

y algunas localidades adyacentes. *Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geol.*, inédito.

RODRÍGUEZ-TORRES, R. (1970) Geología metamórfica del área de Acatlán, Estado de Puebla. *Soc. Geol. Mex. Libro-Guía de la excursión, México-Oaxaca*, pp. 51-54.

SCHMITTER-VILLADA, E. (1970) Nelsonita de ilmenita y magnetita de la región de Huitzo, Estado de Oaxaca. *Soc. Geol. Mex. Libro-Guía de la excursión, México-Oaxaca*, pp. 167-173.

VAIL, J. R. (1965) An outline of the geochronology of the late-Precambrian formations of eastern central Africa. *Royal Soc. London Proc. Ser. A*, 284, pp. 354-369.

WINKLER, H. G. F. (1965) *Petrogenesis of the metamorphic rocks*, Springer-Verlag, Berlin.

LAS FASES DEL VULCANISMO EN LA REGIÓN
DE TLANCHINOL (HIDALGO, MÉXICO),
SEGÚN DATOS PALEOMAGNÉTICOS Y GEOQUÍMICOS

Claude ROBIN *

Claude BOBIER **

* Centre de Recherches géodynamiques - La Darse - 06 Ville-franche Sur mer - France -
Investigador huésped del Instituto de Geología de la UNAM, durante el año 1972.

** Misma dirección en Francia.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN: EL CONTEXTO GEOLÓGICO DE LA SERIE ESTUDIADA	54
I. LAS PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LOS DERRAMES DE LA SERIE DE TLANCHINOL	56
1) Generalidades sobre algunas propiedades magnéticas de las rocas volcánicas	56
2) El análisis de las imantaciones termorremanentes de las lavas de Tlanchinol. Interés geológico y métodos de estudio	58
3) Los datos del estudio paleomagnético	61
II. LOS DATOS GEOQUÍMICOS Y PETROGRÁFICOS-MECANISMO DEL VULCANISMO	66
III. CONCLUSIÓN-INTERÉS DE LOS DATOS MAGNÉTICOS	78
Literatura citada	84

LAS FASES DEL VULCANISMO EN LA REGIÓN DE TLANCHINOL (HIDALGO, MÉXICO), SEGÚN DATOS PALEOMAGNÉTICOS Y GEOQUÍMICOS

RESUMEN

El análisis paleomagnético de una serie aparentemente homogénea de 22 derrames sobrepuestos que forman una sierra, testigo del vulcanismo de la Huasteca (coordenadas medidas 21°N - $98^{\circ}40'\text{W}$), demuestra que la actividad volcánica de esa serie se ha desarrollado durante 4 fases interrumpidas por reposos de duraciones desconocidas.

Si la primera fase corresponde a un periodo de campo geomagnético inverso, las otras tres se deben a las variaciones en dirección del campo local durante una o varias fases de campo normal. Estas etapas se precisan por los análisis químicos y petrográficos y permiten distinguir las diferencias de evolución de las lavas entre los grupos de derrames definidos magnéticamente, diferencias subrayadas por la alternancia de ciclos mugearitas-basaltos. Estos datos patentizan que el cálculo de la dirección del campo dipolar a partir de la magnetización termorremanente de las lavas en una serie de tipo hawaiano, semejante a la de Tlanchinol, debe hacerse sólo después de un análisis serio de la actividad volcánica. El paleomagnetismo contribuye a este análisis, con otros métodos de investigación, de laboratorio, o de campo. Esta serie, de edad astiano probable, permite el cálculo de la posición del polo ($81^{\circ}30'\text{N}$ - 116°W).

RESUME

L'analyse paléomagnétique d'une série apparemment homogène de 22 coulées superposées constituant une butte témoin du volcanisme de la Huasteca (coordonnées moyennes 21°N - $98^{\circ}40'\text{W}$), montre que l'activité volcanique de cette série a eu lieu en quatre phases séparées par des temps de repos de durées inconnues.

Si la première phase correspond à une période de champ inverse, la mise en évidence des trois autres phases est due à l'existence des variations de la direction du champ local durant une ou plusieurs périodes de champ normal. Ces étapes sont précisées par les analyses géochimiques et pétrographiques qui montrent l'existence de différences d'évolution des laves entre les groupes de coulées définis magnétiquement, différences soulignées par l'alternance de cycles mugearites - basaltos. Ces résultats montrent que le calcul de la direction du champ dipolaire à partir des aimantations des laves d'une série de

type hawaïen comparable a celle de Tlanchinol no doit être fait qu'après une analyse sérieuse de l'activité volcanique, le paléomagnétisme y contribuant avec d'autres méthodes de laboratoire et de terrain. Cette série d'âge astien probable, permet de calculer la position du pôle ($81^{\circ}30'N - 116^{\circ}W$).

ABSTRACT

Paleomagnetic analysis of 22 superposed lava flows of homogeneous appearance forming a mountain range in the Huasteca Region (Mean position $21^{\circ}N - 98^{\circ}40'W$) shows that the vulcanism took place during four active stages separated in time by quiet periods of unknown duration.

If the first stage occurred during an epoch of reversed geomagnetic field, the three others are pointed out by variations in direction of the local field during one or several epochs of normal polarity. Geochemical and petrographic analysis give more information about these active stages and permit the recognition of differences, in evolution of the lavas within the groups of lavas defined magnetically, such differences emphasized by alternation of mugearite and basalt.

These results show, also, that to obtain a good estimate of the direction of the dipolar component of the local geomagnetic field, using direction of thermoremanent magnetization in hawaiian-type lavas, similar to that of Tlanchinol, we must first make a very precise analysis of volcanic activity of determine active stages. In such a work it is necessary to use paleomagnetic results along with those given by others field and laboratory methods. The lavas of Tlanchinol, of probable Astien age, give as pole position $81^{\circ}30'N - 116^{\circ}W$.

INTRODUCCIÓN

EL CONTEXTO GEOLÓGICO DE LA SERIE ESTUDIADA

En 1966 comenzó C. Bobier el estudio del vulcanismo en la Huasteca, en relación con las investigaciones perseguidas por la *Mission Française au Mexique et en Amérique Latine*.

Entre Pachuca y Huejutla se realizaron varias observaciones destinadas a los análisis paleomagnéticos y químicos. Una de ellas se refiere a las rocas básicas que se encuentran al norte, al lado de la carretera que va de Tlanchinol a Huejutla (figura 1).

Esta serie, aparentemente homogénea, está constituida por 22 derrames sobrepuestos, de lava basáltica compacta, dominados por tobas. El espesor de los derrames que se escalonan entre 1240 y 1500 metros de altitud, se re-

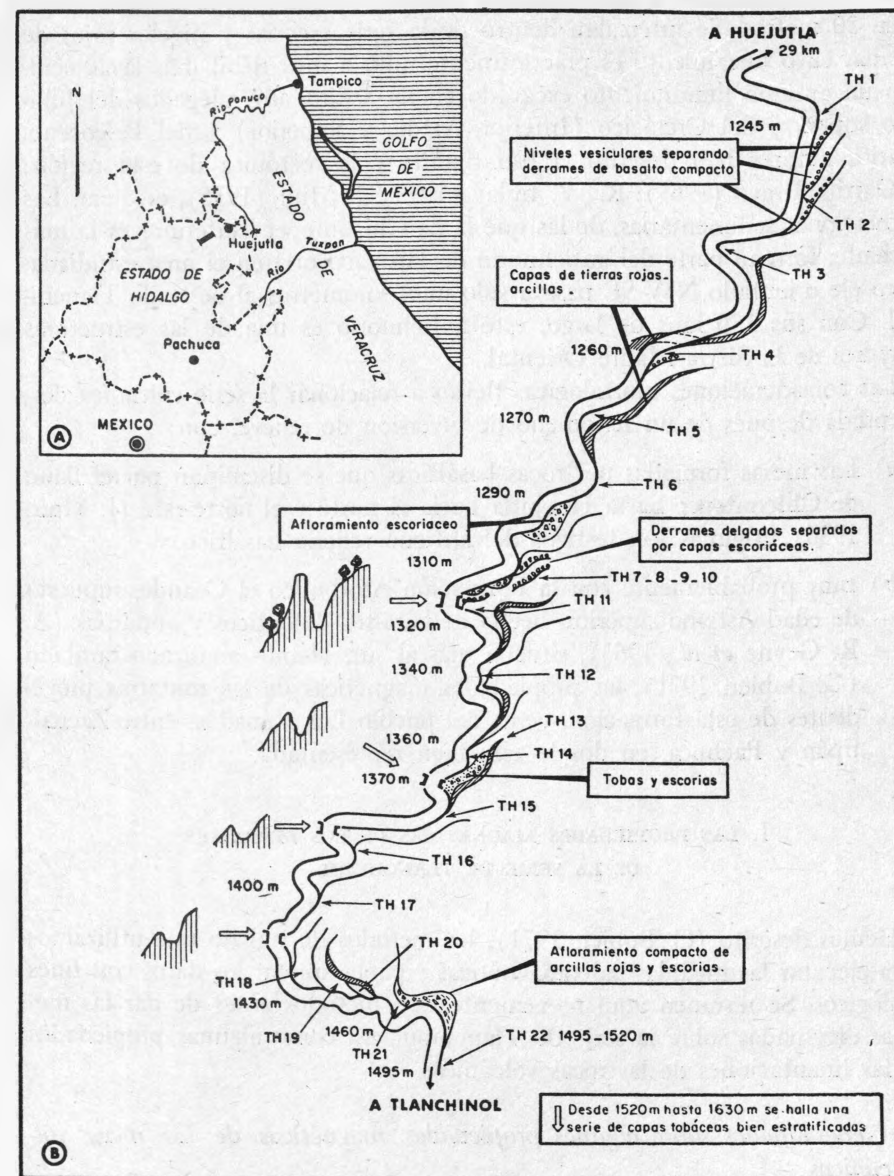


Figura 1. Croquis de una porción del Estado de Hidalgo, entre Tlanchinol y Huejutla.

duce ocasionalmente a unos cuantos metros, aunque puede alcanzar también 30 metros. Se intercalan dentro de la serie escorias y niveles rojos de arcillas cuyo buzamiento es prácticamente nulo o muy débil. Las lavas ocultan un antiguo hundimiento excavado en los sedimentos plegados del Jurásico superior, del Cretácico (Inferior, Medio y Superior) y del Paleoceno. Varios autores han descrito la estratigrafía y la tectónica de esta región: J. Carrillo-Bravo (1965); R. W. Imlay (1943); J. Muir (1936), etcétera. Las formaciones sedimentarias, de las que la de Chicontepec (inferior) es la más reciente, forman parte del anticlinorio de Huayacocotla en el área estudiada, cuyo eje orientado NW-SE pasa a sólo unos kilómetros al oeste de Tlanchinol. Con sus 150 kms de largo, este anticlinorio es una de las estructuras mayores de la Sierra Madre Oriental.

