

# Geología y geoquímica de elementos mayores de la Caldera de Huichapan, Hidalgo, México

M. Milán<sup>1,2</sup>, C. Yáñez<sup>2</sup>, I. Navarro-L.<sup>1</sup>, S.P. Verma<sup>1</sup> y G. Carrasco-Núñez<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Depto. de Geotermia, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavacaca, Mor., México.

<sup>2</sup>Div. Ciencias de la Tierra, Instituto Politécnico Nacional, Ticomán, D.F., México.

<sup>3</sup>Instituto de Geología, UNAM, D.F., México.

Recibido: 18 de noviembre, 1991; aceptado: 29 de mayo, 1992.

## RESUMEN

La Caldera de Huichapan cuya estructura aproximadamente subcircular es de ~8.5 km de diámetro, se localiza en la parte central del Cinturón Volcánico Mexicano. Esta caldera se formó por la erupción de varios flujos de ignimbritas (San Francisco y Don Guinyó), hace aproximadamente 4.2 Ma. Litológicamente, se identificaron cuatro grupos constituidos por: el basamento sedimentario formado por calizas cretácicas; una secuencia pre-caldera conformada por basaltos y riolitas del Grupo San Juan; una secuencia caldérica constituida por las ignimbritas San Francisco y Don Guinyó; por último, una secuencia post-ignimbrítica que comprende andesitas, dacitas y basaltos. Quince muestras de rocas se seleccionaron para el análisis de elementos mayores por fluorescencia de rayos-X. Químicamente, estas rocas varían de andesitas basálticas a riolitas y pertenecen a las series calco-alcalina y alto-K calco-alcalina. En sus características de elementos mayores, estas rocas son similares a las de la Caldera de Amealco.

**PALABRAS CLAVE:** Calderas, Cinturón Volcánico Mexicano, ignimbrita, Huichapan, México.

## ABSTRACT

Huichapan Caldera is around 8.5 km wide. It is located in the central part of the Mexican Volcanic Belt. This caldera was formed about 4.2 Ma ago by eruption of several flows of San Francisco and Don Guinyó ignimbrites. Lithologically four groups have been identified: a sedimentary basement formed by cretaceous limestones; a pre-caldera sequence containing basalts and rhyolites of the San Juan Group; a calderic sequence composed of San Francisco and Don Guinyó ignimbrites; and a post-ignimbrite sequence of andesites, dacites and basalts. Fifteen rock samples were selected for major element analysis by X-ray fluorescence spectrometry. Chemically, these rocks vary from basaltic andesites to rhyolites. They belong to the calc-alkaline and high-K calc-alkaline series. In their major element features they are similar to those of Amealco Caldera.

**KEY WORDS:** Calderas, Mexican Volcanic Belt, ignimbrite, Huichapan, Mexico.

## INTRODUCCION

El Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) es una provincia volcánica de 20-150 km de ancho y ≈1,000 km de largo (Fig. 1; modificado de Verma, 1987), que se extiende aproximadamente Este-Oeste desde cerca de Puerto Vallarta hasta Veracruz (Mooser, 1972; Demant y Robin, 1975; Demant, 1978, 1981; Pal *et al.*, 1978; Negendank *et al.*, 1981, 1985; Nixon, 1982; Robin, 1982a, b; Verma, 1987; Aguilar-Y-Vargas y Verma, 1987; Verma y Aguilar-Y-Vargas, 1988; Anguita *et al.*, 1991a, b; De la Fuente Garza y Verma, 1991). De las siete calderas conocidas en el CVM, tres (La Primavera, Los Humeros y Los Azufres) han sido estudiadas con gran detalle, dado su alto potencial geotérmico (ver trabajos incluidos en Verma, 1991). La geología y la geoquímica de la Caldera de Amealco han sido presentados por Carrasco-Núñez *et al.* (1988) y Verma *et al.* (1991a). Las otras tres calderas han sido poco estudiadas: para Chiconquiaco se conoce sólo su localización en un mapa geológico (Negendank *et al.*, 1985), Mazahua ha sido recientemente descubierta (Anguita *et al.*, 1991a, b), mientras que para

Huichapan los estudios previos la refieren de modo indirecto (Segerstrom, 1961; Nichols, 1970; Cedillo, 1975; Herrera y Milán, 1981; Milán 1982; Milán y Herrera, 1987) o bien han sido realizados de modo general para describir su geología (Yáñez, 1984; Ferriz y Mahood, 1986; Milán *et al.*, 1987, 1988).

Esta situación, unida a la escasez de datos geoquímicos en la parte central del CVM, nos llevó a seleccionar tres estructuras claves para su estudio. Estas son: El volcán Zamorano (Carrasco-Núñez *et al.*, 1989), la Caldera de Amealco (Carrasco-Núñez *et al.*, 1988; Verma *et al.*, 1991a), y la Caldera de Huichapan. El objeto de este estudio es presentar la geología de las unidades volcánicas de la Caldera de Huichapan, así como la evolución geoquímica de elementos mayores de los productos emitidos.

## GEOLOGIA

La Caldera de Huichapan, ubicada en el sector central del CVM, se localiza en el Estado de Hidalgo a unos 110 km al NNW de la Ciudad de México (Fig. 1). En la

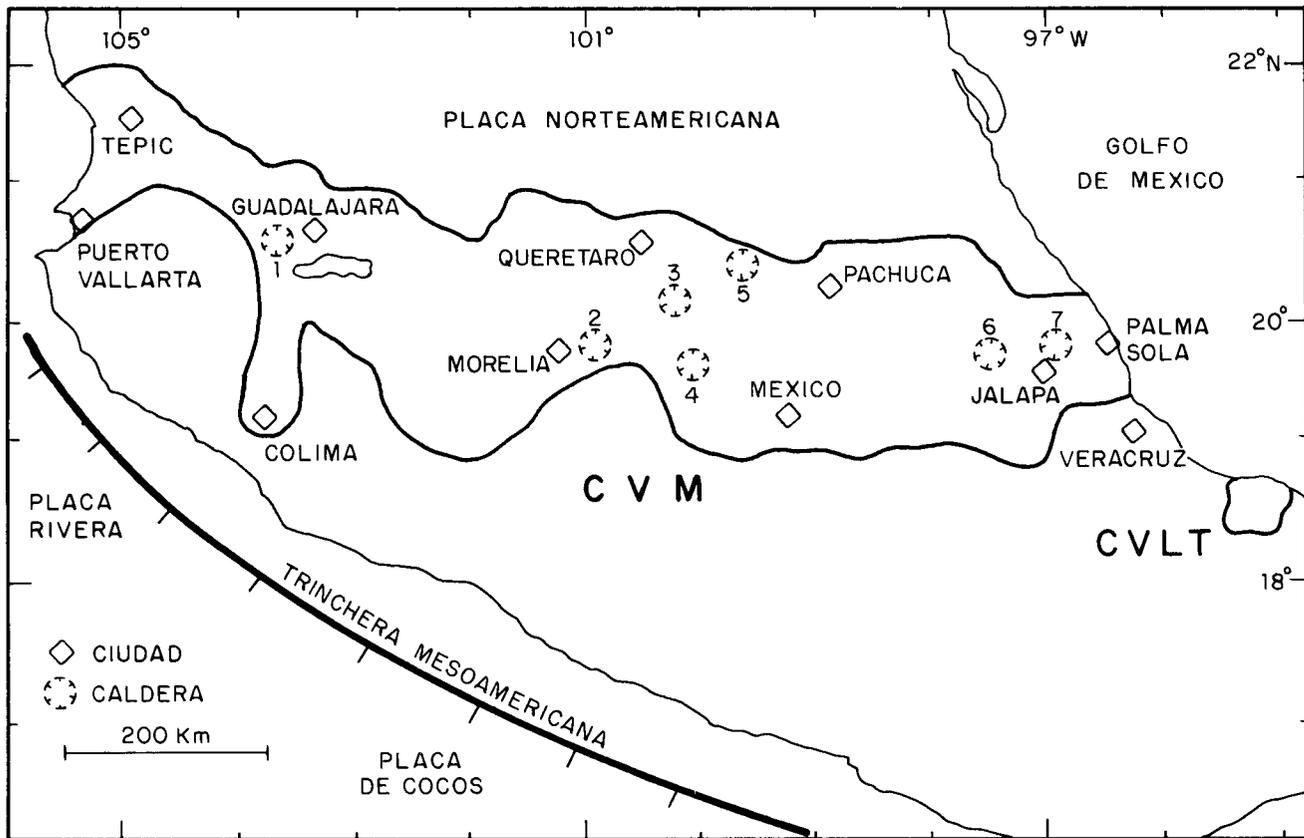


Fig. 1. Localización de la Caldera de Huichapan (H) en el Cinturón Volcánico Mexicano (CVM). CVLT=Campo Volcánico de Los Tuxtlas. Las estructuras caldéricas son: 1=La Primavera, 2=Los Azufres, 3=Amealco, 4=Mazahua (recientemente descubierta por Anguita *et al.*, 1991a, b), 5=Huichapan (este estudio), 6=Los Humeros, 7=Chiconquiaco (Negendank *et al.*, 1985).

