

GL04156

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD  
GERENCIA DE PROYECTOS GEOTERMoeLECTRICOS  
SUBGERENCIA DE ESTUDIOS GEOTERMICOS

PALEOMAGNETISMO, MAGNETOESTRATIGRAFIA  
Y MAGNETISMO DE ROCAS EN EL CAMPO GEO  
TERMICO DE LOS AZUFRES, MICHOACAN . -

INFORME 05-85

Enero '85

Dr. J. Urrutia Fucugauchi

Ing. D. J. Morán Zenteno

Dr. J. Oscar Campos E.



COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD  
GERENCIA DE PROYECTOS GEOTERMIOELÉCTRICOS  
SUBGERENCIA DE ESTUDIOS GEOTERMICOS

PALEOMAGNETISMO, MAGNETOESTRATIGRAFIA Y MAGNETISMO  
DE ROCAS EN EL CAMPO GEOTERMICO DE LOS AZUFRES, MICHOACAN

INFORME 05-85

ENERO '85

DR. J. URRUTIA FUCUGAUCHI\*

ING. D. J. MORÁN ZENTENO\*

DR. J. OSCAR CAMPOS ENRIQUEZ\*\*

\* Laboratorio de Paleomagnetismo y Tectonofísica, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, - Delegación Coyoacán 04510 D. F.

\*\* Departamento de Exploración, Gerencia de Proyectos Geotermioeléctricos, Comisión Federal de Electricidad (CFE), Alejandro Volta 655, Col. de Los Electricistas, Morelia, Michoacán.

# C O N T E N I D O

	PÁGINA
1. INTRODUCCION. . . . .	1
2. OBJETIVOS. . . . .	1
3. ESTUDIOS PALEOMAGNETICOS EN AREAS GEOTERMICAS EN MEXICO. . . . .	2
4. MAGNETOESTRATIGRAFIA. . . . .	2
5. CORRELACION Y DATACION CON PROPIEDADES MAGNE- TICAS. . . . .	3
6. ESTUDIO PALEOMAGNETICO. . . . .	4
6.1 TÉCNICAS DE CAMPO. . . . .	4
6.2 MÉTODOS DE LABORATORIO . . . . .	5
7. RESULTADOS. . . . .	6
7.1 UNIDAD TMSA . . . . .	6
7.1.1 SITIO V . . . . .	6
7.1.2 SITIO VI. . . . .	7
7.1.3 SITIO X . . . . .	7
7.2 UNIDAD QRF . . . . .	8
7.2.1 SITIO IV. . . . .	8
7.2.2 SITIO VII . . . . .	9
7.2.3 SITIO VIII. . . . .	9
7.3 UNIDAD QRV. . . . .	10
7.3.1 SITIO XII . . . . .	10
8. DISCUSION. . . . .	11
BIBLIOGRAFIA . . . . .	13

# I L U S T R A C I O N E S

## PLANOS

1. PLANO GEOLÓGICO, ZONA GEOTÉRMICA DE LOS AZUFRES, AL FINAL MICH., LOCALIZACIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO. . . DEL TEXTO

## FIGURAS

1. LOCALIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO. . . . . "
2. ESCALAS DE CAMBIOS DE POLARIDAD PARA LOS ÚLTIMOS 5.5 MILLONES DE AÑOS. . . . . "
3. CONTORNOS DE LA TEMPERATURA DE CURIE EN FUNCIÓN DE LA COMPOSICIÓN DEL SISTEMA  $TiO_2-FeO_2Fe_2O_3$ . . . . . "
4. ESCALA DE CAMBIOS DE POLARIDAD DEL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE DURANTE EL CENOZÓICO . . . . . "
5. CURVA DE DESMAGNETIZACIÓN POR CMAD (SITIO V, MUESTRA 29). . . . . "
6. CURVAS DE DESMAGNETIZACIÓN TÉRMICA (SITIO V, MUESTRA 29B, SITIO VII, MUESTRA 53B, SITIO XII, MUESTRA 103) . . . . . "
7. DISTRIBUCIÓN DE LAS DIRECCIONES DE MRN (SITIO IV) ANTES Y DESPUÉS DE EFECTUAR LA CORRECCIÓN POR TECTÓNICA. . . . . "
8. CURVAS DE DESMAGNETIZACIÓN POR CMAD (SITIO IV, - MUESTRAS 18A Y 27A). . . . . "
9. CURVA DE MRI DE LABORATORIO (SITIO IV, MUESTRA 27) . . . . . "
10. CURVA DE MRI DE LABORATORIO (SITIO IV, MUESTRA 18) . . . . . "
11. PROYECCIÓN ORTOGONAL QUE MUESTRA EL PROCESO DE DESMAGNETIZACIÓN POR CMAD (SITIO VII, MUESTRAS 53 Y 55) . . . . . "

## FIGURAS

12. CURVAS DE DESMAGNETIZACIÓN POR CMAD (SITIO VII, - AL FINAL MUESTRAS 53A Y 55B). . . . . DEL TEXTO
13. CURVA DE MRI DE LABORATORIO (SITIO VII, MUESTRA 53) "
14. CURVAS DE DESMAGNETIZACIÓN POR CMAD (SITIO XII, - MUESTRAS 98 Y 106B). . . . . "

## TABLAS

1. ESQUEMA DE MUESTREO. . . . . "
2. SITIOS Y CARACTERÍSTICAS PETROGRÁFICAS DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS. . . . . "
3. RESULTADOS MAGNETOESTRATIGRÁFICOS DE LAS UNIDADES VOLCÁNICAS DEL CAMPO GEOTÉRMICO LOS AZUFRES, MICH. "
4. EDADES K-AR DE LAS UNIDADES VOLCÁNICAS DEL CAMPO GEOTÉRMICO LOS AZUFRES, MICH. (DOBSON, 1984). . . . . "

## 1. INTRODUCCION

En este trabajo se reportan resultados preliminares de un estudio de paleomagnetismo, magnetoestratigrafía y magnetismo de rocas realizado en el campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán. El estudio se lleva a cabo con la colaboración del Depto. de Exploración, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de C.F.E. y el Laboratorio de Paleomagnetismo, Instituto de Geofísica de la UNAM.

El campo geotérmico de Los Azufres se encuentra en el Parque Nacional de Los Azufres, en la Sierra de San Andrés, Michoacán, a unos 95 Km de la ciudad de Morelia (Fig. 1). En Los Azufres se encuentran varias manifestaciones geotérmicas tales como fumarolas y manantiales termales, de interés por sus propiedades terapéuticas, y zonas de alteración como depósitos de caolín, de interés éstos para la industria de la cerámica y otras. Tomando en cuenta estas evidencias de un posible sistema geotérmico, la Comisión Federal de Electricidad inició una serie de investigaciones geológicas y geofísicas encaminadas al estudio del campo geotérmico. A la fecha, estas investigaciones han hecho posible la instalación de algunas unidades geotermoeléctricas. El presente trabajo está encaminado a aportar datos para una mejor comprensión del campo geotérmico, que se traduzca en un desarrollo adecuado de su potencial energético (ver objetivos en la siguiente sección).

## 2. OBJETIVOS

Dentro de los objetivos del presente trabajo se tienen: (1) obtener datos paleomagnéticos y sobre el magnetismo de rocas de las diversas unidades geológicas expuestas en el campo geotérmico; (2) utilizar estos datos para magnetoestratigrafía (correlación y datación utilizando polaridades, posiciones polares, direcciones y variación secular); (3) utilizar los datos de unidades datadas por otros medios, por ejemplo técnicas radiométricas (K-Ar, etc.) para formar una base de datos magnetoestratigráficos (y con el tiempo, evaluar los datos radiométricos); y (4) utilizar los datos paleomagnéticos para estudiar la evolución tectónica de la región.

El presente reporte tiene carácter preliminar y se espera realizar más estudios en un futuro próximo. Estos trabajos, permitirán además desarrollar una metodología adecuada aplicable en el país en el estudio de otros campos con potencial geotérmico. Esto es quizá uno de los aspectos más importantes ya que el equipo de laboratorio, facilidades de trabajo de campo, metodología, interpretación, etc. se encuentran disponibles en el país.