Las consideraciones morfológicas llevan a relacionar la serie volcánica desprendida después de un fenómeno de inversión de relieve, con:

- a) Las mesas formadas por rocas basálticas que se diseminan por el llano de Chicontepec hasta Huejutla hacia el norte y el norte-este (J. Muir, 1936). Algunas son testigos del antiguo relleno basáltico y
- b) muy probablemente con la Formación Atotonilco el Grande, supuesta de edad Astiano superior, hecha de basaltos doleríticos y andestias (A. R. Geyne *et al.*, 1963), situada más al sur. Hemos analizado también (C. Bobier, 1971), las propiedades magnéticas de las muestras procedentes de esta formación, cerca del pueblo Los Venados, entre Zacualtipán y Pachuca, en donde está bien representada.

I. LAS PROPIEDADES MAGNÉTICAS DE LOS DERRAMES DE LA SERIE DE TLANCHINOL

Hemos descrito (C. Bobier, 1971), los métodos de trabajo que utilizamos para ejecutar las medidas paleomagnéticas y para explotar los datos con fines geológicos. Se resumen aquí brevemente esos métodos antes de dar las medidas efectuadas sobre la serie de Tlanchinol, así como algunas propiedades de las imantaciones de las rocas volcánicas.

- 1) *Generalidades sobre algunas propiedades magnéticas de las rocas volcánicas*
 - a) *Imantación adquirida durante el enfriamiento*
Imantación termorremanente

Durante el enfriamiento de una lava, la temperatura de los minerales ferromagnéticos varía entre la del punto de Curie y la temperatura ordinaria. Cada mineral adquiere entonces, una imantación termorremanente. La suma de estas imantaciones remanentes elementales, constituye la llamada imantación remanente de la roca. Neel (1949), elaboró la teoría de dicha imantación, E. Thellier (1938) y T. Nagata (1943), y posteriormente sus alumnos, realizaron un estudio experimental preciso de estas imantaciones definiendo sus principales características.

b) *Imantaciones adquiridas a temperatura estable*

α) Imantación remanente de histéresis - imantación remanente isoterma

A. Roche (1953) y F. Rimbart (1958) hicieron ver que la intensidad de las imantaciones remanentes isotermas debidas a los rayos decrece muy pronto según la distancia del punto de impacto a la roca; por lo que se deberán coleccionar muestras lo más distante posible.

β) Arrastre magnético e imantación viscosa remanente

La importancia de esta característica es muy variable según las rocas. En ciertos casos, la imantación remanente crece linealmente con el logaritmo del tiempo de acción del campo.

Apoyándose sobre estas características, E. Thellier (1959), propuso un ensayo para estimar la importancia de la imantación viscosa en las rocas y en las arcillas cocidas.

γ) Imantación remanente química

Dentro de las rocas volcánicas, pueden ocurrir fenómenos semejantes durante la aparición de minerales nuevos (devitrificación de vidrios volcánicos, aportaciones fumarólicas o hidrotermales) o bien, durante la alteración de minerales existentes. Pero, dada la estrecha similitud que existe entre la imantación termorremanente y la imantación remanente química, es muy difícil distinguirla.

- c) *La naturaleza de la imantación remanente natural de las rocas volcánicas. Su utilización en geología*

E. Thellier (1938), mostró que generalmente, dentro de una roca las imantaciones termorremanentes y la imantación remanente isoterma admitida en campo débil, se sobreyacen entre sí pero no se suman. Sus efectos solos se suman geométricamente.

La imantación remanente natural de una roca puede entonces ser de origen múltiple. Así, es necesario analizar con precisión la naturaleza de las imantaciones remanentes para reconocer las que pueden enterarnos en relación a las épocas geológicas.

Este resumen que se acaba de hacer, muestra que dentro de las lavas las imantaciones termorremanentes pueden interesar al geólogo ya que permiten reconocer la dirección y la intensidad del campo magnético terrestre que existían en el lugar y en la época de formación; pero dadas las propiedades magnéticas de las rocas es necesario analizar, para cada formación, la imantación de un conjunto de muestras distantes con objeto de:

- α) Calcular la dirección que excluye la influencia de las heterogeneidades de la roca.
- β) Buscar las imantaciones características de todo un derrame (termorremanente, química o viscosa), eliminando las imantaciones más o menos fortuitas que caracterizan sólo una muestra y no una formación (imantación remanente isoterma y a veces viscosa).

2) *El análisis de las imantaciones termorremanentes de las lavas de Tlanchinol. Interés geológico y métodos de estudio*

a) *La imantación termorremanente de los derrames y el campo geomagnético medio*

En razón de la independencia de las imantaciones admitidas dentro de gamas de temperaturas diferentes, los parámetros de la imantación termorremanente total de una roca volcánica, refleja los valores medios de los parámetros del campo geomagnético durante todo el tiempo de enfriamiento. Para derrames como los que se estudian en este trabajo, dichos tiempos varían entre unas horas y unos años. Por consecuencia, y tomando en cuenta la naturaleza del campo geomagnético, se observa que la dirección, el sentido y la intensidad de las imantaciones termorremanentes de los derrames de Tlanchinol, reflejan los parámetros correspondientes del campo geomagnético medio en el lugar, durante la época de las erupciones.

b) *Interés geológico de las imantaciones termorremanentes*

El análisis de las imantaciones termorremanentes de los derrames de Tlanchinol, presentará interés si podemos contestar a una de las siguientes preguntas:

—¿Puede el campo geomagnético constituir un buen criterio estratigráfico?

—Tomando en cuenta el hecho de la evolución en el tiempo del campo geomagnético medio, existen fenómenos geológicos que, evolucionando en la misma escala de tiempo, ¿pueden ser analizados mediante el estudio de las imantaciones termorremanentes?

Por lo que concierne a la primera pregunta, es necesario recordar el hecho de que las variaciones seculares del campo geomagnético arrastran considerables variaciones en la dirección del campo medio (Chapmann y Bartels, 1941); y que, recíprocamente, derrames de edades diferentes, pueden tener la misma dirección de imantación. De hecho, la dirección y el sentido de las imantaciones de las rocas volcánicas no representan buenos criterios estratigráficos, pero permiten establecer correlaciones dentro de conjuntos volcánicos (C. Bobier, 1970-71). Al contrario, la dirección de un campo dipolar, calculada a partir de direcciones de imantaciones termorremanentes de un gran número de derrames distantes en el tiempo, es susceptible de constituir un criterio estratigráfico (A. Roche, 1970).

En relación con la segunda pregunta, se examina la actividad volcánica que dio nacimiento a series como las de Tlanchinol. Se sabe que dicha actividad es discontinua, y que la mayoría de los complejos volcánicos resultan de la acumulación de productos emitidos durante periodos de actividades cuya repartición en el tiempo se lleva a cabo al seguir un ritmo y formar secuencias características en cada complejo. Las gamas de frecuencia de las variaciones de la actividad volcánica son iguales a las gamas de las variaciones del campo geomagnético medio. Los derrames emitidos durante un mismo periodo de actividad cubriendo unos años, deben presentar direcciones de imantación semejantes, mientras que aquellos que pertenecen a periodos separados por unas décadas presentarán frecuentemente direcciones de imantaciones diferentes. En consecuencia, el análisis de las imantaciones termorremanentes de una serie de derrames, debe permitir hacer un análisis de los periodos de actividad de un volcán. Sin embargo, este análisis tiene límites ya que, tomando en cuenta las variaciones seculares del campo geomagnético, no se puede llegar a datos precisos en el sentido entendido por los físicos, llegando solamente a la evidencia de hechos muy probables. Ade-

más, conviene recordar lo inaproximado que son los métodos geológicos que permiten correlaciones en rocas que difieren unos años en edad. En particular, las fechas radiocronológicas están todavía muy lejos de permitir abordar tales correlaciones.

c) Métodos de análisis

α) Orientación de las muestras

Sobre cada muestra, se coloca una capa de yeso sobre la cual se forma una superficie horizontal con un nivel. Se traza, además de la dirección del norte magnético, la dirección del sol, definida por la sombra de un plomo. Conociendo el momento de la orientación, la hora legal y las coordenadas geográficas del lugar, se puede calcular el azimut del sol y la orientación de la muestra con respecto al norte geográfico en el laboratorio.

β) Medida de las imantaciones

En el laboratorio se saca la muestra con objeto de introducirla en un cubo de yeso, una de cuyas caras es paralela al plano horizontal formado durante el estudio. Las imantaciones fueron medidas con ayuda de un inductómetro de rotación Thellier, construido por la Sociedad Sercel, según el modelo hecho en el Laboratorio de Geomagnetismo del Parc St. Maur (E. Thellier, 1967). Si x e y representan las componentes horizontales, y z la componente vertical, se puede escribir:

$$\operatorname{tg} I = \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad \operatorname{tg} d = \frac{y}{x}$$

$$D = d - \delta \text{ con } \delta = \text{azimut del eje } O_x$$

el momento total $M =$

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

δ) Análisis de las imantaciones

La naturaleza de las imantaciones fue analizada por la técnica de desimantación en campo alternativo (F. Rimbert, 1958).