Figura 2 se presenta el mapa geológico simplificado del área en estudio. La Caldera de Huichapan tiene una forma subcircular de aproximadamente 8.5 km de diámetro y un volumen aproximado de 65 km<sup>3</sup> (Milán y Carrasco-Núñez, 1988). Se distingue ya sea en imagen de satélite, fotografías aéreas o bien en el mismo campo, por las formas fisiográficas que adoptaron los depósitos ignimbríticos y lávicos que la circunscriben. Entre estos, se cuentan las amplias mesetas con formas todavía lobulares, cuyos bordes muestran paredes verticales donde se exponen las secuencias ignimbríticas, sobre todo las capas soldadas porque son más resistentes a la erosión. Por otra parte, la estructura central queda bordeada por un alto topográfico constituido por la acumulación de los derrames andesíticos emitidos desde el anillo de colapso; en el interior de este último, se levanta el domo Hualtepec, con 3000 msnm (Fig. 3). Las características litológicas de las unidades aflorantes dentro y en el entorno de la estructura aquí descrita se presentan a continuación.

## SECUENCIA LITOLÓGICA

### *Basamento sedimentario*

La geología del área se distingue por presentar una secuencia volcánica que descansa sobre calizas del Cretácico Medio y Superior, aflorante al norte de la caldera (Caliza El Doctor y Formaciones Cuesta del Cura y Soyatal). Tanto la caliza El Doctor como la Formación Cuesta del Cura afloran en los alrededores de Ninthí y a 7 km al ENE del puente Don Guinyó. La primera se identifica por su espesor masivo y contenido faunístico abundante, entre el cual sobresalen miliólidos, pelecípodos y gasterópodos. Litológicamente varía de *wackestone* a *packstone*. La Formación Cuesta del Cura está constituida por paquetes de 0.05 a 1 m de espesor, cuya litología varía de *mudstone* a *wackestone*, con una presencia ocasional de nódulos y lentes de pedernal. Esta unidad predomina en la zona de Ninthí tal y como lo exponen Ortuño-Arzate (1981) y Milán (1982). Por último, la Formación Soyatal del Cretácico

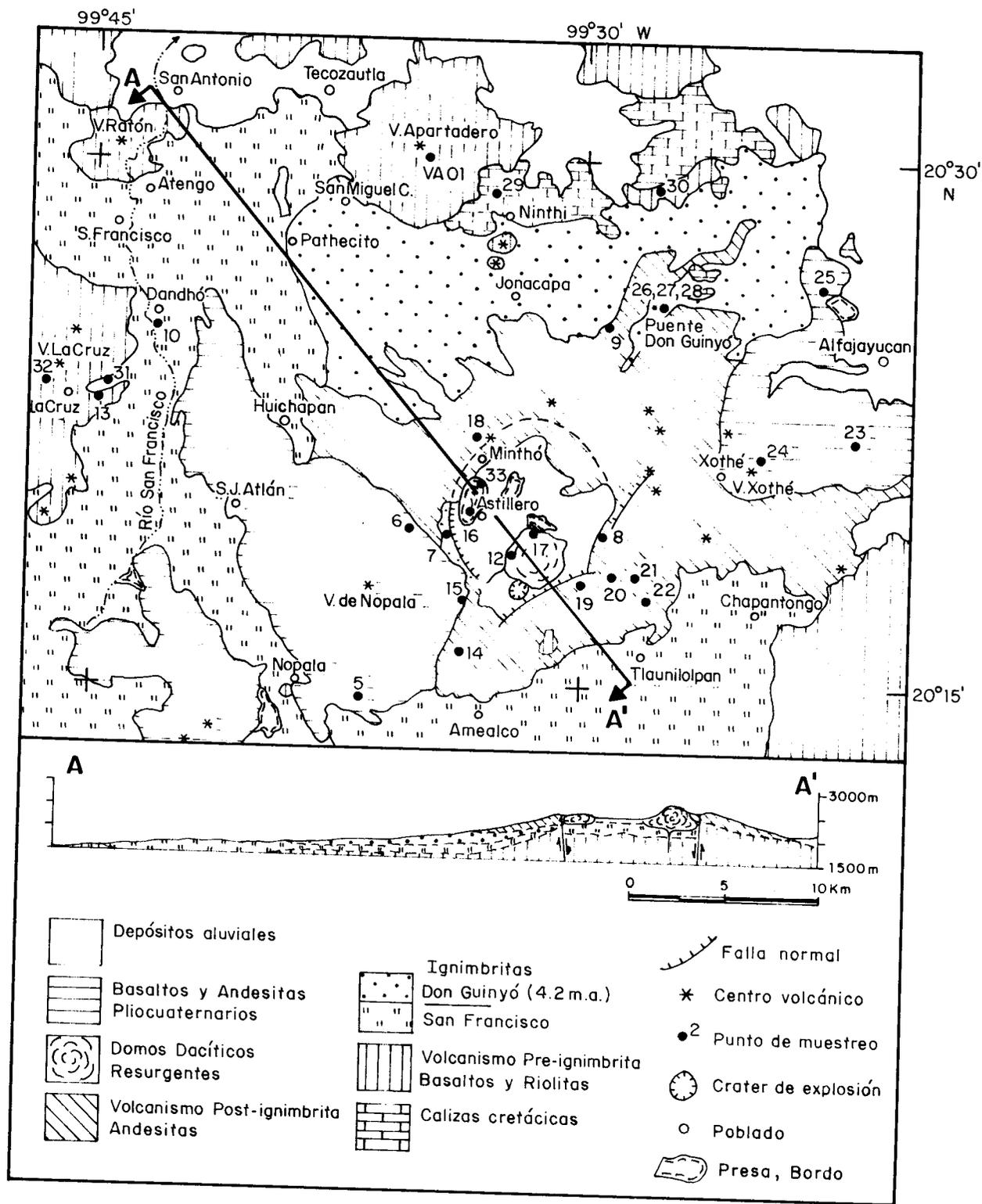


Fig. 2. Mapa geológico simplificado del área de Huichapan. Se incluye la localización de las muestras recolectadas, donde, por simplicidad, en los nombres de las muestras se eliminan las iniciales HP, HPO ó VA.

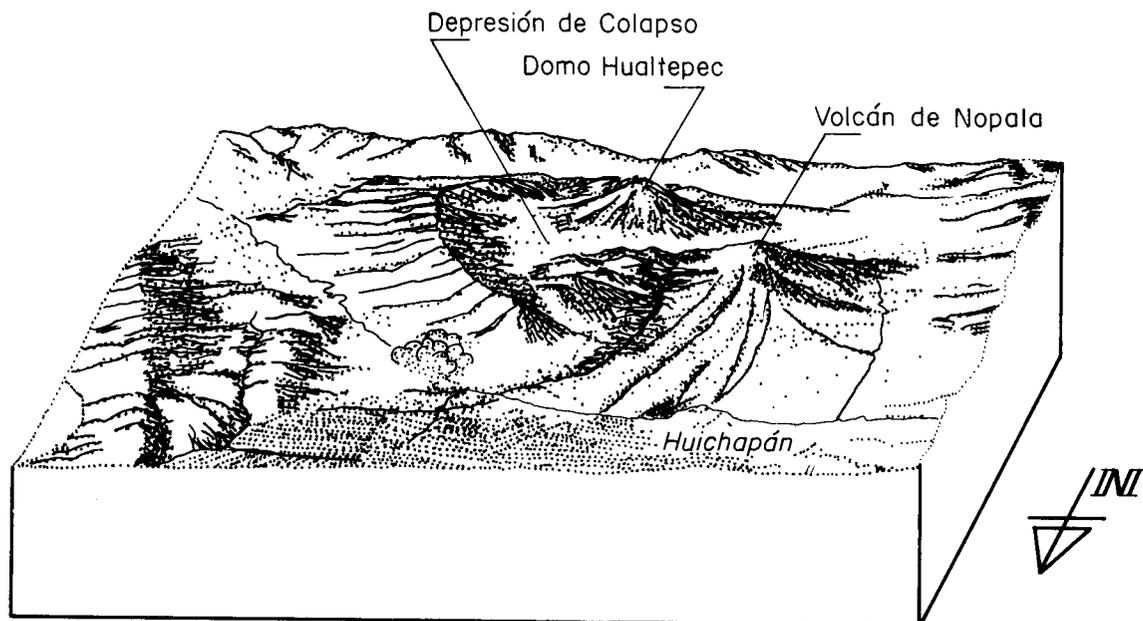


Fig. 3. Bloque esquemático mostrando la fisiografía de la Caldera de Huichapan.

Superior aflora escasamente al norte de Ninthí y se reconoce con facilidad por su litología compuesta de lutitas, areniscas y margas de colores marrón y verde, en estratos delgados y alternantes entre sí (Ortuño-Arzate, 1981; Milán, 1982). Estas rocas se encuentran plegadas y forman pequeñas estructuras recumbentes con ejes de dirección Este-Oeste; no obstante, la tendencia regional de los pliegues es en dirección NNW—SSE (Segerstrom, 1961).

