

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LA MAGNETIZACIÓN REMANENTE NATURAL

JAIME URRUTIA F.*

RESUMEN

El estudio de la estabilidad de la magnetización remanente natural es fundamental en paleomagnetismo. Diversos métodos y criterios son empleados para su estudio, no obstante al presente, éstos son insuficientes para un adecuado tratamiento en ciertas situaciones. En este trabajo se presenta un breve resumen y discusión sobre el análisis de la estabilidad magnética y se estudian las características de rocas ígneas del NE del estado de Jalisco, México.

ABSTRACT

The study of the stability of the natural remanent magnetization is very important in paleomagnetism. Several methods and criteria are now routinely used in its study, however they are not applicable in certain situations. In this paper we present a brief review and critical discussion concerning the magnetic stability of rocks and the results of an investigation carried out on extrusive igneous rocks of NE Jalisco, México.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la estabilidad de la magnetización remanente natural (MRN) es fundamental en paleomagnetismo, de aquí que estos estudios han recibido constante atención desde los primeros trabajos paleomagnéticos. El hecho de la existencia de rocas con alta estabilidad magnética es una de las bases del paleomagnetismo y el estudio de las características de estabilidad ha avanzado proporcionando información donde esa premisa es válida. La estabilidad de la MRN ha sido comprobada utilizando rela-

* Instituto de Geofísica, UNAM.

ciones de campo y correlaciones entre rocas de edades y litologías dadas. Con el establecimiento de técnicas de laboratorio se abrieron múltiples posibilidades para su estudio y éstas pronto se incorporaron en los trabajos paleomagnéticos; por otro lado estas técnicas crearon nuevos problemas referentes a la interpretación de esa nueva información. (McElhinny, 1973). Al presente se disponen de varios criterios para el estudio de la estabilidad y de las técnicas de laboratorio, no obstante ninguno de ellos ha probado ser totalmente adecuado, quedando gran cantidad de problemas sin resolver. Por otro lado los datos de estabilidad magnética han sido utilizados para el estudio de otras propiedades magnéticas y mineralógicas. En las investigaciones se acepta indistintamente alguno de los criterios disponibles y en la mayoría de los casos se hace uso de criterios cualitativos basados principalmente en la experiencia del investigador. En este trabajo se presenta una discusión y crítica del análisis de la estabilidad de la MRN y, en particular se estudian las propiedades de rocas ígneas extrusivas colectadas de una zona en el NE del estado de Jalisco.

2. PRUEBAS DE ESTABILIDAD

En los estudios paleomagnéticos que requieren correlación con la escala de tiempo, el MRN útil es aquel que guarda un registro fiel del campo geomagnético (CGM) de un tiempo dado conocido. Una consideración básica, de aquí, es que la MRN es capaz de permanecer invariable en el transcurso del tiempo (al menos desde su origen al tiempo de observación). Para comprobar que el registro magnético es válido, se han elaborado gran número de pruebas, éstas pueden ser agrupadas en dos categorías mayores: las pruebas de campo y las de laboratorio.

2.1. PRUEBAS DE CAMPO

De acuerdo a Irving (1964), los primeros que efectuaron esta clase de pruebas para analizar la estabilidad de la MR fueron, Folgheraiter (1899) y David (1904); posteriormente el estudio de la estabilidad fue realizado por Graham (1949), quien en su trabajo estableció la forma de aplicación de varias de las pruebas aceptadas actualmente.

Se tienen: prueba del plegamiento, del contacto quemado, de consistencia, de reversiones, de secuencia de polaridades y del conglomerado. En la tabla 1 se presenta un breve resumen y, ejemplos de aplicación se tie-

TABLA 1

PRUEBAS DE CAMPO DE ESTABILIDAD DE LA MRN

PRUEBA	Intervalo de confianza de la prueba	Comentarios
Del plegamiento	estabilidad desde el tiempo del plegamiento.	requiere formaciones plegadas después de adquirida la MRN. Se tienen direcciones dispersas y consistentes antes y después de aplicar la corrección estructural respectivamente.
Del conglomerado	estabilidad desde antes de la formación del conglomerado.	requiere una formación de conglomerado. Se tienen direcciones dispersas y consistentes en el conglomerado y la matriz respectivamente.
Del contacto quemado	estabilidad desde la formación del contacto.	requiere una zona de contacto quemado. Se tienen direcciones dispersas de la roca quemada e ígnea y de la roca no quemada e ígnea respectivamente y consistentes entre ellas.
Del perfil magnético	estabilidad de los sitios y de localidades entre ellos.	requiere del levantamiento de un estudio magnético. El levantamiento es interpretado con geología y la MRN medida con paleomagnetismo. Las medidas teóricas deben concordar.
De MR reversas	estabilidad en el proceso de adquisición y después.	requiere de una o varias formaciones de edad similar con direcciones de MR consistentes y opuestas al CGM actual.
De MR mixtas	estabilidad en y desde la magnetización.	requiere de una secuencia con las partes superiores e inferior de polaridad distinta y consistentes, con polaridad mixta intermedia.
De formación muestreada en diferentes localidades	estabilidad en y desde el proceso de magnetización.	requiere de una formación con afloramientos extensos o que aflore en distintas localidades. Se deben tener direcciones consistentes en todos los sitios estudiados.

nen en varios artículos, entre ellos: Graham (1949), Cox y Doell (1960), Wilson (1962 a y b), Everitt y Clegg (1962), McElhinny y Gough (1963), Bol'shakov y Solodovnikov (1968), McMurry (1970) y Symons (1977).

2.2. PRUEBAS DE LABORATORIO

Estas pruebas además de analizar la estabilidad magnética, sirven para separar las diversas componentes de la MRN. Dentro de ellas se tienen: la de desmagnetización por campos magnéticos alternos decrecientes (cmad) (As y Zijderveld, 1958; Creer, 1959), por altas temperaturas (at) (Irving *et al.*, 1961; Wilson, 1962c), por tratamiento químico (Carmichael, 1961; Collinson, 1963) y por bajas temperaturas (Ozima *et al.*, 1964). Desde sus primeras aplicaciones se les consideró indispensables en cualquier estudio paleomagnético (Irving, 1964), en la tabla 2 se presenta un breve resumen.

Además se tienen las pruebas concernientes con las propiedades magnéticas, tales como el espectro de fuerzas coercitivas, temperaturas de Curie y de bloqueo, tiempo de relajación, coeficiente de Königsberger, susceptibilidad y anisotropía magnética.

Por último, cabe mencionar, que tanto las pruebas de campo como las de laboratorio requieren el empleo de métodos estadísticos para su aplicación (Cox, 1969; Irving, 1964; McElhinny, 1973; Tarling, 1971). En este trabajo se tratarán los métodos estadísticos relacionados con algunas de las pruebas de laboratorio y algunas de las pruebas que emplean propiedades magnéticas.

3. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

3.1. CRITERIOS CUALITATIVOS

Los criterios empleados en los lavados magnéticos para determinar estabilidad y separar las distintas fases de magnetización (tabla 2), aunque objetivos en su original formulación, han sido aplicados en una forma subjetiva y en ocasiones implicando serios errores para el estudio en cuestión.

TABLA 2

PRUEBAS DE LABORATORIO DE LA ESTABILIDAD DE LA MRN

PRUEBA	Intervalo de confianza de la prueba	Comentarios
De acumulación en el magnetómetro y de reproductibilidad de lecturas.	estabilidad de la MR a escala de laboratorio	Permite detectar la presencia de superparamagnetismo a temperatura ambiente y posibles errores instrumentales y humanos en el proceso de medición.
De desmagnetización.	estabilidad de la componente primaria a través del tiempo geológico	Se tienen respectivamente direcciones dispersas y consistentes, antes y después de los procesos. Elimina las componentes blandas y deja las duras. Permite un análisis del comportamiento magnético y de algunas propiedades de las rocas.
Campos magnéticos alternos decrecientes		Recomendable para rocas con magnetita. Estudio del espectro de coercitividad.
Altas temperaturas. Térmico		Recomendable para sedimentos rojos (hematita). Estudio de temperatura de Curie y de bloqueo y espectro de coercitividad.
Tratamiento químico		Recomendable para sedimentos rojos. Estudio de la composición y de los portadores magnéticos.
Bajas temperaturas		Recomendable para sedimentos rojos e ígneas. Estudio del comportamiento magnetocristalino a bajas temperaturas. Destruye MR no afectadas por cmad.
Presiones mecánicas		Recomendable para rocas ígneas. Estudio de la anisotropía y de las orientaciones preferenciales de las componentes de MR.

As y Zijderveld (1958) propusieron que el lavado era satisfactorio cuando la dirección de la MRN permanecía inalterada en respuesta a más tratamiento. Este criterio es adecuado para rocas con alta estabilidad y que contengan una sola fase de magnetización, por ejemplo basaltos de edades recientes, sujetos a lavado por cmad. El criterio depende del número de etapas de desmagnetización y de la etapa máxima empleada, por lo que puede ocurrir que a dicha etapa el criterio se cumple pero no asegura a valores mayores o a otro tratamiento adicional distinto, si la situación se conservará. Por ejemplo, Roy y Lapointie (1976) en un estudio con diabasas de la Formación Nipissing (Canadá) encontraron que el punto final obtenido en tratamiento por cmad y dado por adecuado en varios estudios independientes anteriores (Symons, 1970, 1971; Patel, 1971; Patel y Palmer, 1974; Symons y Londry, 1975) era modificado por tratamiento adicional con at. Por otro lado, como para la mayoría de las rocas no se alcanza punto final, frecuentemente se modifica el criterio para seleccionar la parte del proceso durante la cual la dirección se mantiene invariable por unas etapas. Ello puede dar resultados satisfactorios cuando los cambios posteriores a la parte estática son producto del lavado (como adquisición de MR secundarias como MR anistéricas o MR rotacionales en cmad o MR químicas en at, cuando la intensidad de la MRN es baja o bien por imperfecto aislamiento de campos magnéticos externos, etc.), sin embargo si ello no está bien documentado, es difícil aseverar que tal situación está presente y lo único que se ha obtenido es una fase de la MRN, sin decir si se trata de la MR primaria (MRp) o bien alguna MR secundaria (MRs).

