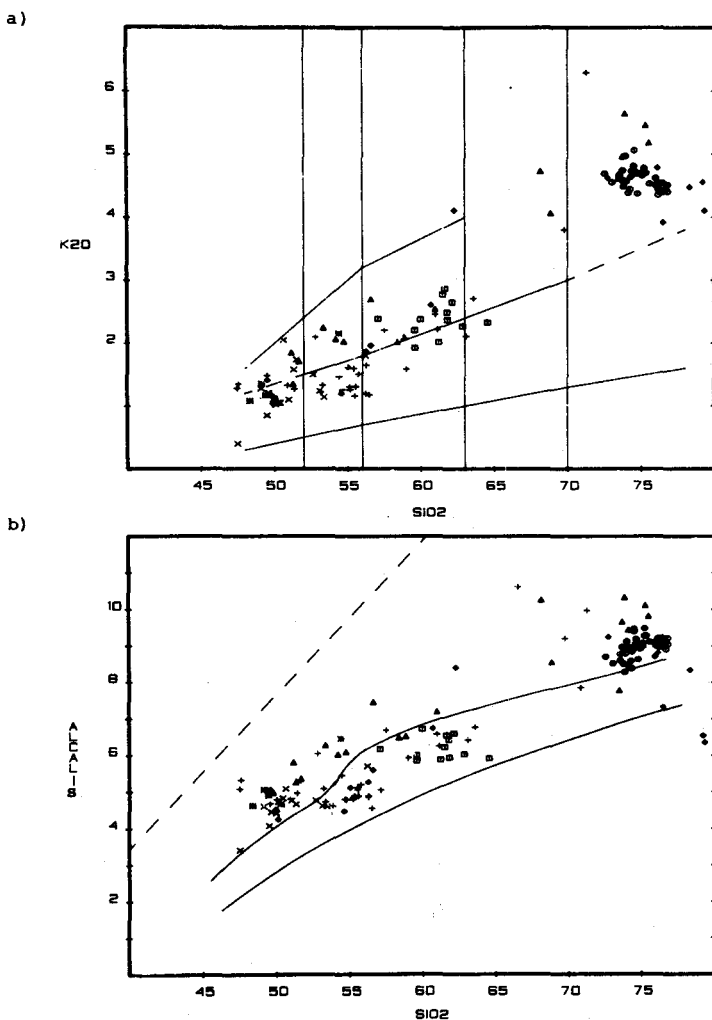


Fig. 22. a) Diagrama de Peccerillo y Taylor, b) Diagrama de Kuno, para el bloque II. Las áreas para las series volcánicas se describen en la fig. 21.

do en potasio, colocándolas dentro del campo de la serie calci-alcalina rica en potasio en el diagrama de Peccerillo y Taylor (1976), y contenido de moderado a fuerte en álcalis, lo que las ubica dentro del área alcalina de Kuno (1966), excepto a aquellas del Domo de Magdalena y a la mayoría de las del Cañón del Río Grande de Santiago. De la misma manera, las rocas volcánicas básicas se muestran ligeramente enriquecidas en álcalis, haciéndolas que se agrupen en el área de las series moderadamente al-

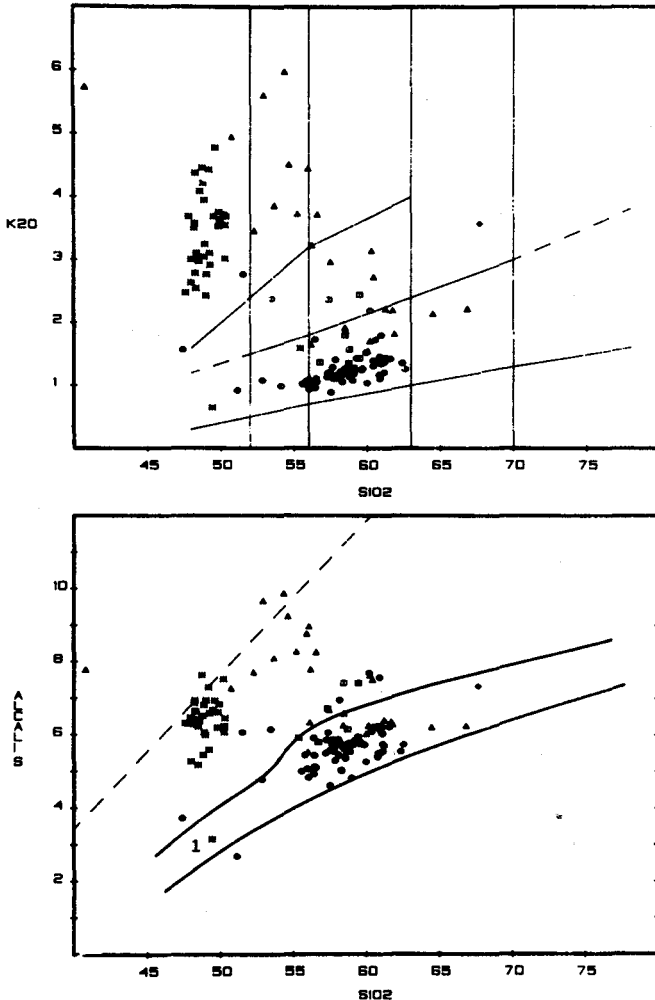


Fig. 23. a) Diagrama de Peccerillo y Taylor, y b) Diagrama de Kuno, para el bloque III. 1 = Basalto calco-alcálico del Volcán Tezontal. Las áreas para las series volcánicas se describen en la fig. 21.

calinas en el diagrama de álcalis vs. sílice. Por otra parte, los productos volcánicos del Volcán de Tequila (único estrato-volcán de esta región) si bien muestran un poco de enriquecimiento en potasio, su contenido en el total de álcalis es moderado, siguiendo la secuencia evolutiva asignada a las series volcánicas de afinidad calci-alkalina (serie del basalto alumínico) dentro del diagrama de Kuno (1966).

En los diagramas que se despliegan para el bloque III (fig. 23) se hace patente la baja correlación que presentan la suma de álcalis y el potasio con el sílice ( $n = 136$ ;  $r = 0.14$  y  $r = -0.61$  respectivamente, tabla 1), siendo además esta última negativa, opuestamente a lo que se espera en una serie evolutiva. Esto significa que existen diferentes series volcánicas representadas en las rocas ígneas de este bloque. Esta observación parece ser compatible en los dos diagramas que se muestran para este bloque, en los que pueden distinguirse dos agrupaciones bien marcadas; una dentro de la serie volcánica calci-alkalina y la otra dentro de la serie shoshonítica de Peccerillo y Taylor (1976), y la del basalto alumínico y la alcalina de Kuno (1966), respectivamente. La serie volcánica calci-alkalina corresponde principalmente a los magmas extruidos por los grandes estrato-volcanes (Volcán de Colima y Nevado de Colima) mientras que la alcalina representa a la mayoría de los volcanes monogenéticos del interior del graben y a una parte de las lavas extruidas en los flancos del mismo. Sin embargo, como puede apreciarse en las dos gráficas, existen algunos productos volcánicos intermedios entre estas dos agrupaciones, de los cuales los más notables son aquellos provenientes del Volcán de Colima, constituidos por escorias y cenizas alcalinas intercaladas con calci-alkalinas, emitidas todas ellas a finales del Pleistoceno. Dichos productos intermedios podrían haberse generado de una mezcla de una inyección pre-eruptiva de un magma de composición basanítica con un magma andesítico que ocuparía la cámara magmática en esos momentos (Luhr y Carmichael, 1982), aunque se desconoce su relación genética.

En general, los productos calci-alkalinos están representados en su mayoría por las andesitas del Nevado de Colima y del Volcán de Colima, las cuales se caracterizan por sus bajos contenidos en potasio, en comparación con las lavas emitidas por los demás estrato-volcanes del CVM (Luhr y Carmichael, 1980; Demant, 1981) y que son consideradas como los productos diferenciados de un magma de composición basáltica rico en aluminio, similar al que dio origen al volcán Tezontal, localizado al NE del Volcán de Colima (Luhr y Carmichael, 1980, 1981). Por otra parte, el magmatismo de tipo alcalino ha dado origen a rocas principalmente básicas con altos contenidos en magnesio y potasio (ankartritas, basanitas de leucita, basanitas, minettes, lamprófiro de flogopita y de hornblenda; Luhr y Carmichael, 1981; Allan,

1984, 1985). Estas, al igual que las series volcánicas alcalinas de los bloques I y II son raras en arcos volcánicos de margen continental, encontrándose típicamente en islas oceánicas y zonas de rompimiento (*rifting*) continental (Carmichael *et al.*, 1974; Allan, 1984; Luhr *et al.*, 1985; Luhr y Carmichael, 1985a).

Debido a la gran cantidad de datos pertenecientes al bloque IV (¡590!), los diagramas  $K_2O$  vs.  $SiO_2$  y  $Na_2O+K_2O$  vs.  $SiO_2$  para esta región se presentan por separado (figs. 24 y 25, respectivamente). En la figura 24 se observa una gran variación en el contenido de potasio en las rocas volcánicas de esta zona. Sin embargo, la correla-

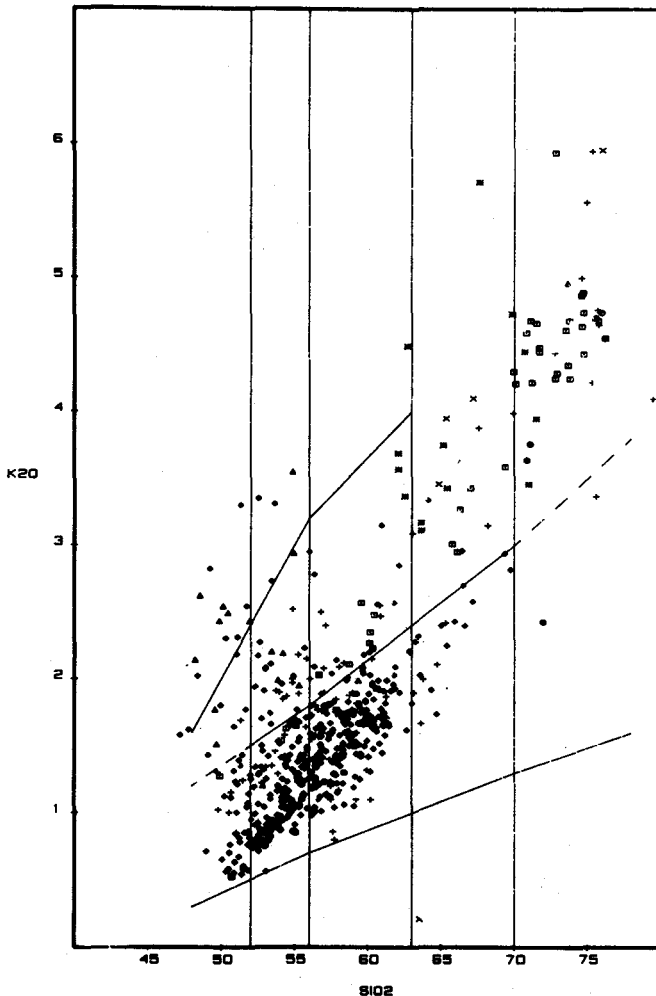


Fig. 24. Diagrama de Peccerillo y Taylor para el bloque IV. Las áreas para las series volcánicas se describen en la fig. 21.

ción entre este elemento y el sílice se puede considerar como buena ( $r = 0.80$ , tabla 1). De esta manera, los productos volcánicos pertenecientes a la gran cantidad de volcanes monogénicos (más de mil, Hasenaka y Carmichael, 1985) de la zona denominada como Michoacán Centro-Occidental por Demant (1981) y como Campo Volcánico de Michoacán-Guanajuato por Hasenaka y Carmichael (1985), se concentran principalmente dentro del área asignada a las series volcánicas calci-alcalinas, aunque

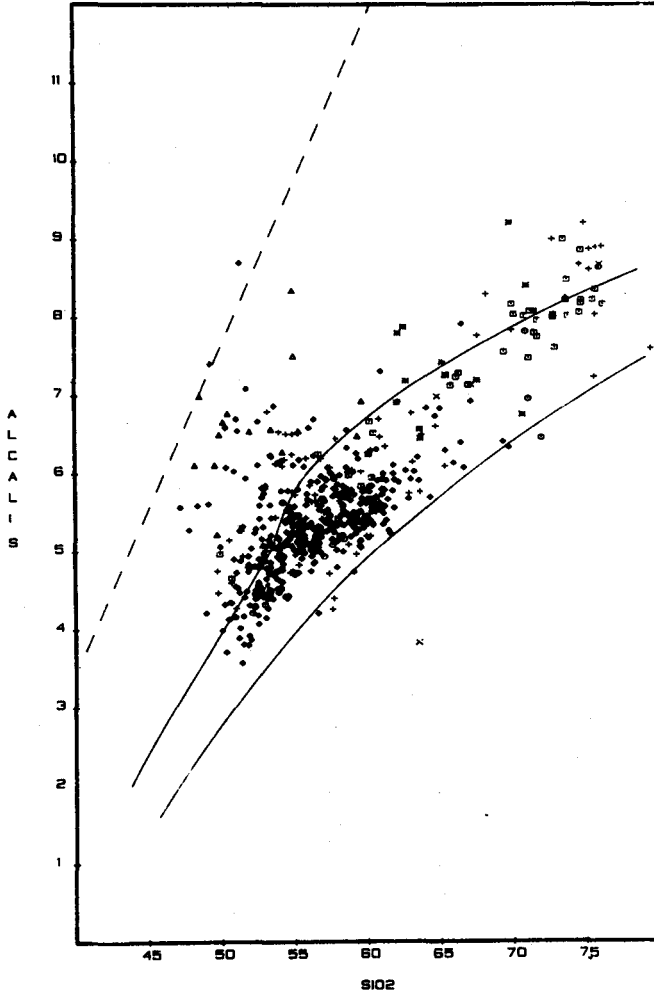


Fig. 25. Diagrama de Kuno para el bloque IV. Las áreas para las series volcánicas se describen en la fig. 21.



una buena parte se distribuye también en las áreas para las series volcánicas shoshoníticas y calci-alcálicas, ricas en potasio. Esta afinidad alcalina de una parte de los magmas extruidos en esta región, se corrobora en el diagrama de álcalis vs. sílice (fig. 25) en donde, además dos análisis de ellos se ubican dentro del campo fuertemente alcalino.

Los productos volcánicos de la región denominada por Silva-Mora (1979) como Michoacán nororiental presentan distribuciones más irregulares que los de Michoacán centro-occidental, repartiéndose tanto en el campo calci-alcálico, como en el calci-alcálico rico en potasio de la figura 24 (campo del basalto alumínico y el alcalino de la fig. 25). De estos productos, los más notables por su composición química son los que pertenecen a la región de Valle de Santiago, los cuales muestran altos contenidos en potasio y en la suma de álcalis, ubicándolos dentro de las series volcánicas calci-alcálicas ricas en potasio y shoshonítica de Peccerillo y Taylor (1976) y dentro de la alcalina de Kuno (1966), en donde además, uno de ellos se encuentra en el límite del campo fuertemente alcalino de Schwarzer y Rogers (1974). Este enriquecimiento en potasio y en álcalis es explicado por Demant (1981) como el producto de la influencia de un mayor espesor de la corteza continental en la región nororiental de Michoacán sin que ese autor haya presentado la evidencia real geofísica concerniente a los espesores corticales en el área de estudio. Sin embargo, algunos de los productos más alcalinos de este bloque han sido extruidos por el volcán denominado Cerro La Pilita (2 muestras con símbolo de diamante), en el frente volcánico del CVM (Luhr y Carmichael, 1985a, 1985b).