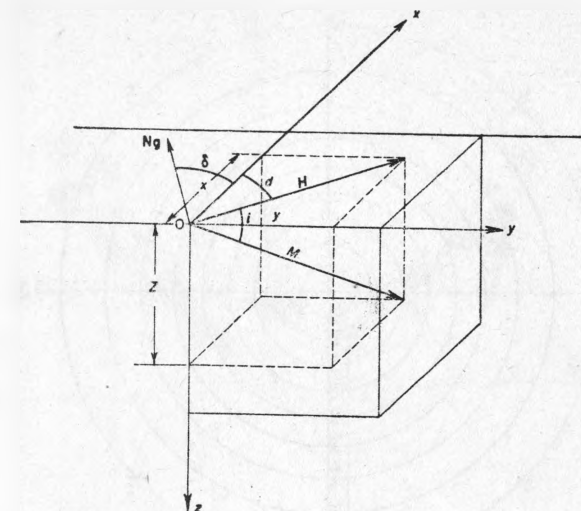


Figura 2

Para cada muestra, se mide el momento, quedando después acción de campos alternativos de intensidad creciente (0, 50 α , 100 α , etcétera...). La naturaleza de las imantaciones está determinada teniendo en cuenta (figuras 3 y 4):

—La variación de la dirección del momento residual (figura 3, b, c, d, y 4 b, c, d.).

$$\frac{M_h}{M_o}$$

—La forma de la gráfica curva $\frac{M_h}{M_o} = f(H)$, donde:

$$\frac{M_h}{M_o}$$

M_h = momento residual después de la acción de un campo alternativo H .

M_o = momento inicial.

Los programas de tratamiento en computadoras permiten hacer los cálculos y trazar la mayoría de las gráficas.

3) Los datos del estudio paleomagnético

a) Dirección de las imantaciones

Los datos están representados por las tablas I y II.

Mientras que la serie aparece homogénea en el campo, el paleomagnetismo pone en evidencia varios periodos de actividad (figura 5). Una primera fase

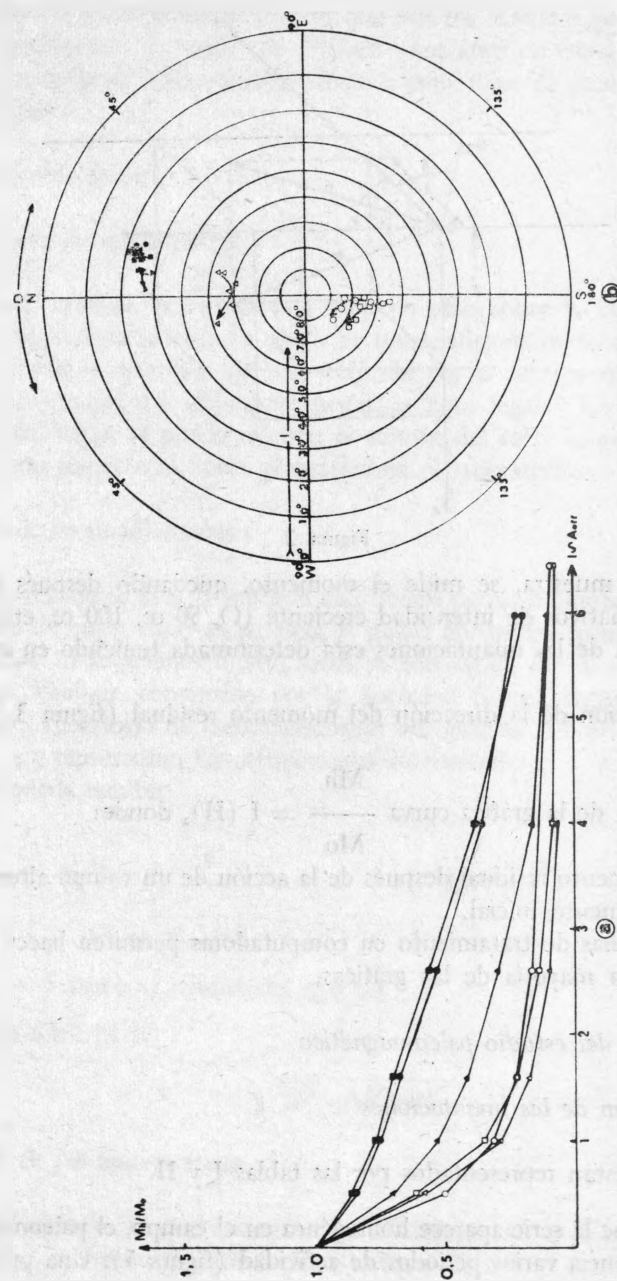


Fig. 3-A

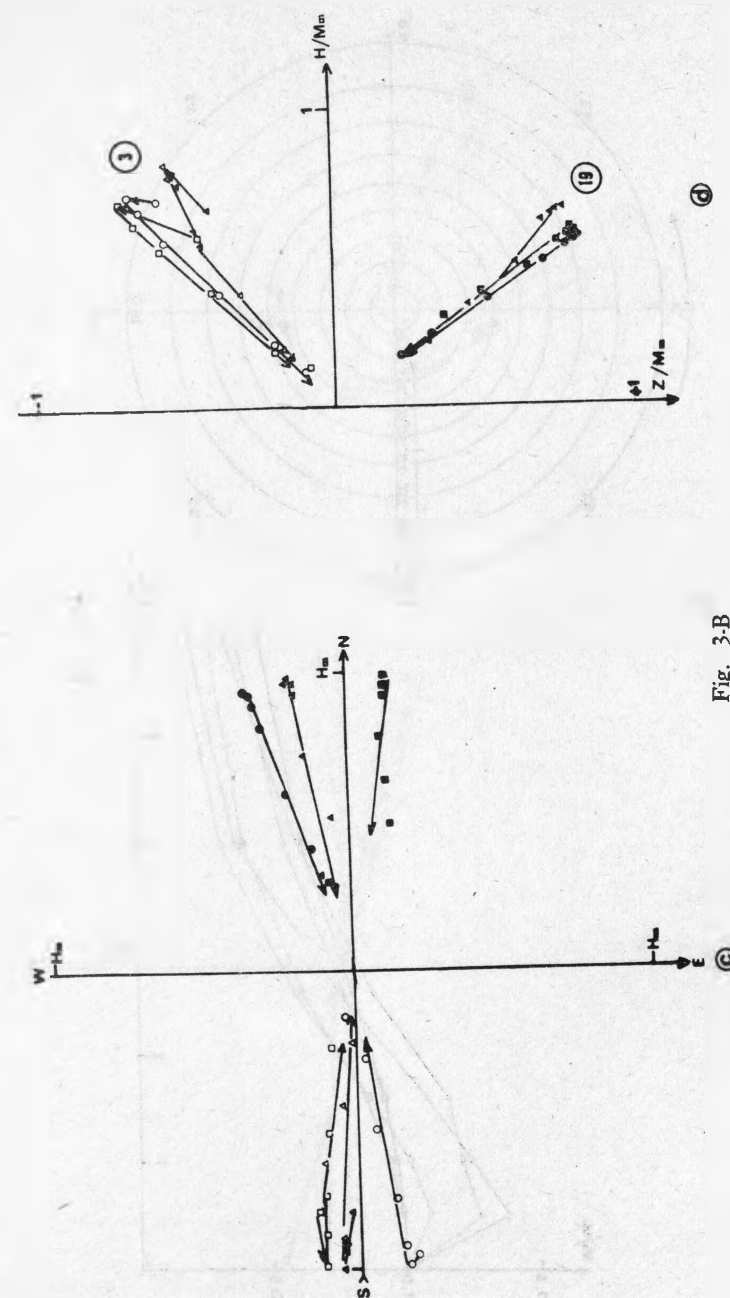


Fig. 3-B

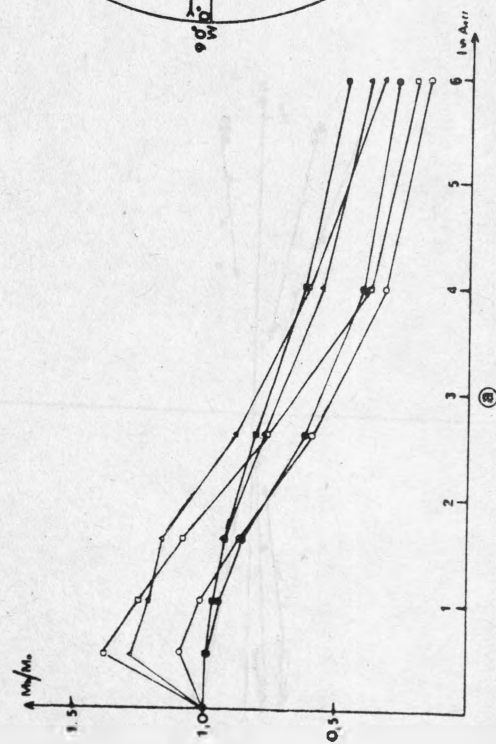
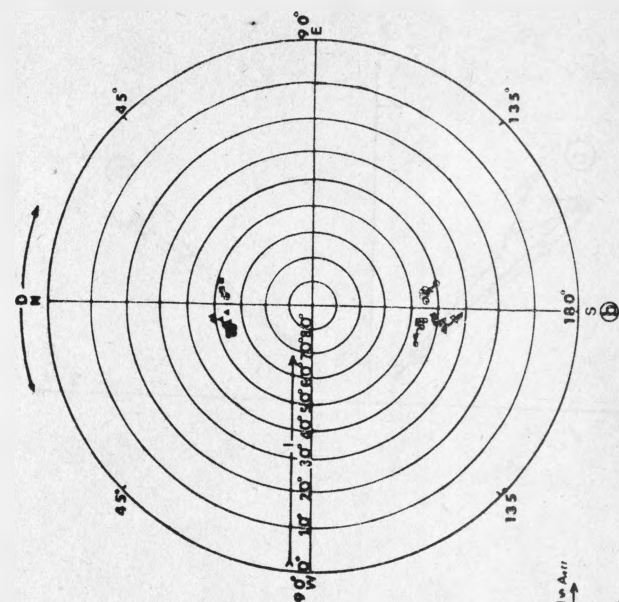