Irving *et al.* (1961) propusieron el criterio conocido como de mínima dispersión. En él se acepta que el lavado es satisfactorio y se selecciona el tratamiento aplicado, cuando las direcciones de los varios especímenes utilizados como pilotos en el lavado presentan la mínima dispersión. Puede ser adecuado en rocas con características magnéticas muy semejantes, lo cual no siempre se cumple. Este criterio se ha aplicado en una forma más subjetiva en la cual se determina la dirección de la MR estable (MRe) seleccionando las direcciones de MRN que produzcan la mínima dispersión sin importar a qué etapa del tratamiento pertenezcan (Watkins y Richardson, 1968; Dagley y Ade-Hall, 1970). Este criterio aunque ha sido criticado por situaciones determinadas (Storetvedt, 1970; Briden, 1972), es ampliamente empleado ya que proporciona datos con "buena estadística", llegando a considerar qué parámetros estadísticos aceptables son sinónimo de datos igualmente aceptables. Esta situación es particular-

mente crítica en el caso de estudios de sedimentos en los cuales el tiempo cubierto por los periodos de magnetización es grande, y cuando se tienen muestras de varios niveles se está trabajando con variaciones del CGM, las cuales pueden ser grandes y no necesariamente las direcciones deben ser coincidentes. Excepto en periodos donde el CGM ha conservado su comportamiento aproximadamente constante, como en el Permo-Carbonífero (Intervalo Magnético Kiaman); es frecuente el tener cambios de polaridad y excursiones. Por otro lado, puede tenerse la posibilidad de eventos tectónicos y movimientos de deriva; es frecuente encontrar secuencias sedimentarias que registran varios eventos geológicos, tales como transgresiones y regresiones, movimientos de levantamiento y subsidencia, etc. Todo ello en el caso extremo, sin embargo variaciones menores pueden estar presentes y éstas pueden pasar inadvertidas bajo el criterio de mínima dispersión.

Frecuentemente aplicaciones subjetivas combinando los criterios de As y Zijderveld (1958) y de Irving *et al.* (1961), son utilizadas (McElhinny y Gough, 1963; Murthy, 1971), con los inconvenientes arriba ya mencionados. Cabe mencionar que una distinción entre los dos criterios se tiene en que el primero es aplicable a especímenes aislados, mientras que el segundo requiere más de uno para su empleo. Tanto en estos dos criterios como en sus modificaciones y combinaciones, la aplicación está sujeta al propio "criterio" del paleomagnetista, quien al final decide cuándo considerar que las direcciones alcanzaron un punto estable final o qué combinación de direcciones seleccionar para el análisis, etc. Propuestas para cuantificar los diversos criterios han sido recientemente avanzadas. Éstas tienen las ventajas de evitar valoraciones subjetivas del interpretador y de hacer comparables los resultados de trabajos individuales. Además permiten estudios adicionales tales como estudios de estabilidad magnética comparada con otras propiedades magnéticas y mineralógicas.

3.2. CRITERIOS CUANTITATIVOS

Para los procedimientos de lavado magnético se han propuesto varios índices, los cuales definen de acuerdo a su valor el proceso de lavado óptimo de un espécimen o grupo de especímenes dado. Éstos han sido denominados índices de lavado óptimo por Giddings y McElhinny (1976). Dentro de estos índices se tienen:

El índice de Tarling y Symons (1967) que fue el primero propuesto y se define por

$$SI = \text{máx} \left\{ (R)^{1/2} / \theta_{63}^{\circ} \right\}$$

donde R es el rango entre tres o más etapas de lavado y θ_{63}° es la desviación estándar circular (Fisher, 1953) para tres o más direcciones dentro de R. Este índice considera cambios en dispersión y en tratamiento, pero no cambios en intensidad.

Symons y Stupavsky (1974) propusieron un índice definido por

$$PSI_s = 57.296 \times 10^3 \times \left| \frac{d_j(H)}{dH} \right|$$

donde $d_j(H) = dJ(H)/|dJ(H)|$, siendo $dJ(H)$ el cambio en MR en un incremento de tratamiento dH . El índice no toma en cuenta cambios en intensidad. De acuerdo a los valores de estabilidad (tabla 3) y de aquí

TABLA 3

CLASIFICACIÓN EN TÉRMINOS DE ESTABILIDAD UTILIZANDO EL
ÍNDICE DE SYMONS Y STUPAVSKY (1974)

ESTABILIDAD	RANGO DE ÍNDICE
EXTREMADAMENTE ESTABLE	$\lesssim 5$ miligramos/Oe
Estable	5 — 20
Moderadamente estable	20 — 50
Baja estabilidad	50 — 200
Inestable	200 — 1000

Symons y Stupavsky proponen que el índice puede ser empleado además de en definir el tratamiento óptimo en comparación de la estabilidad entre distintas colecciones de rocas (de forma similar al uso de los índices de estabilidad relativa). Briden (1972) definió un índice dado por

$$S_{1-2} = 1 - |\bar{J}_1 - \bar{J}_2|/J_1$$

donde $\bar{J}_1$ y $\bar{J}_2$ son los vectores de MR a las etapas 1 y 2 y, J_1 es la magnitud del vector $\bar{J}_1$. El índice considera cambios en dirección e intensidad de la MR.

Heller (1977) definió un parámetro dado por

$$S_H = \frac{\Delta\vartheta}{\Delta H}$$

Donde $\Delta\vartheta = \cos^{-1} (l^1 + m^1 + n^1)$ con (l, m, n) y (l^1, m^1, n^1) como los cosenos directores de una etapa cualquiera y la previa respectivamente, y ΔH es el incremento en el campo desmagnetizante. El valor mínimo define el tratamiento óptimo. El índice considera cambios en dirección, pero no toma en cuenta cambios en intensidad. Por último Urrutia (1977) definió un índice que considera cambios en dirección e intensidad y además el tratamiento aplicado haciendo énfasis en la dispersión de las direcciones entre etapas dadas, con lo que toma ventaja de los factores positivos de los índices previamente definidos. Éste está dado por

$$S = \max \left\{ \frac{J_i (R_l - R_i)}{R_i |\bar{J}_i - \bar{J}_l| \theta_{63}^\circ} \right\}$$

donde los subíndices i y l refieren a etapas dadas durante el tratamiento.

Por otro lado se tienen los índices de estabilidad relativa (Giddings y McElhinny, 1976). Estos índices estiman el comportamiento del vector de MRN bajo un rango de tratamiento dado, de tal forma que la estabilidad puede ser comparada con otros parámetros magnéticos o mineralógicos. Entre ellos se tiene el índice de Wilson *et al.* (1968) modificado por Ade-Hall y definido por

$$S_n = J_n / (J_n - \sum_{i=1}^n \Delta J_i)$$

donde J_n es la intensidad en la etapa n y ΔJ_i es la magnitud del cambio en intensidad a la etapa i . En este índice la parte que influye más es la respuesta de la MR de baja coercitividad (primeras etapas).

Murthy (1971) definió un índice de estabilidad dado por

$$SF = \left(\frac{M_{opt}}{M_o} \right) / \theta_{63}^\circ$$

donde M_{opt} y M_o son las intensidades al lavado óptimo y sin lavado respectivamente y θ_{63}° es la desviación estándar circular (Fisher, 1953) la cual mide la dispersión de direcciones entre la MRN y la del lavado óptimo.

Por último, Giddings y McElhinny (1976) han definido un índice de estabilidad que intenta comprender los aspectos cubiertos por los dos grupos arriba enunciados relacionándolos con las características de las componentes magnéticas de dominio simple, consideradas como las portadoras de la MRe (Evans y McElhinny, 1969; Dunlop *et al.*, 1973). Éste es expresado por

$$PSI = MBI \cdot C_s \cdot C_p \quad (0 \leq PSI \leq 1)$$

donde: $C_s = R/\tilde{B}_p$, $R = \tilde{B}_p - \tilde{B}_s$ con $\tilde{B}_s$ y $\tilde{B}_p$ como el valor de c_{mad} al cual las componentes secundarias son eliminadas y, al cual la dirección e intensidad del vector de MR comienzan a variar al azar respectivamente; $C_p = \tilde{B}_p/80$ ($0 \leq \tilde{B}_p \leq 80$ mT) y $C_p = 1$ ($\tilde{B}_p > 80$ mT); MBI representa la media del índice de Briden, $MBI = \sum_{i=1}^n S_i/n$. En adición ellos definen un índice de coercitividades dado por $CI = C_s \cdot C_p$.

Para dominios simples el tiempo de relajación depende de la fuerza coercitiva (McElhinny, 1973), por lo que el valor de 80 mT fue escogido en base a que es el mínimo campo aceptable por dominios múltiples (Evans y McElhinny, 1969; Dunlop *et al.*, 1973). Utilizando el índice, Giddings y McElhinny dividen las rocas de acuerdo a su estabilidad en cinco clases (tabla 4).