### 3. ESTUDIOS PALEOMAGNETICOS EN AREAS GEOTERMICAS EN MEXICO

El paleomagnetismo ha sido aplicado con éxito en una gran variedad de problemas en geología, geofísica y arqueología (Tarling, 1983). En México, desde hace unos años se ha venido investigando en paleomagnetismo y sus aplicaciones potenciales (para un resumen ver Urrutia, 1984). Estudios en áreas de interés geotérmico han comenzado sólo recientemente. Con resultados reportados se tienen: (1) Cerro Prieto, Baja California Norte (de Boer, 1979); (2) Los Hornos-Derrumbadas, Puebla-Veracruz (Urrutia, 1983) y (3) Los Azufres, Michoacán (Aumento y Gutiérrez, 1980). Estos estudios aún no han mostrado toda la gama de posibles aplicaciones, en correlación y datación, pero han proporcionado algunos resultados de interés en magnetoestratigrafía (de Boer, 1979; Aumento, 1980) y en problemas de estimación de temperaturas de emplazamiento de depósitos piroclásticos (Urrutia, 1984). Los datos paleomagnéticos pueden ser de utilidad además en muchos otros problemas, tales como en el modelado de anomalías magnéticas y aeromagnéticas, estudio de alteraciones hidrotermales e intemperismo, diferenciación y mapeo de depósitos piroclásticos, caracterización de unidades volcánicas, problemas estructurales y tectónicos, estimación de direcciones de flujo de lavas, etc. (Urrutia, 1980).

### 4. MAGNETOESTRATIGRAFIA

Uno de los resultados paleomagnéticos más importantes y que más profundamente ha influenciado los estudios de geomagnetismo, magnetometría, estratigrafía y tectónica es el descubrimiento y documentación de los cambios de polaridad del campo geomagnético en el pasado geológico. Desde los primeros reportes, a principios de este siglo, sobre rocas ígneas con magnetizaciones remanentes con polaridad rever

sa, este aspecto del paleomagnetismo ha sido ampliamente investigado (Cox, 1973). A fines de la década de 1950 y principios de la década de 1960, los estudios permitieron definir la escala de cambios de polaridad para los últimos 5.5 millones de años (Fig. 2), la cual fue aplicada a problemas de correlación y datación y en la interpretación de anomalías magnéticas marinas, en términos de las teorías de Esparcimiento de los Fondos Oceánicos y Tectónica de Placas (Tarling, 1983). En los últimos años, estos estudios paleomagnéticos o magnetoestratigráficos se han incrementado, con el uso de materiales diversos tales como rocas volcánicas, materiales arqueológicos, sedimentos marinos, sedimentos de lago y depósitos en cavernas (Tarling, 1983). Uno de los objetivos a largo plazo de estos estudios es poder definir las variaciones del campo geomagnético en el espacio y en el tiempo a escalas global y local, de tal forma de poder identificar los mecanismos y procesos que generan este campo geomagnético y su evolución. Al mismo tiempo, estos estudios proveen una base de datos cuantitativos para resolver problemas estratigráficos (datación y correlación). Recientemente, los datos magnetoestratigráficos han sido incorporados dentro del código de nomenclatura estratigráfica (Opdyke y Salvador, 1979) y son empleados en las escalas geológicas, tal como en la escala reportada por la Sociedad Geológica de América en 1983.

## 5. CORRELACION Y DATAACION CON PROPIEDADES MAGNETICAS

Los métodos magnéticos hacen uso de la información sobre las variaciones del campo geomagnético que ha quedado grabado en rocas (magnetización remanente, MR). En el caso de rocas volcánicas jóvenes, se tienen varias ventajas tales como una alta intensidad de magnetización (facilidad de medir), alta estabilidad magnética y composición simple de la MR, por lo que el registro es generalmente exacto y fácil de investigar.

En las rocas volcánicas, la magnetización se adquiere al enfriarse el magma por debajo de la temperatura de Curie (la cual depende del mineral magnético; por ejemplo ver Fig. 3) y se conoce como M.R. térmica (MRT). De aquí que la MRT data del tiempo de emplazamiento de la roca volcánica y la MR es considerada primaria y contiene un registro de la dirección (y posición polar) del campo geomagnético al tiempo de adquisición de la magnetización. Sin embargo, diversos procesos pueden alterar y modificar el registro; entre ellos

cambios químicos (MR química; MRQ), exposición a campos magnéticos débiles por largos períodos (MR viscosa; MRV) y exposición a campos magnéticos fuertes como los asociados con rayos (MR isotermal; MRI). Ello hace necesario el investigar la composición vectorial de la MR e interpretar el registro magnético.

En los estudios magnetoestratigráficos, una primera aplicación se basa en la comparación de la polaridad de la MR con la escala de polaridades del campo geomagnético (Figuras 2 y 4), o bien por comparación de los cambios de polaridad en dos secuencias dadas. Una segunda aplicación se basa en la comparación de las direcciones de MR o de las posiciones polares correspondientes con las direcciones o posiciones polares definidas para otras unidades con edades conocidas. Esto requiere el disponer previamente de una base de datos con dataciones radiométricas (lo que constituye uno de los proyectos del Laboratorio de Paleomagnetismo de la UNAM). Una tercera aplicación se basa en la comparación de la dispersión de las direcciones con datos previos sobre la dispersión (principalmente variación secular) del campo geomagnético en el tiempo. Ello requiere también de un banco previo de datos. Los métodos magnéticos tienen también limitaciones, sin embargo, su empleo combinado con observaciones de campo y otros estudios tales como radiométricos y geomorfológicos proporcionan resultados adecuados.

Para los últimos 300 000 años, se tiene también la posibilidad de usar las excursiones del campo geomagnético (cambios en la posición polar que resultan en latitudes entre los 40°N y 40°S). Estas excursiones aún están en la etapa de investigación y su ocurrencia y edad están por definirse. De Boer (1979) hace uso de información sobre excursiones para fines de datación en su estudio del campo de Cerro Prieto. Bremer y Urrutia (1984) han reportado algunos datos paleomagnéticos para unidades volcánicas del valle de Toluca que sugieren campos geomagnéticos transicionales, compatibles con la ocurrencia de excursiones en el período de 19 500 a 30 500 años.

## 6. ESTUDIO PALEOMAGNETICO

### 6.1 Técnicas de Campo

Estudios efectuados sobre muestras sin orientar permiten investigar las propiedades magnéticas (intensidad de MRN, composición vectorial y estabilidad de MRN, susceptibilidad, temperatura de Curie, magnetización de saturación etc.) y la paleointensidad del campo geomagnético. Estudios en muestras de núcleos de perforación permiten, además de lo anterior, investigar la inclinación del campo geomagnético. Estudios en muestras orientadas permiten realizar un estudio completo incluyendo la dirección del campo geomagnético (declinación e inclinación).

El muestreo se realizó utilizando una perforadora portátil de motor de gasolina, con barrena muestrador magnética de corona con diamante; con la cual se perforaron núcleos de 3-15 cm de longitud y 2.5 cm de diámetro. Los núcleos fueron orientados 'in situ' con un dispositivo orientador y una brújula Brunton. Se colectaron un total de 107 núcleos orientados de 12 sitios (Tabla 1). La distribución de los sitios se muestra en el Plano 1. Detalles de los procedimientos pueden encontrarse en Urrutia y Pal (1975):

## 6.2 Métodos de Laboratorio

En el laboratorio los núcleos se cortaron en cilindros de ~2.0-2.2 cm de largo. La magnetización remanente (dirección e intensidad) de cada cilindro se midió con un magnetómetro de flujo (muestras que presentaban una intensidad alta, ~3 A/m) o con un magnetómetro de giro DIGICO acoplado a una microcomputadora.

Considerando que la magnetización remanente (MR) de las muestras puede ser compuesta (es decir, formada por varias MR de diversos orígenes y edades), la composición vectorial y la estabilidad magnética fueron examinadas mediante desmagnetización por campos magnéticos alternos decrecientes (CMAD) y mediante altas temperaturas (desmagnetización térmica). Las desmagnetizaciones CMAD fueron hechas en 8-10 pasos hasta un valor límite de .70-90 mT. Las desmagnetizaciones térmicas fueron hechas en 5 pasos hasta un valor límite de 400-550°C.

Los datos de las direcciones de la MR fueron analizados con métodos estadísticos (bi-dimensionales en

superficie esférica, Fisher, 1953) y los de desmagnetizaciones mediante análisis vectorial. Detalles de los métodos pueden encontrarse en Urrutia (1977, 1978, 1979) y Tarling (1983).

Con objeto de identificar los minerales magnéticos portadores de las magnetizaciones se utilizaron campos magnéticos altos para impartir a las muestras una magnetización isotérmica (MRI) de laboratorio.

## 7. RESULTADOS

### 7.1 Unidad Tmsa

Esta unidad es considerada como el basamento local en la zona y está constituida por una secuencia de derrames andesíticos incluyendo también derrames de dacita, andesita porfirítica y materiales piroclásticos (ver Camacho, 1979; De la Cruz y colaboradores, 1982). Rocas de esta unidad se muestrearon en seis sitios (Tabla 1).

#### 7.1.1 Sitio V.

Se colectaron 8 muestras orientadas (29-36) en este sitio, con separaciones entre ellas de ~20 cm (cubriendo una área de ~2 m<sup>2</sup>). Las andesitas en el sitio presentan textura pilotaxítica con cristales de clinopiroxeno y olivino y con una alteración por oxidación y cloritización de aproximadamente del 5%. Por sus características texturales esta andesita se puede correlacionar con las andesitas afieltradas de ELC-Electroconsult (1980) y están cubiertas por una capa de ceniza, de donde se tienen cristales de biotita que cubren la unidad de andesitas.