#### Rocas volcánicas

Sobre esta secuencia sedimentaria plegada descansan las rocas volcánicas del Terciario, constituidas por dos paquetes principales: el Grupo San Juan, del Mioceno-Plioceno y las rocas del Plioceno generadas durante la formación de la Caldera de Huichapan.

La descripción geológica de la serie volcánica de esta región está organizada en cinco unidades (E-A), en orden decreciente en edad, en la misma forma que se hizo para la caldera de Amealco (Verma *et al.*, 1991a). Debemos de aclarar también que, en la caldera de Huichapan, la siguiente descripción de los tipos de rocas que comprende cada unidad ha sido complementado por el reciente trabajo de Verma *et al.* (1992).

#### Rocas volcánicas pre-ignimbríticas (Unidad E)

Entre este variado conjunto litológico se encuentran las rocas que constituyen al Grupo San Juan (Wilson *et al.*, 1955 citado en Segerstrom, 1961), constituido por tobas, basaltos y riolitas aflorantes a 30 km al norte de la caldera, en la zona de Tecozautla-Río San Juan (Milán y Herrera,

1987; Milán *et al.*, 1988). En el área adyacente al pozo geotérmico de Pathé, Nichols (1970) y Milán (1982) reportan edades de entre 6 y 7 Ma para rocas de esta unidad. Otras rocas cubiertas por los depósitos ignimbríticos de la caldera comprenden los basaltos de los volcanes Apartadero, La Cruz y el Ratón, también considerados por Milán y Herrera (1987) como Grupo San Juan; en el primero de ellos, Milán (1982) reporta una edad de 9 Ma. De igual modo, al norte de Jonacapa, la ignimbrita Don Guinyó cubrió parcialmente dos pequeños conos andesíticos, uno de los cuales se encuentra emplazado sobre las calizas del Cretácico. Los afloramientos precaldéricos más cercanos a la zona de colapso se localizan en las inmediaciones del poblado de Nopala y al NE de Amealco (Hidalgo). Estos consisten en riolitas desvitrificadas, muy parecidas a las que afloran en las inmediaciones de Pathé (Milán, 1982) y a las riolitas del campo de Othoc (Milán *et al.*, 1988), aflorantes a 10 km al sur de Amealco.

#### Secuencias ignimbríticas (Unidad D)

Estas secuencias incluyen a las ignimbritas San Francisco y Don Guinyó, las cuales se describen a continuación.

##### Ignimbrita San Francisco

Esta unidad aflora a todo lo largo del río San Francisco y puede dividirse claramente en dos miembros: el Miembro San Antonio y el Miembro Atengo (Fig. 4).

##### Miembro San Antonio

Este miembro aflora en el escarpe visible al sur de Tecozautla, el cual se extiende al poniente, casi paralelo a

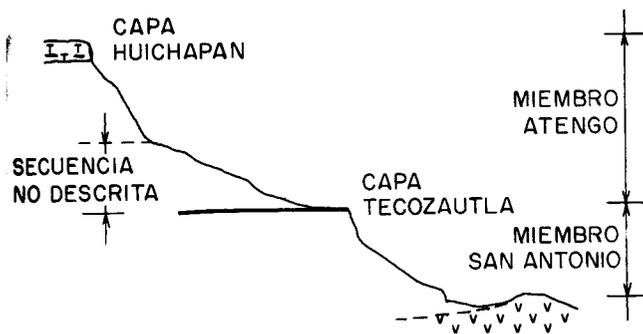


Fig. 4. Disposición esquemática de los Miembros que conforman la ignimbrita San Francisco tal como se observan a lo largo de la carretera Huichapan-Tecoautla (Norte de la Caldera de Huichapan).

la carretera, hasta San Antonio. Entre Atengo y San Antonio, la secuencia es cortada, casi en su totalidad, por el río San Francisco. La sección "tipo" (Fig. 5) de este miembro se levantó sobre el escarpe denominado "La Cruz de Piedra", ubicado a escasos 2 km al poniente de Tecozautla. Esta secuencia está compuesta de varias capas ignimbríticas no soldadas, separadas por horizontes volcanosedimentarios constituidos por pumicitas de caída libre, a veces depositadas y movilizadas en medios acuosos. Así mismo, se logran observar algunos horizontes conglomeráticos mal cementados o débilmente empacados en una matriz limoarenosa. Hacia la base de la secuencia observada, se aprecian horizontes ignimbríticos con lentes de gravas, interstratificados con horizontes de arenas gruesas y gravillas de estratificación cruzada. Este rasgo parece ser de origen sedimentario, no obstante, en San Antonio se aprecian algunos horizontes típicos de surgencia basal (*base surge*). Toda la secuencia se encuentra coronada por una ignimbrita oscura, parcialmente soldada y medianamente consolidada, la cual protege a toda la secuencia inferior de la erosión. En este trabajo, se le denomina Capa Tecozautla.

#### Miembro Atengo

La secuencia correspondiente con este miembro aflora en el escarpe de las minas de arena de Atengo y a él corresponde la sección "tipo" de la Figura 6. Como puede apreciarse en la base, descansa una secuencia de arenas líticas gruesas con estratificación cruzada, constituidas por abundantes fragmentos de andesitas y basaltos, con algunos horizontes también arenosos de caída libre. Hacia la parte media, la presencia de estos horizontes disminuye y aparecen algunas capas ignimbríticas no soldadas, con abundantes fragmentos de pómez. Interdigitadas con las ignimbríticas se observan algunas capas arenosas de caída libre con estratificación gradual y otras de surgencia basal con estratificación cruzada. En la parte media superior predo-

minan las capas ignimbríticas. La porción superior se caracteriza por presentar en la base una secuencia pumicítica arenosa, de caída libre, sobre la cual descansan dos paquetes ignimbríticos: el inferior es de composición pumicítica y no soldado, mientras que el superior denominado Capa Huichapan, se presenta soldado y con fracturamiento columnar. Esta capa, por su espesor, fracturamiento columnar y resistencia a la erosión sobresale de cualquiera de las que conforman la secuencia tobácea; texturalmente, se observa fluidal con fragmentos cristalinos de cuarzo y sanidina, en una matriz de trizas vítreas (*shards*).

#### Toba Don Guinyó

Seegerstrom (1961) definió inicialmente a esta unidad, bajo el puente Don Guinyó, como "tobas y brechas riolíticas y dacíticas bien endurecidas y con lentes horizontales de vidrio negro". Esta definición indica claramente que se trata de una secuencia ignimbrítica constituida por varias unidades de enfriamiento mayoritariamente soldadas, que forman capas muy compactas de color rojizo, donde abundan los "fiammes" de color negro. A pesar de que predominan las capas soldadas, en el Arroyo Pathecito se logran identificar varias unidades no soldadas pero compactas, donde sobresalen los fragmentos de pómez en una matriz de ceniza fina. En general, las distintas capas soldadas y no soldadas contienen fragmentos líticos de composición riolítica y andesítica; petrográficamente, están constituidas por fragmentos cristalinos de feldespatos y cuarzo en una mesostasis fluidal compuesta por trizas vítreas. A pesar de distinguirse bastante bien ambas ignimbríticas, Don Guinyó y San Francisco, no ha sido posible observar la relación que guardan entre sí. Nichols (1970) describe el contacto en la zona de Boyé, a 3 km al NE de Huichapan sobre la carretera. No obstante, este contacto es bastante oscuro, puesto que no se distingue claramente si se trata de una u otra ignimbrita, ya que lo que Nichols (1970) probablemente observó fue una unidad no soldada.

Por otra parte, Nichols (1970) tomó una muestra de la toba Don Guinyó en el extremo noroeste del puente Don Guinyó y realizó dos determinaciones de edades, obteniéndose valores de  $4.2 \pm 0.3$  m.a. y  $4.3 \pm 0.3$  m.a. para la edad de esta unidad ignimbrítica.