Urrutia y Pal (1977b) en adición al empleo de índices en el lavado magnético, utilizaron un programa de cómputo para aplicar el criterio

TABLA 4
CLASIFICACIÓN DE ESTABILIDAD UTILIZANDO EL ÍNDICE
DE GIDDINGS Y McELHINNY (1976)

CLASIFICACIÓN	ÍNDICE	RANGO (TRATAMIENTO)
Clase A. Extremadamente estable	1.0 — 0.80	> 80 mT
Clase B. Muy estable	0.80 — 0.45	40 — 80
Clase C. Estable	0.45 — 0.11	10 — 40
Clase D. Parcialmente estable	0.00 — 0.11	< 15*
Clase E. Inestable	0.00	0

* Agrupación de direcciones en el rango estable consiste de sólo dos o tres vectores separados por ángulos de 10° o más. Generalmente $\tilde{B}_p < 30$ mT y $R < 15$ mT.

de mínima dispersión (Irving *et al.*, 1961) con las modificaciones de Watkins y Richardson (1968) y Dagley y Ade-Hall (1970) en una forma cuantitativa.

3.3 DEFINICIONES ALTERNATIVAS DE ESTABILIDAD

Los criterios antes mencionados aplican a algunas de las características de la estabilidad magnética relacionadas a la determinación del tratamiento óptimo en el laboratorio. Criterios alternativos para definir la estabilidad han sido también utilizados. Ellos, aunque también se encuentran relacionados al lavado magnético, no intentan determinar el lavado y más bien miden determinados aspectos de la estabilidad magnética.

Entre las varias diferentes formas de estimar la estabilidad, algunas de las más empleadas son: la fuerza coercitiva remanente (H_{cr}) definida como el campo directo necesario para reducir a cero una MR producida por un campo directo de saturación (Larson *et al.*, 1969); la fuerza coercitiva volumétrica (H_c), la cual es una función de la temperatura y el espectro de coercitividades (Graham, 1953; Everitt, 1962; Larson *et al.*, 1969); el campo destructivo medio (CDM) y la temperatura destructiva media (TDM), definidos como la magnitud del c_{mad} (Park e Irving, 1970; Robertson y Fahrig, 1971; Ade-Hall *et al.*, 1973) y la temperatura (Beske-Diehl y Shive, 1978) necesarios para reducir la intensidad de MRN a un 50% del valor original (Butler *et al.*, 1976; Prévot *et al.*, 1976; Smith y Prévot, 1977); cocientes de intensidades a algún tratamiento dado, tales como J_{20}/J_0 donde J_{20} y J_0 son las intensidades después del lavado a 20mT y original respectivamente (Ade-Hall *et al.*, 1968; Piper, 1976; Deutsh *et al.*, 1977) y J_{10}/J_0 donde J_{10} es la intensidad después del lavado a 10 mT (Ellwood y Watkins, 1975, 1976); algunos de los parámetros de la estadística de Fisher (1953) tales como la desviación estándar circular (usada en algunos de los índices de estabilidad también) el semiángulo de confianza al 95% ($\propto_{95}$) y el parámetro de precisión k (Larson y Strangway, 1969); el coeficiente de Königsberger $Q = J_0/\chi F$ Königsberger, 1938) o modificaciones tales como $Q = J_0/\chi$, $Q_{20} = J_{20}/\chi$ (Ade-Hall *et al.*, 1968) o $Q = J_{20}/\chi F$ Wilson *et al.*, 1968); Zijderveld (1967) define una magnetización como estable cuando ésta es capaz de mantener su dirección invariable por largos periodos geológicos y finalmente en algunos casos la estabilidad es referida en términos de que también una magnetización dada (general-

mente la primaria) está definida después de un tratamiento dado (por ejem. Beske-Diehl y Shive, 1978).

4. ESTABILIDAD DE ROCAS ÍGNEAS DEL NE DE JALISCO

Ocho distintas unidades de rocas ígneas extrusivas aflorantes en la región de Atotonilco-Arandas en el NE del estado de Jalisco fueron estudiadas para paleomagnetismo (Urrutia, 1976). El análisis de laboratorio comprendió desmagnetización por cmad con un valor máximo de 450 Oe (45 mT). Se analizaron un total de 65 muestras, con 8-10 muestras por sitio excepto un sitio con 4 muestras. Para la interpretación se utilizó el criterio del punto final (As y Zijderveld, 1958) en la mayoría de las muestras, y en algunas se modificó seleccionando la parte del espectro de coercitividad con mínima variación de direcciones. De cada sitio se escogió una muestra como piloto a la cual se le aplicó un lavado detallado (diversas etapas) y cuyos resultados (selección del campo óptimo) se aplicaron al resto de las muestras del sitio; en uno de los sitios (sitio V) se aplicó el lavado detallado a todas las muestras del sitio (Urrutia, 1976; Urrutia y Pal, 1977 a y b). Las muestras con lavado por etapas, en un total de 15, se analizan en términos de su estabilidad magnética en esta sección.

Para el análisis utilizando los índices de lavado óptimo, estabilidad magnética relativa y estabilidad paleomagnética, se usó un programa de cómputo **FORTTRAN IV** originalmente elaborado por el Dr. M. Richards. Este programa no incluye los índices de Watkins *et al.* (1968), de Ade-Hall (1969), de Urrutia (1977) y de Heller (1977). Los resultados se presentan en las tablas 5, 7 y 9. En la tabla 5 se incluyen los índices de Briden, Symons y Stupavsky, Heller y Murthy; se presentan sólo los datos para la etapa de índice óptimo (valores entre paréntesis). Los valores del índice de Briden son en general cercanos a 1.0 (varían entre 0.63 a 0.99) para la mayoría de las muestras lo que indica alta estabilidad. Los valores de este índice pueden variar entre -1.0 y 1.0. Los valores del índice de Symons y Stupavsky (dados en milésimas de grado por Oersted) son cercanos a cero, lo que indica variaciones menores en dirección, y de aquí alta estabilidad (tabla 3). Estos índices definen el rango de tratamiento óptimo, en términos generales los rangos no coinciden debido principalmente a que el índice de Symons y Stupavsky no considera los cambios en intensidad incluidos en el de Briden. El tratamiento

TABLA 5

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE ROCAS VOLCÁNICAS DEL NE DE JALISCO

S	N	ÍNDICE DE BRIDEN	ÍNDICE DE SYMONS Y STUPAVSKY	ÍNDICE DE HELLER	ÍNDICE DE MURTHY	MOVIMIENTO ANGULAR MÁXIMO
I	11c	0.91(10-15)*	0.098(15-20)*	0.046(30-45)*	0.31(15)*	0.445(0-10)
II	18b	0.89(25-30)	0.077(30-45)	0.055(15-20)	0.39(25)	0.486(10-15)
III	28c	0.92(30-35)	0.060(25-30)	0.052(20-25)	0.48(20)	0.347(0-10)
IV	40b	0.83(30-35)	0.069(0-10)	0.070(0-10)	0.04(25)	3.048(20-25)
V	42	0.98(15-20)	0.018(20-25)	0.018(15-25)	0.71(20)	0.372(0-10)
V	43b	0.99(2.5-5)	0.019(20-25)	0.012(20-25)	0.06(20)	0.592(0-2.5)
V	44	0.98(2.5-5)	0.025(10-15)	0.008(10-15)	0.75(20)	0.130(0-2.5)
V	45	0.98(10-15)	0.024(15-20)	0.023(10-15)	0.54(20)	0.610(2.5-5)
V	46	0.94(15-20)	0.122(15-20)	0.024(15-20)	0.68(20)	0.256(2.5-5)
V	47b	0.93(0- 5)	0.081(0- 5)	0.081(0- 5)	0.60(20)	0.274(15-20)
V	48	0.97(0-2.5)	0.047(0-2.5)	0.031(5-10)	0.55(20)	0.521(20-25)
V	49b	0.96(15-20)	0.095(5-10)	0.024(15-20)	0.63(20)	0.265(10-15)
VI	50	0.90(0-15)	0.018(0-10)	0.018(0-10)	0.62(25)	0.375(25-30)
VII	58	0.63(10-15)	0.046(15-20)	0.032(10-15)	0.57(10)	0.949(40-45)
VIII	102c	0.92(25-30)	0.055(30-45)	0.046(30-45)	0.19(25)	0.892(15-20)

S, sitio; N, muestra; * rango de tratamiento por cmad en mT para el índice óptimo; * rango de tratamiento seleccionado en Urrutia y Pal (1977a).

seleccionado como óptimo anteriormente (Urrutia, 1976), está dentro del rango para 7 muestras con el de Briden y para 5 muestras con el de Symons y Stupavsky. Los rangos dados por el índice de Heller coinciden para 6 de las muestras con el tratamiento antes seleccionado y para 8 muestras que éstos coinciden con los determinados con el índice de Symons y Stupavsky. El índice de Murthy no define un tratamiento óptimo sino tiene la finalidad de medir la estabilidad de la MRN y para ello utiliza parámetros obtenidos durante el tratamiento, entre ellos los del tratamiento considerado como óptimo; para ellos se consideró el tratamiento seleccionado por Urrutia (1976). Sus resultados serán discutidos posteriormente en relación con otros parámetros de estabilidad y sus correlaciones con algunas propiedades magnéticas. La última columna en la tabla 5 presenta los valores del movimiento angular máximo de las direcciones durante el lavado, en general éste coincide con las primeras etapas del lavado, lo que es interpretado como debido a la eliminación de componentes secundarias (MR viscosa) caracterizadas por una baja coercitividad (menor de 100 oe). En la tabla 6 se presenta un ejemplo de la variación respecto a las diferentes etapas de lavado de los índices mencionados. Los valores corresponden a la muestra 50 (sitio VI). En las figuras 1 y 2 se presenta la variación de los índices con respecto a la etapa de lavado. El índice de Briden (figura 1) varía en forma similar en los sitios I, II, VI y VIII incrementando su valor como las compo-