Las direcciones de magnetización remanente natural (MRN) se encuentran dispersas aparentemente a lo largo de un gran círculo con una orientación aproximada de 140°-320°, con inclinación positivas y negativas. Esta distribución sugiere, dado el tamaño del afloramiento muestreado, MRN compuestas, cuyas -

componentes tienen polaridades opuestas. La desmagnetización térmica y mediante CMAD indica en algunas muestras una sola componente y en otras varias componentes. La polaridad de algunas muestras es inversa y en otras es intermedia.

La intensidad del MR decrece con el CMAD, y es ~10% del valor inicial para una intensidad de 70 mT del CMAD (Figura 5), lo que sugiere la presencia de titanomagnetitas como minerales magnéticos portadores de la MR. Las temperaturas de bloqueo están distribuidas (Fig. 6), lo que sugiere variación en composición o variación en el tamaño de grano.

#### 7.1.2 Sitio VI

Este sitio está a unos 150 m del sitio V. La andesita presenta lajeamiento con un rumbo y echado de ~168° y ~15°. Las características texturales y mineralógicas son similares a las del sitio anterior.

Se colectaron 8 muestras orientadas (37-44), con separaciones entre ellas de ~10-20 cm. La polaridad de las muestras es intermedia.

#### 7.1.3 Sitio X

En este sitio se colectaron 3 muestras orientadas (86-88), dado que los otros núcleos se fracturaron al perforarse debido al lajeamiento de las andesitas. El rumbo y echado es ~161° y ~25°, que es muy parecido al observado en el sitio VI. La polaridad de las muestras es intermedia y las direcciones de MR muy semejantes a las del sitio VI. La andesita en este sitio presenta textura pilotaxítica con algunas porciones intersertales y hialoofíticas y cristales de clinopiroxeno y ortopiroxeno. Por el tamaño y disposición de los cristales de plagioclasa esta andesita parece también corresponder a las que en el informe de Electroconsult se denominan andesitas afieltradas.

## 7.2 Unidad Qrf

Esta unidad está formada por riolitas (coladas viscosas y domos con texturas fluidal y esferulítica, e intercaladas en las coladas viscosas se observan algunas fases ignimbríticas y tobaceas) y se encuentra estratigráficamente arriba de la unidad Tmsa (De la Cruz y colaboradores, 1982). Rocas de esta unidad se muestrearon en cuatro sitios (Tabla 1).

### 7.2.1 Sitio IV

Se colectaron 11 muestras orientadas (18-28) - en este sitio de ignimbritas en posición sub-horizontal (rumbo y echado de  $\sim 262^\circ$  y  $\sim 18^\circ$ , respectivamente). Estas rocas son de color rosa con cuarzo visible (también biotita y sanidino). Se observaron pliegues y 'slumps' singenéticos en partes del afloramiento. El análisis petrográfico reveló una textura esferulítica con alteraciones por oxidación, argilitización y cloritización que alcanzan en conjunto hasta un 10%.

Esta localidad corresponde a la prominencia de riolitas ubicada en el campamento de Agua Fria.

Las direcciones de magnetización remanente natural (MRN) están distribuidas en parte de un gran círculo con orientación aproximada de  $190^\circ-0^\circ$ , e inclinaciones positivas y negativas, formando un grupo único de direcciones (Fig. 7). Esto indica la presencia de al menos dos componentes de magnetización en algunas muestras. Aplicando la corrección por estructura (rotación de ejes para restaurar las capas a una posición horizontal) a las direcciones observadas, cambia la distribución de inclinaciones, y ahora la mayoría se presenta con signo negativo (es decir de polaridad reversa). Esta polaridad reversa obtenida con la corrección sugiere que la estructura de las capas es parcialmente de origen tectónico, y confirma su posición horizontal original lo que podría corresponder a la actitud típica de las ignimbritas.

La forma de las curvas de desmagnetización --- (cambios de intensidad con el campo magnético aplicado) sugiere la presencia de titanomagnetitas (probablemente de grano grueso a fino) con comportamiento variable de dominio sencillo (mayor coercitividad) a dominio múltiple (menor coercitividad), más una contribución menor de minerales de alta coercitividad, probablemente de la serie hematita-ilmenita (Fig. 8). La presencia de titanomagnetitas y, en menor proporción, titanohematitas fué también observada de las curvas de magnetización isotérmica (MRI) con campos magnéticos altos (hasta 1400 mT). Las curvas muestran un incremento en la MRI en campos bajos y una saturación en campos de ~400 mT (Figs. 9 y 10). En la muestra 27 se observan pequeños incrementos hasta campos de 1000 mT (Fig. 9), lo que indica la presencia de otro mineral además de titanomagnetitas, en una proporción mayor que en la muestra 18 (Fig. 10).

### 7.2.2 Sitio VII

Este sitio se localiza en la cañada de Agua Azul, cerca de Rincón de Rubios. Se colectaron un total de 13 muestras orientadas (45-61), de un afloramiento de ignimbritas, que muestran efectos de intemperismo. El análisis microscópico reveló la presencia de esferulitas en una matriz de vidrio perlítico y la existencia de fenocristales de biotita y hornblenda parcialmente cloritizados y oxidados. Esta localidad corresponde al extremo meridional de importantes cuerpos ignimbríticos y riolíticos que se extienden desde Los Azufres.

Los resultados de este sitio indican una polaridad intermedia, dado que las direcciones de magnetización remanente natural están distribuidas en dos grupos con inclinaciones negativas y declinaciones de 270° y 330°, respectivamente. (Fig. 11). Los resultados de desmagnetización con CMAD y con temperaturas indican la presencia, generalmente, de una componente principal de polaridad intermedia. (Figs. 12 y 13).

### 7.2.3 Sitio VIII

Este sitio se encuentra localizado en un afloramiento de ignimbritas perteneciente a la unidad de riolitas fluidales y está ubicado unos cuantos metros del sitio VII. Las características texturales y mineralógicas son las mismas que en este último sitio.

Los resultados de las mediciones de magnetización remanente son similares a las del sitio VII. La polaridad es intermedia. De las curvas de desmagnetización por CMAD y por temperaturas, se observaron magnetizaciones secundarias de menor intensidad, y al parecer los minerales magnéticos han sido menos alterados que en el sitio VII.

### 7.3 Unidad Qrv

La unidad esta constituida principalmente por cuerpos dómicos vítreos que se distribuyen en la porción occidental del área. Esta unidad no se ve afectada por el tectonismo de las unidades Tmsa y Qrf y se le ha atribuido una edad cuaternaria.

Estas rocas presentan en su parte superior fenocristales de feldespatos, en una mesostasis vítrea, mientras que en la parte inferior la estructura es compacta y fluidal.

#### 7.3.1 Sitio XII

Este sitio se ubica en un afloramiento de riolitas vítreas localizado a un costado de la Laguna Larga. En este lugar la unidad de riolitas vítreas está representada por riolitas parcialmente desvitrificadas con esferulitas y fenocristales de albita y sanidino. Existen también algunos fenocristales de biotita, hornblenda y ortopiroxeno. Se llegan a reconocer al microscopio huellas sinuosas de flujo y alteraciones de clorita y arcilla.

Las direcciones de magnetización remanente tienen inclinaciones positivas y negativas con declina-

ciones entre  $220^{\circ}$  y  $20^{\circ}$ , lo que indica polaridades intermedias y normales. Del análisis de las desmagnetizaciones por CMAD y por temperaturas, pudo observarse la presencia de varias componentes y una tendencia a cambiar a una polaridad normal con la desmagnetización. La mayoría de las muestras presentan polaridad normal, sin embargo algunas muestras presentan inclinaciones negativas. (Fig. 14)

## 8. DISCUSION

Los resultados de las observaciones petrográficas se resumen en la Tabla 2 y los resultados de las mediciones magnéticas se resumen en la Tabla 3.

Los resultados de las mediciones de polaridad y direcciones de magnetización remanente permiten establecer correlaciones de los datos de cada sitio y unidad con la escala de polaridad del campo geomagnético y efectuar correlaciones de los datos entre los diferentes sitios. En algunos casos, como en el sitio IV en la unidad Qrf de las ignimbritas de Agua Fría, los resultados proporcionan información sobre la estructura de la unidad.

Los resultados del estudio magnetoestratigráfico se resumen en la Tabla 3. Las polaridades de los sitios IX, V, VI y X de la unidad de andesitas basales son reversas, intermedias y normales/reversas. Los resultados de las dataciones radiométricas (Tabla 4), indican edades entre 14 m.a. Las edades más antiguas corresponden a unidades muestreadas en los pozos, mientras que las unidades expuestas en superficie son más jóvenes que 6 m.a.