#### Volcanismo post-ignimbrítico (Unidad C)

Esta unidad comprende la secuencia de andesitas y basaltos emitidos desde varios centros volcánicos, algunos de ellos emplazados en el borde de colapso de la caldera. En términos generales, las rocas son afaníticas, de color gris oscuro y estructura compacta y vesicular. Poseen fenocristales de andesina y augita en una mesostasis de plagioclasas y piroxenos. Estas rocas se presentan en flujos de enfriamiento de 2 a 5 m de espesor; el mayor apilamiento de estos flujos se observa en los bordes de la

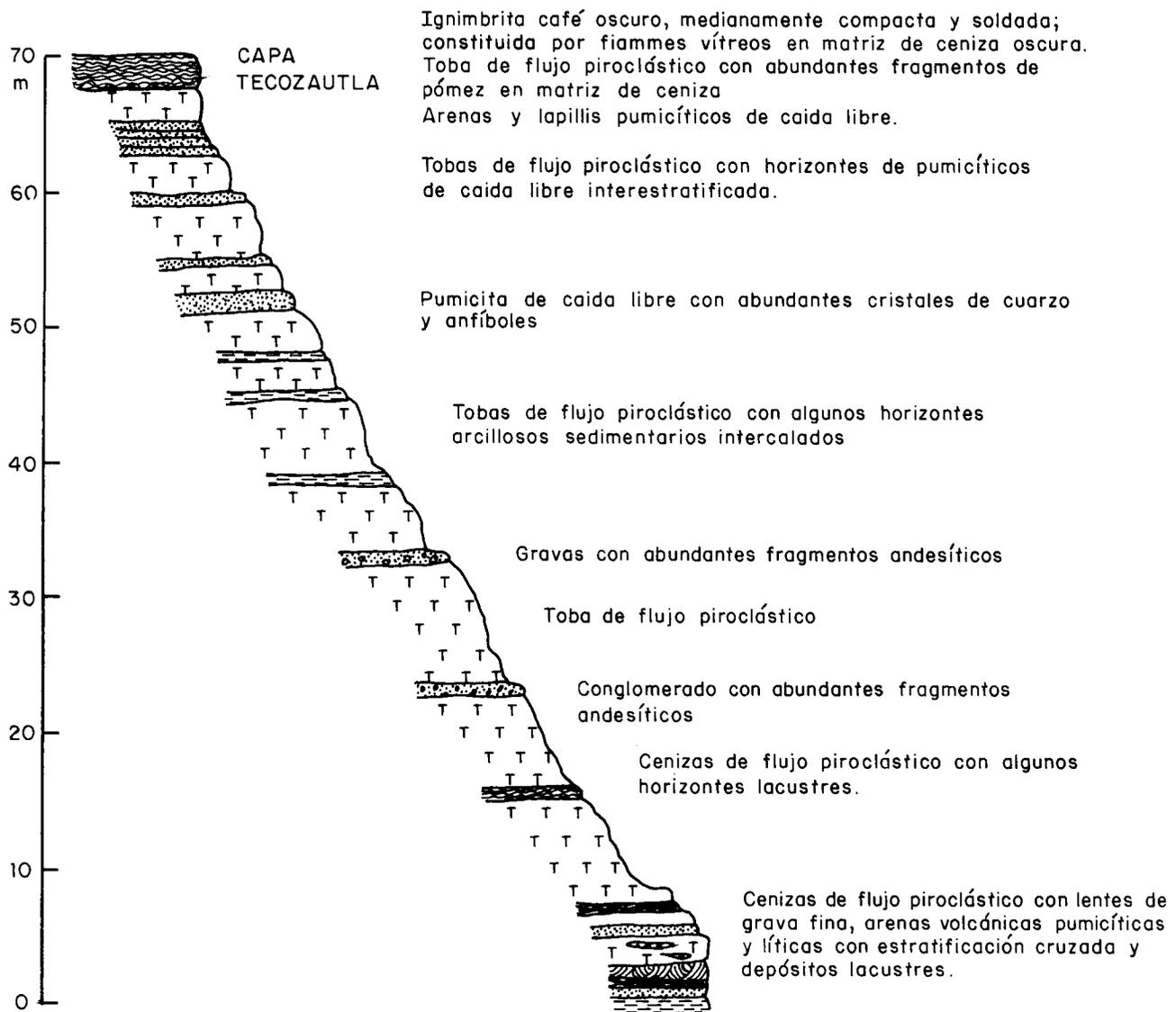


Fig. 5. Sección "tipo" del Miembro San Antonio de la ignimbrita San Francisco.

caldera, donde pueden alcanzar más de 100 m de espesor. Por su posición estratigráfica, sobre la secuencia ignimbritica y bajo los basaltos y andesitas del Volcán de Nopala, se les asigna una edad Plioceno Tardío.

**Domos dactílicos resurgentes (Unidad B)**

Dentro de este conjunto de rocas, se agrupan las emisiones félsicas de los domos Hualtepec y La Gerja. El primero, localizado cerca de la falla sur del borde de colapso, es el mayor en cuanto a dimensiones (Fig. 3) y por lo mismo, sobresale desde cualquier ángulo por el que se observe la caldera. La altitud del domo Hualtepec es comparable a la del Volcán de Nopala. Está constituido por rocas porfídicas en las que abundan las plagioclasas (An<sub>45-50</sub>) y piroxenos, en una mesostasis felsosférica. En general, la unidad es muy uniforme y se levanta sobre un derrame de

andesitas postcaldéricas. Por otro lado, al norte de depresión caldérica se emplazaron dos domos riolítico (Cerro La Gerja), al pie de los cuales se ubica la Hacienda El Astillero. Los afloramientos de esta unidad son de color rosado y se encuentran alterados por intemperismo. La petrografía de una muestra tomada cerca de la hacienda indica que se trata de una riolita esferulítica. Por su posición respecto a las andesitas postcaldérica estos domos resurgentes parecen haberse emplazados contemporáneamente y por lo mismo se les asigna una edad Plioceno Tardío.

**Volcanismo Pliocuaternario (Unidad A)**

Las rocas pertenecientes a esta unidad quedan expuestas tanto al oriente (Volcán Xothé) como al poniente (Volcán de Nopala) de la depresión de colapso. A este volcanismo

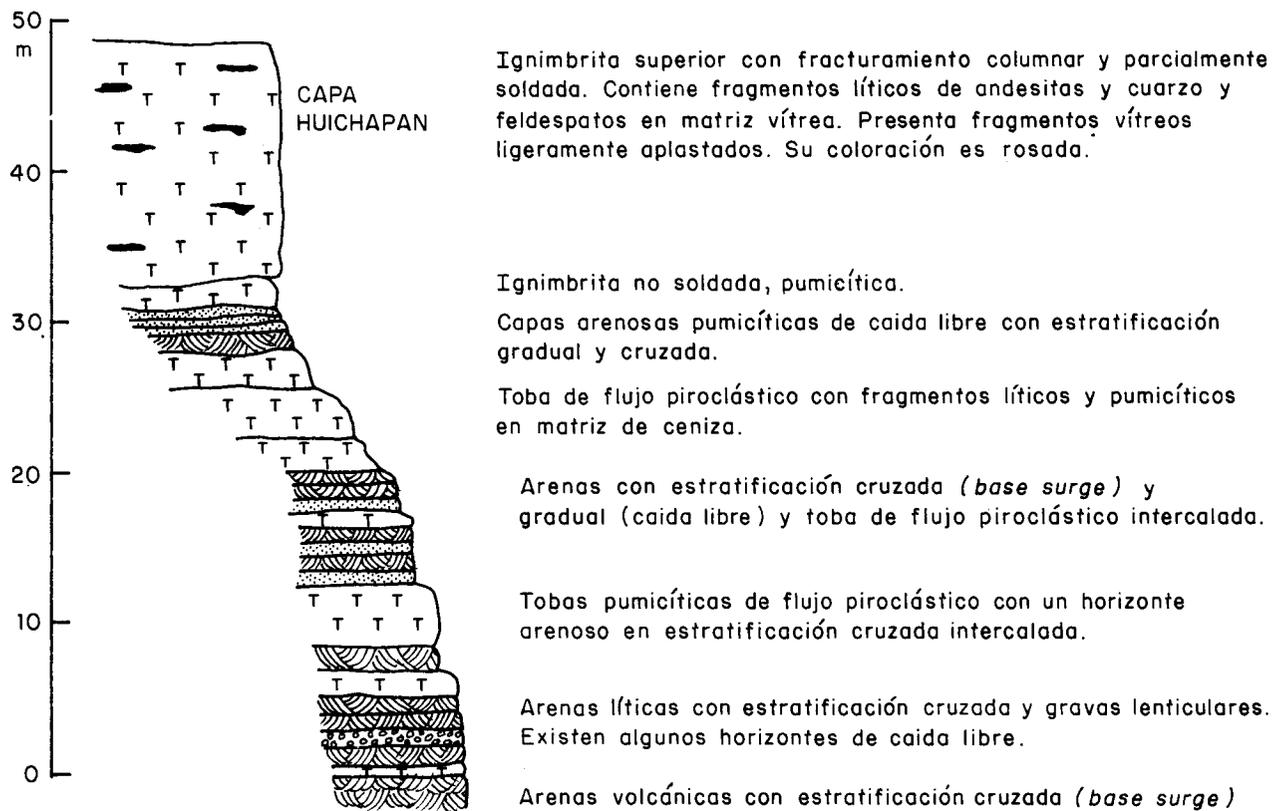


Fig. 6. Sección "tipo" del Miembro Atengo de la ignimbrita San Francisco.

se le ha considerado como volcanismo periférico. Corresponden con basaltos de olivino y andesitas basálticas de piroxeno emitidas en forma de derrames lávicos. Las emisiones del Volcán de Nopala se vertieron parcialmente sobre el borde occidental de la zona de colapso, pero su máximo alcance llegó a 17 km al NE del centro de emisión (E de Dandhó, Fig. 2), cubriendo un sector amplio de la ignimbrita San Francisco y de los basaltos postcaldéricos. Por otro lado, los basaltos del Volcán Xothé tuvieron alcances máximos de 10 km, canalizados por un patrón de drenaje preexistente y cubriendo la ignimbrita Don Guinyó y a los basaltos precaldéricos. Por su posición estratigráfica y morfología bien conservada, estos volcanes se han considerado como pliocuaternarios y representan la última fase volcánica relacionada con la caldera de Huichapan.