TABLA 6

EJEMPLOS DE VARIACIÓN DE ALGUNOS ÍNDICES CON RESPECTO
AL TRATAMIENTO APLICADO. VALORES PARA LA MUESTRA 50
(VER TEXTO Y TABLA 5)

TRATAMIENTO (mT)	ÍNDICE DE BRIDEN	ÍNDICE DE SYMONS Y STUPAVSKY	ÍNDICE DE HELLER	ÍNDICE DE MURTHY
0.0 — 10.0	0.90	0.018	0.018	0.91
10.0 — 15.0	0.90	0.030	0.041	0.83
15.0 — 20.0	0.88	0.046	0.051	0.74
20.0 — 25.0	0.80	0.046	0.041	0.62
25.0 — 30.0	0.64	0.214	0.375	0.47
30.0 — 35.0	0.64	0.217	0.047	0.42
35.0 — 40.0	0.81	0.106	0.167	0.30
40.0 — 45.0	0.79	0.207	0.243	0.30

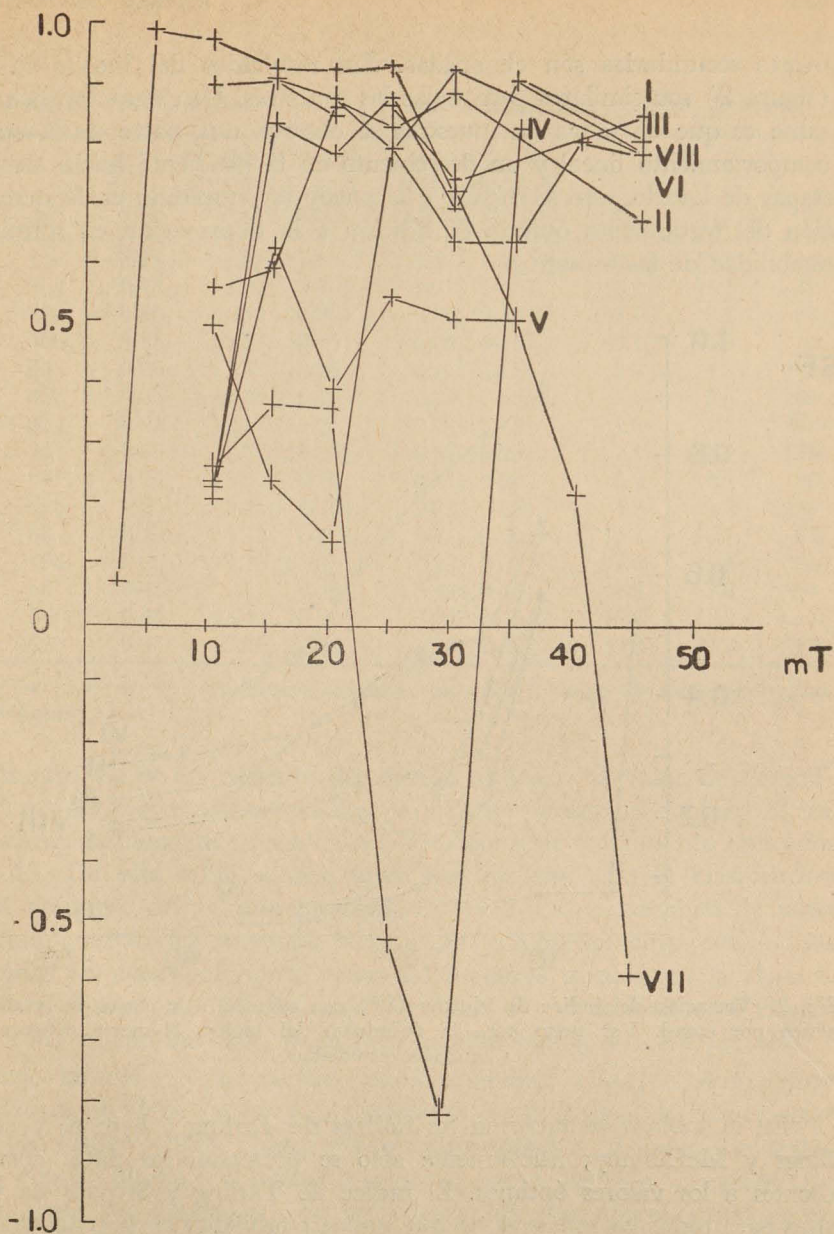


Fig. 1. Variación del índice de Briden (S_{1-2}) con respecto a la etapa de lavado magnético por cmad. Ver texto para la definición del índice. Números en romano refieren a las unidades estudiadas.

nentes secundarias son eliminadas. Los resultados del índice de Briden (figura 2) son similares para todas las muestras. Una característica interesante es que en todas las muestras se observa una parte de la curva de comportamiento lineal y un decremento en la pendiente hacia las últimas etapas de lavado, esto se sugiere que puede ser empleado en la determinación del tratamiento óptimo en adición a la información en términos de estabilidad de las muestras.

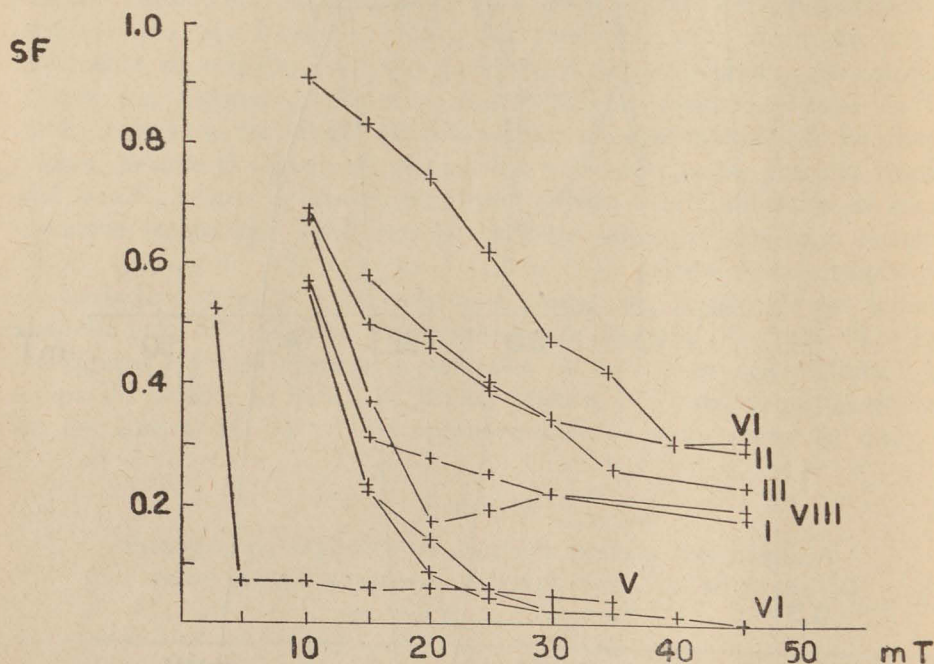


Fig. 2. Variación del índice de Murthy (SF) con respecto a la etapa de lavado magnético por cmad. Ver texto para la definición del índice. Números refieren a las unidades estudiadas.

En la tabla 7 se incluyen los índices de Tarling y Symons y de Giddings y McElhinny; nuevamente sólo se presentan los datos correspondientes a los valores óptimos. El índice de Tarling y Symons da valores altos para todas las muestras, lo que indica estabilidad en la magnetización. El tratamiento óptimo seleccionado por Urrutia (1976) está dentro del rango dado por el índice en 7 de las 15 muestras. Para el caso del índice de Giddings y McElhinny, éste depende del tratamiento aplicado ya que

TABLA 7

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE ROCAS VOLCÁNICAS DEL NE DE JALISCO

S	N	T	ÍNDICE DE TARLING Y SYMONS	ÍNDICE DE GIDDINGS Y McELHINNY	θ_{63}	α_{95}	k
I	11c	0-45	2.57(25-45)*	0.37(10-45)*	20.2	15.5	16.
II	18b	0-45	4.27(15-30)	0.31(15-45)	18.4	14.1	19.
III	28c	0-45	6.52(20-35)	0.36(10-45)	13.1	9.1	38.
IV	40b	0-35	1.95(0-15)	0.06(0-15)	49.1	45.5	3.
V	42	0-25	12.31(15-25)	0.29(0-25)	5.8	4.3	198.
V	43b	0-35	15.33(2.5-10)	0.33(0-35)	5.6	3.6	207.
V	44	0-25	12.47(2.5-25)	0.29(0-25)	1.6	1.2	2 607.
V	45	0-25	13.07(10-20)	0.18(10-25)	7.1	5.3	131.
V	46	0-25	3.80(0-10)	0.23(0-20)	8.7	6.5	86.
V	47b	0-25	3.21(0-10)	0.27(0-25)	6.9	5.7	138.
V	48	0-25	4.71(0-10)	0.21(0-20)	14.2	10.7	33.
V	49b	0-25	3.15(2.5-10)	0.28(0-25)	7.8	5.8	108.
VI	50	0-45	9.61(0-15)	0.45(0-45)	8.8	5.6	84.
VII	58	0-45	4.44(10-20)	0.16(10-35)	19.7	12.9	17.
VIII	102c	0-45	3.98(25-45)	0.26(20-45)	19.2	14.7	18.