En general, la única línea de evolución que se muestra más clara es la que presentan las rocas volcánicas de la región de Los Azufres, las cuales se enriquecen rápidamente en potasio haciéndolas que pasen al dominio de las series volcánicas calci-alcálicas, para sus composiciones más básicas, al área de las calci-alcálicas ricas en potasio, a partir de sus composiciones andesíticas. Sin embargo, en la figura 25(b) se observa (muestras representadas por cuadro) que su contenido en el total de álcalis es moderado, ajustándose a la línea de evolución para las series volcánicas del basalto alumínico. Por otra parte, a pesar de este alineamiento en los productos volcánicos de esta zona, un estudio reciente (Cathelineau *et al.*, 1987) considera que estos productos no son la consecuencia de una sola línea de evolución.

Los diagramas de  $K_2O$  vs.  $SiO_2$  y  $Na_2O + K_2O$  vs.  $SiO_2$  para la región del Nevado de Toluca se presentan en la figura 26, observándose en ellos (muestras representadas por círculos) la evolución típicamente calci-alcálica de los magmas extruidos por el

Nevado de Toluca, así como de la mayoría de los volcanes monogenéticos de esta región.

En el diagrama de potasio vs. sílice para el bloque VI correspondiente a la región de México (fig. 27a) no se aprecia una línea de evolución bien definida para sus productos volcánicos. Aunque la mayoría de ellos se ubican dentro del área calci-alcalina,

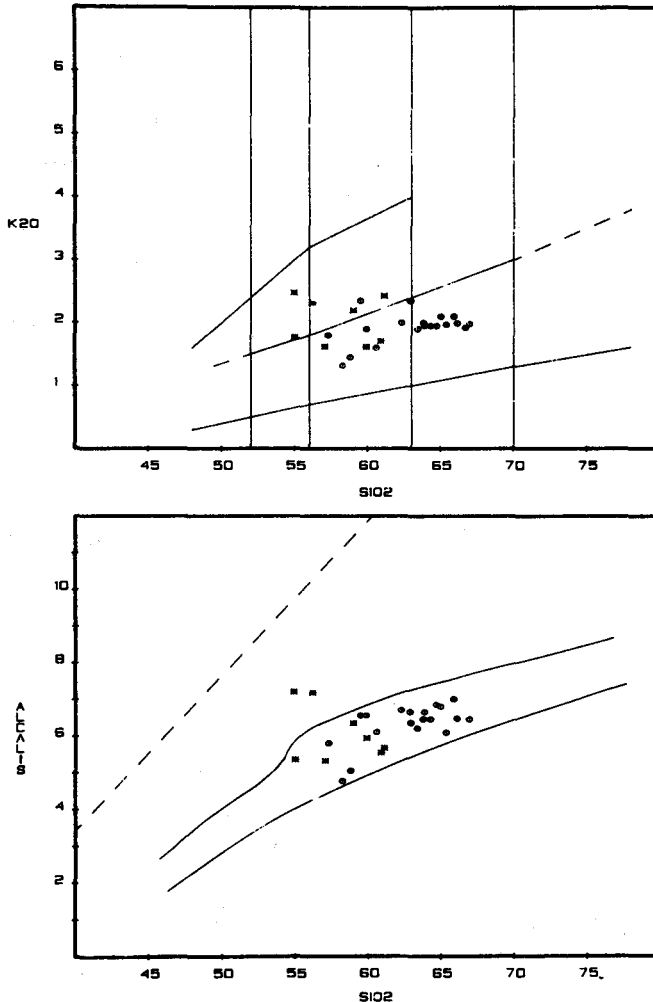
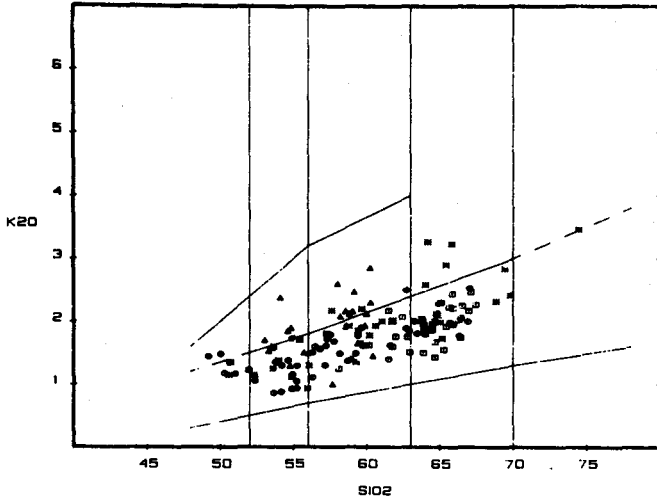


Fig. 26. a) Diagrama de Peccerillo y Taylor, y b) Diagrama de Kuno, para el bloque V. Las áreas para las series volcánicas se describen en la fig. 21.

una buena parte muestra, asimismo, un ligero enriquecimiento en potasio, principalmente aquellos pertenecientes a los volcanes monogenéticos que se localizan en el costado suroccidental de la Sierra de las Cruces. Por otro lado, en el diagrama de álcalis vs. sílice para el mismo bloque (fig. 27b), no se observa tampoco una línea de evolución bien definida. Además, aunque al igual que con el diagrama para el potasio, la mayoría de los productos se ubican dentro del área relacionada con una evolu-

a)



b)

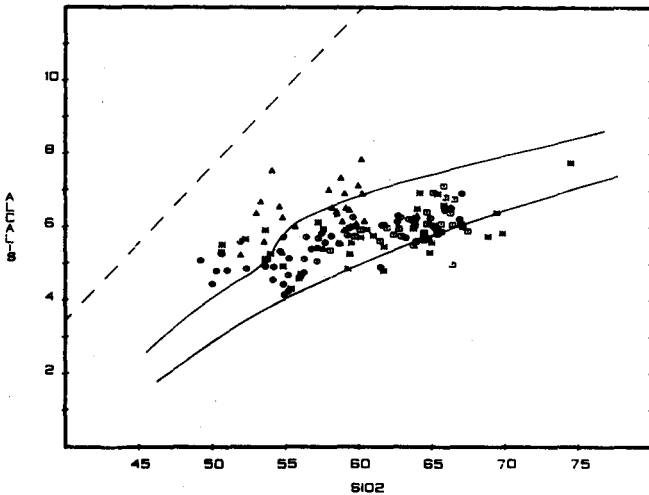
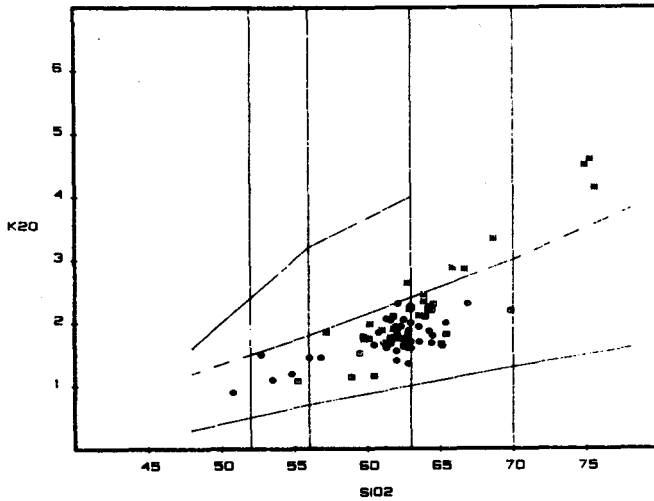


Fig. 27. a) Diagrama de Peccerillo y Taylor, y b) Diagrama de Kuno, para el bloque VI. Las áreas para las series volcánicas se describen en la fig. 21.

ción de tipo calci-alcálico (serie volcánica del basalto aluminado), muchos se distribuyen también, tanto en el área de la serie volcánica alcalina como dentro del área de la toleítica.

Las figuras 28 y 29 muestran claramente la línea de evolución típicamente calci-alcálica de los productos volcánicos pertenecientes a los grandes estrato-volcanes de esta región (Popocatepetl, Iztaccíhuatl, y La Malinche), así como la evolución, también calci-alcálica, de las demás manifestaciones volcánicas de estas áreas, con excep-

a)



b)

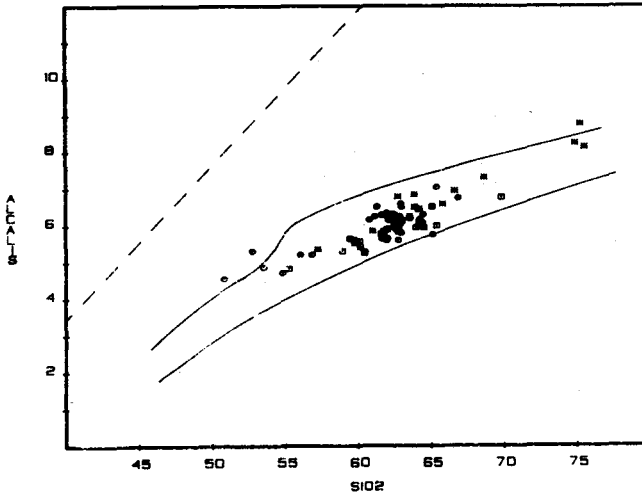
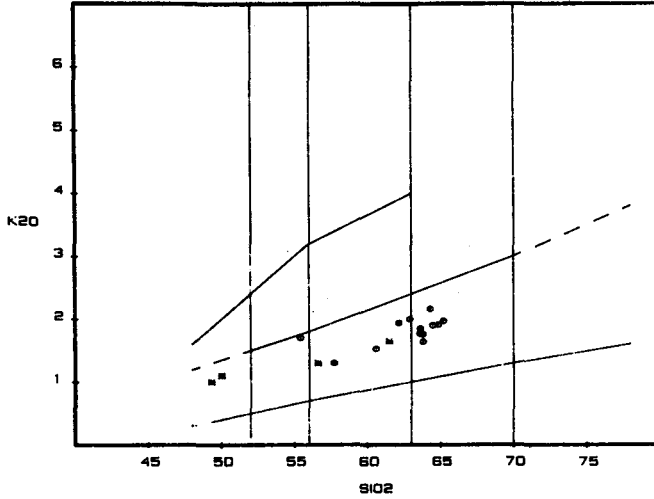


Fig. 28. a) Diagrama de Peccerillo y Taylor, y b) Diagrama de Kuno, para el bloque VII. Las áreas para las series volcánicas se describen en la fig. 21.

ción de dos conos cinerfíticos de la región del volcán La Malinche. Estos últimos muestran un poco de enriquecimiento en la suma de álcalis y son considerados por Robin (1982a) como las manifestaciones más meridionales de las formaciones del tipo Atotonilco (ver más adelante), y que representan un volcanismo de transición entre el calci-alcálico y el alcalino.

a)



b)

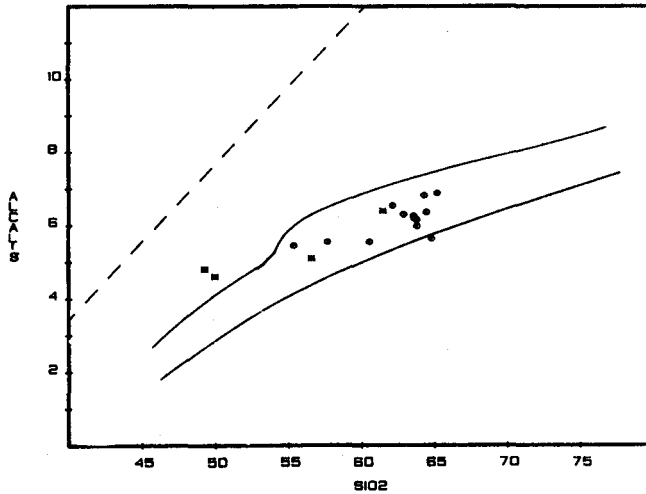


Fig. 29. a) Diagrama de Peccerillo y Taylor, y b) Diagrama de Kuno, para el bloque VIII. Las áreas para las series volcánicas se describen en la fig. 21.

Al igual que para la región de Michoacán, los diagramas de potasio vs. sílice y alcalis vs. sílice para el bloque IX se presentan por separado (figs. 30 y 31, respectivamente). En la figura 30 se puede apreciar que si bien existe un poco de dispersión en el contenido de potasio, se exhibe, en general, una correlación positiva bastante buena entre este elemento y el sílice ( $n = 429$ ;  $r = 0.84$ , tabla 1). Los productos extruidos por los grandes estrato-volcanes (Pico de Orizaba y Cofre de Perote) muestran una línea de evolución de tipo calci-alcálico, aunque algunos presentan un ligero en-

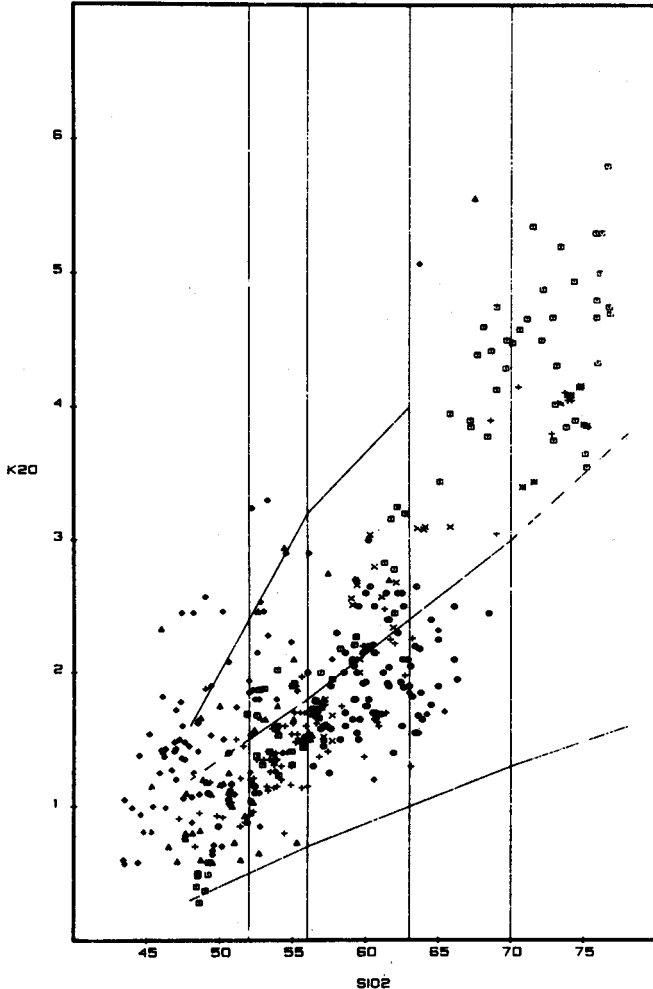


Fig. 30. Diagrama de Peccerillo y Taylor para el bloque IX. Las áreas para las series volcánicas se describen en la fig. 21.

riquecimiento en potasio, principalmente los del Cofre de Perote. Sin embargo, en el diagrama de álcalis vs. sílice, los productos de ambos volcanes se ubican casi exclusivamente dentro de la curva evolutiva de las series volcánicas del basalto aluminico. De la misma manera, la mayoría de los volcanes monogenéticos de la región Pico de Orizaba-Cofre de Perote muestran una tendencia evolutiva de tipo calci-alcalino en ambos diagramas (figs. 30 y 31).