Fig. 4-A

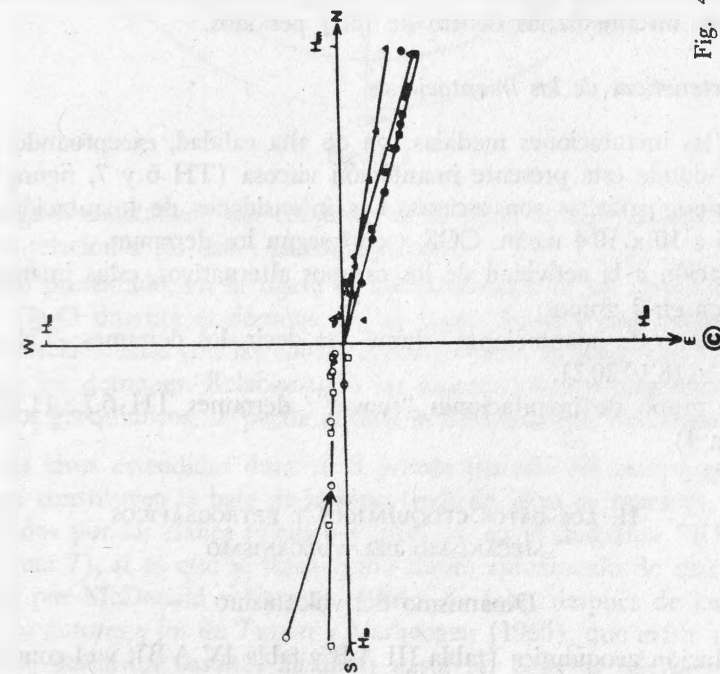
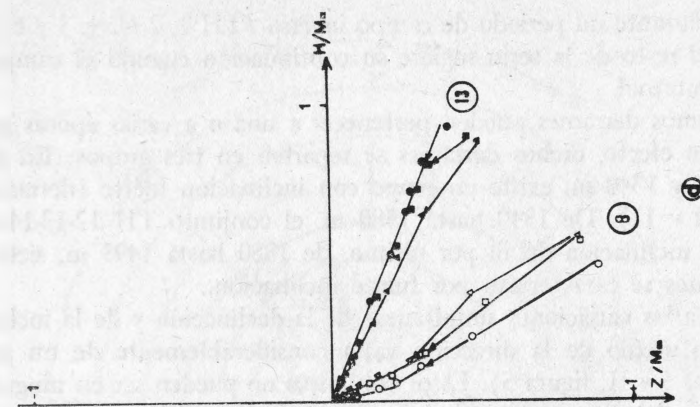


Fig. 4-B

concluyó durante un periodo de campo inverso (TH 1, 2, 3, 4, 5 y 6), mientras que el resto de la serie sugiere su continuación cuando el campo tenía dirección normal.

Los últimos derrames pueden pertenecer a una o a varias épocas geomagnéticas. En efecto, dichos derrames se reparten en tres grupos: En la base, entre 1300 y 1340 m, existe un grupo con inclinación fuerte (derrames TH 7, 8, 9, 10 y 11). De 1340 hasta 1380 m, el conjunto TH 12-13-14-15 presenta una inclinación débil; por último, de 1380 hasta 1495 m, siete derrames patentes se caracterizan por fuerte inclinación.

Debido a las variaciones simultáneas de la declinación y de la inclinación, el término medio de la dirección varía considerablemente de un grupo a otro (tablas I y II, figura 5). Estos conjuntos no pueden ser en ningún caso, el producto del azar, pues son el resultado de la emisión total de estas lavas de imantación normal durante el transcurso de tres fases de actividad, ya que la dirección del campo medio varía de una fase a otra, siguiendo la variación secular del campo terrestre. En lo que concierne al derrame TH6, es posible que su emisión tuviera lugar durante el periodo de transición del campo terrestre que precede al periodo de campo normal contemporáneo de los derrames TH 7-8-9-10-11. Embleton (1969), puso en evidencia las direcciones intermediarias dentro de tales periodos.

b) Características de las imantaciones

Todas las imantaciones medidas son de alta calidad, exceptuando en dos derrames donde está presente imantación viscosa (TH 6 y 7, figura 3); las imantaciones parásitas son escasas. Las intensidades de imantación varían sólo de 5 a 10×10^{-4} u.e.m. CGS / cm^3 según los derrames.

En relación a la actividad de los campos alternativos, estas imantaciones se reparten en 2 grupos:

—Un grupo de imantaciones “duras”, es decir, los derrames: TH 1,2,3,4, 5,9,10,14,16,18,19,20,21.

—Otro grupo de imantaciones “suaves”: derrames TH 6,7,8,11,12,13,15, 17 (figura 4).

II. LOS DATOS GEOQUÍMICOS Y PETROGRÁFICOS MECANISMO DEL VULCANISMO

Dinamismo del vulcanismo

La evolución geoquímica (tabla III A-B y tabla IV A-B), y el conocimien-

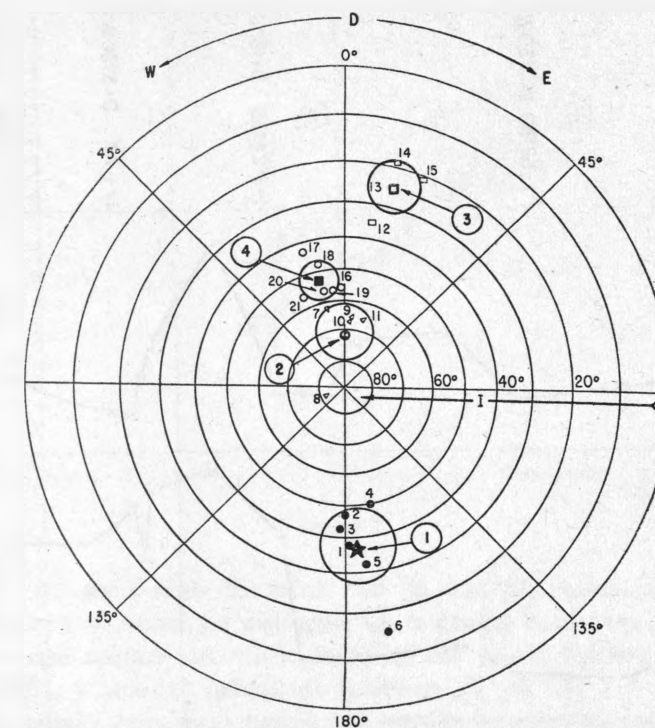


Figura 5

to petrográfico detallado del conjunto de la serie, apoyan la hipótesis fundada en relación a los datos paleomagnéticos.

Se han presentado, en la figura 6, las variaciones de los elementos SiO_2 , K_2O y Na_2O durante el derrame de las lavas. Aparece una evolución que puede correlacionarse con las épocas geomagnéticas, es decir, con la edad relativa de los derrames. Relacionando las descripciones petrográficas a estos elementos geoquímicos, se puede definir la dinámica del vulcanismo así:

a) Las lavas extendidas durante el primer periodo del campo geomagnético, que constituyen la base de la serie (más de 50 m de espesor), están representados por los clanes toleítico y alcalino, en el diagrama SiO_2 - Alcalinos (figura 7), si es que se toma como límite aproximado de esas zonas la definida por McDonald y Katsura (1964). Se sabe, después de los trabajos de dichos autores y los de Turner y Verhoogen (1960), que existe una gama completa, desde los basaltos alcalinos hasta los basaltos toleíticos, a pesar