S, sitio; N, muestra; T, tratamiento por cmad en mT; * rango de tratamiento para el índice óptimo.

el parámetro C_p es un cociente del campo aplicado al valor de 80 mT. Los valores del índice son empleados para definir clases de estabilidad, las cuales aproximadamente coinciden con los rangos de tratamiento aplicados (tabla 4). De esta tabla se desprende que en este caso la clasificación tiene la limitante del tratamiento aplicado (ver última columna de tabla 7) y aun cuando las muestras tengan un comportamiento estable son clasificadas en clases inferiores; todas las muestras quedan en la clase C de estables y sólo una (40 B) queda en clase D de parcialmente estable y una (50) queda en clase B de muy estable (tabla 4). En la tabla 7 se incluye también la desviación estándar circular (θ_{63}°), el semiángulo de confianza al 95% (α_{95}) y el parámetro de precisión (k) de la estadística de Fisher (1953); estos valores corresponden al rango de tratamiento total (última columna) y por lo tanto reflejan el grado de agrupamiento (o dispersión) de las direcciones durante el tratamiento. Estos valores son aquí considerados como parámetros para medir la estabilidad de las muestras y preferibles (rango total) a estimaciones de estas estadísticas (θ_{63}° , α_{95} , k) utilizando otros rangos dados (por ejem. Larson

TABLA 8

EJEMPLO DE VARIACIÓN DE ALGUNOS ÍNDICES Y ESTIMADORES DE ESTABILIDAD CON RESPECTO AL TRATAMIENTO APLICADO.
VALORES PARA LA MUESTRA 50 (VER TEXTO Y TABLA 7).

TRATAMIENTO (mT)	ÍNDICE DE TARLING Y SYMONS	θ_{63}	α_{95}	k
0.0-15.0	9.6	1.3	1.9	4 041.
0.0-20.0	6.8	2.1	2.3	1 535.
0.0-25.0	6.2	2.6	2.4	999.
0.0-30.0	2.6	6.7	5.6	144.
0.0-35.0	2.3	8.1	6.1	99.
0.0-40.0	2.6	7.7	5.3	111.
0.0-45.0	2.4	8.8	5.6	84.

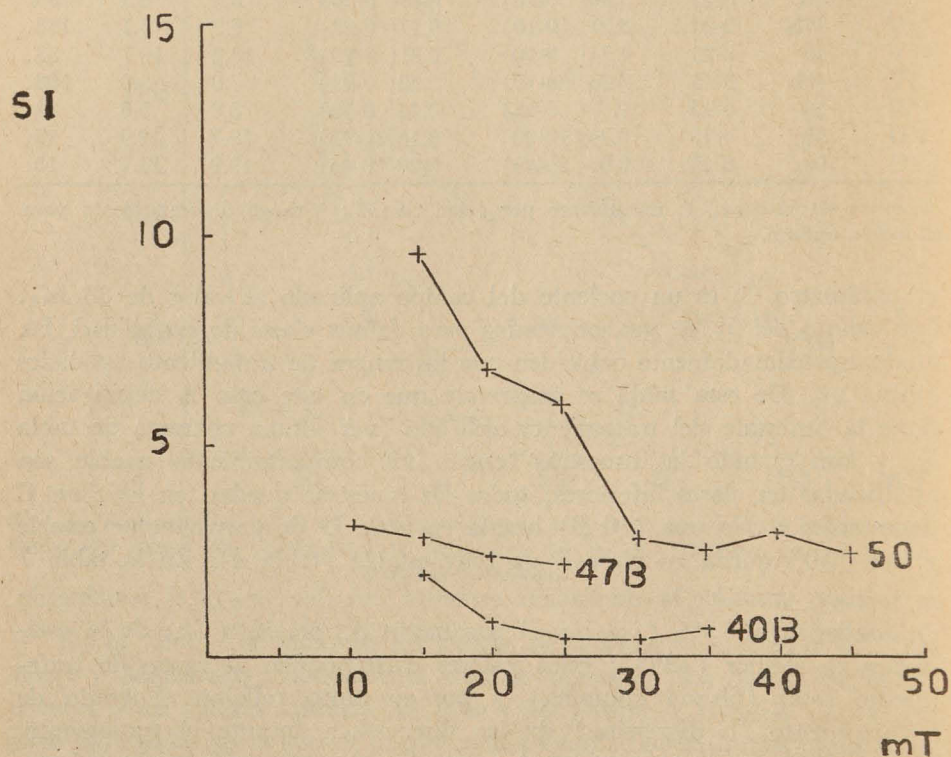


Fig. 3. Variación del índice de Tarling y Symons (SI) con respecto a la etapa de lavado magnético con cmad. Ver texto para la definición del índice. Gráficas en forma acumulativa.

y Strangway, 1969). En la tabla 8 se incluye un ejemplo de la variación de estos índices (tabla 7) con respecto a las diferentes etapas de lavado. Los valores corresponden a la muestra 50 (sitio VI). En la figura 3 se presentan gráficamente algunos ejemplos adicionales (estas gráficas están en forma acumulativa a diferencia de las gráficas de las figuras 1 y 2 que están en función de la etapa de lavado).

En la tabla 9 se presentan algunos parámetros utilizados previamente para medir la estabilidad de la MR (J_{10}/J_0 , J_{20}/J_0 y CDM) y el índice de coercitividad (CI) de Giddings y McElhinny (1976). Este índice es aquí incluido debido a que éste representa una estimación de la proporción de componentes secundarias en el espectro de fuerzas coercitivas, donde un valor de 1 (máximo valor) indica ausencia de componentes secundarias y de 0 (Mínimo valor), predominancia de las mismas. Los valores corresponden al rango de tratamiento seleccionado para el índice de Giddings y McElhinny (tabla 7) y los valores entre paréntesis representan el parámetro C_s el cual es aquí considerado en vez de CI para la dis-

TABLA 9

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE ROCAS VOLCÁNICAS DEL NE DE JALISCO

S	N	J_{10}/J_0	J_{20}/J_0	CDM	CI(C_s)
I	11c	0.36	0.30	7.5(DM-PDS ₂)	0.340 (0.7778)
II	18b	0.76	0.62	27.5(PDS ₁)	0.250 (0.6667)
III	28c	1.32	0.89	30.0(DS ₂)	0.340 (0.7778)
IV	40b	0.26	0.04	6.0(DM-PDS ₂)	0.1875 (1.0)
V	42	0.98	0.97	—	0.3125 (1.0)
V	43b	0.06	0.06	1.0(DM)	0.4375 (1.0)
V	44	0.89	0.76	45.0(DS)	0.3125 (1.0)
V	45	0.98	0.92	>45.0(DS)	0.113 (0.6)
V	46	0.97	0.93	>45.0(DS)	0.25 (1.0)
V	47b	0.94	0.81	>45.0(DS)	0.3125 (1.0)
V	48	0.96	0.87	34.0(DS ₂)	0.25 (1.0)
V	49b	1.03	0.87	>45.0(DS)	0.3125 (1.0)
VI	50	0.91	0.73	32.5(DS ₂)	0.5625 (1.0)
VII	58	0.24	0.06	6.0(DM-PDS ₂)	0.223 (0.7143)
VIII	102c	0.55	0.27	11.0(PDS ₂)	0.174 (0.5556)

S, sitio; N, muestra; J_{10}/J_0 , intensidad a 10 mT/intensidad original; J_{20}/J_0 , intensidad después del tratamiento a 20 mT; CDM, campo destructivo medio en mT; CI, índice de coercitividad; C_s , parámetro que mide el rango de tratamiento por cmad en que la dirección permanece invariable (ver texto); DM, dominio múltiple; PDS₁ y PDS₂, pseudo-dominio simple; DS y DS₂, dominio sencillo (ver tabla 10).

cusión de la estabilidad de la MR dado que CI depende del tratamiento aplicado como se mencionó anteriormente. Para la estimación del CDM se utilizaron las gráficas presentadas en Urrutia (1976). Estos valores se compararon con mediciones de CDM (tabla 10) en muestras sintéticas de magnetita (generalmente el mineral magnético dominante en ígneas extrusivas, situación presente en las muestras de este estudio, Urrutia, 1976) de diversos autores (compilada por Smith y Prévot, 1977) y de ello se clasificaron los minerales magnéticos responsables de la MRN como de dominio simple (DS), pseudo-dominio simple (PDS) y dominio múltiple (MD). La MRT se considera que reside principalmente en minerales de DS (Verghoogen, 1965; Ozima y Ozima, 1965) y que éstos a su vez son los responsables del comportamiento estable (Evans y McElhinny,

TABLA 10

VALORES DE CDM (CAMPO DESTRUCTIVO MEDIO) OBTENIDAS PARA MUESTRAS SINTÉTICAS DE MAGNETITA PRESENTADAS POR VARIOS AUTORES (TOMADA DE SMITH Y PRÉVOT, 1977).