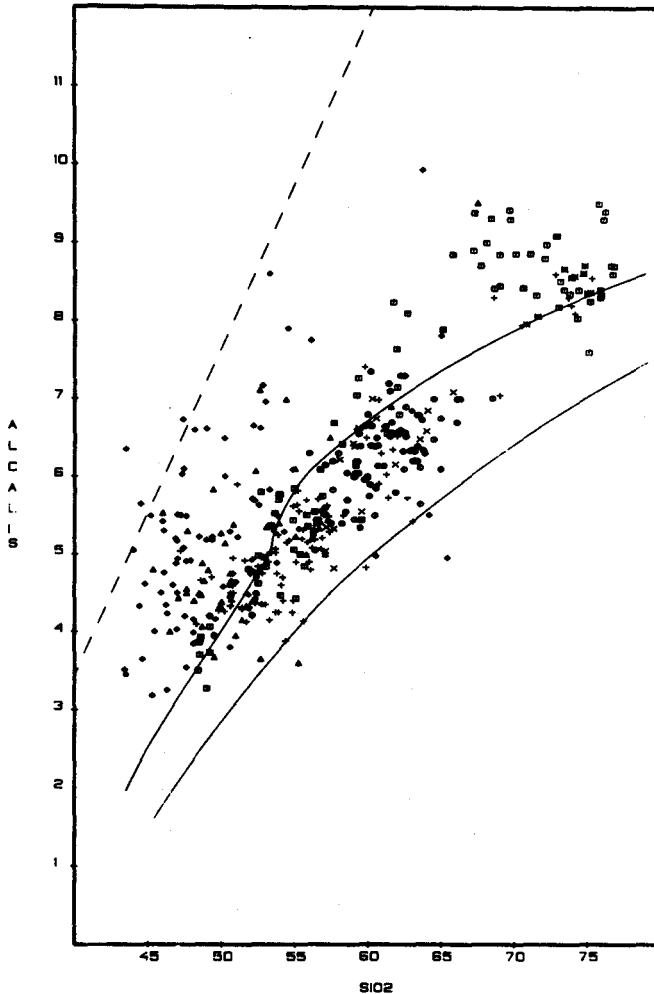


Fig. 31. Diagrama de Kuno para el bloque IX. Las áreas para las series volcánicas se describen en la fig. 21.

Los productos volcánicos de la caldera de Los Humeros muestran un rápido incremento en potasio a partir de sus composiciones andesíticas, lo cual provoca que pasen de las series volcánicas calci-alcalinas a las series calci-alcalinas ricas en potasio y shoshonítica. Cabe señalar que los basaltos de olivino de esta caldera, aunque presentan bajos contenidos en potasio, muestran, en general, altos contenidos en álcalis, así como un alto valor de magnesio (Aguilar-y-Vargas, 1985) y son considerados como el magma primario (parental magma) a partir del cual se han diferenciado los demás productos volcánicos de esta caldera, a través, principalmente, de un proceso de cristalización fraccional. Asimismo, este magma original es considerado, con base en estudios isotópicos de Sr y Nd (Verma, 1983, 1984), como el producto de la fusión parcial del manto superior, con escasa contribución de material de la corteza. Cabe mencionar que este modelo petrogenético ha sido empleado para estimar algunos parámetros adicionales de cámaras magmáticas por Verma (1985b).

Parece ser que la mayor dispersión de puntos en ambos diagramas (figs. 30 y 31) es la que se presenta para las rocas volcánicas de la región de Jalapa-Chiconquiaco-Palma Sola. Estos productos muestran una gran variación en el contenido de potasio, colocándolos irregularmente en los campos de las series volcánicas calci-alcalinas, calci-alcalina rica en potasio y shoshonítica (fig. 30). Sin embargo, la mayoría de ellos muestra un alto contenido en el total de álcalis, lo cual se manifiesta claramente en la figura 31, en donde una buena cantidad de estos productos volcánicos se distribuyen muy cerca y a lo largo del límite entre las rocas moderadamente alcalinas y fuertemente alcalinas, ubicándose, además, tres análisis dentro de este campo.

En los diagramas para el bloque X (fig. 32), se observa una gran dispersión de puntos y no se distingue una serie evolutiva clara en los productos volcánicos de esta región. Sin embargo, la mayoría de ellos parece mostrar un buen enriquecimiento en el contenido de álcalis, principalmente para las regiones de Atotonilco y de Zacualtipan, ubicándose los magmas de esta última muy cerca del límite entre las series moderadamente alcalinas y las fuertemente alcalinas. En general, los magmas extruidos en este bloque son considerados por Robin (1982a) como la serie volcánica de transición entre un magmatismo de tipo alcalino y de calci-alcalino.

#### D) Gráficas bivariadas

Este tipo de diagramas son utilizados para tratar de mostrar la evolución magmática que han seguido los productos volcánicos extruidos en un lugar determinado o en una región en particular, a través de los diferentes procesos de fraccionación o dife-



renciación, principalmente el de cristalización fraccional, para lo cual se utiliza un parámetro denominado índice de fraccionación como abscisa, contra el cual son graficados todos los óxidos.

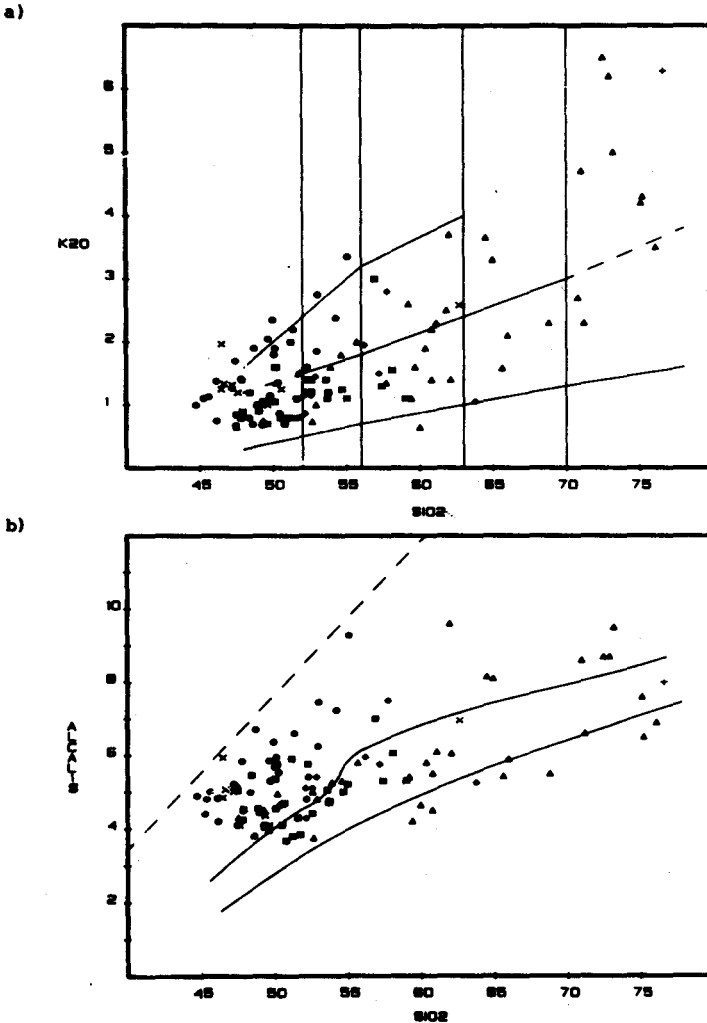


Fig. 32. a) Diagrama de Peccerillo y Taylor, y b) Diagrama de Kuno, para el bloque X. Las áreas para las series volcánicas se describen en la fig. 21.

Se han propuesto diversos índices de fraccionación a lo largo de este siglo, desde sencillos, como los que utilizan alguno de los óxidos para este propósito, principalmente el MgO y el SiO<sub>2</sub> (este último propuesto por Harker, 1909, citado en Cox *et al.*, 1980), hasta muy complicados, como el de Larsen (1938, citado en Cox *et al.*,

1980), Kuno (1959) y Thornton y Tuttle (1960), siendo este último ampliamente utilizado en la actualidad. Sin embargo, en la mayoría de los casos, básicamente la misma información puede ser deducida, ya sea utilizando índices sencillos o complicados (Cox *et al.*, 1980).

Las gráficas que se presentan a continuación (figs. 33-44 ; explicación de la simbología dada en la figura 33) son conocidas generalmente con el nombre de diagramas de Harker (Carmichael *et al.*, 1974; Cox *et al.*, 1980) y emplean el  $\text{SiO}_2$  como índice de fraccionación, el cual, si bien permanece casi sin modificaciones en las primeras etapas de la cristalización del magma (Wright y Fiske, 1971, citados en Cox *et al.*, 1980), pone en evidencia con mayor facilidad los procesos de fraccionación relacionados con la mezcla de magmas (Cox *et al.*, 1980; Demant, 1981). Además de los diagramas de Harker, se presentan para cada bloque del CVM las matrices de correlación (tabla 1) en donde se incluye, aparte de los elementos mayores, la suma de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) y el índice de diferenciación (I.D.) de Thornton y Tuttle (1960).

En la figura 33 se despliegan los diagramas de Harker para el bloque I, en donde se puede apreciar claramente que existen, en general, dos tendencias evolutivas bien marcadas, una de ellas representada por los productos volcánicos de los estrato-volcanes monogenéticos de la región de Ixtlán (asteriscos), y la otra asociada a los conos cineríticos de la región del volcán Sangangüey (diamantes). Estas tendencias son particularmente notables en los diagramas para el  $\text{TiO}_2$ , FeOt (fierro total) y  $\text{MgO}$ , a partir de los cuales se observa un enriquecimiento apreciable de estos elementos en los productos volcánicos del volcán Sangangüey con respecto a los productos emitidos por los estrato-volcanes.

Por otra parte, el proceso de fraccionación que parece dominar en ambas series de evolución es la cristalización fraccional. Sin embargo, en el caso del Volcán Ceboruco se han presentado evidencias de procesos más complejos involucrando mezcla de magmas junto con una posible asimilación de la corteza (Nelson, 1980).

En los diagramas de Harker para el bloque II (fig. 34) se observa que la mayoría de los óxidos presentan muy buenas correlaciones con el sílice (tabla 1). En general, los magmas de este bloque muestran descensos constantes en fierro, magnesio y calcio, y un ascenso muy ligero en sodio conforme el sílice aumenta, aunque a partir de las composiciones dacíticas el sodio presenta una gran dispersión, excepto para los productos volcánicos de la caldera de La Primavera. Por otra parte, en las gráficas para el aluminio y el titanio, se distingue un grupo composicional básico con con-

tenidos menores en estos dos elementos con respecto a los demás productos de la misma composición, el cual corresponde principalmente a la región de Arandas-Atonilco y algunos productos de la región de Guadalajara.

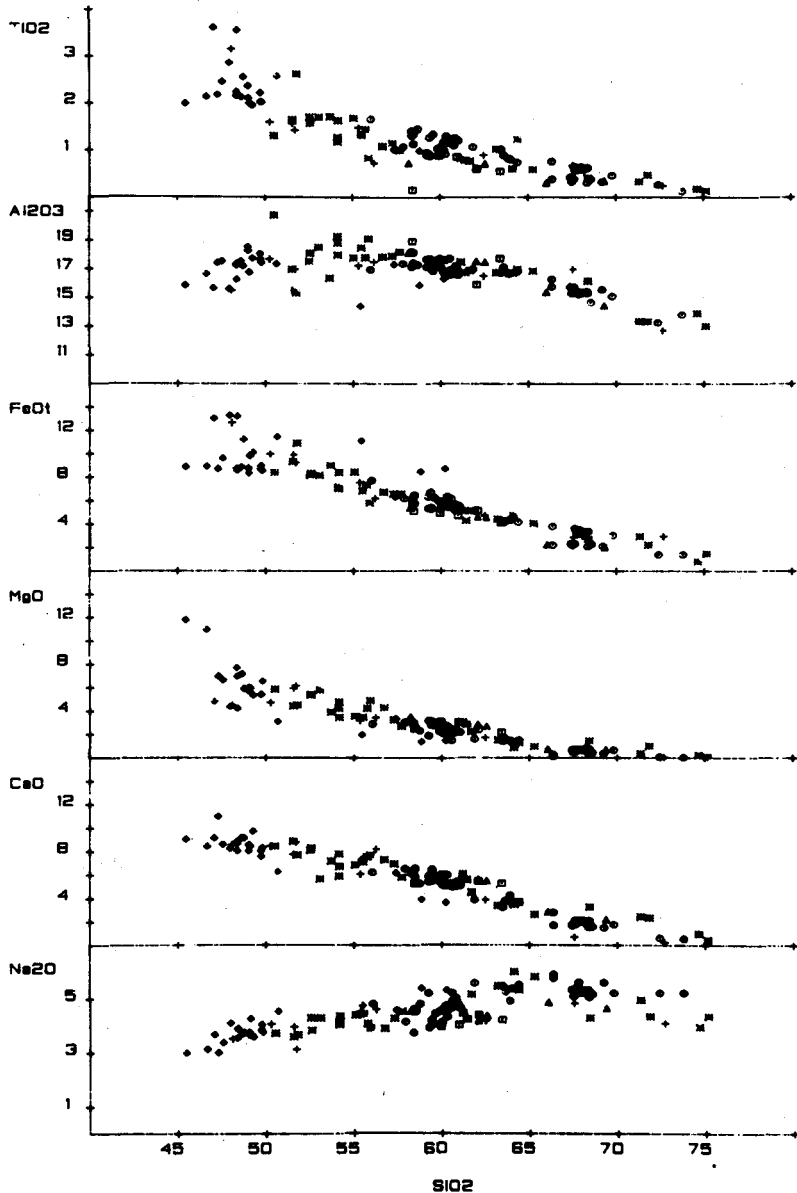


Fig. 33. Diagramas de Harker para algunos de los elementos mayores de las rocas ígneas del bloque I.

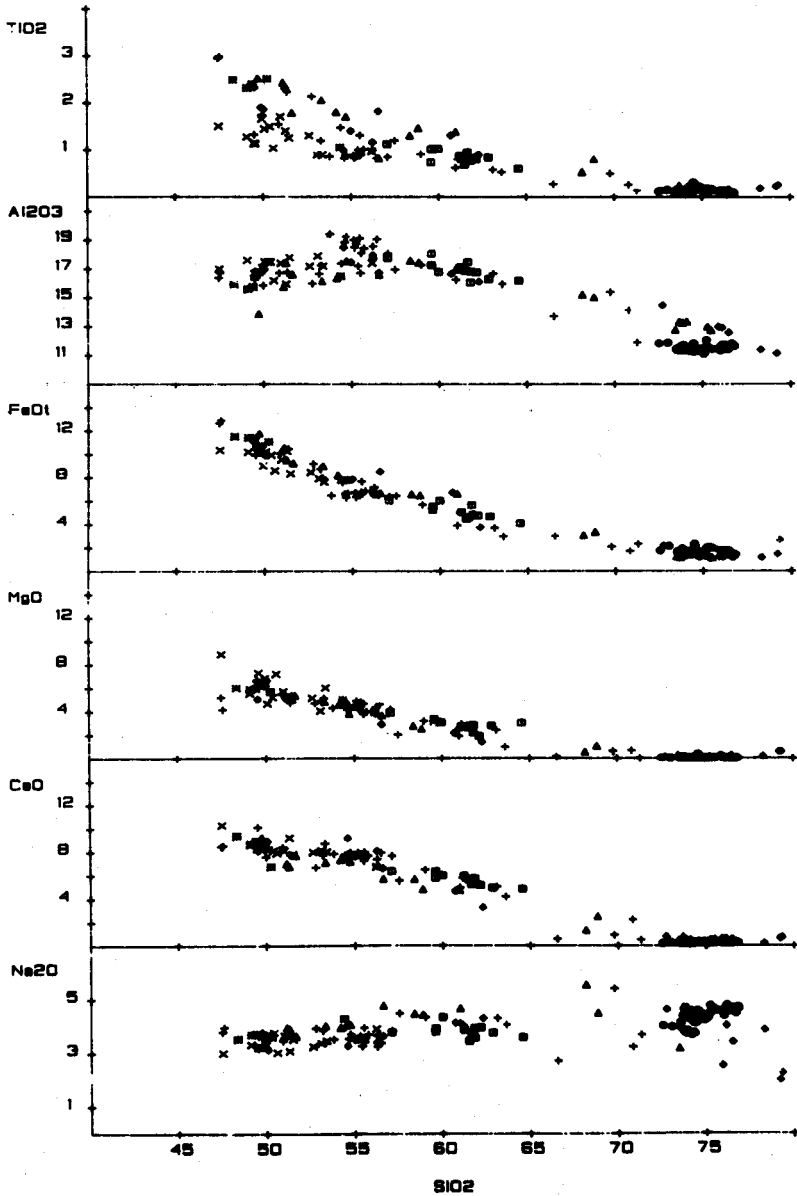


Fig. 34. Diagramas de Harker para algunos de los elementos mayores de las rocas ígneas del bloque II.