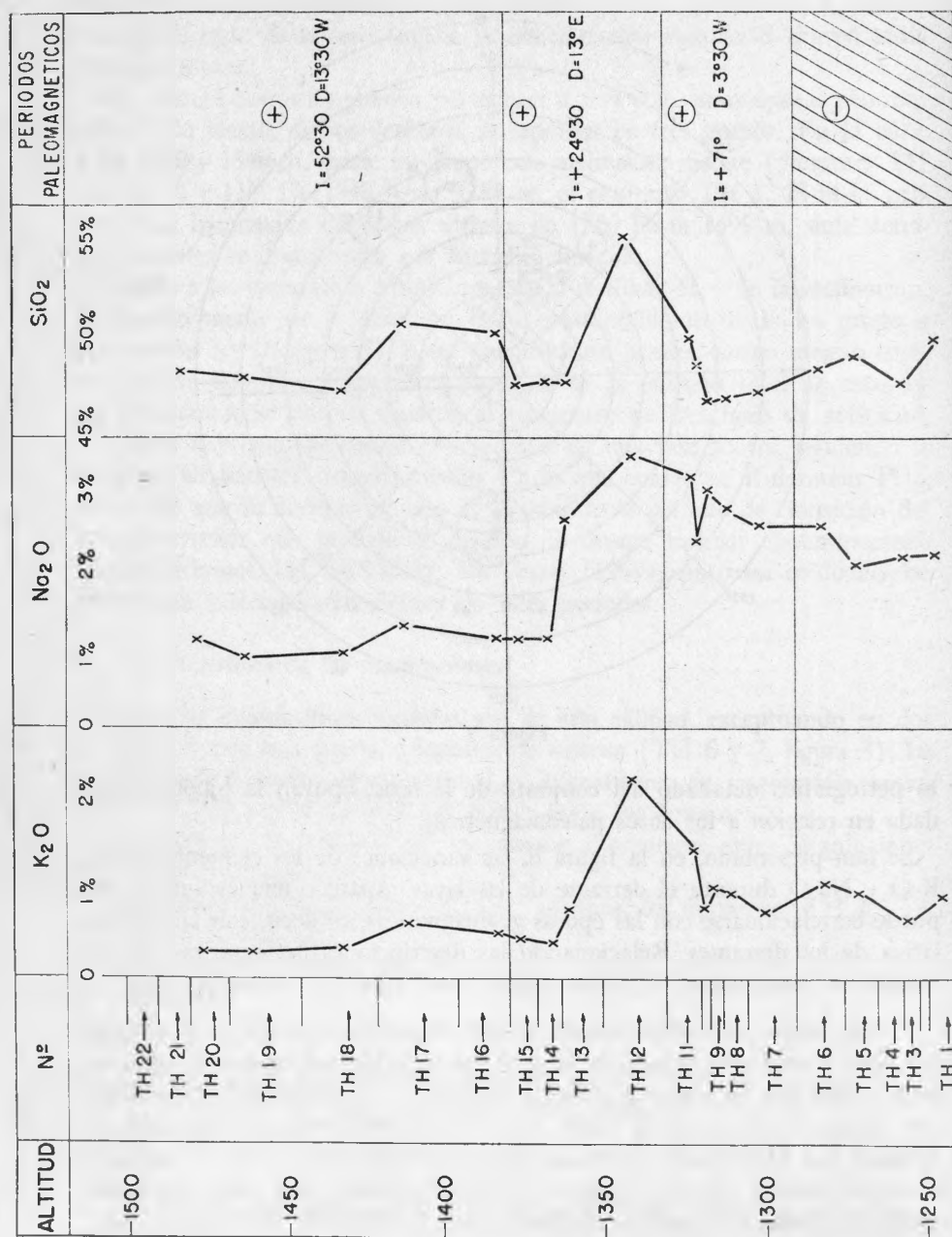


Figura 6

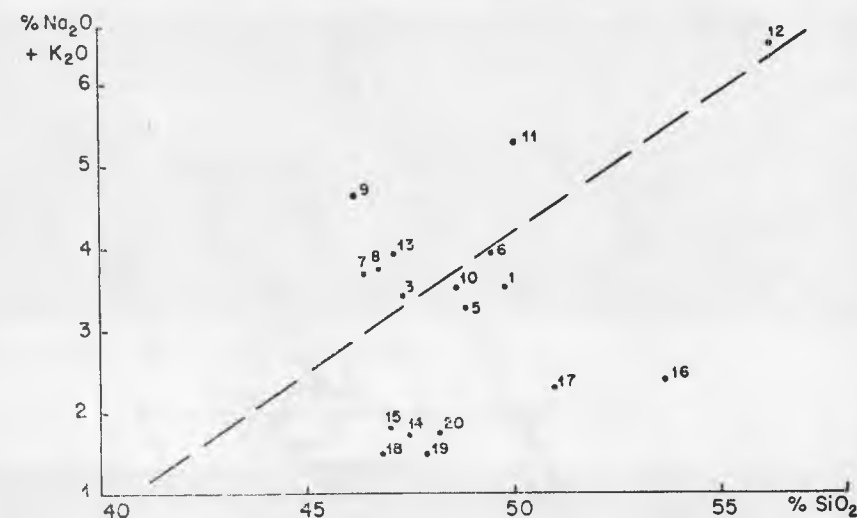


Figura 7

de que las dos series sean diferentes una de otra por ciertas características mineralógicas y químicas. Se distingue, sin embargo, entre esos primeros derrames, en este magma intermedio entre los dos clanes, tendencias alcalinas (TH3, TH6), y aspectos netamente toleíticos (TH1, TH5).

Al microscopio, estas rocas tienen una estructura microlítica porfírica. Los microlitos de plagioclasas presentan muy seguido una orientación preferencial. La fase vidriosa tiene buen grado de desarrollo en algunas muestras. En la mesostasa, los microlitos de andesina, labradorita y bitownita están separados por intersticios en los cuales se encuentran clinoperoxenos y numerosos granos de óxidos metálicos (magnetita, ilmenita). El olivino, en la muestra TH3, alterado, que contiene minerales opacos, se rodea de una cinta fina de crecimiento, y constituye en esta roca el grupo principal de fenocristales. Al contrario, en TH5, basalto cuya fase vidriosa está bastante desarrollada, el olivino se presenta en xenolitos con idingsita, rodeados por una pestaña de reacción hecha de clinopiroxenos. Se nota, además, en la mesostasa, microlitos de ortopiroxenos. Por el conjunto, la plagioclase media es una labradorita relativamente ácida (50-60% an.). Es frecuente ver varios agregados de unos milímetros de dimensión constituidos por clinopiroxenos y olivino en la matriz de esos basaltos.

b) Después de un tiempo de inactividad suficientemente larga para permitir el cambio del campo geomagnético y una evolución geoquímica den-

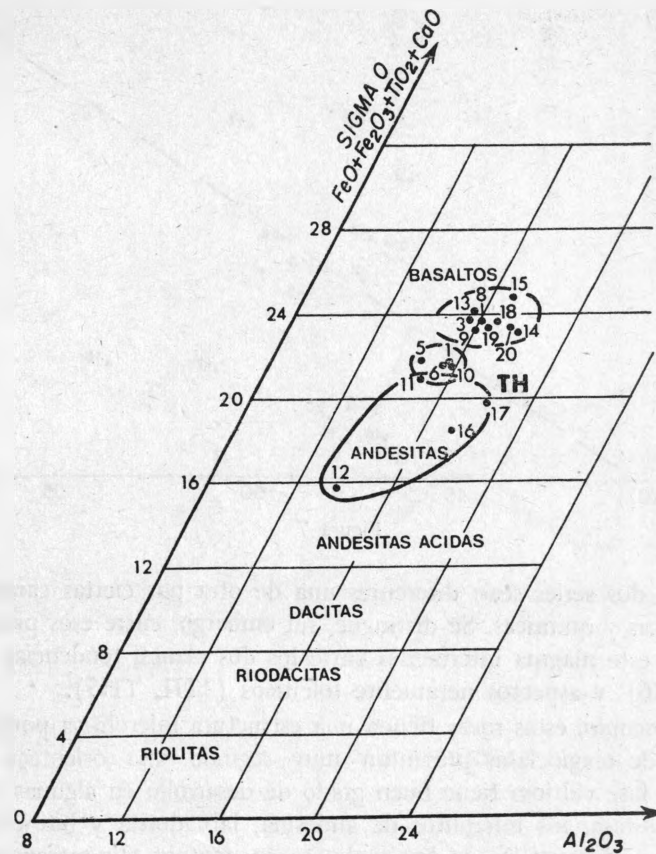


Figura 8

tro de las cámaras magmáticas, al tener lugar el primer periodo de variaciones seculares del campo magnético terrestre, normalmente orientado, se logra el asentamiento de un magma que tiene todos los caracteres de los basaltos alcalinos.

Estos basaltos de olivino (TH7 y TH9 son las muestras más representativas), muestran al microscopio una fase bien cristalizada con plagioclasas intermedias (50-55% an.), y fenocristales de clinopiroxenos (serie diopside-augita), abundantes en TH7. Los minerales opacos están diseminados en la matriz, la cual está fuertemente coloreada; se nota también la presencia de apatita. Cuando la alcalinidad está muy avanzada, existe un poco de nefelina en la norma C.I.P.W. (TH7 y TH9, tabla III-A). La composición



Foto 1. Mesas basálticas de la región de Huejutla.



Foto 2. Aspecto de los derrames al lado de la pista Tlanchinol-Huejutla.

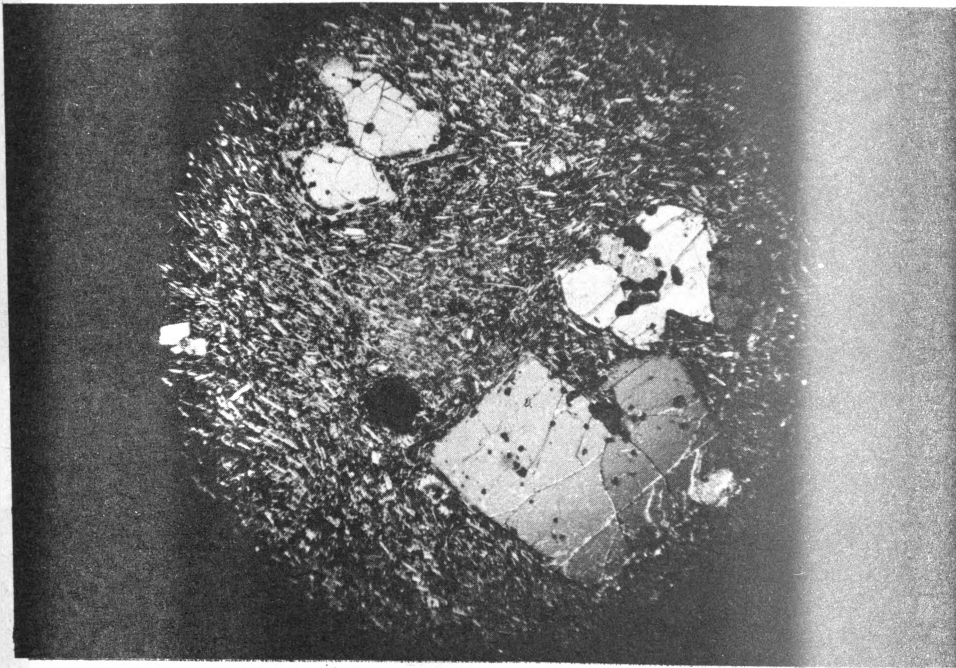


Foto 3. Microfotografía de una lámina del derrame TH3. Basalto de olivino a tendencia alcalina (ver la situación del punto representativo sobre la figura 7). Fenocristales de clinopiróxenos y pequeños cristales de olivino en una matriz de microlitas orientadas — nicoles cruzados.



Foto 4. Microfotografía de una muestra del derrame TH7. Basalto alcalino de olivino. Numerosos cristales de clinopiróxenos (augita) y olivino en una matriz hecha por microlitas de andesita y labradorita. Nicoles cruzados.

química del derrame TH7 es la que se acerca más al medio calculado a una gran cantidad de análisis de basaltos alcalinos de las islas Hawai (Mc Donald y Katsura, 1964). Sin embargo, su posición es intermedia entre los basaltos alcalinos y las hawaítas. Confrontado con este grupo de basaltos alcalinos que se reproduce (tabla V), el contenido en sílice de estas lavas es muy semejante. Para todos los elementos, los valores medios de los análisis de las muestras más alcalinas de la serie son idénticos a los valores medios propuestos por dichos autores. Al contrario, se pueden atestiguar algunas diferencias entre el medio de basaltos alcalinos dado por A.E.J. Engel *et al.* (1965), (tabla V), especialmente sobre el aluminio cuyo porcentaje es netamente más débil (15-16% contra 18%), y el magnesio que, al contrario, es abundante (valores de nuestros análisis: 7% hasta 9.5%; el medio de los basaltos alcalinos de Engel *et al.*: 4.8%).