	Dominio simple (DS)		Pseudo-dominio simple (PDS)		Dominio múltiple (DM)
	DS ₁ *	DS ₂ **	PDS ₁ ⁺	PDS ₂ ⁺	DM***
Tamaño (μ m)	elongadas 0.2 $\times$ 0.03	0.037—0.25	d = 1.5	d = 6	d = 250
CDM (mT)	40	30—45	28	11	3.5

Referencias: * Dunlop (1969); ** Rimbert (1959) y Dunlop (1973b); + Parry (1965); *** Lowrie y Fuller (1971).

1969; Dunlop *et al.*, 1973). Diversos autores han establecido que mientras más pequeño es el mineral magnético, más estable es la MRT (Larson *et al.*, 1969); y que la fuerza coercitiva se incrementa con el decremento en tamaño de los minerales (Kittel, 1956; Stacey, 1962; Larson *et al.*, 1969). En la figura 4 a-h se presentan algunos de los estimadores de estabilidad mencionados. Puede observarse que existe un buen acuerdo en sus resultados y que éstos correlacionan a su vez con los resultados previamente reportados en la literatura. Una excepción la constituye la muestra 43B la cual de acuerdo a los estimadores CDM (4a), J_{20}/J_0 (4b), J_{10}/J_0 (4c), índice de Murthy (4d) y el máximo desplazamiento angular (4g), la muestra es inestable, y de acuerdo a α_{95} (4e), K (4f) y C_s (4h) la muestra es estable. Esta situación se presenta

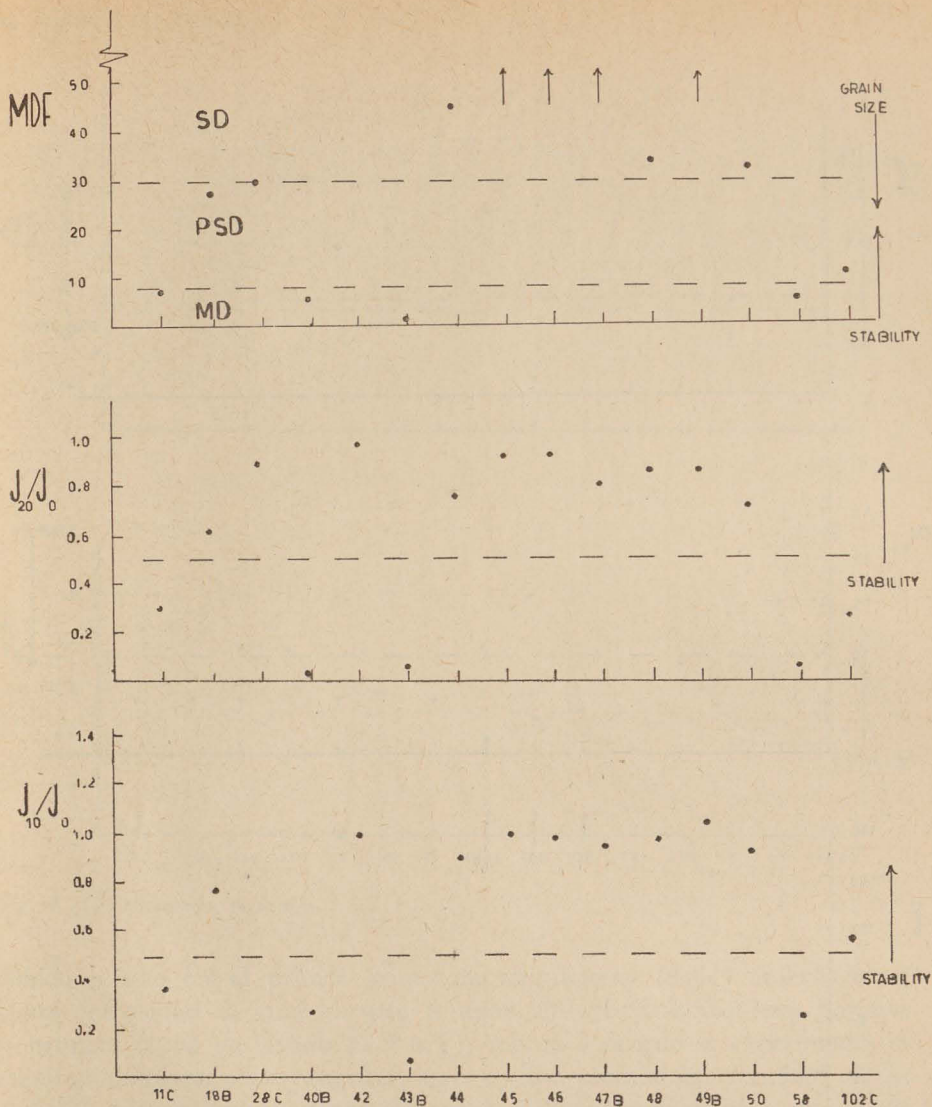


Fig. 4. Comparación de los estimadores de estabilidad magnética para las distintas muestras estudiadas. a) campo destructivo medio en mT, b) J_{20}/J_0 , c) J_{10}/J_0 , d) índice de Murthy (SF), e) semiángulo del cono de confianza al 95%, α_{95} , f) parámetro de precisión, k, g) desplazamiento angular máximo, h) parámetro de coercitividades. Ver texto para la definición de los distintos estimadores.

Nota: La fig. 4 continúa en páginas siguientes.

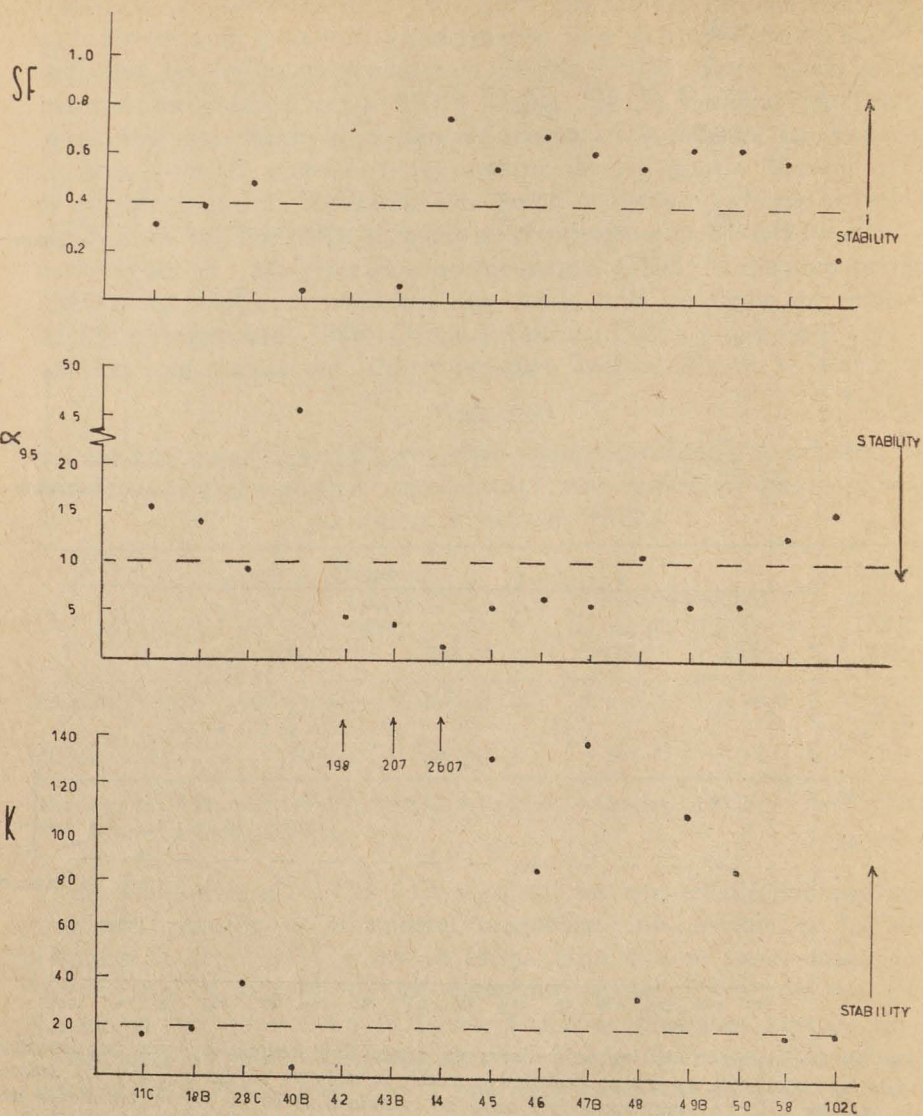


Fig. 4 (Continuación).