#### Depósitos aluviales

El interior de la caldera está cubierta por un paquete limo arcilloso aluvial, reflejo de inundaciones periódicas en el interior de la caldera. Por esto mismo, no se descarta que en niveles más profundos esta secuencia se encuentre descansando sobre un paquete lacustre posterior al emplazamiento de los domos félsicos. Yáñez (1984) reporta la presencia de este paquete lacustre en el interior de la caldera; sin embargo, el estudio de esta unidad queda fuera del alcance del presente trabajo.

## RESULTADOS Y DISCUSION

La localización de las muestras recolectadas se presenta en la Figura 2. La Tabla 1 proporciona las coordenadas de los sitios de muestreo así como el tipo de roca encontrada de acuerdo a la clasificación de Le Bas *et al.* (1986) y Peccerillo y Taylor (1976).

#### Petrografía

Una síntesis de los datos petrográficos y la clasificación correspondiente se presentan en la Tabla 2. Dos muestras de las rocas pre-ignimbríticas (Unidad E) son basalto y riolita con textura microlítica y esferulítica respectivamente. Las rocas de las secuencias ignimbríticas (Unidad D) tienen una textura piroclástica. El volcanismo post-ignimbrítico (Unidad C) varía de basalto a andesita, con variadas texturas. Por su parte, aunque petrográficamente dos de las muestras de los domos resurgentes (Unidad B) parecen ser andesitas, químicamente son dacitas (Tabla 2). Finalmente, el volcanismo Pliocuaternario (Unidad A) comprende rocas de basaltos a andesitas, con variadas texturas.

En su mineralogía modal, dominan las plagioclasas tanto en los fenocristales como en el mesostasis. Los piroxenos son los que siguen en importancia (Tabla 2).

Tabla 1

Localización y clasificación de las rocas volcánicas de la Caldera de Huichapan, Hidalgo, México.

Unidad	Muestra	Clasificación		Localización	
		Le Bas et al.	/ Peccerillo y Taylor	Latitud 20° N	Longitud 99° W
A	HP15	Andesita	/ Calcoalc-K	17'10"	33'15"
	HP06	T-andesita	/ "	19'30"	35'00"
	HP05	Andesita	/ "	14'40"	36'40"
B	HP12	Dacita	/ Calcoalcalina	18'30"	32'00"
	HP17	Dacita	/ "	19'30"	31'50"
C	HP14	And. Bas.	/ Calcoalcalina	16'10"	32'40"
	HP09	T-andesita	/ "	25'00"	29'00"
	HP21	Andesita	/ "	18'00"	28'25"
	HP20	Dacita	/ "	18'00"	29'08"
D	HP28	Traquita	/ Calcoalc-K	25'50"	27'40"
	HP27	"	/ "	25'50"	27'40"
	HP26	"	/ "	25'50"	27'40"
	HP10	Riolita	/ "	24'40"	43'00"
	HP31	"	/ "	23'30"	44'50"
E	HP30	Riolita	/ Calcoalc-K	28'50"	28'00"

Las clasificaciones son según los diagramas TAS de Le Bas et al. (1986) y SiO<sub>2</sub> vs. K<sub>2</sub>O de Peccerillo y Taylor (1976).

#### Geoquímica de elementos mayores

Quince muestras de rocas fueron seleccionadas para el análisis de elementos mayores por el método de fluorescencia de rayos-X por dispersión de onda, utilizando un equipo Siemens en el Instituto de Investigaciones Eléctricas. Detalles experimentales se encuentran en Guevara y Verma (1987) y Verma et al. (1991b). Los resultados de análisis de elementos mayores se presentan en la Tabla 3.

Todas las muestras analizadas (Tabla 3) son normativas en Cuarzo (*Q* en su norma). Ninguna de las rocas representa un magma "primario", ya que los valores de magnesio (Mg-V) no son altos (varían entre ~15 y ~50, o sea mucho menor que ~70). Por lo tanto, se trata de rocas que provienen de magmas bastante diferenciados.

De acuerdo con el diagrama TAS (Fig. 7; Le Bas et al., 1986), estas rocas se clasifican como andesita basáltica a riolita y son similares a las de la vecina Caldera de Amealco (Verma et al., 1991a). Cabe mencionar que químicamente se han encontrado también basaltos en ambas calderas (Navarro-L., 1992; Verma et al., 1992 y en

preparación). Por otra parte, en la Fig. 8 (Peccerillo y Taylor, 1976), las rocas pertenecen a las series calcoalcalina y alto-K calcoalcalina. Este carácter calcoalcalino es compatible con otras regiones de la parte central del CVM (Aguilar-Y-Vargas y Verma, 1987). En sus elementos mayores, las muestras de Huichapan demuestran características similares a las de la Caldera de Amealco (Verma et al., 1991a). Esto está de acuerdo con Milán y Carrasco-Núñez (1988) quienes han sugerido que ambas calderas se formaron bajo condiciones geológicas parecidas, al considerar su ubicación geográfica, edad (Plioceno Inferior) y evolución química.

La Figura 9 presenta los datos de elementos mayores en las muestras de Huichapan en un diagrama AFM. En esta figura también las rocas de Huichapan demuestran su carácter diferenciado, presentando ubicación alejada del magnesio y con tendencia hacia los álcalis. Finalmente, en la Figura 10 se presentan los datos de elementos mayores versus SiO<sub>2</sub>. Los óxidos TiO<sub>2</sub>, FeO, MgO y CaO demuestran tendencias claras de decrecimiento al aumentar el SiO<sub>2</sub>, mientras que para Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Na<sub>2</sub>O el comportamiento es menos evidente.

Tabla 2  
Composición modal de las rocas de la Caldera de Huichapan, Hidalgo, México.

Unidad	Muestra	FENOCRISTALES										MESOSTASIS				TEXTURA	CLASIFICACION
		OL	OPX	CPX	FK	Q	PL	MG	FR	PL	VDR	PX	MG				
A	HP23	**	**				****				****			*	*	Porfídica	And. basáltica
	HP24			*			****				****			*	**	"	Andesita
	HP25			**			****				****			**	**	Microclítica	"
	HP15		****				****				****		*	**	**	Intersertal	Basalto
	HP06		**				****				****		**	**	**	Hialopilitica	Andesita
HP05		**				****				****		**	**	**	"	"	"
B	HP17			**			****			****	*		**			Porfídica	Andesita
	HP12		***	*			****			****	*					"	"
	HP16						****			****						Esferulítica	Riolita
C	HP14			*			****			****			**	*	*	Porfídica	Andesita
	HP22	*		*			****			****			*	**	**	"	Basalto
	HP19			**			****			****			**	**	*	Intergranular	Andesita
	HP21			**			****			****			*	*	*	Porfídica	"
	HP09		*				****			****		*	*	*	*	Microclítica	"
	HP18			**			****			****			**	*	*	Pilotaxítica	"
	HP20		*	*			****			****			*	*	*	Microclítica	"
D	HP28			*		*	***			***			*			Piroclástica	Ignimbrita
	HP27			*		*	***			***						"	"
	HP26			*		**	***			***						"	"
	HP10		*			****	***			***			*			"	"
	HP31		*			****	***			***			*			"	"
E	HP33	***		**		***	***			***			**	*	*	Microclítica	Basalto
	HP30					****	***			***			**	*	*	Esferulítica	Riolita

Las abreviaturas empleadas son: OL = olivino; OPX = ortopiroxeno; CPX = clinopiroxeno; FK = feldespatos potásicos; MG = magnetita; FR = fragmentos de roca; VDR = vidrio; PX = piroxeno; PL = plagioclasa; Q = cuarzo.

Las abundancias modales están normalizadas a ~100 % independientemente para fenocristales y mesostasis.

Abundancia modal: \* < 5%; \*\* 5% < \*\*\* < 25%; \*\*\*\* < 50%; \*\*\*\*\* > 50%.

Las tendencias en los diagramas de elementos mayores son en general compatibles con procesos de diferenciación magmática por cristalización fraccionada (Navarro-L., 1992; Verma *et al.*, 1992). Por otra parte, la evolución de

la Caldera de Huichapan así como la diferenciación de sus productos eruptivos son similares a la vecina Caldera de Amealco (Milán y Carrasco-Núñez, 1988; Verma *et al.*, 1991a).

Tabla 3

Química de elementos mayores y norma CIPW de la Caldera de Huichapan, Hidalgo, México.