Al final de este periodo se forman rocas más evolucionadas. Así, TH11 representa un derrame con plagioclasa de 40% an.; el grado en sílice aumenta y la relación $\text{Na}_2\text{O} : \text{K}_2\text{O}$ es más de 2, lo que permite llamar a tal roca hawaíta, y se representa en la figura 8 (TH11 es parte del área andesítica).

c) La evolución geoquímica iniciada, continúa durante la suspensión del vulcanismo que corresponde al cambio geomagnético entre la segunda y la tercera fase. Así, a principio de la nueva fase volcánica, se obtiene un magma evolucionado, "intermediario" (TH12).

En estas rocas se nota un abatimiento considerable del porcentaje de elementos máficos en comparación con las lavas precedentes. La plagioclasa (una oligoclasa), y el análisis químico, es criterio suficiente para acercar la naturaleza de este derrame a las mugearitas. Por último, este periodo terminó con el derrame de basalto alcalino y basalto toleítico no diferenciado. El espesor total alcanza 40 m.

d) Durante la última fase de la actividad volcánica se encuentran en primer término, lavas evolucionadas. El derrame TH16 tiene 19% de cuarzo normativo, pero conserva una plagioclasa media muy básica; el contenido en elementos alcalinos es menor al 3% y el del aluminio alcanza valores mucho más altos (17.3 y 18% en TH16 y TH17), que los del conjunto de los análisis.

Aparece un poco de corindón (2% en TH17), en el cálculo de la norma. Estos caracteres enseñan que muy probablemente se trata de una roca de diferenciación del magma toleítico, que da lugar posteriormente a la potente serie terminal.

Localidad N°	Altitud	N.	R	I_R	D_R	K	α_{95}
TH ₁	1245	3	2,98	- 38°	179° E	105	12°
TH ₂	1250	3	2,98	- 48°	180° E	193	9°
TH ₃	1255	3	2,98	- 43°	178° W	161	10°
TH ₄	1260	3	2,95	- 50°	168° E	50	17° 30
TH ₅	1270	3	2,89	- 32°30	173° E	18	29° 30
TH ₆	1290	3	2,93	- 15°30	169° E	33	21° 30
TH ₇	1300	3	2,90	+ 61°30	12°30 W	20	27° 30
TH ₈	1310	3	2,75	+ 82°	125° W	8	44°
TH ₉	1315	3	2,99	+ 66°30	3°30 E	508	5° 30
TH ₁₀	1318	3	2,97	+ 67°30	1° E	68	15°
TH ₁₁	1320	3	2,99	+ 65°	11°30 E	285	7° 30
TH ₁₂	1340	3	2,80	+ 34°30	8° E	10	39°
TH ₁₃	1360	3	2,99	+ 24°	13° E	442	6°
TH ₁₄	1365	3	1,99	+ 18°30	12°30 E	131	22°
TH ₁₅	1372	3	2,99	+ 21°	18° E	272	7° 30
TH ₁₆	1382	3	2,98	+ 55°30	4°30 W	131	11°
TH ₁₇	1410	3	2,96	+ 42°30	19° W	65	15° 30
			2,99	+ 47°30	13°30 W	282	7° 30
TH ₁₈	1430	3	2,99	+ 47°30	13°30 W	282	12° 30
TH ₁₉	1460	3	2,98	+ 54°30	8° W	101	12° 30
TH ₂₀	1475	3	2,99	+ 56°30	14° W	262	7° 30
TH ₂₁	1480	3	2,99	+ 55°30	24° W	272	7° 30
TH ₂₂	1495	3	2,97	+ 53°	11°30 W	99	12° 30
Resultante general (1245-1495 m)			20,70	48°	3° W		23°
Resultante de las imantaciones inversas (1245-1300 m)			5,86	- 38°	175° E		9° 50
Resultante de las imantaciones normales (1300-1495 m)			14,96	+ 52°	2° W		9°
Resultante de las imantaciones normales							
• Nivel inferior (1300-1320)			4,88	+ 71°	3°30 W		10° 30
• Nivel medio (1340-1372)			3,97	+ 24°30	13° E		6° 77
• Nivel superior (1382-1480)			6,96	+ 52°30	13°30 W		4° 30

TABLA I

Niveles considerados	ϕ_p	p	δ_p	δ_m
Serie completa	81° 30 N	116° W	19° 30	30°
Serie inversa	85° 30 N	177° E	6° 30	11°
Serie normal	78° 30 N	106° W	8° 30	12°
Serie normal nivel inferior	55° N	102° W	16°	18°
Serie normal nivel medio	75° N	22° E	4°	7° 30
Serie normal nivel superior	73° N	141°30 W	4°	6°

TABLA II

Los últimos derrames de toleítas, que pueden alcanzar un espesor de 30m cada uno, revelan al microscopio una fase pigmentada por óxidos metálicos en negro o rojo (magnetita, limonita, goetita...). Las pagioclasas (labradorita y bitownita) en forma de microlitos largos y finos, tienen maclas de albita. El olivino se presenta como la facie ordinaria de los magmas toelíticos: alterado (idingsita), y está rodeado de una cinta hecha de clinopiróxenos. La última fase de la serie está representada por una lava de estructura intermedia entre microlítica y de grano fino, porfirica. Los fenocristales (ca-

si únicamente plagioclasas), alcanzan de 3 a 4 mm de longitud, y constituyen de 35% hasta 40% de la roca; se trata generalmente de labradoritas; la bitownita ocurre en cristales más pequeños. Todos presentan huellas de alteraciones neumatolíticas, y cristalizaciones secundarias (zeolitas, chlorita, calcita...). Contienen frecuentemente óxidos opacos y pequeños cristales de clinopiróxenos, los cuales se encuentran también alterados.

El olivino se presenta en pequeños granos y cristales con idingsita. La mesostasa está constituida por un conjunto de feldespatos más alcalinos, mez-

	TH ₁	TH ₃	TH ₅	TH ₆	TH ₇	TH ₈	TH ₉	TH ₁₀	TH ₁₁
SiO ₂	49,90	47,45	48,90	49,55	46,45	46,80	46,22	48,50	50,03
Al ₂ O ₃	15,65	15,60	14,50	15,50	14,60	16,15	16,07	15,80	14,88
Fe ₂ O ₃	4,94	2,57	3,46	2,40	3,61	7,37	4,88	6,22	3,64
FeO	5,96	9,14	8,04	7,79	7,56	4,38	6,55	4,78	7,04
TiO ₂	1,80	2,22	2,03	2,18	2,14	2,21	2,18	1,55	2,15
MnO	0,15	0,17	0,17	0,17	0,15	0,19	0,17	0,17	0,15
P ₂ O ₅	0,35	0,45	0,57	0,43	0,45	0,46	0,62	0,36	0,64
CaO	8,80	9,70	8,10	9,10	10,35	9,50	9,45	8,77	8,02
MgO	5,65	8,65	7,45	7,00	9,65	6,95	7,78	6,47	7,43
Na ₂ O	2,52	2,63	2,28	2,84	2,93	2,89	3,50	2,70	3,70
K ₂ O	1,00	0,80	1,00	1,05	0,75	0,88	1,14	0,85	1,58
P.F.	2,36	1,29	2,68	1,24	2,04	2,37	1,48	3,61	1,59
Total	99,08	100,67	99,18	99,25	100,68	100,15	100,04	99,78	100,85

TABLA III - A

	TH 12	TH 13	TH 14	TH 15	TH 16	TH 17	TH 18	TH 19	TH 20
SiO ₂	56,33	47,20	47,52	47,10	53,75	51,00	46,95	48,00	48,27
Al ₂ O ₃	13,73	15,63	17,90	16,97	17,28	17,98	16,77	16,47	17,45
Fe ₂ O ₃	4,42	2,33	2,96	4,40	4,66	2,53	6,54	8,31	7,39
FeO	3,75	9,57	8,58	7,12	3,91	7,70	5,33	3,45	3,53
TiO ₂	1,65	1,92	2,17	2,05	1,88	1,88	2,04	1,91	1,94
MnO	0,13	0,17	0,18	0,16	0,10	0,16	0,17	0,16	0,17
P ₂ O ₅	0,44	0,42	0,55	0,47	0,33	0,51	0,42	0,42	0,59
CaO	5,91	10,14	9,68	11,00	7,85	7,60	9,52	9,54	10,25
MgO	5,68	8,63	7,12	7,90	4,31	7,28	9,48	8,28	7,41
Na ₂ O	4,02	3,07	1,30	1,32	1,56	1,56	1,10	1,10	1,35
K ₂ O	2,45	0,81	0,45	0,50	0,72	0,72	0,40	0,40	0,40
P.F.	2,29	1,00	2,25	1,43	1,63	1,63	2,13	2,76	1,94
Total	100,85	100,88	100,66	100,42	100,55	100,55	100,80	100,80	100,70

TABLA III - B

clados con piróxenos y granos de olivino. La chlorita, calcita, epidota y los óxidos metálicos, están diseminados en la matriz.

El diagrama triangular, muy dispersivo, de De La Roche, confirma los datos petrográficos. Esta representación gráfica hace aparecer la naturaleza de los diferentes derrames. Se notan en particular las posiciones de las muestras TH11, 12 y 16.

Así pues, se puede concluir que los derrames de la serie de Tlanchinol se asentaron en 4 fases de actividad, la primera contemporánea de una época de campo inverso y las 3 últimas, correspondientes a 3 episodios en campo normal. Se debe además tener en cuenta la espesa serie volcano-sedimentaria que descansa sobre los derrames.