Entre las correlaciones de los datos de diferentes sitios, se tiene que los datos de los sitios VI y X concuerdan, lo que permite sugerir que es la misma unidad. Los sitios tienen una separación de 500 m y el acuerdo observado entre las direcciones sugiere que la magnetización remanente es estable. Las rocas son parte de la unidad de andesitas Tmsa y corresponde a la porción de andesitas lajeadas. Los resultados de los sitios VII y VIII, en la unidad Qrf también presentan resultados muy similares. La separación es mucho menor y en este caso es posible seguir la continuidad de la unidad. Las diferencias observadas son debidas a variación

en el grado de alteración de los minerales magnéticos.

Con respecto a la información sobre tectónica, en el caso del sitio IV de la unidad Qrf (riolitas de Agua Fria) pudo observarse que al corregir por estructura (rotación para hacer horizontales las capas), las direcciones de magnetización remanente de polaridad intermedia (declinaciones al sur e inclinaciones positivas) pasan a ser de polaridad reversa, que es la polaridad esperada. Ello sugiere que la estructura es secundaria.

## BIBLIOGRAFIA

- ALDRICH, L.T., Y WETHERILL, G. H., 1958. Geochronology by - radioactive decay.- Annual Rev. Nucl. Sci. 8, 257.
- AUMENTO F.; GUTIERREZ N., 1980. El campo Geotérmico de Los - Azufres, Michoacán, C.F.E.- 14-80.
- BREMER, M. Y URRUTIA, J., 1984. Magnetoestratigrafía y varia - ciones del Campo Geomagnético en Rocas Volcáni - cas del Centro de México. Sometida para Publ.
- CAMACHO A. F., PALACIOS N.M., 1976. Geología de la Zona Geo - térmica de Los Azufres, Michoacán, C.F.E. In - forme Interno.
- CAMACHO A., F., 1979. Geología de la Zona Geotérmica de Los - Azufres, Michoacán (México) C.F.E., Reporte - Interno 6-79.
- COX, A., 1973. Plate Tectonics and Geomagnetic Reversals, W. H. Freeman and Company. San Francisco.
- DE BOER J., 1979. Paleomagnetism of the Quaternary Cerro - - Prieto, Crater Elegante, and Salton Buttes Do - mes in the Northern part of the Gulf of Cali - fornia Rhombochasm. Proceedings, 2nd Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja Ca - lifornia, México, Mexicali B.C., México.
- DE LA CRUZ MARTINEZ., V., SALINAS AGUILAR., J., GONZALEZ O., D., SANDOVAL S., J.M., 1982. Estudio Geológi - co Estructural a detalle del Campo Geotérmico Los Azufres, Mich. Informe interno, C.F.E.
- DEMANT A., MAUVOIS R., SILVA M., L., 1975. Estudio Geológico de las Hojas de Morelia y Maravatío, Estado de Michoacán. C.F.E. Inst. Geol. U.N.A.M., repor - té inédito, 30 p.

- DEMANT A., 1978. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus Problemas de Interpretación. - Univ. Nal. Autón. México, Inst. Geol. Rev. V.2 p. 172-187.
- DOBSON, P.F., 1984. Volcanic Stratigraphy and geochemistry - of the Los Azufres Geothermal Center, Mexico. M.S. Thesis, Standford Universty.
- ELC-ELECTROCONSULT, 1980. Petrografía Ignea Primaria y Minerología Secundaria del Campo Geotérmico de Los Azufres, Michoacán, México, Informe Preliminar, C.F.E.
- FISHER, R.A., 1953. Dispersión on a Sphere. Proc. Roy Soc. - London, A217, 295-305
- NAGATA, T., 1965. Rock Magnetism, 2nd Ed, Maruzan, Tokyo, - p. 350
- OPDYKE, N.O. Y SALVADOR, A., 1979. A Supplementary Chapter - of the ISSC International Stratigraphic Guide. Geology, V.7, p. 578-583.
- STEIGER, R.H. y JAGER, E, 1977. Subcommission on geochronology: Convention on the Use of Decay Constants in geo-and Cosmochronology. Earth Planet. SCI. Letters, 36, 359-362
- TARLING D.H., 1983. Paleomagnetism. Geophysical and Geological Applications. Chapman and Hall, London, - New-York, 376 pp.
- URRUTIA, J.F. Y PAL, S., 1975. Procedimientos de campo en Investigaciones Paleomagnéticas. Anales Inst. - Geofísica.
- URRUTIA, J.F., 1977. Algunos Métodos Estadísticos Usados en Paleomagnetismo. Anales Inst. Geof., UNAM, V. 22-23, p. 87-98.

- URRUTIA, J.F., 1978. Análisis de Estabilidad de la Magnetización Remanente Natural. Anales Inst. Geof., UNAM, V. 24, p. 117-146
- URRUTIA, J.F., 1979. Significado y utilización de Magnetizaciones de Múltiple Fases. Anales Inst. Geofísica, UNAM, V. 25, p. 101-123
- URRUTIA, J.F., 1980. Paleomagnetic Studies of Mexican Rocks, Ph.D, Thesis, Univ. Newcastle Upon Tyne, U.K, 689 p.
- URRUTIA - FUCUGAUCHI, J., 1983. Paleomagnetic Estimation of Emplacement Temperature of Pyroclastic Deposits - Preliminary Study of Caldera de Los Humeros and Alchichica Crater. Geof. Inst. Vol. 22-3, pp. 277-292
- URRUTIA, J.F., 1984. On the Tectonic Evolution of Mexico. - Paleomagnetic Constraints. Geodynamic Series, - AGU, V. 12, p. 27-39