Unidad	A			B		C		
	HP15	HP06	HP05	HP12	HP17	HP14	HP09	HP21
SiO <sub>2</sub>	60.33	60.42	60.58	63.50	63.72	56.09	57.22	59.65
TiO <sub>2</sub>	1.07	1.04	0.95	0.69	0.72	1.51	1.32	1.49
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.18	15.43	15.43	16.64	17.60	16.53	16.14	14.44
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.77	6.66	6.57	4.93	5.14	8.76	7.77	8.15
MnO	0.10	0.10	0.09	0.06	0.06	0.13	0.11	0.11
MgO	3.09	2.88	2.83	1.76	1.88	3.59	2.63	2.88
CaO	4.89	4.85	4.78	4.20	4.57	7.46	5.57	6.16
Na <sub>2</sub> O	3.65	3.86	3.62	4.24	4.17	4.07	4.58	4.10
K <sub>2</sub> O	2.79	2.92	2.90	1.81	1.85	1.06	1.65	1.96
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	0.18	0.16	0.12	0.14	0.27	0.19	0.18
LOI	1.31	0.41	1.81	1.62	1.01	0.67	1.23	0.86
Suma	100.36	98.75	99.72	99.57	100.86	100.14	98.41	99.98
Mg-V	50.11	48.76	48.67	44.00	44.60	47.42	42.69	43.75
Q	11.60	11.20	12.81	19.18	18.22	5.53	7.05	10.41
C	-	-	-	0.36	0.76	-	-	-
OR	16.65	17.55	17.50	10.92	10.95	6.30	10.03	11.58
AB	31.18	33.21	31.29	36.63	35.34	34.62	39.88	34.69
AN	19.71	16.42	17.66	20.47	21.79	23.83	19.15	15.21
DI-Mg	1.67	3.11	2.49	-	-	4.92	3.17	5.73
DI-Fe	1.29	2.54	2.05	-	-	4.72	3.51	6.07
HY-Mg	7.00	5.85	6.05	4.48	4.69	6.71	5.27	4.51
HY-Fe	6.23	5.47	5.72	4.12	4.37	7.39	6.68	5.49
MT	2.20	2.21	2.22	2.22	2.18	2.19	2.24	2.17
IL	2.05	2.01	1.84	1.34	1.37	2.88	2.58	2.83
AP	0.43	0.43	0.39	0.29	0.33	0.64	0.46	0.43
Sálicos	79.14	78.39	79.25	87.57	87.06	70.58	76.11	71.89
Fémicos	20.87	21.62	20.76	12.44	12.94	29.44	23.91	27.24
C.I.	28.21	27.24	27.26	23.61	25.08	39.13	29.69	30.74
D.I.	59.43	61.96	61.60	66.73	64.51	46.75	56.96	56.68
S.I.	18.36	17.65	17.78	13.81	14.42	20.54	15.81	16.85
A.R.	1.88	2.00	1.95	1.82	1.75	1.54	1.80	1.83

Tabla 3 (continuación)

Unidad	C		D				E
	HP20	HP28	HP27	HP26	HP10	HP31	HP30
SiO <sub>2</sub>	62.73	64.60	65.10	66.25	75.06	75.82	76.63
TiO <sub>2</sub>	1.14	0.58	0.61	0.62	0.16	0.15	0.05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.32	13.81	14.61	13.80	12.67	12.39	12.62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.50	6.54	5.58	5.78	2.05	2.02	1.10
MnO	0.08	0.08	0.06	0.09	0.02	0.03	0.03
MgO	1.69	0.97	0.47	0.80	0.30	0.51	0.09
CaO	3.85	2.82	2.66	2.58	0.27	0.64	0.43
Na <sub>2</sub> O	4.44	4.92	4.98	4.99	4.01	4.23	2.98
K <sub>2</sub> O	2.37	2.75	2.94	2.87	4.36	4.03	4.53
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.13	0.06	0.04	0.06	0.00	0.01	0.03
LOI	1.61	2.44	2.56	1.77	1.76	0.47	1.25
Suma	99.86	99.57	99.61	99.61	100.66	100.30	99.74
Mg-V	33.15	24.61	15.64	23.35	24.36	35.72	14.53
Q	15.36	16.66	17.56	18.68	33.78	33.17	41.22
C	-	-	-	-	0.87	-	2.13
OR	14.25	16.73	17.90	17.33	26.05	23.85	27.21
AB	38.24	42.86	43.42	43.16	34.31	35.85	25.60
AN	12.36	7.70	9.10	6.93	1.35	2.92	1.98
DI-Mg	1.97	1.50	0.73	1.40	-	0.08	-
DI-Fe	3.28	3.90	2.93	3.53	-	0.08	-
HY-Mg	3.37	1.79	0.87	1.39	0.76	1.23	0.21
HY-Fe	6.44	5.34	3.96	4.02	1.37	1.33	0.83
MT	2.21	2.24	2.24	2.22	1.20	1.17	0.65
IL	2.20	1.13	1.19	1.20	0.31	0.29	0.10
AP	0.31	0.15	0.10	0.15	-	0.02	0.07
Sálicos	80.21	83.95	87.98	86.10	96.37	95.80	98.14
Fémicos	19.80	16.06	12.03	13.90	3.63	4.20	1.86
C.I.	18.97	12.19	11.29	10.92	1.88	3.97	2.13
D.I.	67.85	76.25	78.88	79.17	94.14	92.87	94.03
S.I.	10.56	6.39	3.36	5.54	2.80	4.73	0.98
A.R.	2.20	2.71	2.69	2.85	4.26	4.46	2.68

Unidad A: Basaltos y andesitas pliocuaternarias. Unidad B: Domos dacíticos y riolíticos. Unidad C: Vulcanismo post-ignimbrítico. Unidad D: Ignimbritas San Francisco/Don Guinyó. Unidad E: Vulcanismo pre-ignimbrítico.

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = Hierro total expresado como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Mg-V = Valor de Mg = 100 Mg<sup>+2</sup>/[Mg<sup>+2</sup> + 0.9(Fe<sup>+2</sup> + Fe<sup>+3</sup>)], atómico.

Las normas CIPW son calculadas a base seca y ajuste al 100 %, utilizando el paquete RIGD (Verma *et al.*, 1991c).

Sálicos = Suma de los minerales sálicos normativos (Q + OR + AB + AN).

Fémicos = Suma de los minerales fémicos normativos (DI-Mg + DI-Fe + HY-Mg + HY-Fe + FO + FA + MT + IL + HM).

C.I. = Índice de cristalización (AN + 2.1570577 + DI-Mg + FO + 0.70007617 HY-Mg); (Poldervaart y Parker, 1964).

D.I. = Índice de diferenciación (Q + OR + AB + NE + LC); (Thornton y Tuttle, 1960).

S.I. = Índice de solidificación (100 MgO)/(MgO + FeO + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O); (Hutchinson, 1974).

A.R. = Relación de alcalinidad (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + CaO + (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O))/(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + CaO - (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O)). Sin embargo, cuando el SiO<sub>2</sub> > 50 % y 1 < (K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O) > 2.5, entonces es utilizado 2(Na<sub>2</sub>O) en lugar del álcalis total (Wright, 1969).