III. CONCLUSIÓN

INTERÉS DE LOS DATOS MAGNÉTICOS

a) La comparación de las direcciones medias del campo, calculadas por el conjunto, en las lavas de Tlanchinol, por una parte, y por el conjunto de los derrames de imantación normal de esta serie, por otra, muestra que la dirección de la resultante general ($+48^{\circ}30'$) es sobre todo determinada por las lavas de imantación normal (resultante $+52^{\circ}2'$), más abundantes, que por las lavas de inclinación inversa (resultante: $+38^{\circ}5'$). En el caso presente, como el derrame de las rocas de imantación normal se ha producido durante 3 fases distintas de actividad, es probable que la influencia del campo no dipolar esté ya atenuada, y que el término medio de la dirección esté relativamente cerca del que pertenece al campo dipolar. Si, al contrario, el derrame se hubiera hecho durante el curso de una sola fase de actividad, lo cual pudo haber sido posible, teniendo en cuenta la importancia de la últi-

	TH1	TH3	TH5	TH6	TH7	TH9	TH10	TH11
Q	6.32		3.09				4.22	
Or	5.91	4.73	5.91	6.20	4.43	6.74	5.02	9.34
Ab	21.32	22.25	19.29	24.03	23.21	25.41	22.85	31.31
An	28.44	28.40	26.38	26.44	24.47	24.77	28.48	19.33
Ne					0.85	2.28		
D1 {	Wo	5.40	7.01	4.21	6.63	9.99	7.54	5.29
	En	3.92	4.33	2.67	4.11	6.95	5.50	4.29
	Fs	0.98	2.27	1.28	2.13	2.21	1.34	0.37
H1 {	En	10.15	5.64	15.89	12.37		11.82	4.68
	Fs	2.53	2.96	7.59	6.41		1.02	1.68
O1 {	Fo		8.11		0.66	11.97	9.73	6.45
	Fa		4.69		0.38	4.20	2.61	2.55
Mg	7.16	3.73	5.02	3.48	5.23	7.08	9.02	5.28
Ap	0.82	1.05	1.33	1.00	1.05	1.45	0.84	1.49
Il	3.42	4.22	3.86	4.14	4.06	4.14	2.94	4.08

Tabla IV - A

	TH12	TH13	TH15	TH16	TH17	TH18	TH19
Q	6.67		3.41	19.21	9.26	6.11	9.71
Or	14.48	4.79	2.95	4.14	4.25	2.36	2.36
Ab	34.02	22.98	11.17	13.20	13.20	9.31	9.31
An	12.12	26.48	38.90	37.44	34.37	39.64	38.92
Ne							
D1 {	Wo	5.95	8.80	5.26		2.02	2.41
	En	5.06	5.24	3.65		1.68	2.08
	Fs	0.11	3.12	1.18		0.09	
H1 {	En	9.08		16.03	10.73	18.13	21.93
	Fs	0.20		5.17	0.41	9.24	1.24
O1 {	Fo		11.39				
	Fa		7.47				
Mg	6.41	3.38	6.38	6.76	3.67	9.48	6.11
Ap	1.03	0.98	1.10	0.54	1.19	0.98	0.98
Il	3.65	3.65	3.89	3.57	3.57	3.87	3.63

Tabla IV - B

ma fase, la dirección media indicaría en mayor grado el reflejo del campo medio de la época, en relación a la tendencia representativa de la dirección del campo dipolar. Ya que es evidente, que para calcular una media representativa de un campo dipolar, no se debe sólo multiplicar el número de derrames analizados; se hace necesario también asegurarse que dicho aumento no tiene como efecto acrecentar la influencia de una fase de actividad particular, sino que al contrario, discrimina el aumento de las fases sometidas al análisis. Un campo dipolar sólo puede ser representado por la dirección media de un conjunto de direcciones del campo medio, las cuales quedan definidas por la dirección media de las direcciones de imantaciones de los derrames pertenecientes a una misma fase de actividad.

Para que una dirección media calculada a partir de las medidas de la dirección de la imantación de las lavas de una región pueda ser considerada como representativa de un campo dipolar, es necesario que se haya hecho

	Medio de basaltos alcalinos de las Islas Hawaii (McDonald y Katsura)	Medio de Toleñas Islas Hawaii	Medio de los basaltos alcalinos Engel A E J. et al
SiO ₂	46.46	49.36	47.41
TiO ₂	3.01	2.50	2.87
Al ₂ O ₃	14.64	13.94	18.02
Fe ₂ O ₃	3.27	3.03	4.17
FeO	9.11	8.53	5.80
MnO	0.14	0.16	0.16
MgO	8.19	8.44	4.79
CaO	10.33	10.30	8.65
Na ₂ O	2.92	2.13	3.99
K ₂ O	0.84	0.38	1.66
P ₂ O ₅	0.37	0.26	0.92
H ₂ O ⁺			0.79
H ₂ O ⁻			0.61

Tabla V

con anterioridad un análisis serio de la dinámica de la actividad volcánica de dicha región.

b) Se ha visto también que junto a otras técnicas de estudio, el paleomagnetismo puede, en ciertos casos, servir para establecer la dinámica de un pequeño sistema volcánico en el cual los datos de campo no pueden ayudar al geólogo.

c) Teniendo en cuenta el espesor de ciertos derrames (20 a 30 m en la última fase), y el desarrollo horizontal (algunos derrames forman barreras rocosas de varios kilómetros), es claro que el estudio de las direcciones de

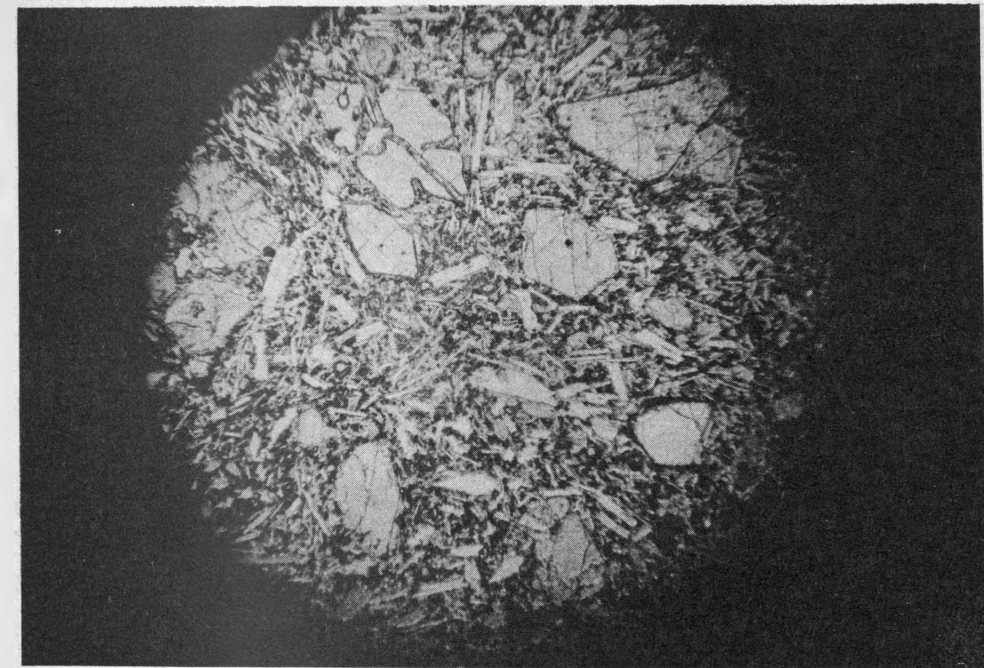


Foto 5. La misma, con luz natural.

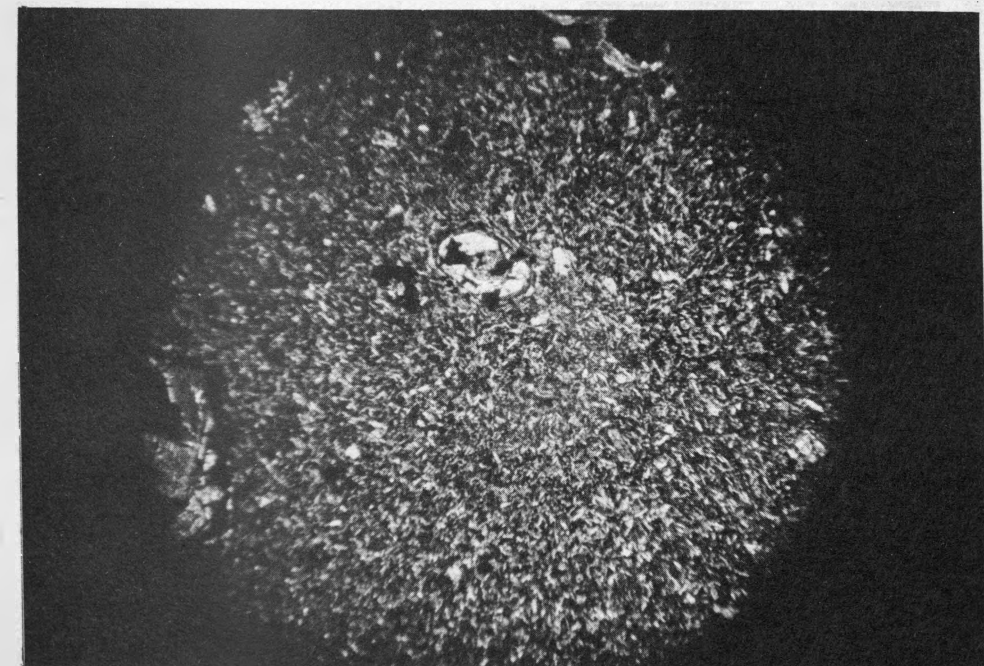


Foto 6. TH12 — mugearita — raros cristales de clinopiróxeno en un fondo hialopilitico — nicoles cruzados.