Distribución de los principales  
aparatos de la FVTM

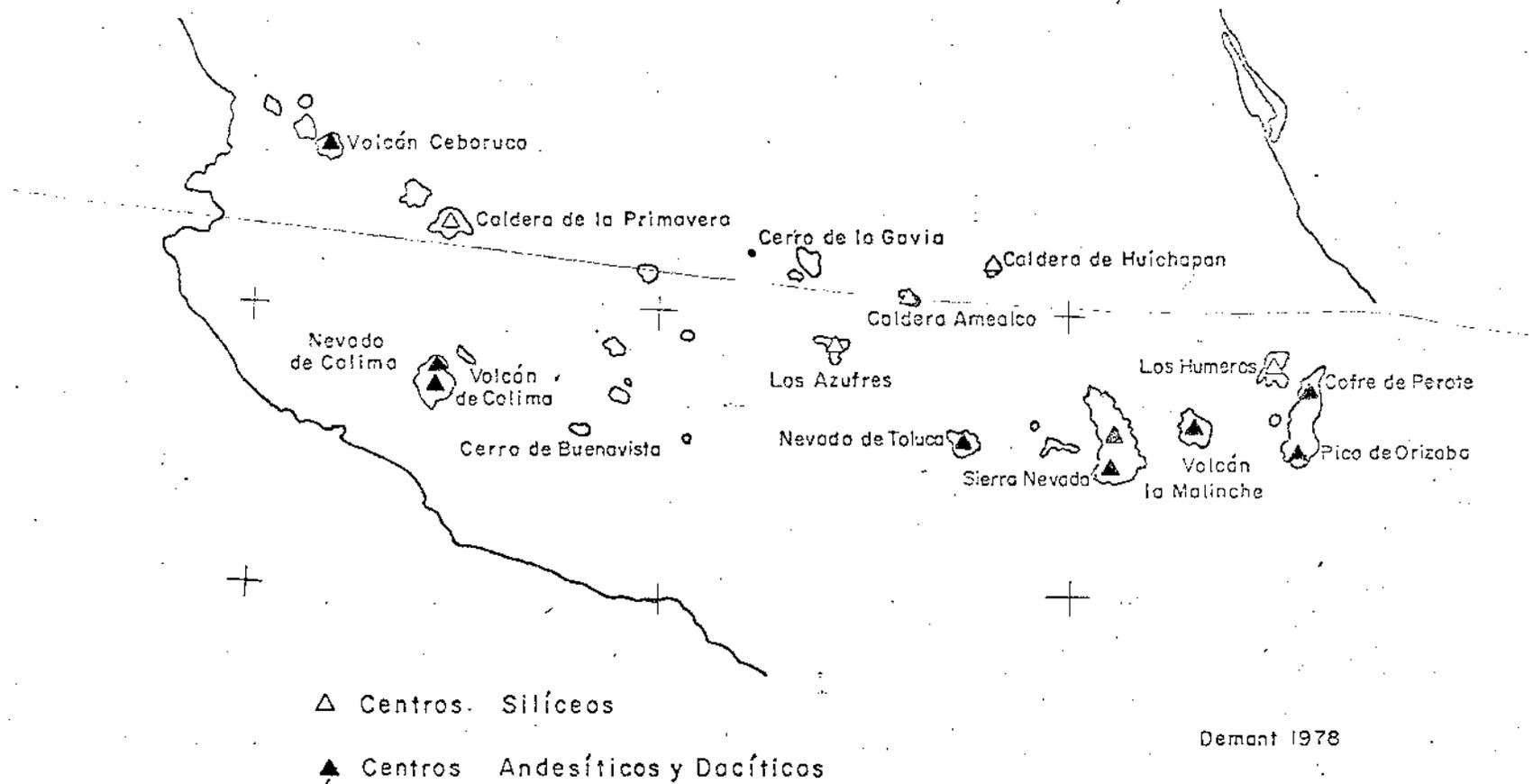


Figura 1.- Localización del área

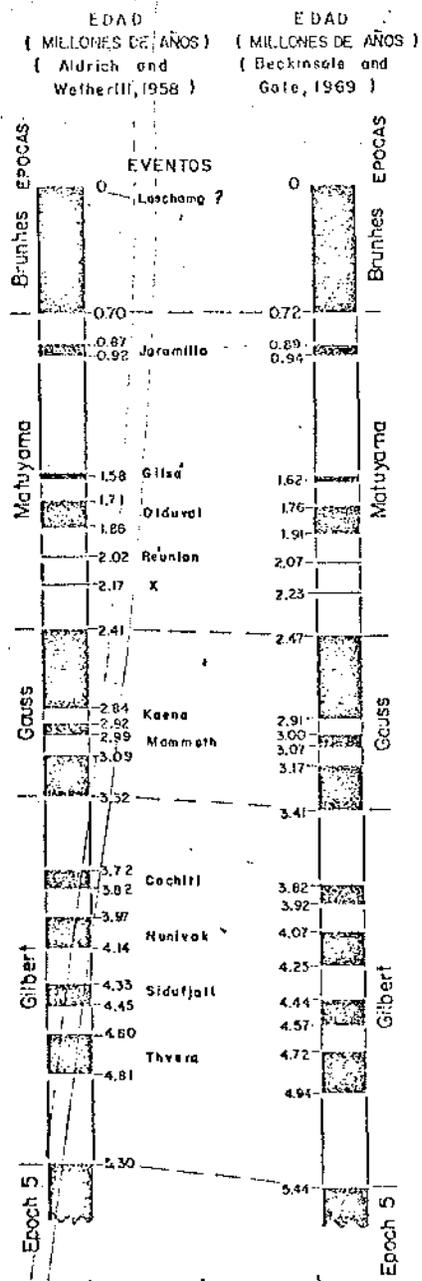


FIGURA 2.- ESCALAS DE CAMBIOS DE POLARIDAD PARA LOS ULTIMOS 5.5 MILLONES DE AÑOS

THE MAGNETISM OF ROCKS

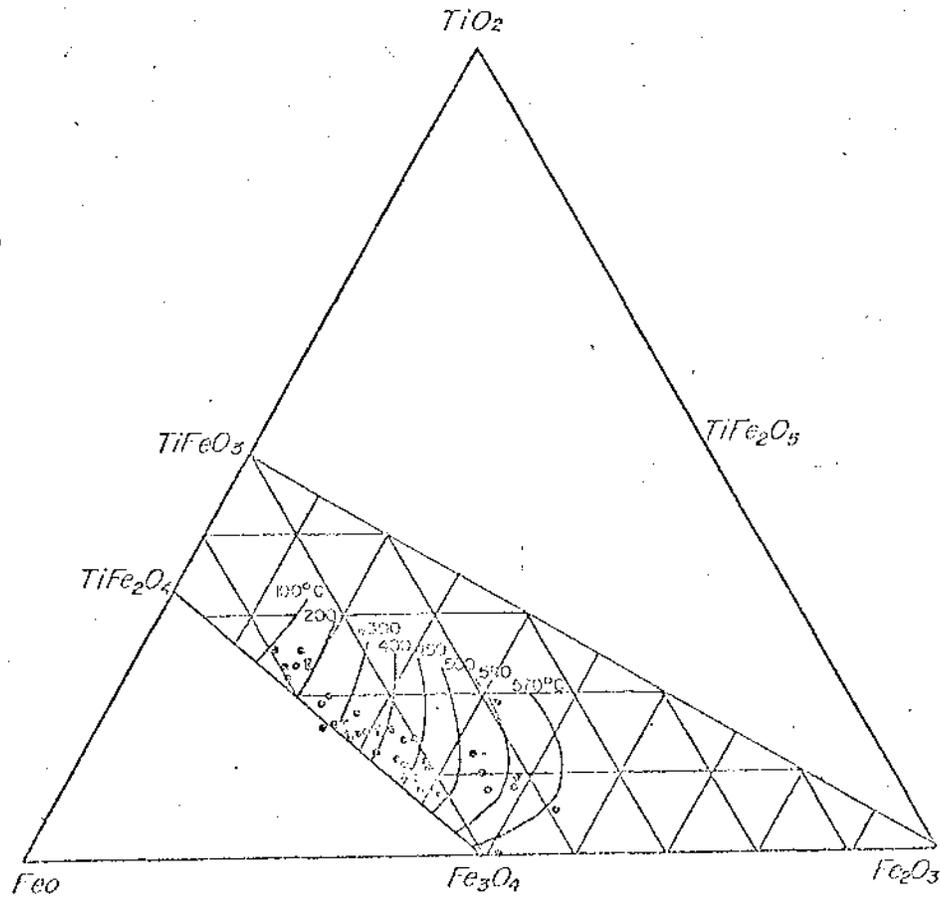
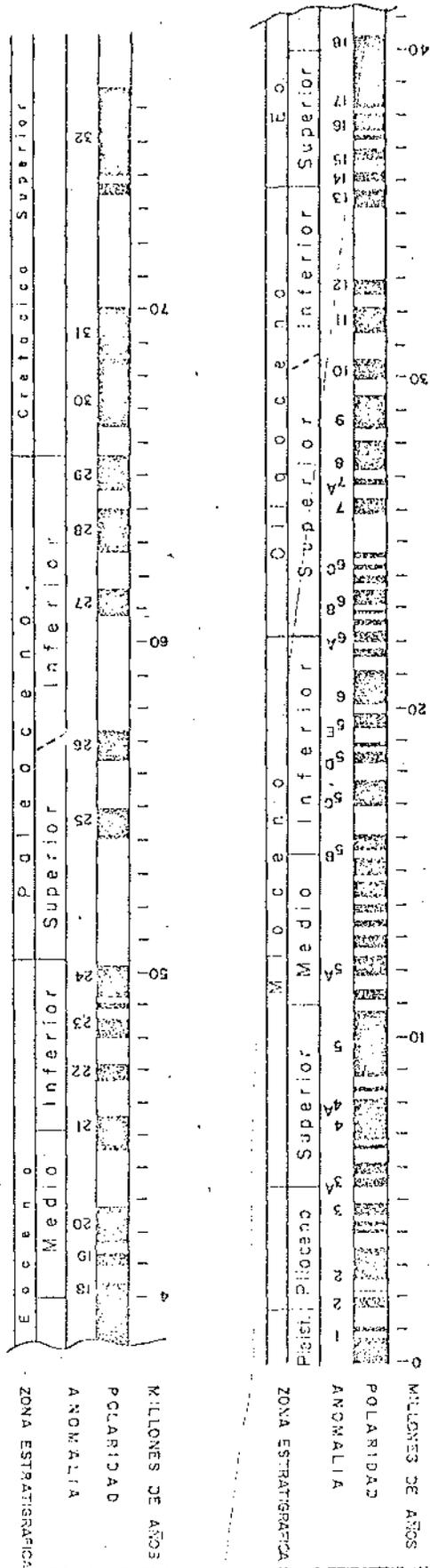


Figura 3.- Contornos de la temperatura de curie en función de la composición del sistema  $TiO_2-FeO_2-Fe_2O_3$  (Negata, 1965)

FIGURA 4 -- ESCALA DE CAMBIOS DE POLARIDAD DE LA ZONA DE CAMPO MAGNETICO TERRESTRE DURANTE EL CENIZOICO (SEGUN TARDING, 1983)