En la figura 35 correspondiente al bloque III, se puede apreciar notablemente la coexistencia de dos grupos magmáticos diferentes en esta región, uno perteneciente

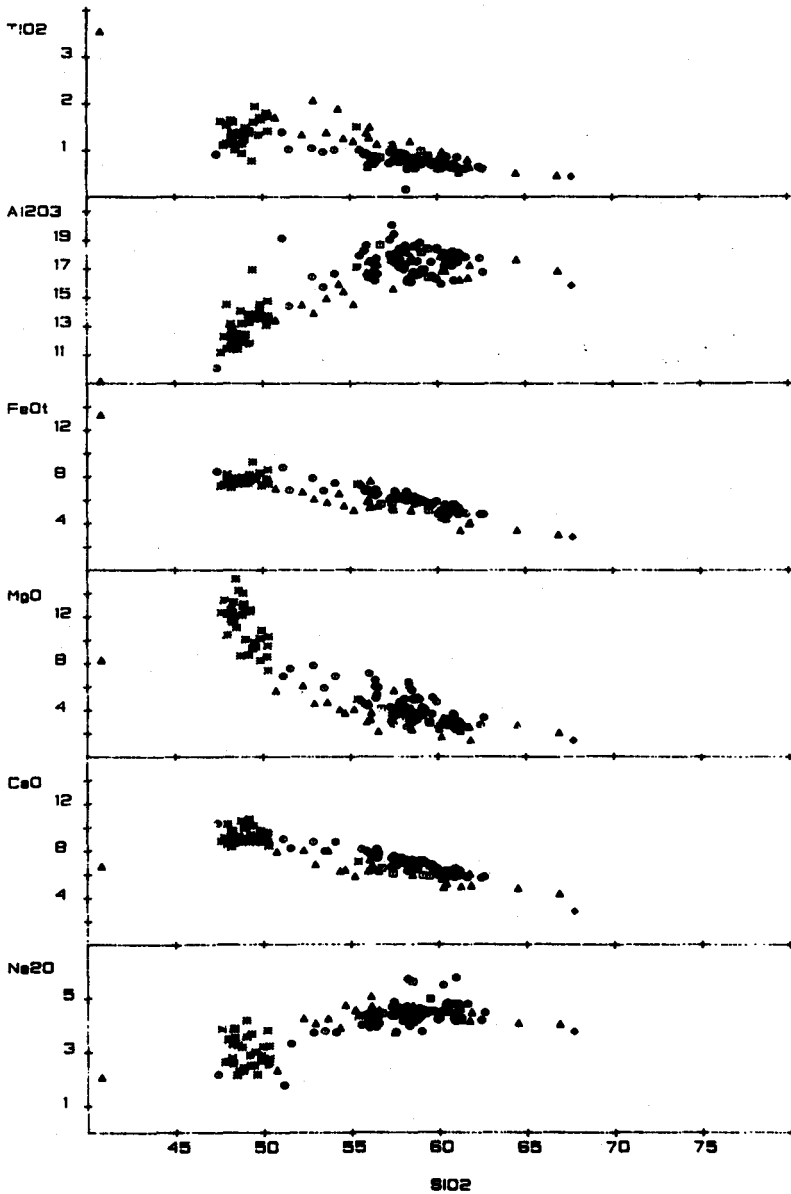


Fig. 35. Diagramas de Harker para algunos de los elementos mayores de las rocas ígneas del bloque III.

a los grandes estrato-volcanes (Volcán de Colima y Nevado de Colima) junto con algunas lavas de las paredes del Graben de Colima, y el otro ligado a los volcanes monogenéticos del interior del Graben y a algunos de los productos volcánicos de las paredes del mismo. Esta diferencia es muy notable en los diagramas que se presentan para el aluminio, magnesio y sodio, existiendo además, una correlación positiva entre el aluminio y el sílice ( $r = 0.81$ , tabla 1), opuestamente a lo que sucede en arcos volcánicos continentales, puesto que generalmente los productos volcánicos básicos en estos ambientes tectónicos presentan fuertes contenidos en aluminio, los cuales decrecen conforme el sílice aumenta. Asimismo, los productos volcánicos de los conos monogenéticos exhiben altos contenidos en magnesio y contenidos bajos en hierro, causando que sus "valores de magnesio" sean bastante altos (mayores de 70, Aguilar-y-Vargas, 1985), lo cual es indicativo de que se trata de magmas primarios que han sufrido escasa fraccionación. De la misma manera, se puede apreciar que algunos de los productos derivados del Volcán de Colima se presentan en medio de las dos agrupaciones antes mencionadas, funcionando como ligaduras de ambos grupos, sugiriendo una mezcla de magmas como un proceso de fraccionación importante para estos productos, lo cual, de hecho, ha sido propuesto por Luhr y Carmichael (1982).

Los diagramas de Harker para el bloque IV se presentan en las figuras 36 y 37. En ellos se observa que, en general, la gran mayoría de los volcanes monogenéticos de Michoacán centro-occidental se agrupan dentro de una misma línea de evolución, opuestamente a lo que se observa en los productos volcánicos de la región de Michoacán nororiental, los cuales muestran una gran dispersión en todos los diagramas. Tampoco las rocas volcánicas de Los Azufres parecen ser el producto de un mismo proceso evolutivo. De esta manera, los productos magmáticos que más se destacan por su coherencia como grupo y por sus características propias son aquellos de la región de Valle de Santiago, los cuales, junto con algunos productos volcánicos de Michoacán centro-occidental, exhiben un marcado enriquecimiento en titanio, hierro y sodio, contenidos moderados en aluminio y muy bajos en magnesio y calcio, en comparación con las demás rocas volcánicas de este bloque. Sin embargo, los basaltos de la región de Valle de Santiago poseen valores de magnesio bastante moderados (Aguilar-y-Vargas, 1985), sugiriendo que ya han sufrido procesos de fraccionación.

En las figuras 38, 40 y 41 se presentan los diagramas de Harker para las regiones de los grandes estrato-volcanes de la parte central del CVM; Nevado de Toluca, Popocatepetl-Iztaccihuatl y La Malinche, respectivamente. En general, estos aparatos volcánicos siguen líneas de evolución similares y bien definidas, suponiéndose que el

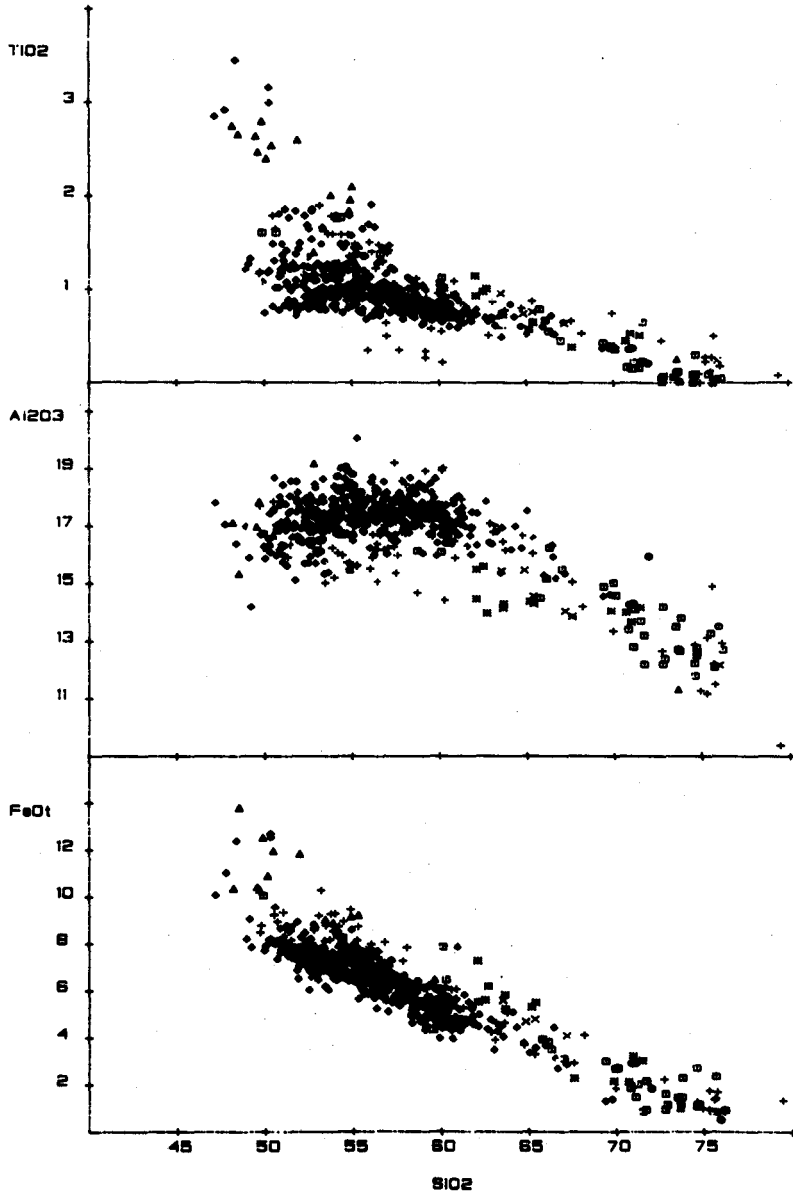


Fig. 36. Diagramas de Harker para algunos de los elementos mayores de las rocas ígneas del bloque IV.

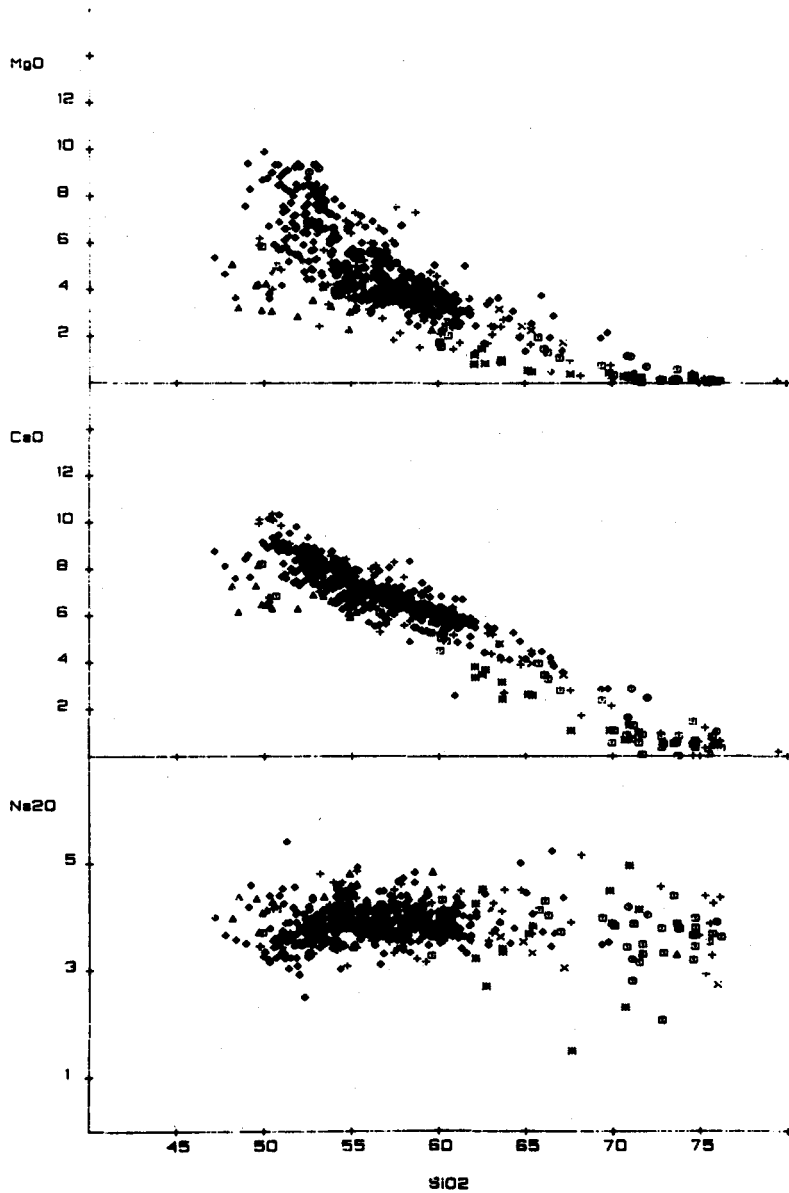


Fig. 37. Diagramas de Harker para algunos de los elementos mayores de las rocas ígneas del bloque IV.



proceso de fraccionación dominante en todos ellos ha sido la cristalización fraccional. Sin embargo, estudios recientes sobre el Volcán Popocatepetl (Boudal y Robin, 1984; Robin y Boudal, 1984) parecen poner en evidencia episodios volcánicos en los que se han efectuado procesos de mezclas magmáticas. Por su parte, Cantagrel

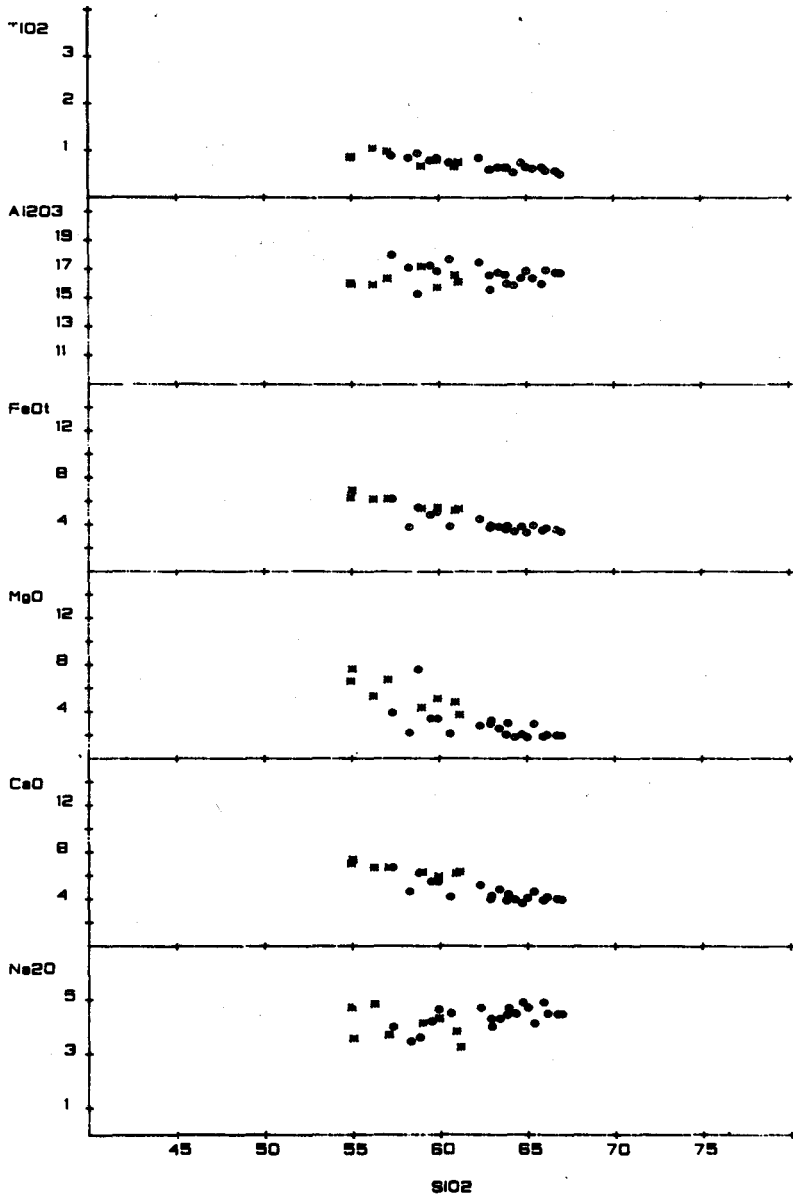


Fig. 38. Diagramas de Harker para algunos de los elementos mayores de las rocas ígneas del bloque V.