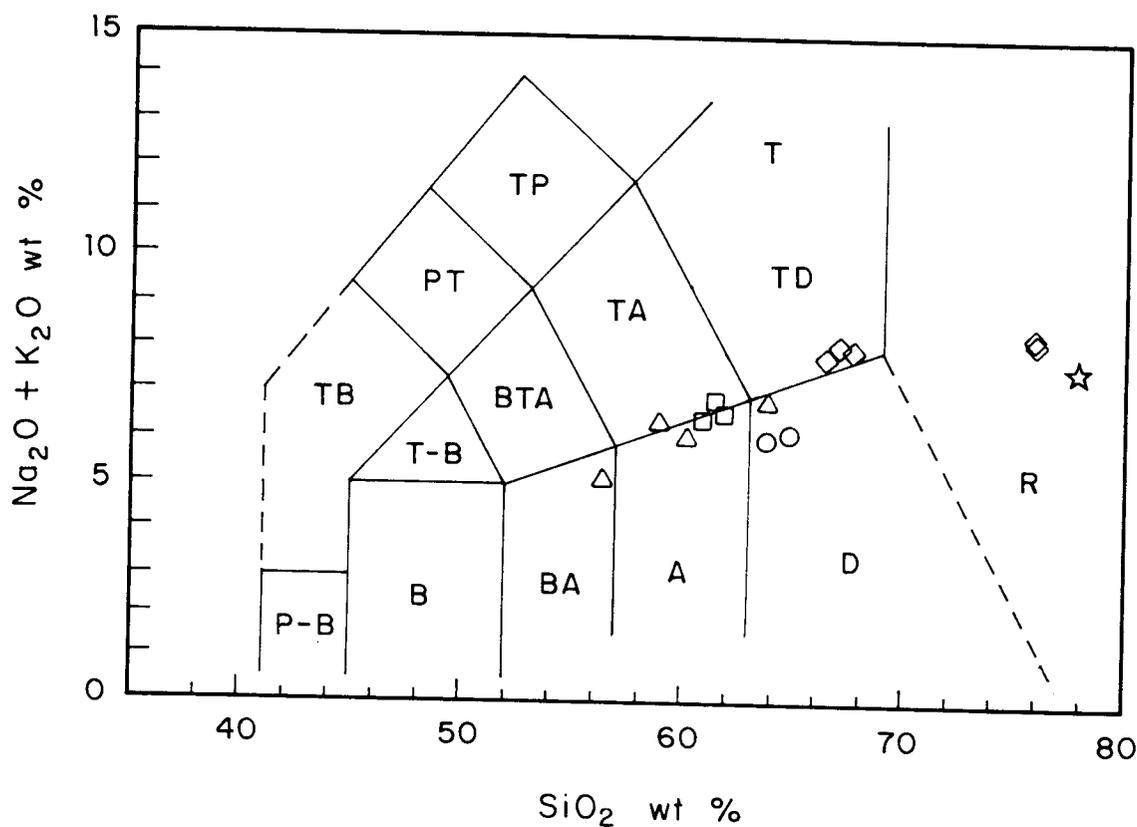


Fig. 7. Ubicación de las muestras de Huichapan en el diagrama TAS (Total álcalis - Silica, según Le Bas *et al.*, 1986); aquí los campos son: P-B=basalto picrítico; B=basalto; BA=andesita basáltica; A=andesita; D=dacita; R=riolita; TB=basanita tefrítica; T-B=traqui-basalto; BTA=traqui-andesita basáltica; TA=traqui-andesita; TD=traqui-dacita; T=traquita; PT=fonotefrita; TP=tefri-fonolita. Los símbolos utilizados son: cuadros para la unidad A, vulcanismo plio-cuaternario; círculos para la unidad B, domos silíceos; triángulos para la unidad C, vulcanismo post-ignimbrítico; diamantes para la unidad D, secuencia ignimbrítica; estrellas para la unidad E, vulcanismo pre-ignimbrítico.

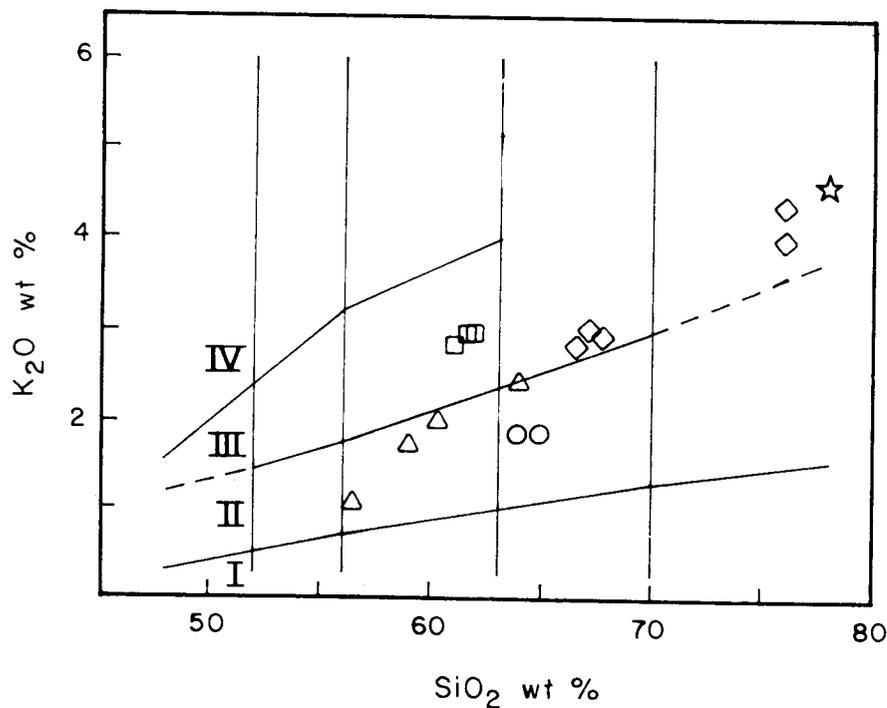


Fig. 8. Ubicación de las muestras de Huichapan en el diagrama de K<sub>2</sub>O - SiO<sub>2</sub> (Peccerillo y Taylor, 1976); las secuencias I a IV son: I=serie toleítica; II=serie calcoalcalina; III=serie alto-K calcoalcalina; IV=serie shoshonítica. Para la explicación de los símbolos utilizados, ver la leyenda de la Figura 7.



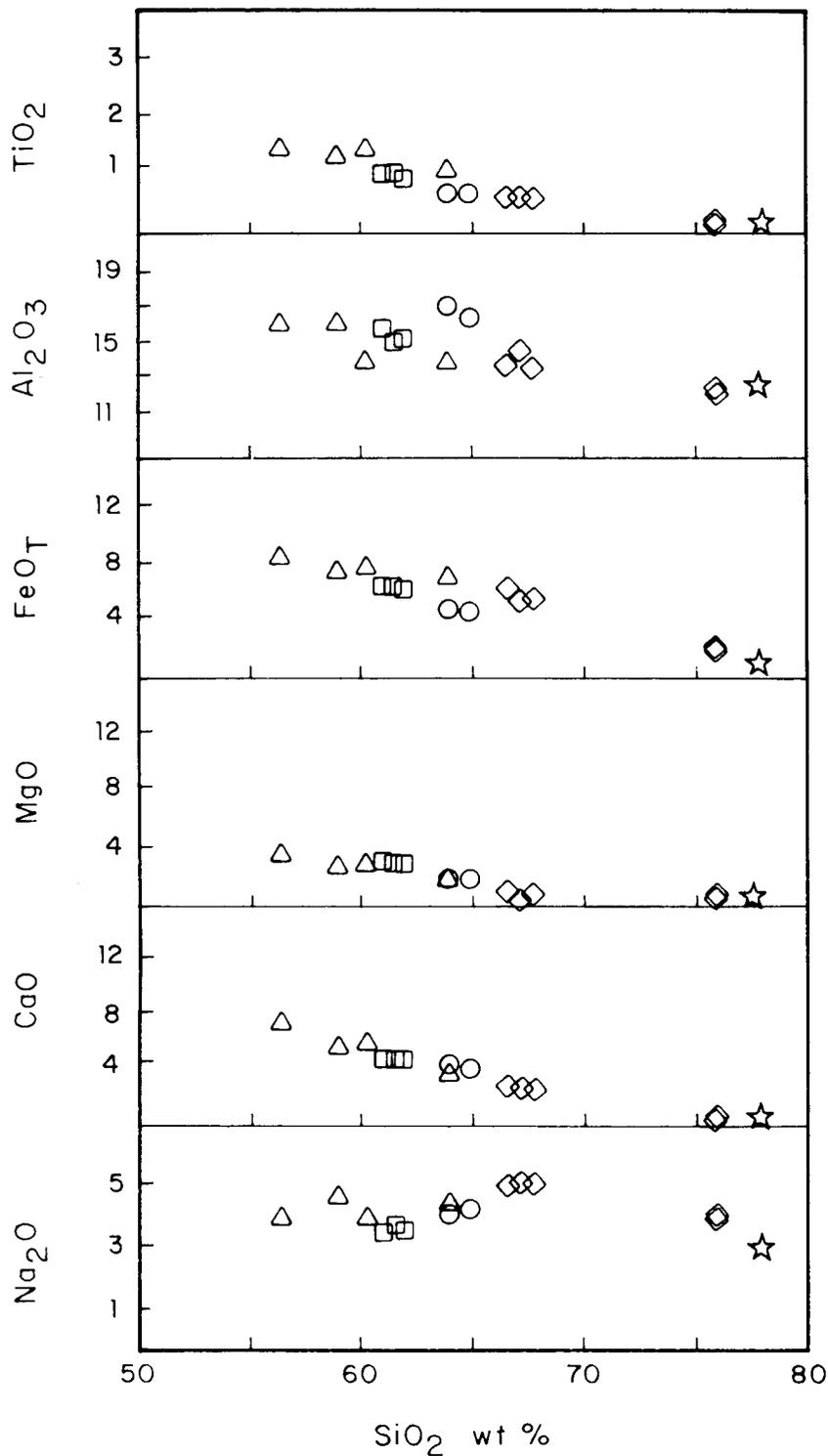


Fig. 10. Diagramas "Harker" de algunos elementos mayores versus  $\text{SiO}_2$  para las muestras de Huichapan. Para la explicación de los símbolos utilizados, ver la leyenda de la Figura 7.

#### BIBLIOGRAFIA

AGUILAR-Y-VARGAS, V.H. 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), 26, 195-272.

ANGUITA, F., S.P. VERMA, M. MILAN, L. GARCIA CACHO y D. SAMANIEGO-M., 1991a. La confirmación de una hipótesis de trabajo: Una nueva caldera en el centro del Cinturón Volcánico Mexicano. *Bol. IIE*, 15, 27-31.

ANGUITA, F., S.P. VERMA, L. GARCIA CACHO, M.