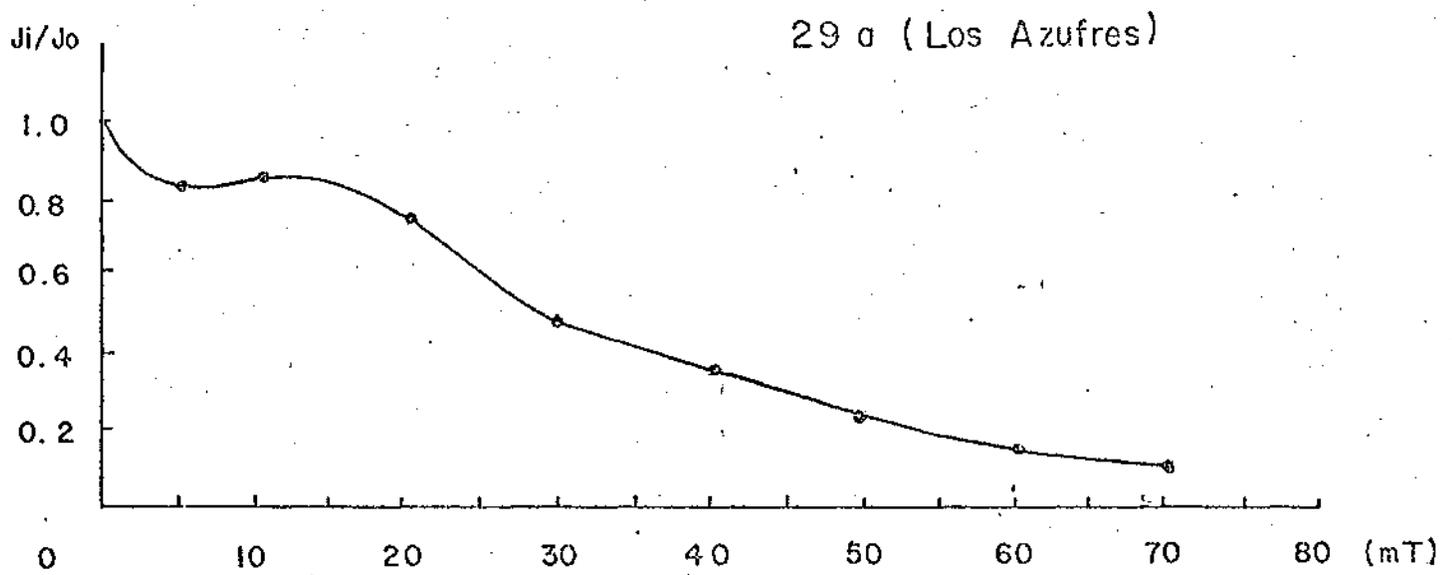


FIGURA 5.- CURVA DE DESMAGNETIZACION POR CMAD  
(SITIO  $\nabla$ , MUESTRA 29 )

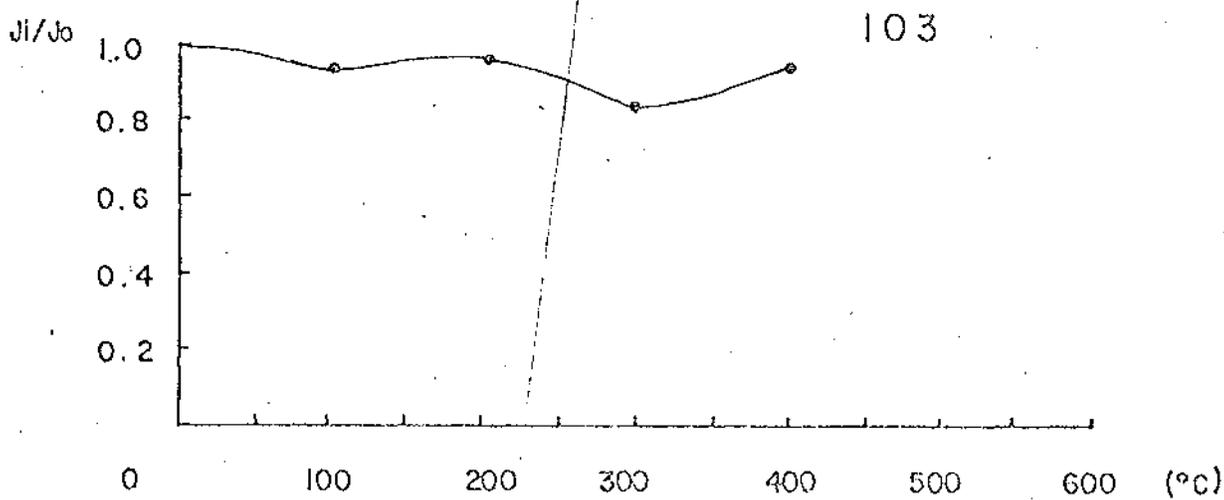
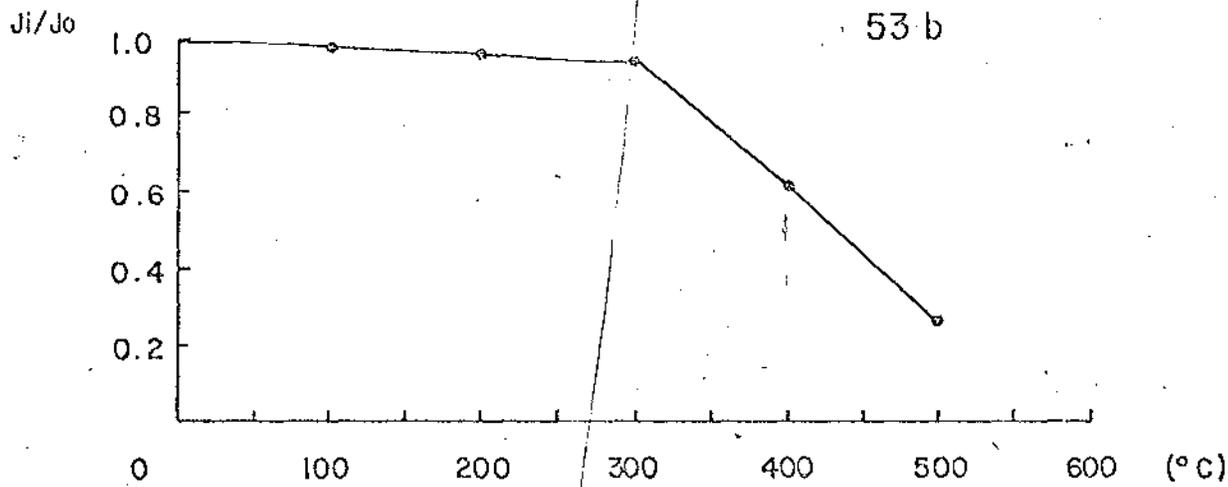
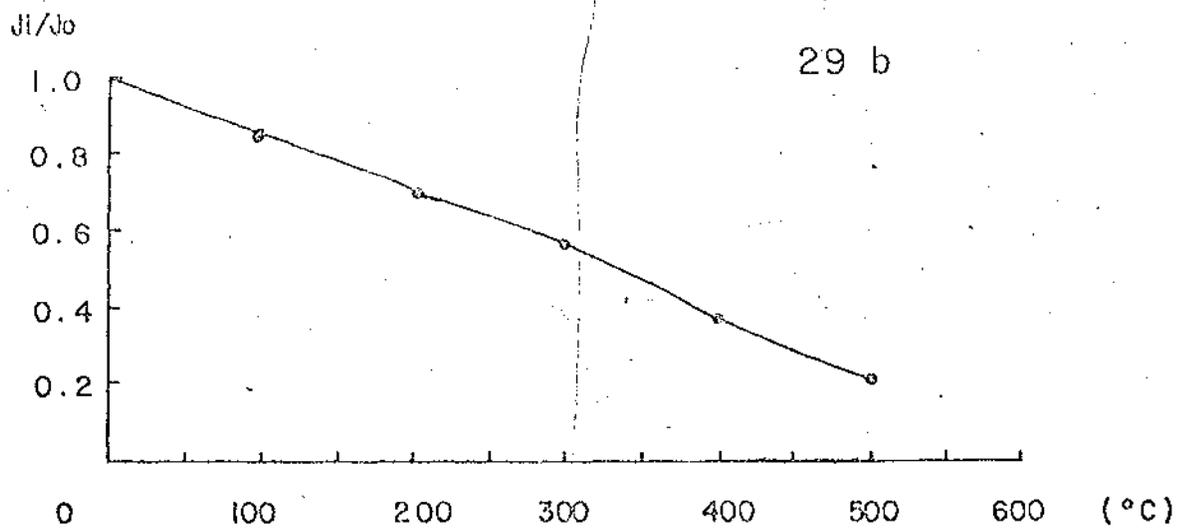


FIGURA 6 -- CURVAS DE DESMAGNETIZACION TERMICA ( SITIO V, MUESTRA 29 b; SITIO VII, MUESTRA 53 b; SITIO XII, MUESTRA 103 )