*et al.* (1981) exponen las diferencias que existen entre las lavas andesíticas correspondientes a la primera fase de evolución del Nevado de Toluca y sus productos más diferenciados correspondientes a la segunda fase. La primera se caracteriza por con-

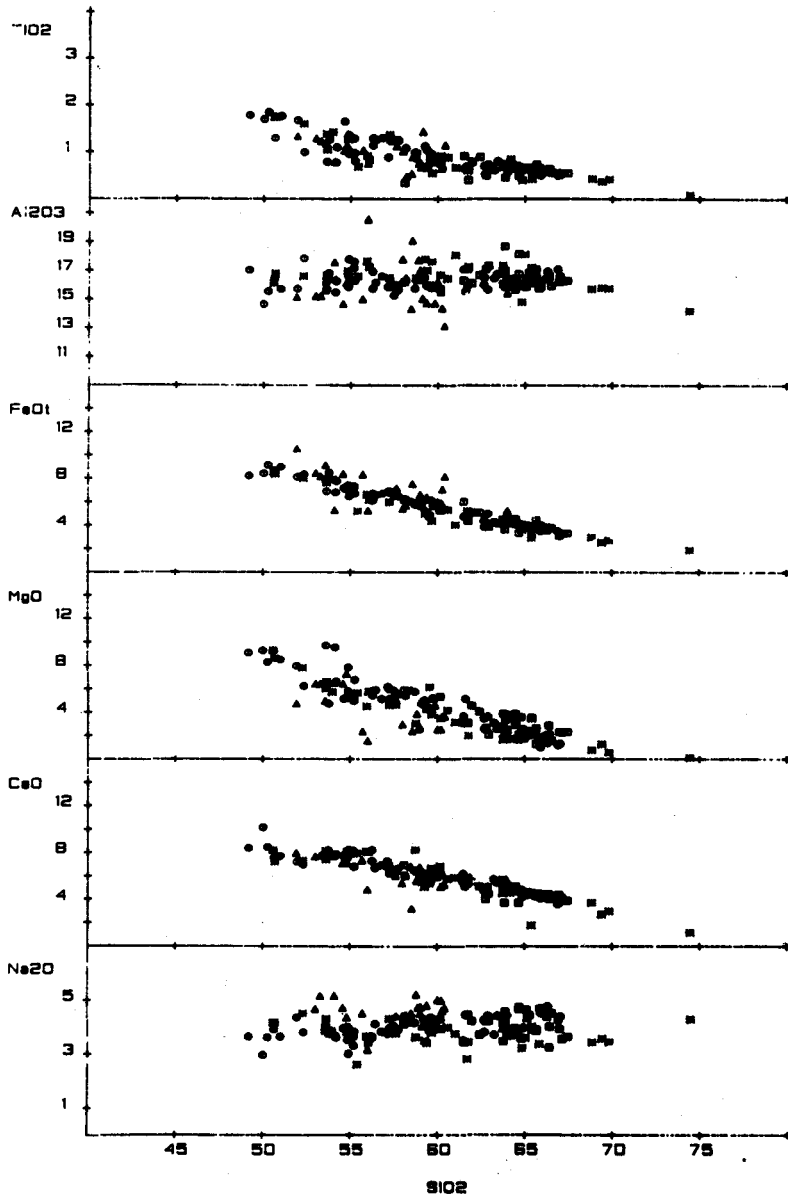


Fig. 39. Diagramas de Harker para algunos de los elementos mayores de las rocas ígneas del bloque VI.

tenidos bastante variables en aluminio, fierro, magnesio, calcio y sodio, en contraste con la línea de evolución más coherente que presenta la segunda (fig. 38).

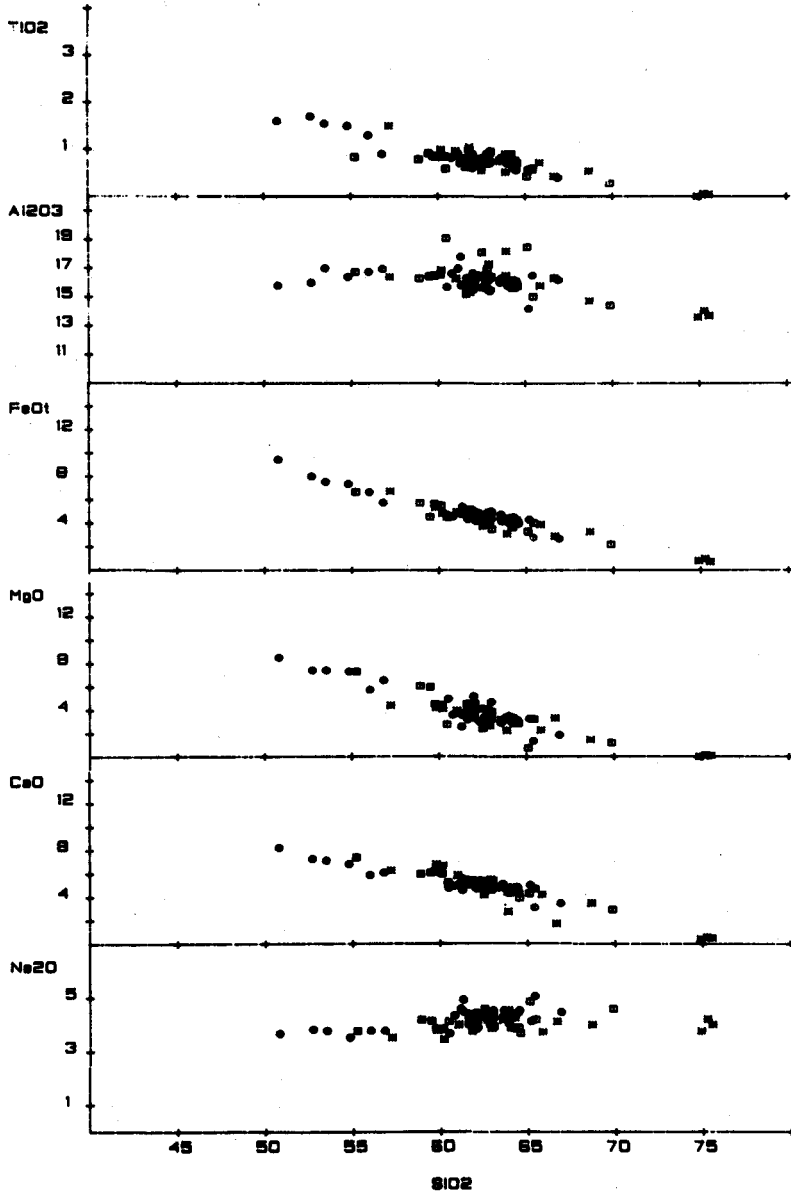


Fig. 40. Diagramas de Harker para algunos de los elementos mayores de las rocas ígneas del bloque VII.

La figura 39 muestra los diagramas de Harker para el bloque VI, en donde, aparentemente, la mayoría de los productos volcánicos han seguido una evolución similar. La dispersión más marcada la presentan los magmas extruidos por los volcanes monogenéticos situados en el flanco suroccidental de la Sierra de las Cruces, los que exhiben, en general, contenidos bastante variables en  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$  y  $\text{MgO}$ , y se muestran más enriquecidos en  $\text{Na}_2\text{O}$  en comparación con el resto de los productos volcánicos de la región. De manera general, los productos volcánicos de este bloque (fig. 39) presentan decrementos suaves y constantes en titanio, hierro, magnesio y calcio, mientras que el aluminio y el sodio permanecen sin variaciones significativas, conforme el sílice aumenta. Un modelo petrogenético basado sobre elementos traza y datos isotópicos para el sur del Valle de México (Sierra Chichinautzin) ha sido presentado recientemente por Verma y Armienta (1985).

Las figuras 42 y 43 despliegan los diagramas de Harker correspondientes al bloque IX, a partir de los cuales se puede apreciar que los productos volcánicos de este bloque presentan líneas diferentes de evolución. Esta diferencia evolutiva se muestra muy acentuada entre los magmas extruidos por los grandes estrato-volcanes Pico de Orizaba y Cofre de Perote, junto con los productos volcánicos de la mayoría de los conos monogenéticos y algunos productos de la Caldera de Los Humeros, con respecto a los magmas extruidos en la región de Jalapa-Chiconquiaco-Palma Sola, exhibiendo, en general, estos últimos, mayores contenidos en  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{FeO}$  y  $\text{Na}_2\text{O}$ , y menores contenidos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{MgO}$ , en comparación con los primeros. Los procesos de fraccionación dominantes en los volcanes Pico de Orizaba y Cofre de Perote son, al parecer, al igual que los otros grandes estrato-volcanes del CVM, la cristalización fraccional en combinación con la mezcla de magmas dentro de una cámara magmática subyacente a los mismos (Demant, 1981; Robin y Cantagrel, 1982).

Los diagramas de Harker para el bloque X (fig. 44) ponen de manifiesto las fuertes variaciones que existen en los contenidos de elementos mayores para los diversos productos volcánicos de esta región para el CVM. De esta manera, los únicos productos que parecen tener una línea evolutiva bien definida son los que corresponden a la región de Tetela.

En general, el rasgo más notable se presenta en las rocas volcánicas de composiciones básicas de este bloque, las cuales muestran un fuerte enriquecimiento en hierro, en comparación con sus similares de los otros bloques. Sin embargo, este alto contenido en hierro (aunque común a ellas) no parece ser el producto de un proceso único de evolución, puesto que hasta los productos volcánicos básicos de una misma región muestran bastante dispersión en el contenido de este elemento.

## E) Diagramas triangulares Magnesio-Fierro(total)-Aluminio

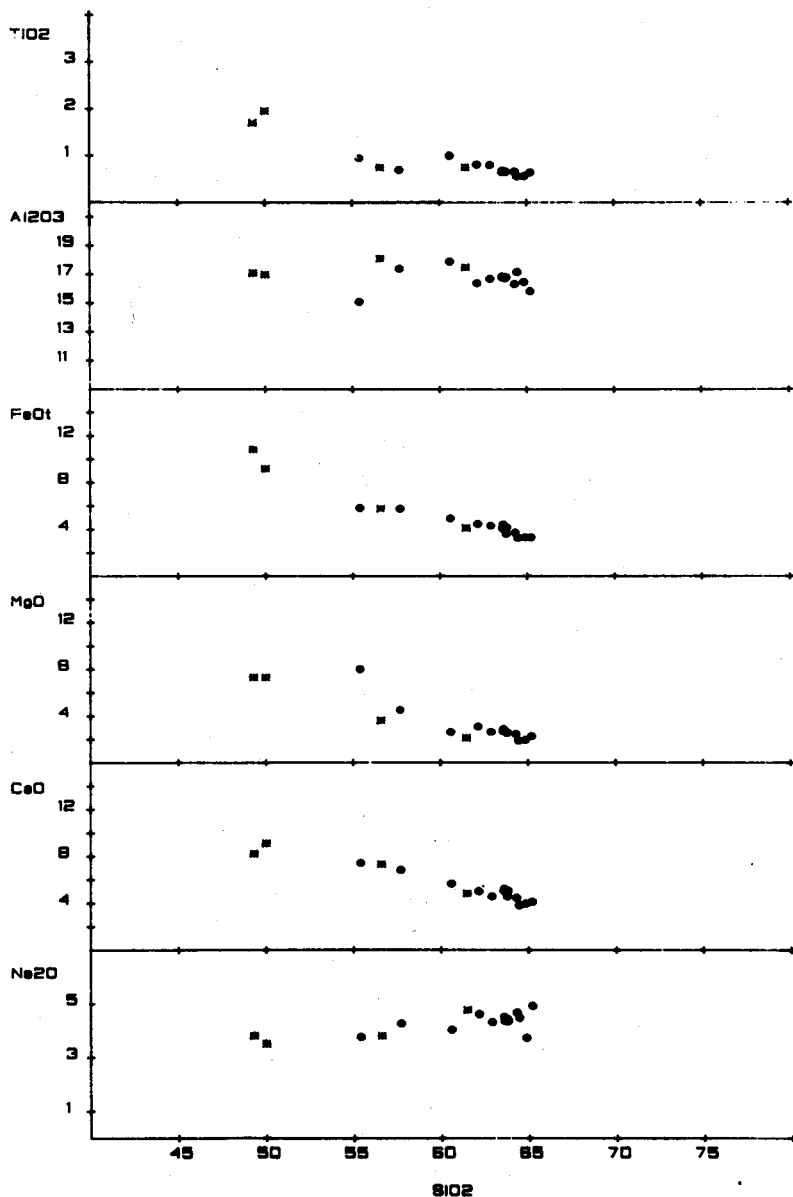
Estudios realizados por Pearce *et al.* (1977) sobre la relación entre los contenidos

Fig. 41. Diagramas de Harker para algunos de los elementos mayores de las rocas ígneas del bloque VIII.