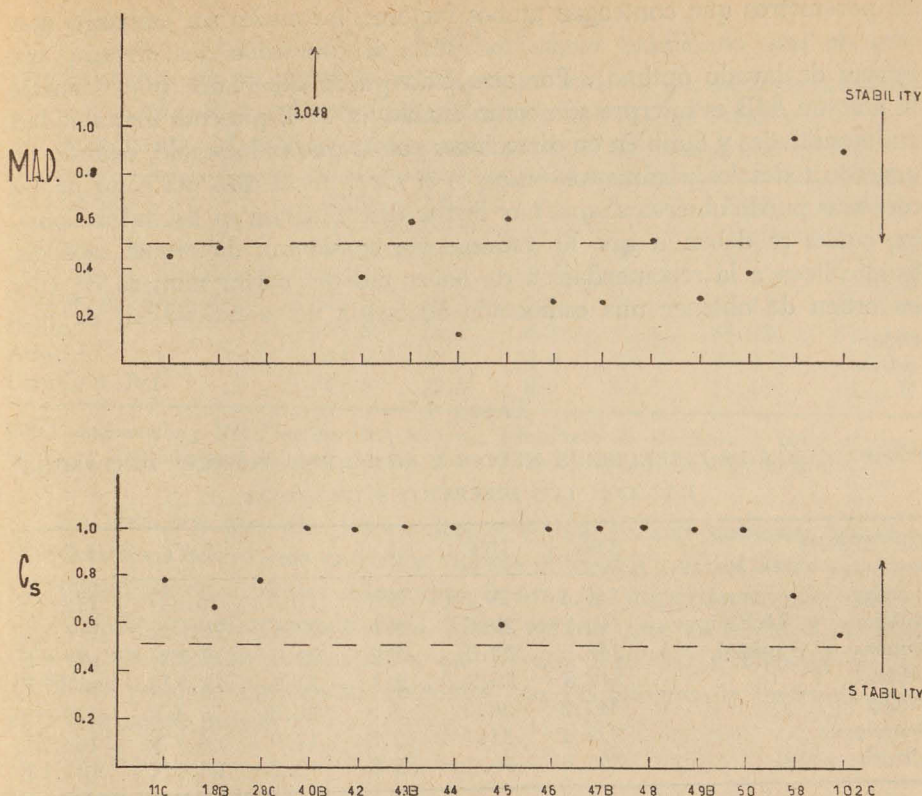


Fig. 4 (Continuación y final).

debido a que en el primer grupo de estimadores (4a-d) interviene el factor intensidad la cual en esta muestra decayó drásticamente durante la primera etapa de lavado (2.5 mT), misma a la que se experimentó el máximo desplazamiento angular; esto es interpretado en términos de la presencia de una componente viscosa de baja coercitividad y esta componente es la que los estimadores miden, mientras que la componente estable en este caso es de menor intensidad y debe residir en minerales de dominio simple y no en dominio múltiple como aparece. El segundo grupo (4 e-h) es influenciado por la variación en direcciones, las que permanecen casi invariables después de la primera etapa. De aquí se concluye que es necesario estimar al menos dos parámetros, uno mayormente controlado por cambios en intensidad y el otro en dirección (además

de parámetros que contengan ambos factores, los cuales sin embargo dan idea de una estabilidad media, no real, al promediar los efectos; ver índices de lavado óptimo). Por otro lado puede observarse que mientras la muestra 43B es interpretada como estable, la 40 B presenta inestabilidad en intensidades y también en direcciones por lo que es inestable, estando de acuerdo todos los parámetros (excepto el C_s); en el caso del resto de las muestras puede observarse que hay ligeras discrepancias en las indicaciones, las cuales se deben a que los estimadores consideran diferentes aspectos, lo que lleva a la recomendación de hacer uso del mayor número de ellos en orden de obtener una estimación adecuada de la estabilidad de una roca.

TABLA 11

COMPARACIÓN DE DIRECCIONES MEDIAS Y POSICIONES POLARES DETERMINADAS CON LOS DIFERENTES CRITERIOS

CRITERIO	DEC	INC	k	α_{95}	LAT	LONG
Tarling y Symons	347.1	29.6	6.1	26.3	76.9 N	148.8 E
Giddings y McElhinny	346.5	29.6	5.8	27.3	76.3 N	149.2 E
Symons y Stupavsky	347.1	31.0	5.2	29.0	77.1 N	151.8 E
Briden	344.8	36.2	5.3	28.8	75.7 N	167.7 E
Heller	347.2	30.2	5.9	26.8	77.1 N	149.4 E
Anterior	325.1	31.1	12.2	17.9	56.7 N	166.7 E
Urrutia y Pal	355.6	36.2	35.8	10.2	68.1 N	181.1 E

DEC, declinación; INC, inclinación; k y α_{95} , parámetro de precisión y cono de confianza al 95% de probabilidad (Fisher, 1953); LAT, latitud; LONG, longitud.

En la tabla 11 se presenta una comparación de dirección media y posición polar obtenidas utilizando los índices de (1) Tarling y Symons, (2) Giddings y McElhinny, (4) Briden, (3) Symons y Stupavsky y (5) Heller con respecto al cálculo usando el criterio adoptado en Urrutia y Pal (1977a). Para los cálculos, los datos del sitio V que por su número sesgarían los resultados fueron primeramente compilados para obtener una dirección media y ésta fue usada con peso unitario en el cálculo final. Este sitio V fue previamente analizado en Urrutia y Pal (1977b) utilizando los criterios cualitativos, una cuantificación del criterio de mínima dispersión y el índice de Briden. En adición a ese estudio, en la tabla 12 se presentan los cálculos con los otros índices mencionados (ver tabla 1 de Urrutia y Pal, 1977b).

TABLA 12

COMPARACIÓN DE DIRECCIONES MEDIAS Y POSICIONES POLARES DETERMINADAS CON LOS DIFERENTES CRITERIOS PARA EL SITIO V
(VER TABLA 11 PARA LOS CÁLCULOS FINALES DE TODOS LOS SITIOS)

CRITERIO	DEC	INC	k	α_{95}	LAT	LONG
Tarling y Symons	335.4	18.1	8.1	20.6	63.7 N	145.3 E
Giddings y McElhinny	335.7	19.7	8.0	20.8	64.4 N	146.7 E
Symons y Stupavsky	335.7	19.7	8.3	20.3	64.2 N	146.2 E
Heller	335.8	21.1	8.3	20.4	64.8 N	148.3 E
Anterior	334.7	23.4	8.8	19.7	64.3 N	152.0 E
Urrutia y Pal	342.8	23.5	8.8	19.7	71.5 N	168.1 E

DEC, declinación; INC, inclinación; k y α_{95} , parámetro de precisión y cono de confianza al 95% de probabilidad (Fisher, 1953); LAT, latitud; LONG, longitud.

En términos generales los resultados (tabla 11 son similares, sin embargo existen diferencias entre los valores obtenidos con los índices y con el criterio anterior. Estas diferencias ilustran la importancia del criterio de selección en el resultado final. Cabe aclarar que estos datos no modifican los resultados reportados en Urrutia (1976) y Urrutia y Pal (1977a) ya que ellos fueron obtenidos con un número de muestras considerablemente mayor.

5. ASPECTOS ADICIONALES

Los criterios más comúnmente empleados para determinar el tratamiento óptimo en el laboratorio, son los basados en aspectos cualitativos. Sus fundamentos son objetivos y apoyados en múltiples trabajos teóricos y experimentales y al momento los resultados obtenidos en su mayoría se consideran adecuados. Estos criterios, sin embargo, en algunos casos pueden conducir a errores graves tanto en el trabajo de laboratorio como en la interpretación de resultados. Por otro lado, se ha sugerido que los tratamientos comúnmente aceptados y en uso en la mayoría de los laboratorios son insuficientes para obtener resultados correctos (Roy y Lapointe, 1978). Esta observación es aplicable también a los criterios cuantitativos y de hecho, al presente, la única propuesta es la de Roy y Lapointe, de utilizar tratamientos de laboratorio más extensos.

El empleo de índices para determinar el tratamiento óptimo en el laboratorio y los aplicados a estimar la estabilidad magnética, no obstante

los intentos efectuados, no se ha incorporado en los procedimientos rutinarios y aun los mismos autores originadores de estos índices no los han utilizado en sus estudios subsecuentes. Estos índices han sido criticados por algunos autores (Andél, 1970) por no ser independientes de, por ejemplo, el número de etapas de desmagnetización usadas, el incremento de las etapas, su regularidad y la aceptación o rechazo de los cambios en intensidad; por ello se han ido proponiendo los varios índices disponibles (Briden, 1972 y Giddings y McElhinny, 1976, incluyen algunos comentarios críticos sobre algunos de los índices en adición a sus propuestas).

De la discusión presentada en Giddings y McElhinny (1976) se desprende que los índices propuestos son sólo aplicables para rocas ígneas (o cuyo comportamiento magnético dependa del mineral magnetita). No obstante, algunos de estos índices son aplicables para otras rocas y otros tratamientos distintos del de cmad. Por ejemplo, el índice de Tarling y Symons se ha usado para lechos rojos tratados con at (Tarling y Sutton, 1967; Turner e Ixer, 1977). De los índices mencionados, los más adecuados para aplicarse en otras rocas son: Tarling y Symons, Briden, Urrutia y Murthy. El índice de Giddings y McElhinny usa un parámetro (C_p) que depende de la fuerza coercitiva de la magnetita (dominios simples).

Gran parte del interés en los tratamientos de laboratorio se ha centrado en rocas ígneas y para el análisis de sedimentarias y metamórficas se han extrapolado los resultados del análisis de ígneas. No obstante el análisis de rocas sedimentarias y metamórficas, en las cuales los procesos de magnetización y el comportamiento de sus magnetizaciones no se encuentra aún bien determinados, presenta problemas mayores y donde las posibilidades de errores graves son también mayores. Para el estudio e interpretación de estos casos una medida mínima necesaria es la de analizar cada unidad de tiempo en forma separada del resto y hacerlo en el mayor detalle posible; con ello se evita involucrar variaciones del CGM, dejando principalmente las debidas a las mismas MRN. Para ello se pueden aplicar algunos de los criterios mencionados, evitando los directamente relacionados a rocas ígneas (Giddings y McElhinny, 1976; Ade-Hall *et al.*, 1968; Park e Irving, 1970; Wilson *et al.*, 1968) así como el criterio de mínima dispersión (Irving *et al.*, 1961; Watkins y Richardson, 1968; Dagley y Ade-Hall, 1970; Urrutia y Pal, 1977b) o restringir el uso de este criterio al análisis de muestras de una misma unidad de tiempo o a muestras que cubran periodos de comportamiento casi estático del CGM tales como el Intervalo Kiaman. Este criterio de mínima dispersión tam-

bién ha sido criticado por Storetvedt (1970) y Briden (1972) aplicado en ciertas situaciones en rocas ígneas.