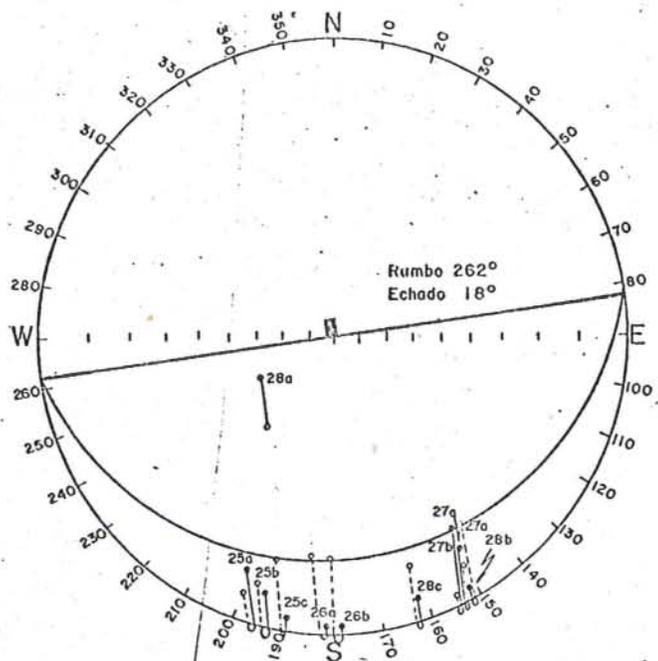
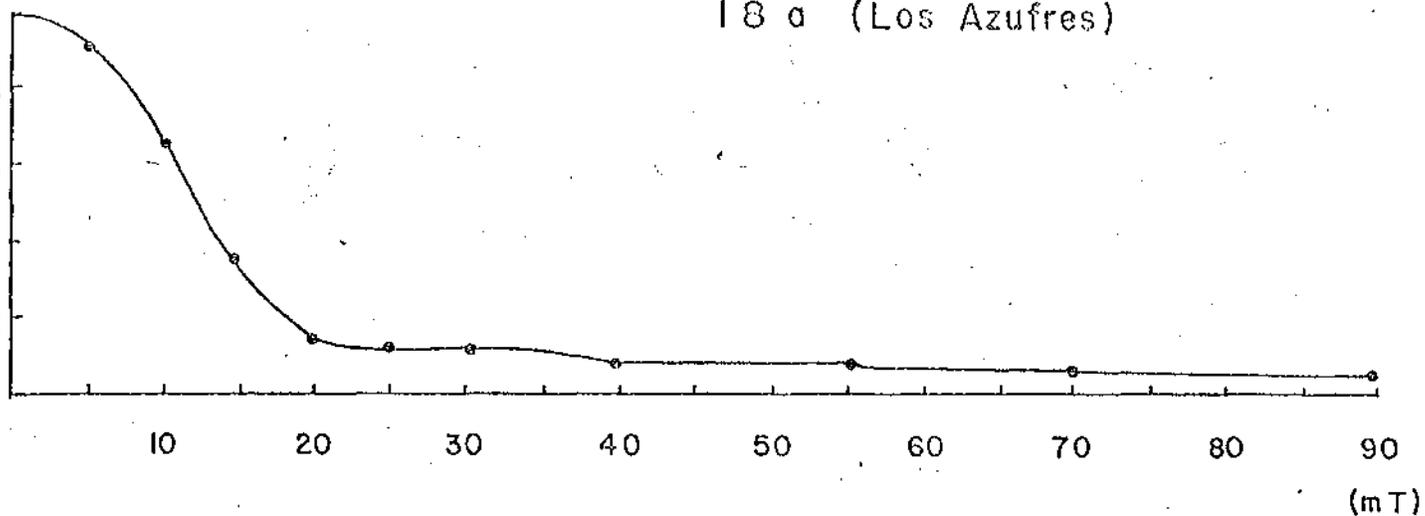


Figura 7.- Distribución de las direcciones de MRN (Sitio IV) antes y despues de efectuar la corrección por tectónico.

18 a (Los Azufres)



27 a (Los Azufres)

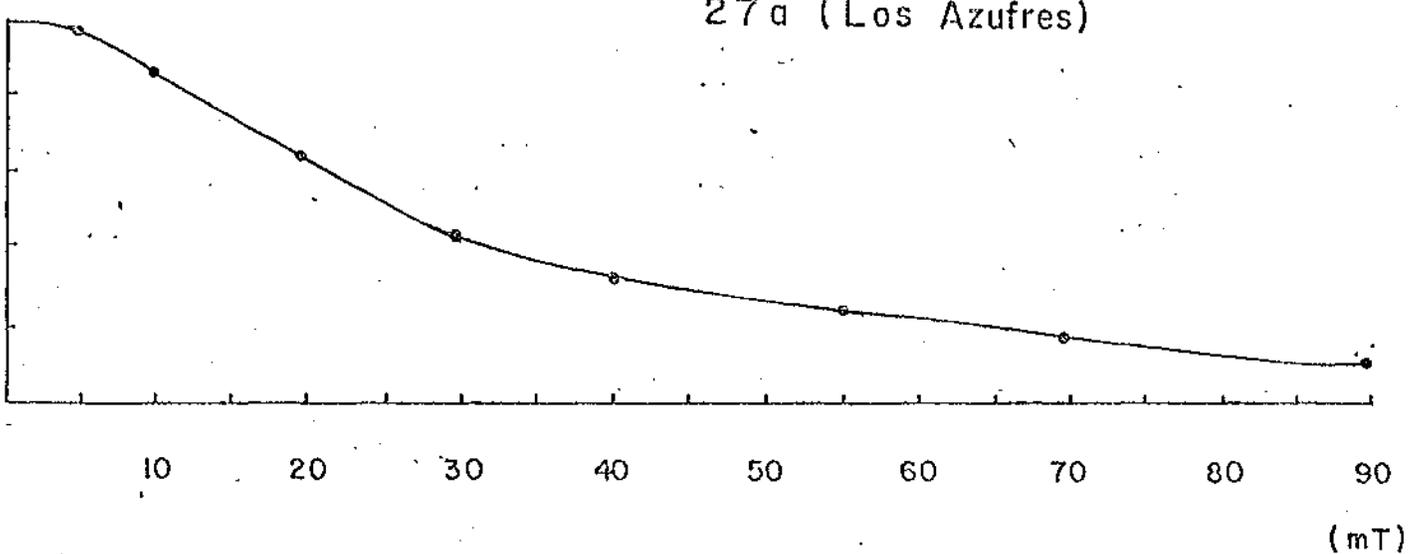


FIGURA 8. - CURVAS DE DESMAGNETIZACION POR CMAD  
(SITIO IV, MUESTRAS 18a Y 27a)

1500 (m)

1000

500

0

1.8 (1.7)

1.0

0.5

0

10

20

30

40

(A/m)

8 000

10 000

18 000

20 000

28 000

50 000

58 000

10 000

12 000

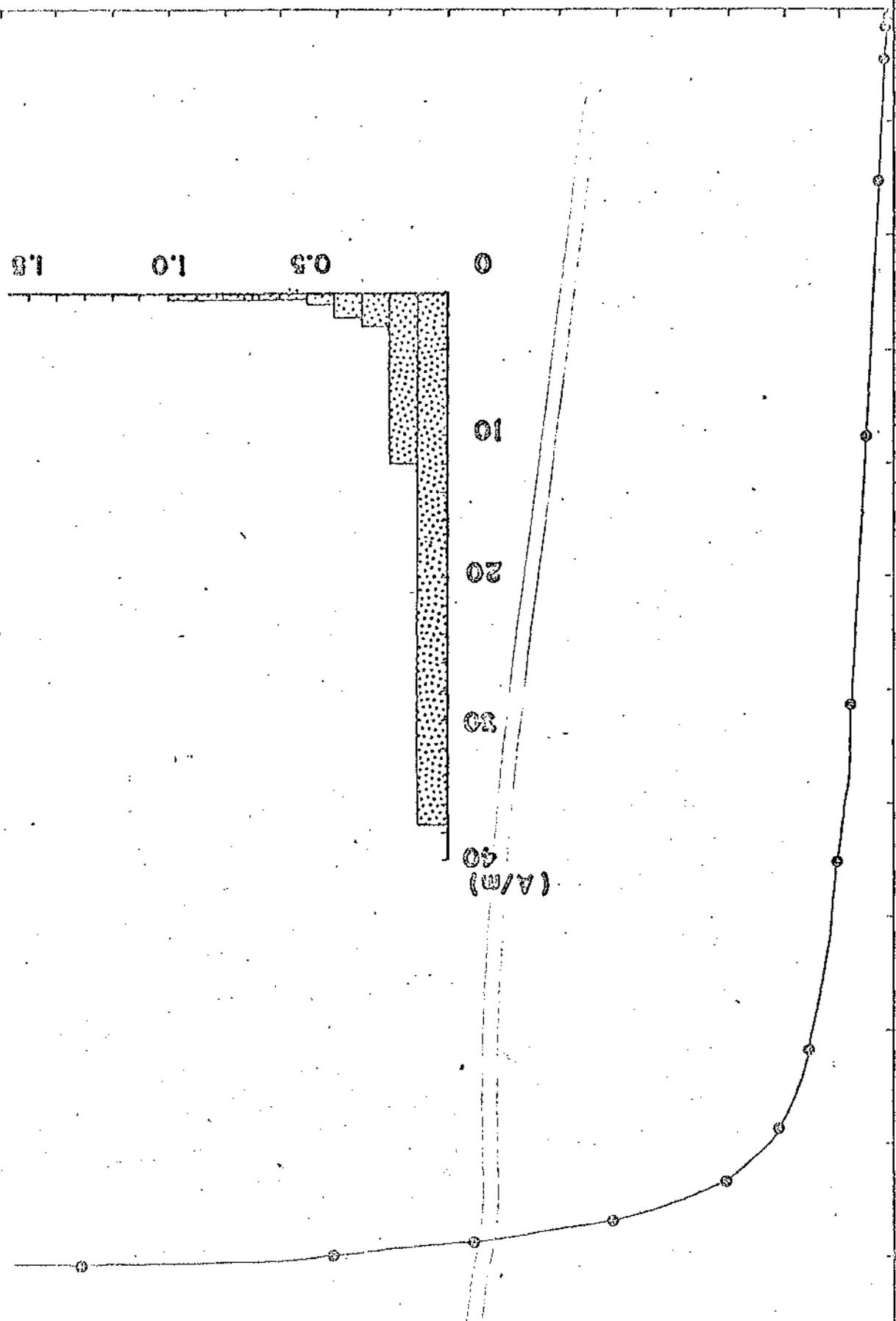
30 000

58 000

FIGURA 9.-CURVA DE MRI DE LABORATORIO (SITIO IX, MUESTRA 27)