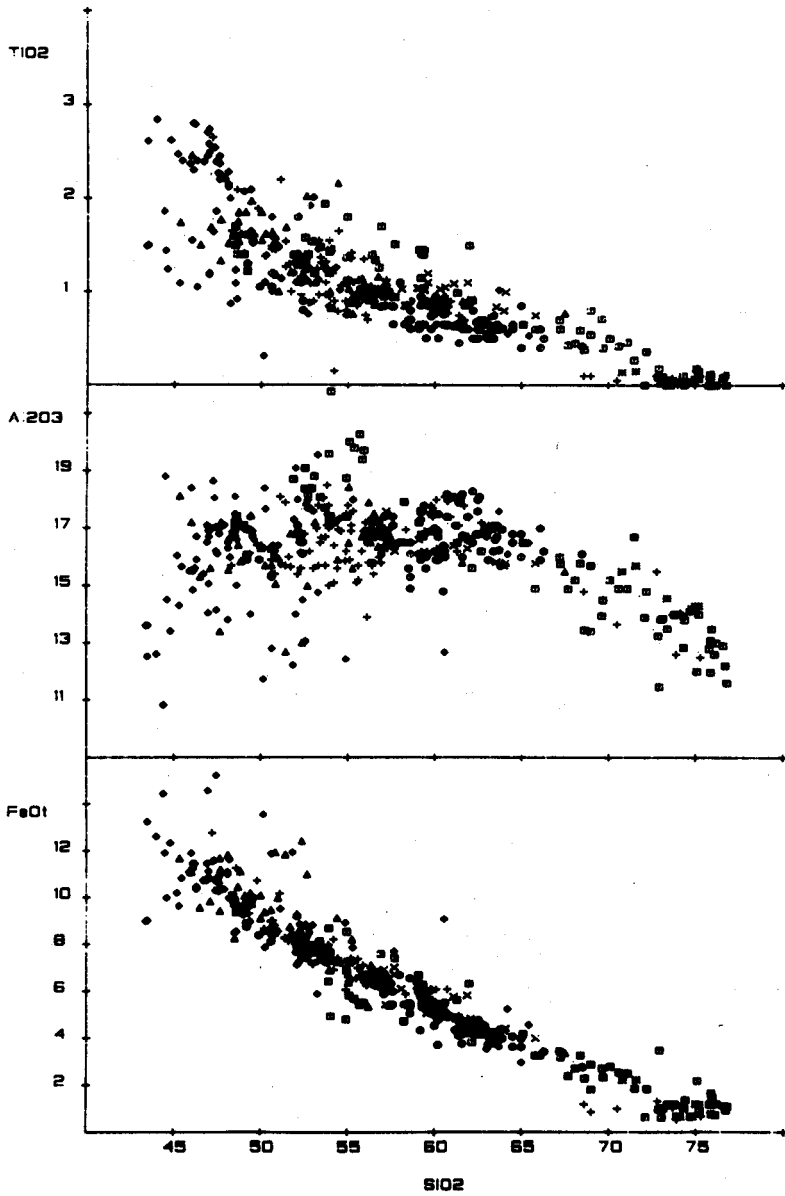


Fig. 42. Diagramas de Harker para algunos de los elementos mayores de las rocas ígneas del bloque IX.

de elementos mayores de las rocas volcánicas y el ambiente tectónico en el que se encuentran, dieron como resultado la proposición de un diagrama ternario compuesto por los óxidos  $MgO-FeO-Al_2O_3$ , en el cual se podían distinguir cinco ambientes

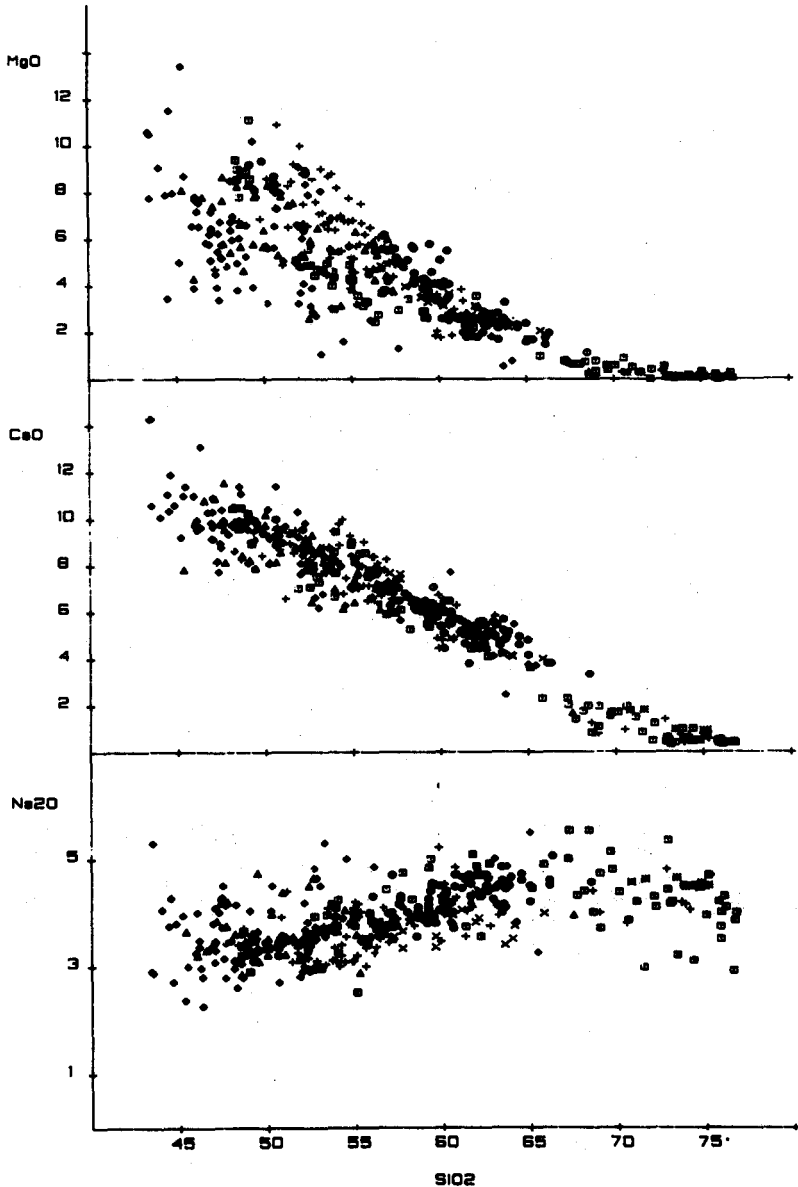


Fig. 43. Diagramas de Harker para algunos de los elementos mayores de las rocas ígneas del bloque IX.

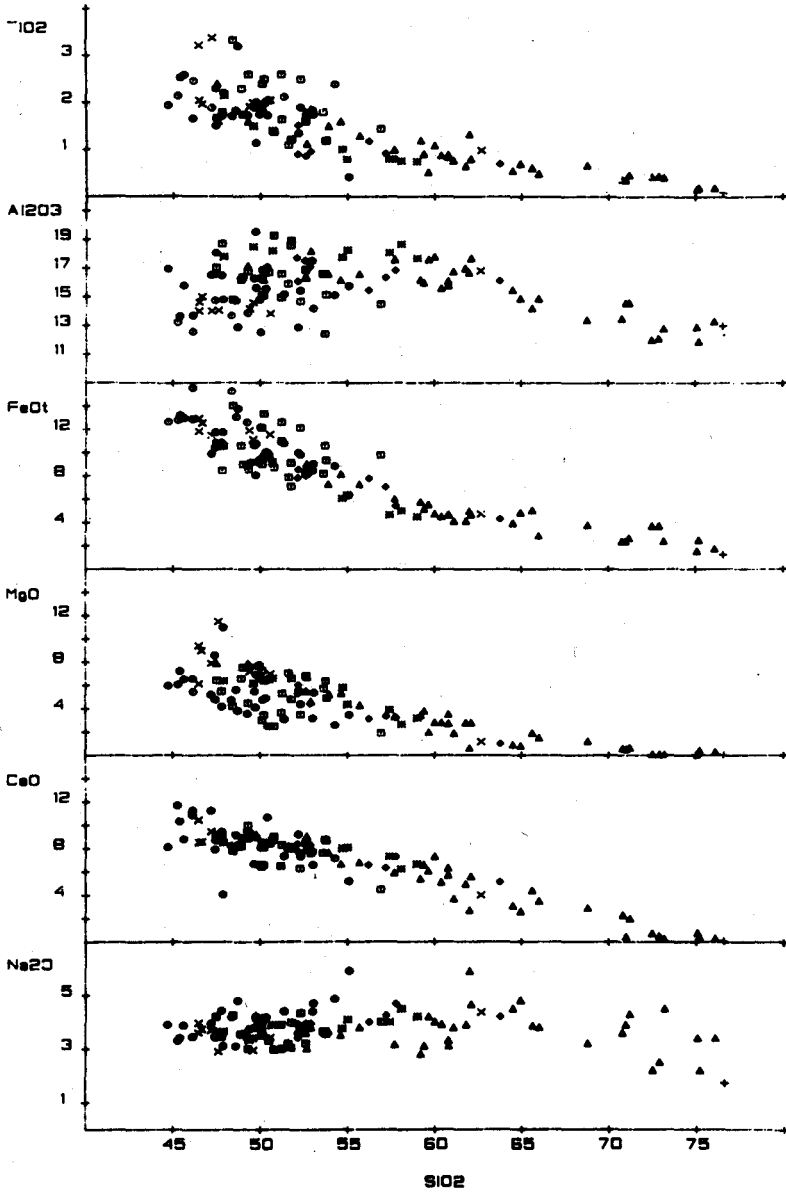
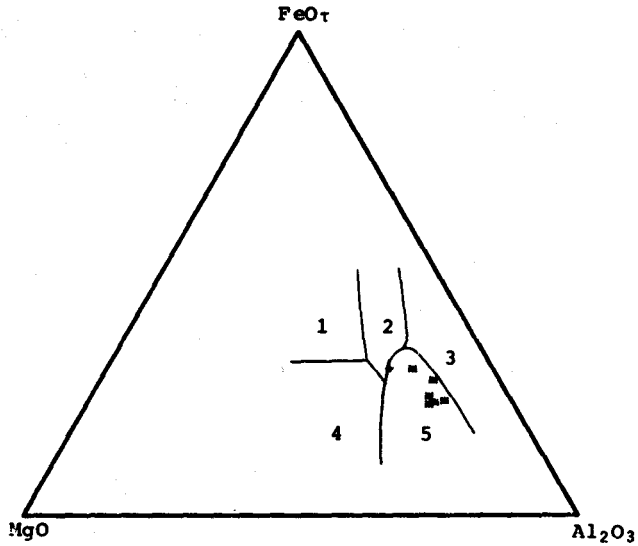


Fig. 44. Diagramas de Harker para algunos de los elementos mayores de las rocas ígneas del bloque X.



tectónicos (islas oceánicas, continental, isla de centro de esparcimiento o expansión, orogénico, y cordillera y piso oceánicos), para las rocas subalcalinas (utilizando el diagrama de álcalis/sílice de MacDonald y Katsura, 1964) con contenidos en sílice del 51 al 56% (recalculados sin agua). Cabe aclarar que las fronteras propuestas (cam-

a)



b)

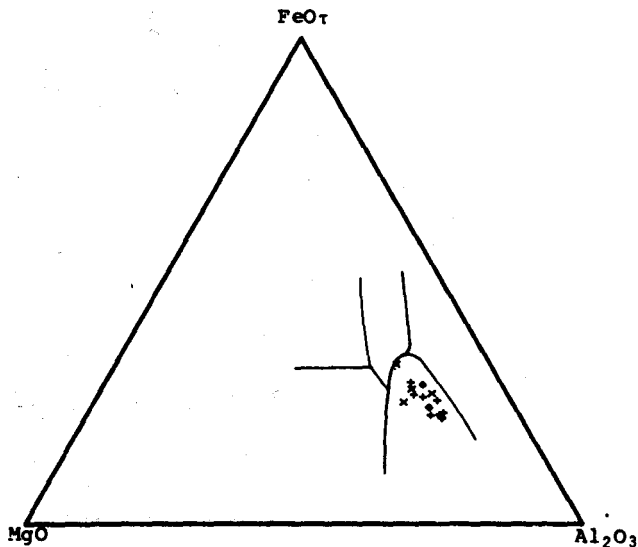
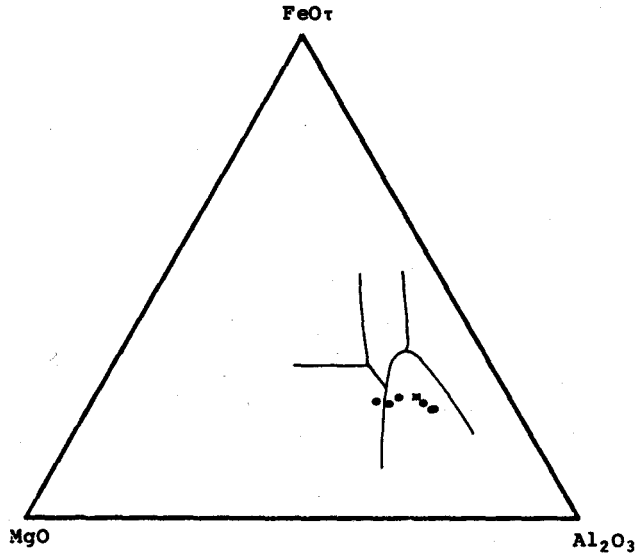


Fig. 45. Diagramas de Pearce *et al.* (1977). a) Bloque I. b) Bloque II, 1 = Isla oceánica, 2 = Continental, 3 = Isla de centro de expansión, 4 = Cordillera y Piso oceánicos, 5 = orogénico.

pos 1 al 5; fig. 45-48) por Pearce *et al.* (1977) son de tipo estadístico, o sea que no *todas* las muestras de un ambiente tectónico caen dentro del campo correspondiente. Las figuras siguientes (figs. 45-48; para simbología, consultar la explicación de la figura 45) presentan tales diagramas para los diferentes bloques del CVM.

a)



b)

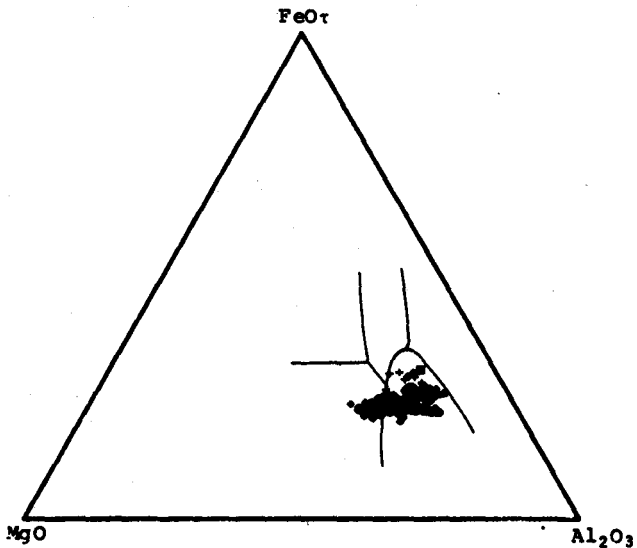
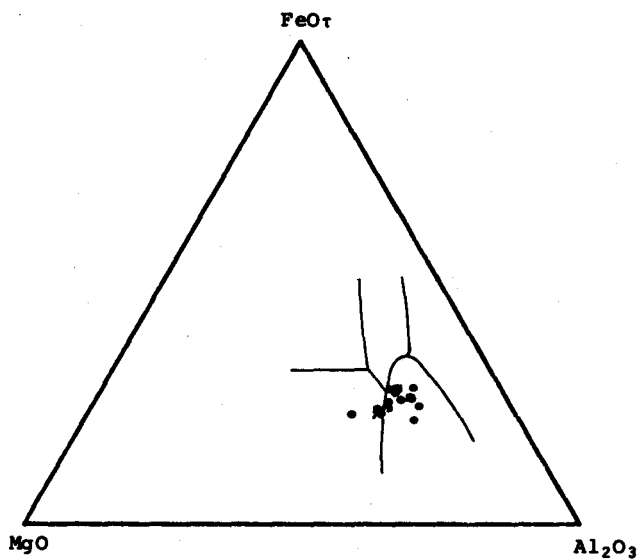


Fig. 46. Diagramas de Pearce *et al.* (1977). a) Bloque III, b) Bloque IV. Las áreas para las rocas volcánicas se describen en la fig. 45.

a)



b)