- MILAN y D. SAMANIEGO-M., 1991b. Mazahua: una nueva caldera en el Cinturón Volcánico Mexicano. *Geofis. Int.*, 30, 149-172.
- CARRASCO-NUÑEZ, G., M. MILAN y S.P. VERMA, 1988. Fases volcánicas de la Caldera de Amealco. *Geomimet*, 153, 69-82.
- CARRASCO-NUÑEZ, G., M. MILAN y S.P. VERMA, 1989. Geología del Volcán Zamorano, Estado de Querétaro. *Rev. Inst. Geol. UNAM*, 8, 194-201.
- CEDILLO, R.F., 1975. Estudio geohidrológico de los valles de Tecozautla-Huichapan, Edo. de Hidalgo. *Tesis Profesional Ing. Geól., U.N.A.M.*
- DE LA FUENTE GARZA, G. y S.P. VERMA, 1991. Aparatos volcánicos en la parte centro-occidental del Cinturón Volcánico Mexicano. *Actas Fac. Cienc. Tierra UANL Linares (Eds. S.P. Verma, J.A. Ramírez F., C.O. Rodríguez de B., J.M. Barbarín C., G. Izquierdo M., M.A. Armienta H. & D.J. Terrell)*, 6, 93-97.
- DEMANT, A., 1978. Características del eje neovolcánico transmexicano y sus problemas de interpretación. *Rev. Inst. Geol. UNAM*, 2, 172-187.
- DEMANT, A., 1981. L'axe néo-volcanique transmexicain - étude volcanologique et pétrographique - signification géodynamique. Tesis doctoral, 259 p. y appendix, 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. *Rev. Inst. Geol. UNAM*, 75, 813-860.
- FERRIZ, H. y G.A. MAHOOD, 1986. Vulcanismo riolítico en el eje neovolcánico mexicano. *Geofis. Int.*, 25, 117-156.
- GUEVARA, M. y S.P. VERMA, 1987. Comparison of matrix effect correction and direct intensity-concentration relationship methods for major element analysis of geological materials by X-ray spectrometry. *X-Ray Spectrom.*, 16, 87-91.
- HERRERA, F.J. y M. MILAN, 1981. Estudio geológico de las zonas geotérmicas de Yenthó, Pathé y Taxidó, Estados de Hidalgo y Querétaro. *C.F.E. Informe Técnico*, 13-81.
- HUCHINSON, C.S., 1974. Laboratory handbook of petrographic techniques. John-Wiley & Sons, N. Y., 527 p.
- LE BAS, M.J., R.W. LE MAITRE, A. STRECKEISEN y B. ZANETTIN, 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J. Petrol.*, 27, 745-750.
- MILAN, M., 1982. Ampliación del estudio geológico de las zonas geotérmicas de Yenthó, Pathé y Taxidó, Hidalgo, México. *C.F.E. Informe Técnico*, 68-83.
- MILAN, M. y G. CARRASCO-NÚÑEZ, 1988. Las calderas de Huichapan y Amealco: Similitudes y diferencias. *IX Conv. Nal. Resúmenes*, 58-59.
- MILAN, M. y J.J. HERRERA-F, 1987. Aspectos geológicos importantes de la exploración geotérmica del campo de Pathé, estados de Hidalgo y Querétaro. *Geotermia, Rev. Mex. Geoener.*, 3, 31-39.
- MILAN, M., G. CARRASCO-NÚÑEZ y S.P. VERMA, 1987. Geología y geoquímica de la Caldera de Huichapan. *Memorias 50 Aniversario de la Creación de la Carrera de Geología en la UNAM, Facultad de Ingeniería, UNAM*, p. 66 (resumen).
- MILAN, M., G. CARRASCO-NÚÑEZ y S.P. VERMA, 1988. Muestreo y resultados preliminares del estudio petrológico transversal al Cinturón Volcánico Mexicano. *Geomimet*, 151, 18-34.
- MOOSER, F., 1972. The Mexican Volcanic Belt: Structure and tectonics. *Geofis. Int.*, 12, 55-70.
- NAVARRO-L., I., 1992. Balance petrológico de rocas volcánicas de la Caldera de Huichapan, Hidalgo, México. Tesis Profesional Ingeniero Geólogo-Mineralogista, Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, México, 61 p.
- NEGENDANK, J.F.W., R. EMMERMANN, F. MOOSER, U. SEIFFERT-KRAUS y H.J. TOBSCHALL, 1981. Evolution of some Tertiary and Quaternary central volcanoes of the TMVB and possible different positions of the Benioff-Zone. *Zbl. Geol. Paläont.*, 1, 183-194.
- NEGENDANK, J.F.W., R. EMMERMANN, R. KRAWCZYK, F. MOOSER, H. TOBSCHALL y D. WERLE, 1985. Geological and geochemical investigations on the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofis. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 2 (Ed. S.P. VERMA), 24, 477-575.
- NICHOLS, R.C., 1970. The geology and geochemistry of the Pathe geothermal zone, Hidalgo, Mexico. Ph. D. Thesis, The University of Oklahoma, Graduate School, 116 p.

- NIXON, G.T., 1982. The relationship between Quaternary volcanism in central Mexico and the seismicity and structure of subducted ocean lithosphere. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 93, 514-523.
- ORTUÑO-ARZATE, S., 1981. Geología del área Tequisquiapan-Cardonal, Estado de Hidalgo y Querétaro. Tesis Profesional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional, 57 p.
- PAL, S., M. LOPEZ-M., J. PEREZ-R. y D.J. TERRELL, 1978. Magma characterization in the Mexican Volcanic Belt (Mexico). *Bull. Volcanol.*, 41, 179-189.
- PECCERILLO, A. y S.R. TAYLOR, 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58, 63-81.
- 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., 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. In: R.S. THORPE (Ed.) Andesites, 137-147, *John Wiley*.
- SEGERSTROM, K., 1961. Geología del sureste del estado de Hidalgo y del noreste del estado de México. *Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol.*, 13, nos. 3 y 4.
- THORTON, C.P. y O.F. TUTTLE, 1960. Chemistry of igneous rocks. I. Differentiation Index. *Am. J. Sci.*, 258, 664-684.
- VERMA, S.P., 1987. Mexican Volcanic Belt: Present state of knowledge and unsolved problems. *Geofís. Int.*, Special Volume on Mexican Volcanic Belt - Part 3B (Ed. S. P. Verma), 26, 309-340.
- VERMA, S.P., Editor, 1991. Calderas: Genesis, structure and unrest. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 47, 208 p.
- VERMA, S.P. y V.H. AGUILAR-Y-VARGAS, 1988. Bulk chemical composition of magmas in the Mexican Volcanic Belt (Mexico) and inapplicability of generalized arc-models. *Chem. Erde*, 48, 203-221.
- VERMA, S.P., G. CARRASCO-NUÑEZ y M. MILAN, 1991a. Geology and geochemistry of Amealco Caldera, Qro., Mexico. In: S.P. VERMA (Ed.) *Calderas: Genesis, Structure and Unrest*, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 47, 105-127.
- VERMA, S.P., T. BESCH, M. GUEVARA y SCHULZ-DOBRICH, 1991b. Determinación de elementos traza y elementos mayores en estándares geoquímicos internacionales de referencia por fluorescencia de rayos X. *Actas Fac. Cienc. Tierra UANL Linares* (Eds. S.P. Verma, J.A. Ramírez F., C.O. Rodríguez de B., J.M. Barbarín C., G. Izquierdo M., M.A. Armienta H. & D.J. Terrell), 6, 17-21.
- VERMA, S.P., M. CABRERA-VÁZQUEZ, A. CARMONA-POZOS, D. SAMANIEGO-M., I. NAVARRO-L., A. SALAZAR-V. y I. SÁNCHEZ, 1991c. RIGD (Record Indexed Geoscientific Data): Reporte de Progreso. *Actas Fac. Cienc. Tierra UANL Linares* (Eds. S.P. Verma, J.A. Ramírez F., C.O. Rodríguez de B., J.M. Barbarín C., G. Izquierdo M., M.A. Armienta H. & D.J. Terrell), 6, 23-28.
- VERMA, S.P., I. NAVARRO-L. y L. GARCIA CACHO, 1992. Major element geochemistry and mineralogy of Huichapan caldera, Hidalgo, Mexico. *J. South Am. Earth Sci.*, 5, 327-336.
- WRIGHT, J.B., 1969. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis. *Geol. Mag.*, 106, 370-384.
- YÁÑEZ, C., 1984. Exploración geológica de la Caldera de Huichapan, Estado de Hidalgo. *Soc. Geol. Mex. VII Conv. Nal.*, 171 (resumen).
- 
- M. Milán<sup>1,2</sup>, C. Yáñez<sup>2</sup>, I. Navarro-L.<sup>1</sup>, S.P. Verma<sup>1</sup>, y G. Carrasco-Núñez<sup>1,3</sup>
- <sup>1</sup>Departamento de Geotermia, Div. Fuentes de Energía Instituto de Investigaciones Eléctricas Apdo. Postal 475, Cuernavaca, Mor. 62000, México.
- <sup>2</sup>Div. Ciencias de la Tierra, Instituto Politécnico Nacional Ticomán, D.F., México.
- <sup>3</sup>Instituto de Geología, UNAM Ciudad Universitaria, D.F. 04510, México.