Los datos de estabilidad magnética han sido correlacionados con otras propiedades magnéticas y petrológicas en el estudio de rocas ígneas. Extensos trabajos sobre el tema se tienen en Ade-Hall *et al.* (1968) y Larson *et al.* (1969). Entre los resultados reportados destacan la relación entre las propiedades magnéticas y el estado de oxidación a alta temperatura de titanomagnetitas (Ade-Hall y Wilson, 1964); Ade Hall *et al.*, 1965; Wilson *et al.*, 1968; Murthy, 1971 y otros) y en particular la relación entre la estabilidad y el estado de oxidación (Watkins y Haggerty, 1965; Larson *et al.*, 1966). Correlaciones que han sido discutidas posteriormente en otros estudios (Ade-Hall *et al.*, 1968). Larson y Strangway (1969) reportaron una correlación entre estabilidad y la presencia de pequeños granos observados al microscopio y Murthy (1971) reporta que ésta no es debida enteramente al tamaño de los granos sino también a la presencia de titanomagnetita.

En base a la discusión y a los resultados de las rocas ígneas del ejemplo, se hace énfasis en la utilización del mayor número de criterios disponibles para una interpretación adecuada y correcta.

BIBLIOGRAFÍA

- ADE-HALL, J. M., 1969. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 18, 93-107.
 ADE-HALL, J. M. y R. L. WILSON, 1964. *Nature*, 198, 659.
 ADE-HALL, J. M., R. L. WILSON y P. J. SMITH, 1965. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 9, 323-336.
 ADE-HALL, J. M., M. A. KHAN, P. DAGLEY y R. L. WILSON, 1968. Partes I y II, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 16, 375-388 y 389-400.
 ADE-HALL, J. M., F. AUMENTO, P. J. C. RYALL y R. E. GERSTEIN, 1973. *Can. J. Earth Sci.*, 10, 679-696.
 ANDEL, J., 1970. *Stud. Geophys. Geod.*, 14, 312-324.
 AS, J. A. y J. D. A. ZIJDERVELD, 1958. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 1, 308-319.
 BESKE-DIEHL, S. y P. N. SHIVE, 1978. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 55, 351-362.
 BOL-SHAKOV, A. S. y G. M. SOLODOVNIKOV, 1968. *Izv. URSS*, 9, 95-101.
 BRIDEN, J. C., 1972. *Geophys. Res.*, 77, 1401-1405.
 BUTLER, R. F., S. K. BANERJEE y J. H. STOUT, 1976. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 47, 179-196.
 CARMICHAEL, C. M., 1961. *Proc. Roy. Soc., Lond.*, A263, 508.
 COLLISON, D. W., 1963. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 9, 203-217.
 COX, A., 1969. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 18, 545-549.
 COX, A. y R. R. DOELL, 1969. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 71, 647-768.
 CREER, K. M., 1959. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 2, 261-275.

- DAGLEY, P. y J. M. ADE-HALL, 1970. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 20, 65.
- DAVID, P., 1904. *C. R. Acad. Sci., Paris*, 138, 41-42.
- DEUTSH, E. R., R. R. PATZOLD y G. S. MURTHY, 1977. *Initial Rep. DSDP*, 37, 475-479.
- DUNLOP, D. J., J. A. HANES y K. L. BUCHAN, 1973. *J. Geophys. Res.*, 78, 1387-1393.
- ELLWOOD, B. B. y N. D. WATKINS, 1975. *Initial Rep. DSDP*, 34, 495.
- ELLWOOD, B. B. y N. D. WATKINS, 1977. *Initial Rep. DSDP*, 37, 511.
- EVANS, M. E. y M. W. McELHINNY, 1969. *J. Geomag. Geoelect.*, 21, 757.
- EVERITT, C. W. F., 1962. *Phil. Mag.*, 7, 583-597.
- EVERITT, C. W. F. y J. A. CLEGG, 1962. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 6, 312-319.
- FISHER, R. A., 1953. *Proc. Roy. Soc., Lond.*, A217, 295-305.
- FOLGHERAITER, G., 1899. *J. Phys. Rad.*, 8, 5-16.
- GIDDINGS, J. W. y M. W. McELHINNY, 1976. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 44, 239-251.
- GRAHAM, J. W., 1949. *J. Geophys. Res.*, 54, 131-167.
- GRAHAM, J. W., 1953. *J. Geophys. Res.*, 58, 243-260.
- HELLER, F., 1977. *J. Geophys.*, 42, 475-488.
- IRVING, E., 1964. *Palaeomagnetism and its application to geological and geophysical problems*, Wiley, 399 p.
- IRVING, E., W. A., W. A. ROBERTSON, P. M. STOTT, D. H. TARLING y M. A. WARD, 1961. *J. Geophys. Res.*, 66, 1927-1933.
- KOENIGSBERGER, J. G., 1938. Partes I y II, *Terr. Mag. Atmos. Elect.*, 43, 119-127 y 299-320.
- LARSON, E. E. y D. W. STRANGWAY, 1969. *J. Geophys. Res.*, 74, 1505-14.
- LARSON, E. E., M. OZIMA, M. OZIMA, T. NAGATA, y D. W. STRANGWAY, 1966. *Eos*; 47, 69.
- LARSON, E. E., M. OZIMA, M. OZIMA, T. NAGATA y D. W. STRANGWAY, 1969. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 17, 263-292.
- McELHINNY, M. W., 1973. *Palaeomagnetism and plate tectonics*, Cambridge University press, 358 p.
- McELHINNY, M. W. y D. L. GOUGH, 1963. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 7, 287-303.
- MURTHY, G. S., 1971. *Can. J. Earth Sci.*, 8(7), 802-812.
- OZIMA, M. y M. OZIMA, 1965. *J. Geophys. Res.*, 70, 1363-1369.
- OZIMA, M., M. OZIMA y T. NAGATA, 1964. *J. Geomag. Geoelect.*, 16, 37-40.
- PARK, J. K. y E. IRVING, 1970. *Can. J. Earth Sci.*, 7, 1499-1514.
- PATTEL, J. P., 1971. M. Sc. thesis, University of Western Ontario, London, Ont.
- PATTEL, J. P. y H. C. PALMER, 1974. *Can. J. Earth Sci.*, 11, 353-361.
- PIPER, J. D. A., 1976. *Geol. J.*, 11 (2), 189-201.
- PREVOT, M., A. LECAILLE, J. FRANCHETEAU y R. HEKINIAN, 1976. *Nature*, 259 (5545), 649-653.
- ROBERTSON, W. A. y W. F. FAHRIG, 1971. *Can. J. Earth Sci.*, 8, 1355.
- ROY, J. L. y P. L. LAPOINTE, 1976. *Can. J. Earth Sci.*, 13, 749-773.
- ROY, J. L. y P. L. LAPOINTE, 1978. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 16, 20-37.
- SMITH, B. M. y M. PREVOT, 1977. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 14, 120-136.
- STACEY, F. D., 1962. *Phil. Mag.*, 7, 1887-1900.
- STORETVEDT, K. M., 1970. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 19, 107-110.

- SYMONS, D. T. A., 1970. *Can. J. Earth Sci.*, 7, 86-90.
- SYMONS, D. T. A., 1971. *Geol. Surv. Can. Pap.*, 70-71, 6368.
- SYMONS, D. T. A., 1977. *Can. J. Earth Sci.*, 14(6), 1246-1262.
- SYMONS, D. T. A. y J. W. LONDREY, 1975. *Can. J. Earth Sci.*, 12, 940-949.
- SYMONS, D. T. A. y M. STUPAVSKY, 1974. *J. Geophys. Res.*, 79, 1718-1720.
- TARLING, D. H., 1971. *Principles and Applications of Palaeomagnetism*, Chapman and Hall, London, 192 p.
- TARLING, D. H. y D. H. SUTTON, 1967. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1, 35-43.
- TARLING, D. H. y D. T. A. SYMONS, 1967. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 12, 443-449.
- TURNER, P. y R. A. IXER, 1977. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 34, 113-124.
- URRUTIA F., J., 1976. Tesis Maestría en Ciencias, UNAM, 292 p.
- URRUTIA F., J., 1977. Manuscrito inédito.
- URRUTIA F., J. y S. PAL, 1977a. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 36, 202-206.
- URRUTIA F., J. y S. PAL, 1977b. *Geof. Intern.*, 16(3), 197-202.
- VERHOOGEN, J., 1962. *J. Geol.*, 70, 168-181.
- WATKINS, N. D. y S. E. HAGGERTY, 1965. *Nature*, 206, 797.
- WATKINS, N. D. y A. RICHARDSON, 1968. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 15, 287-304.
- WILSON, R. L., 1962a. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 6, 397-399.
- WILSON, R. L., 1962b. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 7, 194-202.
- WILSON, R. L., 1962c. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 7, 125-130.
- WILSON, R. L., S. E. HAGGERTY y N. D. WATKINS, 1968. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 16, 79-96.
- ZIJDERVELD, J. D. A., 1967. In: *Methods in Palaeomagnetism*, Elsevier Collinson D. W., Creer, K. M. y Runcorn, S. K. (Eds.), 254-286.