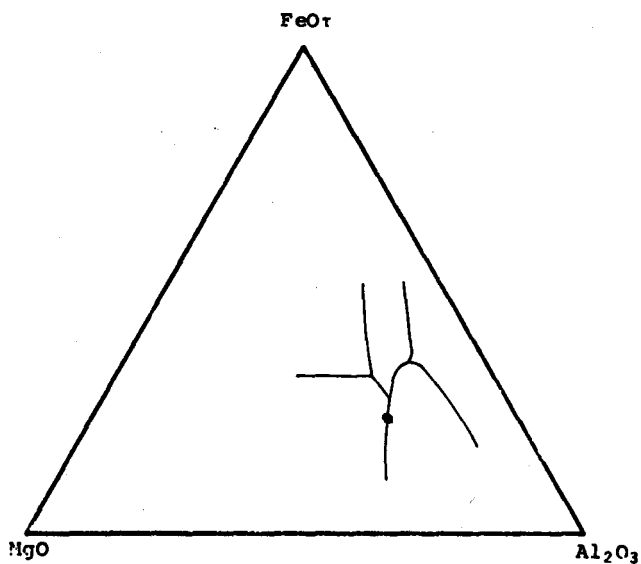
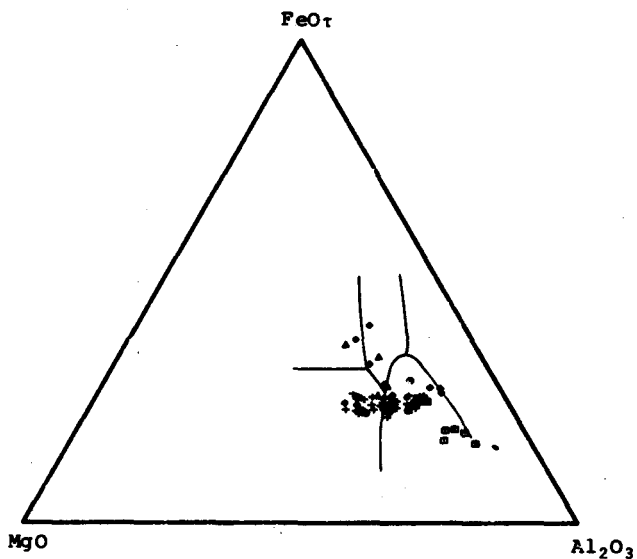


Fig. 47. Diagramas de Pearce *et al.* (1977). a) Bloques V y VI, b) Bloque VII. x = análisis del bloque V. Las áreas para las rocas volcánicas se describen en la fig. 45.

a)



b)

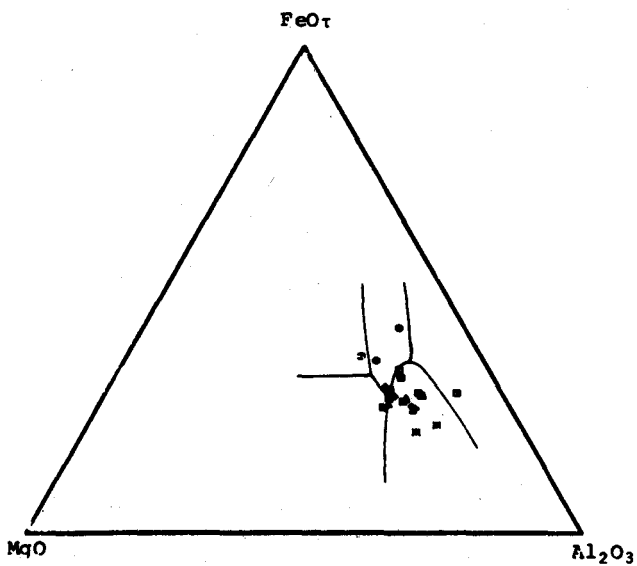


Fig. 48. Diagramas de Pearce *et al.* (1977). a) Bloque IX, b) Bloque X. Las áreas para las rocas volcánicas se describen en la fig. 45.

De una manera general, en todos los bloques se observa que el tipo de rocas volcánicas que utiliza este diagrama tiende a concentrarse en el área asignada para el ambiente orogénico, el cual engloba a las rocas volcánicas extruidas en arcos insulares y en arcos volcánicos de margen continental, ambos relacionados con procesos de subducción. Sin embargo, en los diagramas para los bloques IX y X (fig. 48) se puede apreciar también una tendencia de agrupación dentro del campo señalado como de ambiente continental, el cual incluye las rocas básicas denominadas "traps" y "plateau basalts" (basaltos de planicie), como las de la zona de rompimiento continental africana (rift africano). Esta última agrupación parece corroborarse por las evidencias de campo presentadas por Robin (1976a, 1976b, 1982a) y Robin y Tournon (1978), quienes describieron rocas de este tipo en algunas de las regiones correspondientes a estos dos bloques. Las agrupaciones que se presentan, principalmente, en los bloques IV y VI (figs. 46 y 47, respectivamente), dentro del área asignada para las rocas extruidas en ambientes tectónicos de cordillera oceánica o de piso oceánico (campo 4), están en concordancia con las rocas de ambientes orogénicos (campo 5) utilizadas por Pearce *et al.* (1977), en vista de la naturaleza estadística de las fronteras señalado anteriormente.

El diagrama ternario  $MgO-FeO-Al_2O_3$  correspondiente al bloque VIII no se presenta, debido a la ausencia de análisis geoquímicos sobre el tipo de rocas apropiadas para este diagrama. Asimismo, las rocas volcánicas del bloque V para este diagrama ternario se presentan junto con las del bloque VI (fig. 47), debido a que sólo una roca volcánica (del bloque V) reunió las condiciones anteriormente establecidas para este tipo de diagramas.

### CONCLUSIONES

A partir de la información resumida en este trabajo, se concluye que el magmatismo del CVM no parece ser el producto exclusivo de los procesos de subducción que se efectúan entre la Placa Norteamericana y las placas de Rivera y de Cocos, sino que existen otros mecanismos que contribuyen al vulcanismo en esta provincia geológica, principalmente en los extremos occidental y oriental de la misma (bloques I, II y III, y IX y X, respectivamente) en donde se ha mostrado, a través de los diferentes diagramas de variación, que aparte del vulcanismo de tipo calci-alcálido posiblemente relacionado con los procesos de subducción, coexiste un magmatismo de tipo alcalino raro en arcos volcánicos de margen continental, típico de zonas de rompimiento (rifting) continental.

Asimismo, a diferencia de las demás provincias volcánicas de la Cadena Circumpacífica, en el CVM no es distinguible una variación lateral en sus productos volcánicos, basada sobre un incremento gradual en su contenido de álcalis conforme aumenta la distancia entre el arco magmático y la zona de subducción. Es pertinente mencionar que el análisis de la información geoquímica disponible a lo largo de cuatro transectos perpendiculares de la Trinchera Meso-Americana demuestra ciertas dificultades en aplicar modelos generalizados de subducción (Verma y Aguilar-y-Vargas, 1986).

Por otra parte, los procesos de diferenciación que parecen dominar en los magmas extruidos por los grandes estrato-volcanes son la cristalización fraccional y la mezcla de magmas.

#### AGRADECIMIENTOS

Tenemos el gusto de agradecer a J. F. Allan, T. Hasenaka, J. F. Luhr, S. A. Nelson y C. Robin por habernos proporcionado sus datos inéditos sobre el CVM. Deseamos expresar también nuestro agradecimiento a cuatro árbitros por haber revisado el manuscrito y proporcionado sus valiosos comentarios. Asimismo, se agradece la excelente colaboración del Centro de Cómputo de nuestro Instituto. A. Patiño dibujó las dos primeras figuras presentadas; las demás fueron generadas por computadora. Se agradece a S. Ortega, quien preparó las reducciones de todas las figuras incluidas en el presente trabajo. Esta investigación fue financiada parcialmente por CONACYT mediante un proyecto titulado "La petrogénesis en el Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) y las características de fuentes de calor y cámaras magmáticas en tres campos geotérmicos del CVM".

#### BIBLIOGRAFIA

- AGUILAR-y-VARGAS, V. H., 1985. Composición química de los magmas en el Cinturón Volcánico Mexicano. Tesis Profesional Ing. Geol., I.P.N., 293 p.
- ALLAN, J. F., 1984. Geological studies in the Colima Graben, SW Mexico. Ph. D. thesis, Univ. of Calif., Berkeley, 136 p.
- ALLAN, J. F., 1985. Lamprophyric lavas in the Colima Graben. SW Mexico. *Cont. Mineral Petrol.*, en prensa.
- ARCULUS, R. J. y R. W. JOHNSON, 1978. Criticism of generalized models for the magmatic evolution of arc-trench systems. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 39, 118-126.
- ATWATER, T., 1970. Implications of plate tectonics for the Cenozoic tectonic evolution of western North America. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81, 3513-3536.

- BLOOMFIELD, K., 1973. The age and significance of the Tenango Basalt, central Mexico. *Bull. Volcanol.*, 37, 586-595.
- BLOOMFIELD, K., 1975. A Late-Quaternary monogenetic volcano field in central Mexico. *Geol. Rundschau*, 64, 476-497.
- BOUDAL, C. y C. ROBIN. Etat de connaissances sur le volcan Popocatepetl - Evaluation des risques. *Bull. PIRPSEV*, 98, 77 p.
- CANTAGREL, J. M. y C. ROBIN, 1978. Géochimie isotopique du strontium dans quelques séries types du volcanisme de l'est mexicain. *Bull. Soc. Geol. France*, 20, 935-939.
- CANTAGREL, J. M., C. ROBIN y P. VINCENT, 1981. Les grandes étapes d'évolution d'un volcan andésitique composite: Exemple du Nevado de Toluca (Mexique). *Bull. Volcanol.*, 44, 177-188.
- CANTAGREL, J. M., A. GOURGAUD y C. ROBIN, 1985. Repetitive mixing events and Holocene pyroclastic activity at Pico de Orizaba and Popocatepetl (Mexico). *Bull. Volcanol.*, en prensa.
- CARMICHAEL, I. S. E., F. J. TURNER y J. VERHOOGEN, 1974. Igneous Petrology. McGraw-Hill Inc., 739 p.
- CATHELINEAU, M., R. OLIVER y D. NIEVA, 1987. Geochemistry of volcanic series in the Los Azufres geothermal field (Mexico). *Geofís. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 3B (Ed. S. P. Verma), 26, este número.
- CAWTHORN, R. G. y M. J. O'HARA, 1976. Amphibole fractionation in calc-alkaline magma genesis. *Am. J. Sci.*, 276, 309-329.
- CEBULL, S. E. y D. H. SHURBET, 1986. Mexican Volcanic Belt: An intraplate transform? *Geofís. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 3A (Ed. S. P. Verma), 26, en prensa.
- CHEN, C., 1978. Petrochemistry and origin of Pleistocene volcanic rocks from Northern Taiwan. *Bull. Volcanol.*, 41, 513-528.
- COMBREDET, N., 1983. Etude du puits A1 du champ géothermique de Los Azufres - Michoacán - Mexique. Ph. D. thesis, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, 181 p.
- COX, K. G., J. D. BELL y R. J. PANKHURST, 1980. The interpretation of igneous rocks, George Allen & Unwin Ltd., 450 p.
- DEMANT, A., 1978. Características del eje neovolcánico transmexicano y sus problemas de interpretación. *UNAM, Inst. Geol. Revista*, 2, 172-187.
- DEMANT, A., 1979. Vulcanología y petrografía del sector occidental del Eje Neovolcánico. *UNAM, Inst. Geol. Revista*, 3, 39-57.
- DEMANT, A., 1981. L'axe néo-volcanique transmexicain - étude volcanologique et pétrographique - signification géodynamique. Ph. D. thesis, 259 p. y apéndice, 106 p., Univ. de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille.

- DEMANT, A. y C. ROBIN, 1975. Las fases del vulcanismo en México: Una síntesis en relación con la evolución geodinámica desde el Cretácico. *UNAM, Inst. Geol. Revista*, 75, 813-860.
- DOBSON, P. F., 1984. Volcanic stratigraphy and geochemistry of the Los Azufres geothermal center, Mexico. M. S. thesis, 58 p., Stanford Univ., Stanford.
- ERFFA, A. VON, W. HILGER, K. KNOBLICH y R. WEYL, 1977. Geología de la cuenca alta de Puebla y Tlaxcala y sus contornos. El proyecto México de la Fundación Alemana para la investigación científica, XI, F. Steiner Verlag, 130 p.
- FERRIZ, H., 1985. Zoneamiento composicional y mineralógico en los productos eruptivos del centro volcánico de Los Humeros, Puebla, México. *Geofis. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 1 (Ed. S. P. Verma), 24, 21-40.
- FERRIZ, H. y G. A. MAHOOD, 1984. Eruption rates and compositional trends at Los Humeros volcanic center, Puebla, Mexico. *J. Geophys. Res.*, 89, 8511-8524.
- FOSHAG, W. P. y R. J. GONZALEZ, 1956. Birth and development of Paricutin volcano, Mexico. *U. S. Geol. Surv. Bull.*, 965-D, 355-487.
- FRIES, Jr., C., C. S. ROSS y A. OBREGON P., 1965. Mezcla de vidrios en los derrames cineríticos Las Américas de la región de El Oro-Tlalpujahua, estados de México y Michoacán, parte centro-meridional de México. *UNAM, Inst. Geol. Bol.*, 70, 85 p.
- GASTIL, R. G. y W. JENSKY, 1973. Evidence for strike-slip displacement beneath the trans-Mexican volcanic belt. Stanford Univ. Publ. *Geol. Sci.*, 13, 171-180.
- GASTIL, R. G., D. KRUMMENACHER y J. MINCH, 1979. The record of Cenozoic volcanism around the Gulf of California. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 90, 839-857.
- GEYNE, R. A., C. FRIES, K. SEGERSTROM, R. F. BLACK, I. F. WILSON y A. PROBERT, 1963. Geología y yacimientos minerales del Distrito de Pachuca-Real del Monte, Estado de Hidalgo, México. Cons. Rec. Nat. No Renov., Publ. 5E, 220 p.
- GILBERT, C. M., G. A. MAHOOD y I. S. E. CARMICHAEL, 1985. Volcanic stratigraphy of the Guadalajara area, Mexico. *Geofis. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 1 (Ed. S. P. Verma), 24, 169-191.
- GILL, J. B., 1981. Orogenic andesites and plate tectonics. Springer-Verlag, 390 p.
- GUNN, B. M. y F. MOOSER, 1971. Geochemistry of the volcanics of central Mexico. *Bull. Volcanol.*, 34, 577-616.
- HANUS, V. y J. VANĚK, 1978. Subduction of the Cocos plate and deep active fracture zones of Mexico. *Geofis. Int.*, 17, 14-53.
- HASENAKA, T. y I. S. E. CARMICHAEL, 1985. The cinder cone of Michoacán-Guanajuato, central Mexico: Their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 25, 105-124.
- HUTCHINSON, C. S., 1974. Laboratory Handbook of Petrographic Techniques. John Wiley & Sons, 527 p.