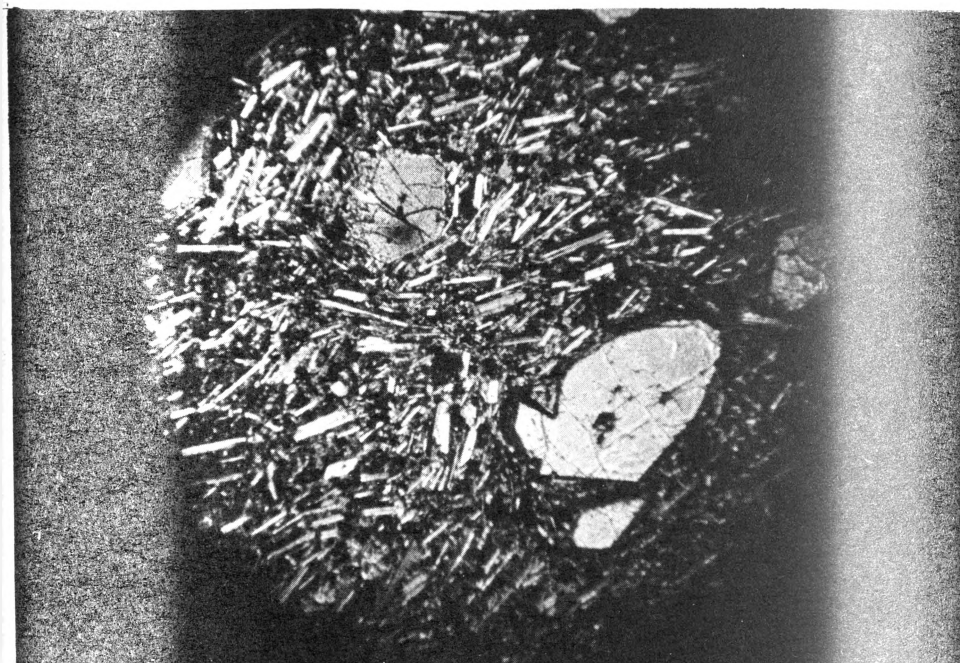


Figura 5. Microfotografía del basalto andesítico del derrame TH18 — piróxenos y matrices de plagioclasa básicas — nicoles cruzados.

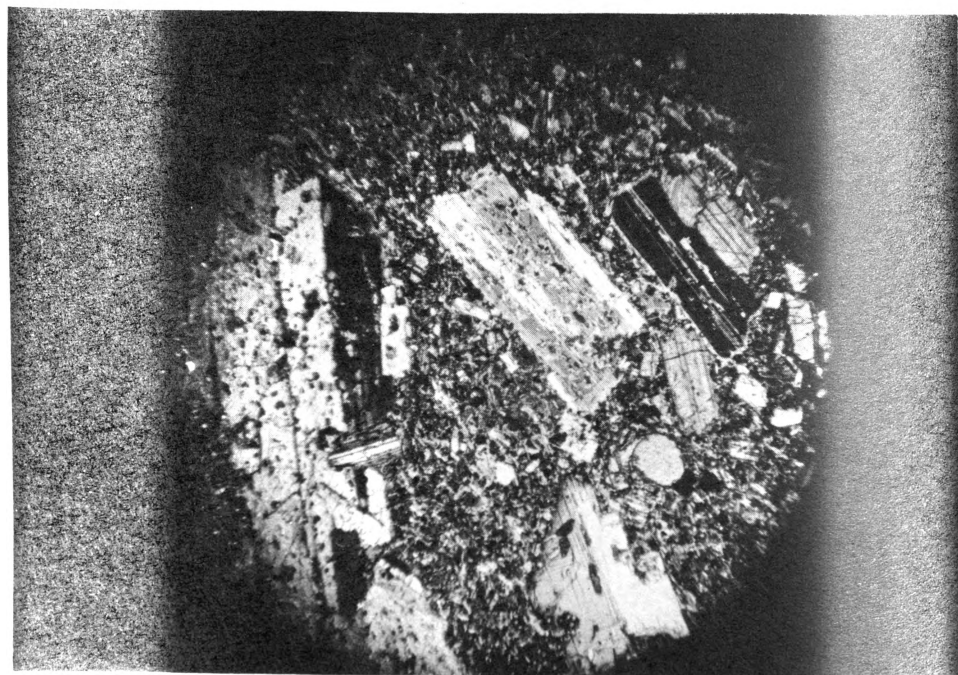


Figura 6. Derrame TH21, microfotografía con nicoles cruzados, fenocristales de feldespato (labradorita y bitownita) dentro de una matriz microcristalina.

imantaciones medidas en series verticales vecinas permitiría establecer correlaciones y precisar la evolución en el espacio del vulcanismo de esta región.

d) Por último, la posición del polo geomagnético calculada a partir del conjunto de datos obtenidos sobre la serie de Tlanchinol ($81^{\circ}30'N$, $116^{\circ}W$), está cerca de la posición calculada a partir de la serie de Atotonilco el Grande ($82^{\circ}N$, $167^{\circ}30'W$), lo que trae un argumento en favor del paralelismo establecido en el tiempo entre la serie de Tlanchinol y la serie de Atotonilco el Grande.

N°.	FELDESPATOS				PLAGIOCLASA
	% Total	Ortoclasa	Albita	Anortita	% AN
TH1	56	11	38	51	57
TH3	55	9	40	51	56
TH5	52	12	37	51	58
TH6	57	11	42	47	52
TH7	52	9	44	47	51
TH9	57	12	45	43	49
TH10	56	9	40	51	55
TH11	60	16	52	32	38
TH12	60	24	56	20	26
TH13	54	9	42	49	54
TH15	53	6	21	73	78
TH16	55	7	24	69	74
TH17	52	8	26	66	72
TH18	51	5	18	77	81
TH19	50	4	19	77	80

Tabla VI

AGRADECIMIENTOS: Este artículo pudo ser realizado con los recursos ofrecidos por La Mission Française Archeologique et Ethnologique au Mexique dirigida por el profesor G. Stresser-Pean y el Instituto de Geología de la UNAM. (Director: ingeniero D. Córdoba M.). Los análisis químicos fueron realizados en el laboratorio de Geología Dinámica de la Universidad PARÍS VI, y el cálculo de las normas C.I.P.W. en México sobre computadora, bajo la dirección del doctor Francisco J. Fabregat-G.

LITERATURA CITADA

- BOBIER, C. (1970) *L'utilisation des propriétés magnétiques des roches en stratigraphie. Colloque sur les méthodes et les tendances de la stratigraphie.* Orsay, october, 1970 (sous-presse).
- (1971) *Contribution du paléomagnétisme à l'étude géodynamique des volcans du Massif Central française, d'Algérie nord-orientale et du Mexique.* Thèse doctorat es sciences. Paris, 659 p.
- CARRILLO-BRAVO, J. (1965) *Estudio geológico de una parte del anticlinorio de Huayacocotla.* Bol. Asoc. Mex. Geol. Petrol., v. xvii, n. 5-6, p. 73.
- CHAPMAN, S.; BARTELS, S. (1940-1962) *Geomagnetism.* Oxford and Clarendon Press, 1049 p.
- EMBLETON, B. J. J. (1969) *Evidence of rapid polar shift from the paleomagnetic record of Eurasia.* Natur, Geol. Bull., 222, n. 5198, pp. 1036-37.
- ENGEL, A. E. J.; ENGEL, G. G.; HAVENS, R. G. (1965) *Chemical characteristics of oceanic basalts and the upper mantle.* Geol. Soc. Am. Bull., v. 76, n. 7, pp. 719-34.
- GEYNE, A. R.; FRIES, C. JR.; SEGERSTROM, K.; BLACK, R. F.; WILSON, I. F. (1963) *Geología y yacimientos minerales del distrito de Pachuca, Real del Monte, Estado de Hidalgo, México.* Consejo Rec. Nat. No Renov., Publ. 5 E.
- IMLAY, R. W. (1943) *Evidence for upper Jurassic landmass in eastern Mexico.* Am. Asoc. Petrol. Geol. Bull., v. 27, n. 4, pp. 524-29.
- IRVING, E. (1964) *Paleomagnetism and its applications to geological and geophysical problems.* Wiley, New York, 399 p.
- LE BORGNE (1960) *Étude expérimentale du trainage magnétique dans le cas d'un ensemble de grains magnetiques très fins dispersés dans une substance non magnétique.* Ann. Geophys., t. 16, n. 4.
- MCDONALD, G. A. y KATSURA, T. (1964) *Chemical composition of hawaiian lavas.* Journ. Petrol. 5 (1), pp. 82-133.
- MOORE, J. G. (1970) *Submarine basalt from the Revillagigedo islands region, Mexico.* Marine Geol. 9, pp. 331-45.
- MUIR, J. (1936) *Geology of the Tampico Region.* Am. Asoc. Petrol. Geol. XIX, 280 p., 19 lám.
- NAGATA, T. (1953) *Rock magnetism.* Maruzen Co., Tokyo, 225 p.
- NEEL, L. (1949) *Théorie de l'aimantation thermorémanente.* Ann. Geophys., v. 5, p. 99.
- (1951) *Théorie des deux types de trainage.* 5, Phys. Rad., v. 12, p. 339.
- RIMBERT, F. (1958) *Contribution à l'étude de l'action de champs alternatifs sur les aimantations rémanentes des roches. Applications a la Géophysique.* Thèse, Paris.
- ROCHE, A. (1953) *Étude sur l'aimantation des roches volcaniques tertiaires et quaternaires d'Auvergne et du Velay.* Thèse, Paris.
- (1970) *In Compte rendu du Colloque sur les méthodes et tendances de la strtigraphie.* Orsay, october, 1970 (sous-presse).
- THELLIER, E. (1938) *Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications géophysiques.* Thèse, Paris et ann., I. P. G. 16, pp. 157-302.
- (1967) *A "Big Sample" spinner Magnetometer ines. Methods in paleomagnetisme.* Nato Advanced Study Inst. on Paleomagnetic Methods, Univ. Newcastle upon Tyne, 1964, Proc., New York, Am. Elsevier Publ. Co., pp. 75-76.
- ; THELLIER, O. (1959) *Sur l'intensité du champ magnetique terrestre dans le passé historique et géologique.* Ann. de Geophys., t. 15, n. 3.
- TILLEY, C. E.; SCOON, J. H. (1961) *Differentiation of hawaiian basalts; trends of Mauna Loa and Kilauea historic magmas.* Am. Jour. Sci. 295, pp. 60-68.
- TURNER, F. J.; VERHOOGEN, J. (1960) *Igneous and metamorphic petrology.* Ed. New York, Mc Graw Hill, 694 p.
- YODER, H. S.; RILEY, C. E. (1962) *Origin of basalt magmas, an experimental study of natural and synthetic rock system.* Jour. Petrol. 3, pp. 342-532.