- IRVINE, T. N. y W. R. BARAGAR, 1971. A guide to the chemical classification of the common igneous rocks. *Can. J. Earth Sci.*, 8, 523-548.
- KELSEY, C. H., 1965. Calculation of the C.I.P.W. norm. *Mineral Mag.*, 34, 276-282.
- KUDO, A. M., M. E. JACKSON y J. W. HUSLER, 1985. Phase chemistry of Recent andesite, dacite, and rhyodacite of volcán Pico de Orizaba, Mexican Volcanic Belt: Evidence for xenolithic contamination. *Geofis. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 2 (Ed. S. P. Verma), 24, 679-689.
- KUNO, H., 1959. Origin of Cenozoic petrographic provinces of Japan and surrounding areas. *Bull. Volcanol.*, 20, 37-76.
- KUNO, H., 1966. Lateral variation of basaltic magma type across continental margins and island arcs. *Bull. Volcanol.*, 29, 195-222.
- KUNO, H., 1968. Differentiation of basalt magmas. *En:* (Ed. H. H. Hess and A. Poldervaart), *Basalts*, 2, 623-688, Interscience, N. Y.
- LOMNITZ, C., 1982. Direct evidence of a subducted plate under Southern Mexico. *Nature*, 296, 235-238.
- LOPEZ-RAMOS, E., 1983. Geología de México. Edición Escolar, Tomo III, 3<sup>ra</sup> ed., 453 p.
- LOPEZ-RAMOS, E. y S. H. SANCHEZ-MEJORADA, 1976. Carta Geológica de la República Mexicana. Comité Carta Geol. México, Scale 1:2 000 000.
- LUGO H., J., M. A. ORTIZ P., J. L. PALACIO P., G. BOCCO V., 1985. Las zonas más activas en el Cinturón Volcánico Mexicano (entre Michoacán y Tlaxcala). *Geofis. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 2 (Ed. S. P. Verma), 24, 83-96.
- LUHR, J. F. e I. S. E. CARMICHAEL, 1980. The Colima volcanic complex, Mexico I. Post-caldera andesites from volcán Colima. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 71, 343-372.
- LUHR, J. F. e I. S. E. CARMICHAEL, 1981. The Colima volcanic complex, Mexico: II. Late-Quaternary cinder cones. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 76, 127-147.
- LUHR, J. F. e I. S. E. CARMICHAEL, 1982. The Colima volcanic complex, Mexico: III. Ash- and scoria-fall deposits from the upper slopes of volcán Colima. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 80, 262-275.
- LUHR, J. F. e I. S. E. CARMICHAEL, 1985a. The 1759-1774 eruption of Jorullo volcano, Michoacán, Mexico: The earliest stages of fractionation in calc-alkaline magmas. *Contrib. Mineral. Petrol.*, en prensa.
- LUHR, J. F. e I. S. E. CARMICHAEL, 1985b. Contemporaneous eruptions of calc-alkaline and alkaline magmas along the volcanic front of the Mexican Volcanic Belt. *Geofis. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 1 (Ed. S. P. Verma), 24, 203-216.

- LUHR, J. F. y P. LAZAAR, 1985. The southern Guadalajara volcanic chain, Jalisco, Mexico. *Geofís. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 2 (Ed. S. P. Verma), 24, 691-700.
- LUHR, J. F., S. A. NELSON, J. F. ALLAN, e I. S. E. CARMICHAEL, 1985. Active rifting in southwestern Mexico: Manifestations of an incipient eastward spreading-ridge jump. *Geology*, 13, 54-57.
- MacDONALD, R., 1974. Tectonic settings and magma associations. *Bull. Volcanol.*, 38, 575-593.
- MacDONALD, G. A. y T. KATSURA, 1964. Chemical composition of hawaiian lavas. *J. Petrol.*, 5, 82-133.
- MAHOOD, G. A., 1977. A preliminary report on the comenditic dome and ash flow complex of Sierra La Primavera, Jalisco. *UNAM, Inst. Geol. Revista*, 1, 177-190.
- MAHOOD, G. A., 1980. Geological evolution of a Pleistocene rhyolitic center - Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 8, 199-230.
- MAHOOD, G. A., 1981. Chemical evolution of a Pleistocene rhyolitic center -Sierra La Primavera, Jalisco, Mexico. *Contrib. Mineral Petrol.*, 77, 129-149.
- MARTIN DEL POZZO, A. L., 1982. Monogenetic vulcanism in Sierra Chichinautzin, Mexico. *Bull. Volcanol.*, 45, 9-24.
- MAUPOME, L., R. ALVAREZ, S. W. KIEFFER y R. S. DIETZ, 1975. On the terrestrial origin of the Tepexitl crater, Mexico. *Meteoritics*, 10, 209-214.
- MENARD, H. W., 1955. Deformation of the northeastern Pacific basin and the west coast of North America. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 86, 99-110.
- MOLNAR, P. y L. R. SYKES, 1969. Tectonics of the Caribbean and Middle American region from focal mechanisms and seismicity. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 80, 1639-1684.
- MOOSER, F., 1969. The Mexican volcanic belt - Structure and development. Formation of fractures by differential crustal heating. Pan-Am. Symp. Upper Mantle, Mexico, 2, 15-22.
- MOOSER, F., 1972. The Mexican Volcanic Belt: Structure and tectonics. *Geofís. Int.*, 12, 55-70.
- MOOSER, F. y M. MALDONADO-KOERDELL, 1961. Penecontemporaneous tectonics along the Mexican Pacific coast. *Geofís. Int.*, 1, 1-20.
- NEGENDANK, J. F. W., 1972. Volcanics of the Valley of Mexico, Part I: Petrography of the volcanics. *N. Jb. Miner. Abh.*, 116, 308-320.
- NEGENDANK, J. F. W., 1973. Geochemical aspects of volcanic rocks of the Valley of Mexico. *Geofís. Int.*, 13, 267-278.
- NEGENDANK, J. F. W., R. EMMERMAN, F. MOOSER, F. SEIFERT-KRAUS y H. J. TOBSCHALL, 1981. Evolution of some Tertiary and Quaternary central vol-

- canoes of the Trans-Mexican Volcanic Belt and possible different positions of the Benioff Zone. *Zbl. Geol. Palaont.*, 3/4, 183-194.
- NEGENDANK, J. F. W., R. EMMERMAN, R. KRAWCZYK, F. MOOSER, H. TOBSCHALL y D. WERLE, 1985. Geological and geochemical investigations of the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofís. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 2 (Ed. S. P. Verma), 24, 477-575.
- NELSON, S. A., 1980. Geology and petrology of volcán Ceboruco, Nayarit, Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, Part II, 91, 2290-2431.
- NELSON, S. A., 1984. Geología del volcán Ceboruco, Nayarit, México, con una estimación de riesgos de erupciones futuras. *UNAM, Inst. Geol., Revista*, sometido.
- NELSON, S. A. e I. S. E. CARMICHAEL, 1984. Pleistocene to Recent alkalic volcanism in the region of Sangangüey volcano, Nayarit, Mexico. *Contrib. Mineral Petrol.*, 85, 321-335.
- NIETO-OBREGON, J., L. A. DELGADO-ARGOTE y P. E. DAMON, 1985. Geochronologic, petrologic and structural data related to large morphologic features between the Sierra Madre Occidental and the Mexican Volcanic Belt. *Geofís. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 2 (Ed. S. P. Verma), 24, 623-663.
- NIXON, G. T., 1982. The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and the structure of subducted ocean lithosphere. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 93, 514-523.
- NIXON, G. T., A. DEMANT, R. L. ARMSTRONG y J. E. HARAKAL, 1987. K-Ar and geologic data bearing on the age and evolution of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofís. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 3A (Ed. S. P. Verma), 26, en prensa.
- PAL, S. y J. URRUTIA-FUCUGAUCHI, 1977. Paleomagnetism, geochronology and geochemistry of some igneous rocks from Mexico and their tectonic implications. Proc. IV Int. Gondwana Symp., Calcutta, Part II, 814-831.
- PAL, S., M. LOPEZ M., J. PEREZ R. y D. J. TERRELL, 1978. Magma characterization in the Mexican volcanic belt (Mexico). *Bull. Volcanol.*, 41, 379-389.
- PEARCE, T. H., B. E. GORMAN y T. C. BIRKETT, 1977 The relationship between major element chemistry and tectonic environment of basic and intermediate volcanic rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 36, 121-132.
- PECCERILLO, A. and S. R. TAYLOR, 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58, 63-81.
- PEREZ R., J., S. PAL, D. J. TERRELL, J. URRUTIA-F. y M. LOPEZ M., 1979. Preliminary report on analysis of some "in house" geochemical reference samples from Mexico. *Geofís. Int.*, 18, 197-209.
- PICHLER, H. y R. WEYL, 1976. Quaternary alkaline volcanic rocks in eastern Mex-

- ico and Central America. *Münster. Forsch. Geol. Paläont.*, 38/39, 159-178.
- POLDERVAART, A. y A. B. PARKER, 1964. The crystallization index as a parameter of igneous differentiation in binary variation diagrams. *Am. J. Sci.*, 262, 281-289.
- ROBIN, C., 1976a. Las series volcánicas de la Sierra Madre Oriental (basaltos e ignimbritas), descripción y caracteres químicos. *UNAM, Inst. Geol. Revista*, 2, 13-42.
- ROBIN, C., 1976b. Présence simultanée de magmatismes de significations tectoniques opposées dans l'est du Mexique. *Bull. Soc. Geol. France*, 18, 1637-1645.
- ROBIN, C., 1982a. Relations volcanologie-magmatologie-géodynamique: Application au passage entre volcanismes alcalin et andésitique dans le sud Mexicain (Axe Trans-mexicain et Province Alcaline Orientale). *Annal. Sci. l'Univ. Clermont-Ferrand II*, 30, 503 p.
- ROBIN, C., 1982b. Mexico. *En* (Ed. R. S. Thorpe) *Andesites*, 137-147, John Wiley.
- ROBIN, C., 1984. Le Volcan de Colima en tant que "volcan laboratoire". *En: Prévision et surveillance des éruptions volcaniques, Coloquio de la PIRPSEV*, 95-100.
- ROBIN, C., 1986. A model for the origin and development of the Trans-Mexican Neo-Volcanic Belt. *Geofis. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 3B (Ed. S. P. Verma), 26,
- ROBIN, C. y C. BOUDAL, 1984. Une éruption remarquable par son volume: l'événement de type Saint-Hélène du Popocatepetl (Mexique). *C. R. Acad. Sc. Paris*, 299, 881-886.
- ROBIN, C. y J. M. CANTAGREL, 1982. Le Pico de Orizaba (Mexique): Structure et évolution d'un grand volcan andésitique complexe. *Bull. Volcanol.*, 45, 299-315.
- ROBIN, C. y E. NICOLAS, 1978. Particularités géochimiques des suites andésitiques de la zone orientale de l'axe transmexicain, dans leur contexte tectonique. *Bull. Soc. Géol. France*, 20, 193-202.
- ROBIN, C. y J. TOURNON, 1978. Spatial relations of andesitic and alkaline provinces in Mexico and Central America. *Can. J. Earth Sci.* 15, 1633-1641.
- ROBIN, C., J. M. CANTAGREL y P. VINCENT, 1983. Les nuées ardentes de type Saint-Vincent, épisodes remarquables de l'évolution récente du Pico de Orizaba (Mexique). *Bull. Soc. Géol. France*, 25, 727-736.
- SCHWARZER, R. R. y J. J. W. ROGERS, 1974. A worldwide comparison of alkali olivine basalts and their differentiation trends. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 23, 286-296.
- SHURBET, D. H. y S. E. CEBULL, 1984. Tectonic interpretation of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*, 101, 159-165.
- SILVA-MORA, L., 1979. Contribution à la connaissance de l'Axe volcanique Trans-mexicain: Etude géologique et pétrologie des laves du Michoacán oriental. Univ. de Droit, d'Econ. et des Sci. d'Aix-Marseille III. 146 p., appendix 88 p.
- STEWART, D. C., J. FRIZADO y L. E. CUMMINS, 1963. Error recognition in published chemical analyses of igneous rocks. *Computers and Geosci.*, 9, 527-535.

- THORNTON, C. P. y O. F. TUTTLE, 1960. Chemistry of igneous rocks, I. Differentiation index. *Am. J. Sci.*, 258, 664-684.
- THORPE, R. S., 1977. Tectonic significance of alkaline volcanism in eastern Mexico. *Tectonophysics*, 40, 19-26.
- THORPE, R. S. y P. W. FRANCIS, 1976. Volcan Ceboruco: A major composite volcano of the Mexican Volcanic-Belt. *Bull. Volcanol.*, 39, 201-213.
- URRUTIA, F., J. H. y G. L. DEL CASTILLO, 1977. Un modelo del Eje Volcánico Mexicano. *Bol. Soc. Geol. Mexicana*, 38, 18-28.
- VENEGAS, S., S., J. HERRERA F. y R. MACIEL F., 1985. Algunas características de la Faja Volcánica Mexicana y de sus recursos geotérmicos. *Geofís. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 1 (Ed. S. P. Verma), 24, 97-157.
- VERMA, M. P., V. H. AGUILAR-y-VARGAS y S. P. VERMA, 1986. A program-package for major-element handling and CIPW norm calculation. *Computers and Geosci.*, en prensa.
- VERMA, S. P., 1983. Magma genesis and chamber processes at Los Humeros caldera, Mexico - Nd and Sr isotope data. *Nature*, 301, 52-55.
- VERMA, S. P., 1984. Alkali and alkaline earth element geochemistry of Los Humeros caldera, Puebla, Mexico. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 20, 21-40.
- VERMA, S. P., 1985a. Mexican Volcanic Belt (Preface). *Geofís. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 1 (Ed. S. P. Verma), 24, 7-19.
- VERMA, S. P., 1985b. On the magma chamber characteristics as inferred from surface geology and geochemistry: Examples from Mexican geothermal areas. *Phys. Earth Planet. Int.*, 41, 207-214.
- VERMA, S. P. y V. H. AGUILAR-y-VARGAS, 1986. Bulk chemical composition of magmas in the Mexican Volcanic Belt (Mexico) and inapplicability of generalized arc-models. *Chem. Geol.*, sometido.
- VERMA, S. P. y M. A. ARMIENTA H., 1985.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , alkali and alkaline earth element geochemistry of Chichinautzin Sierra, Mexico. *Geofís. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 2 (Ed. S. P. Verma), 24, 665-678.
- VERMA, S. P. y M. LOPEZ M., 1982. Geochemistry of Los Humeros caldera, Puebla, Mexico. *Bull. Volcanol.*, 45, 63-79.
- VERMA, S. P., M. LOPEZ M. y D. J. TERRELL, 1985. Geochemistry of Tertiary igneous rocks from Arandas-Atotonilco area, northeast Jalisco, Mexico. *Geofís. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 1 (Ed. S. P. Verma), 24, 31-45.
- WATKINS, N. D., B. M. GUNN, A. K. BAKSI, D. YORK y J. ADE-HALL, 1971. Paleomagnetism, geochronology and potassium-argon ages of the Río Grande de

- Santiago Volcanics, Central Mexico. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 82, 1955-1968.
- WHITFORD, D. J. y K. BLOOMFIELD, 1976. Geochemistry of late Cenozoic volcanic rocks from Nevado de Toluca area, Mexico. *Carnegie Inst. Washington Yearb.*, 75, 207-213.
- WILCOX, R. E., 1954. Petrology of Paricutin volcano, Mexico. *U. S. Geol. Surv. Bull.*, 965 C, 281-354.
- WILLIAMS, H., 1950. Volcanoes of the Paricutin region, Mexico. *U. S. Geol. Surv. Bull.*, 965 B, 165-279.
- WRIGHT, J. B., 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis. *Geol. Mag.*, 106, 370-384.

(Recibido: 14 de junio de 1985)

(Aceptado: 5 de diciembre de 1985)

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

V. H. Aguilar-y-Vargas y S. P. Verma, 1987. Composición química (elementos mayores) de los magmas en el Cinturón Volcánico Mexicano. *Geofis. Int.*, Volumen Especial sobre el Cinturón Volcánico Mexicano - Parte 3B (Ed. S. P. Verma), Vol. 26, pp. 195-272