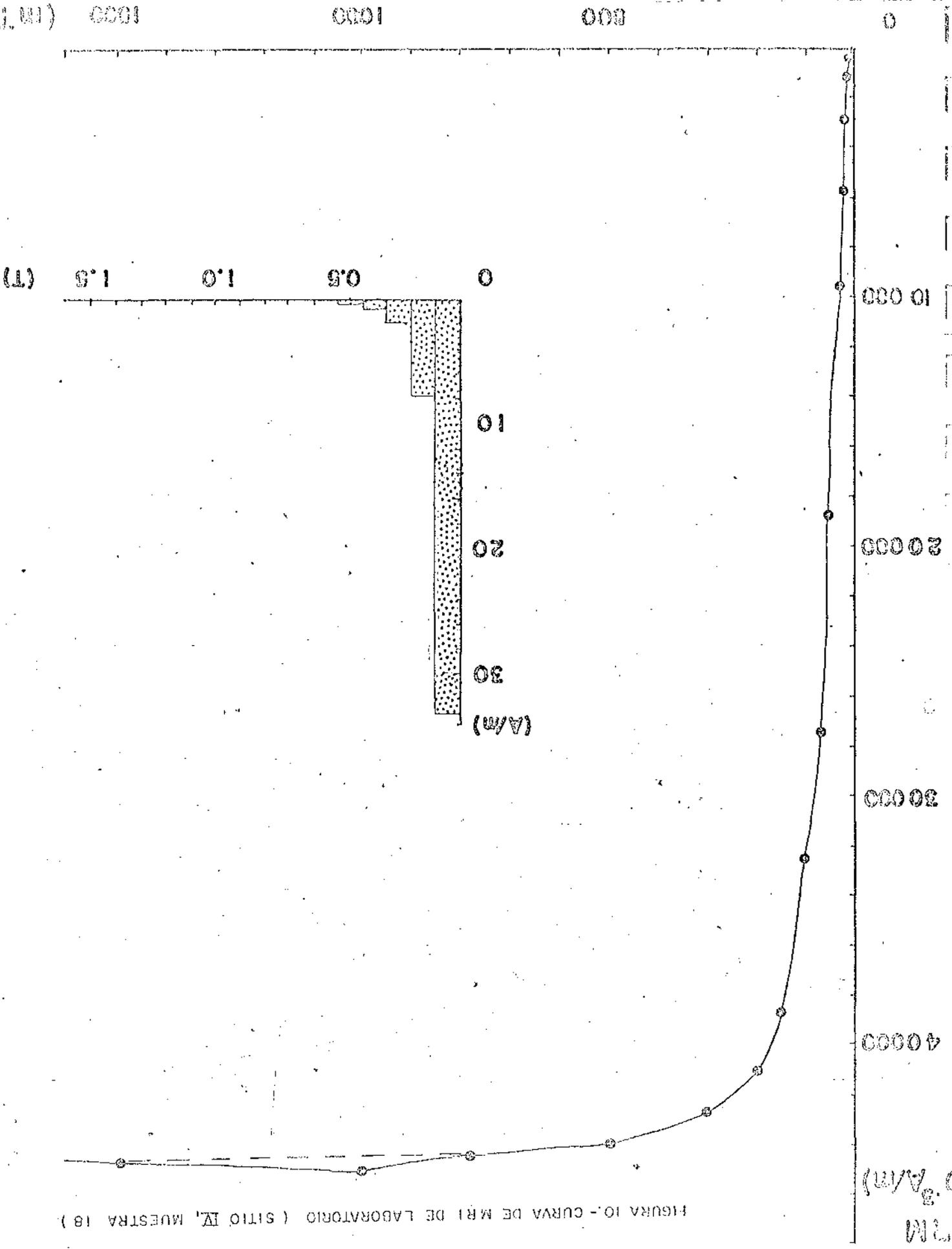
27 (Los Azufres, Mich.)

1 R M  
1.8  
1.5  
1.0  
0.5  
0  
A/m

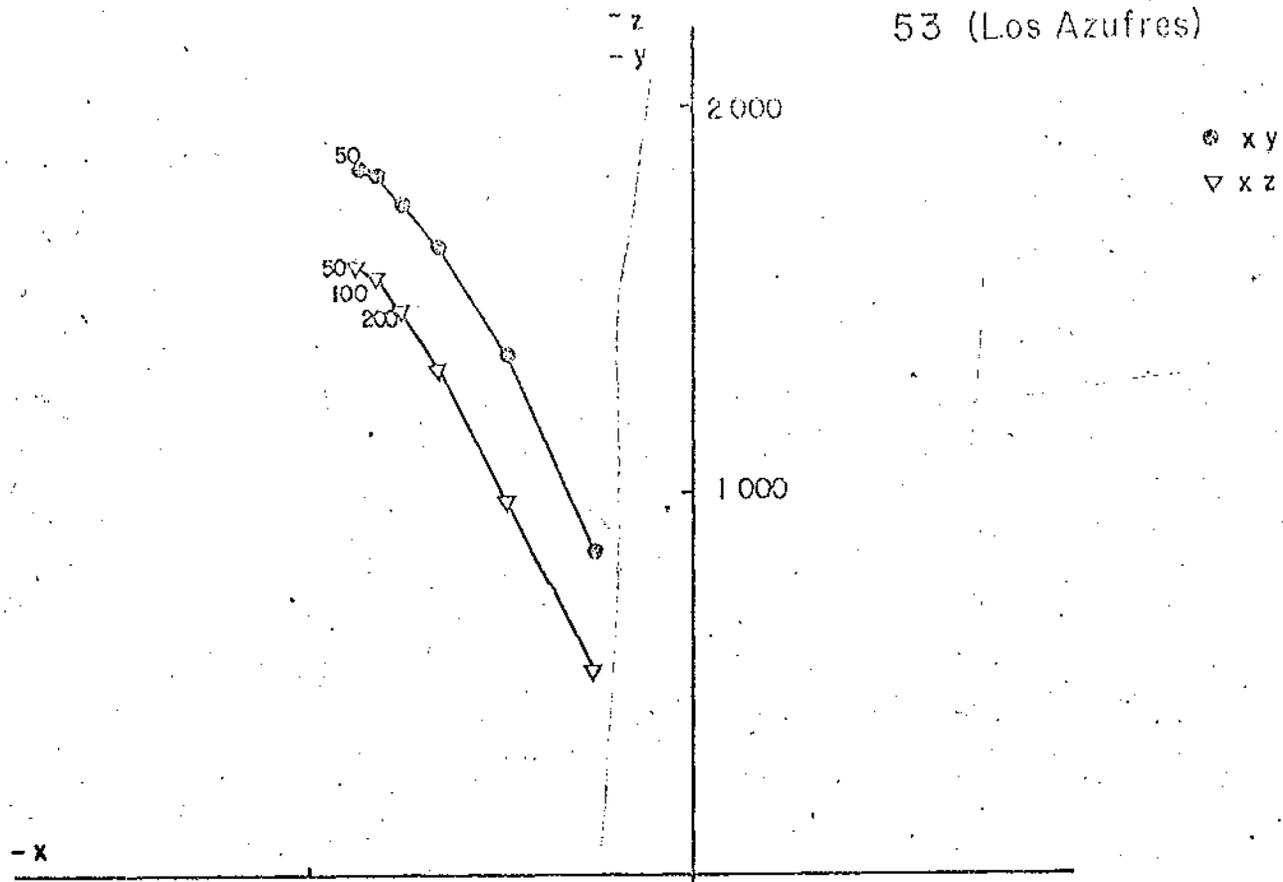


18 (Los Azules, Mich.)

FIGURA 10.-CURVA DE MRI DE LABORATORIO (SITIO IX, MUESTRA 18)



53 (Los Azufres)



55 (Los Azufres)

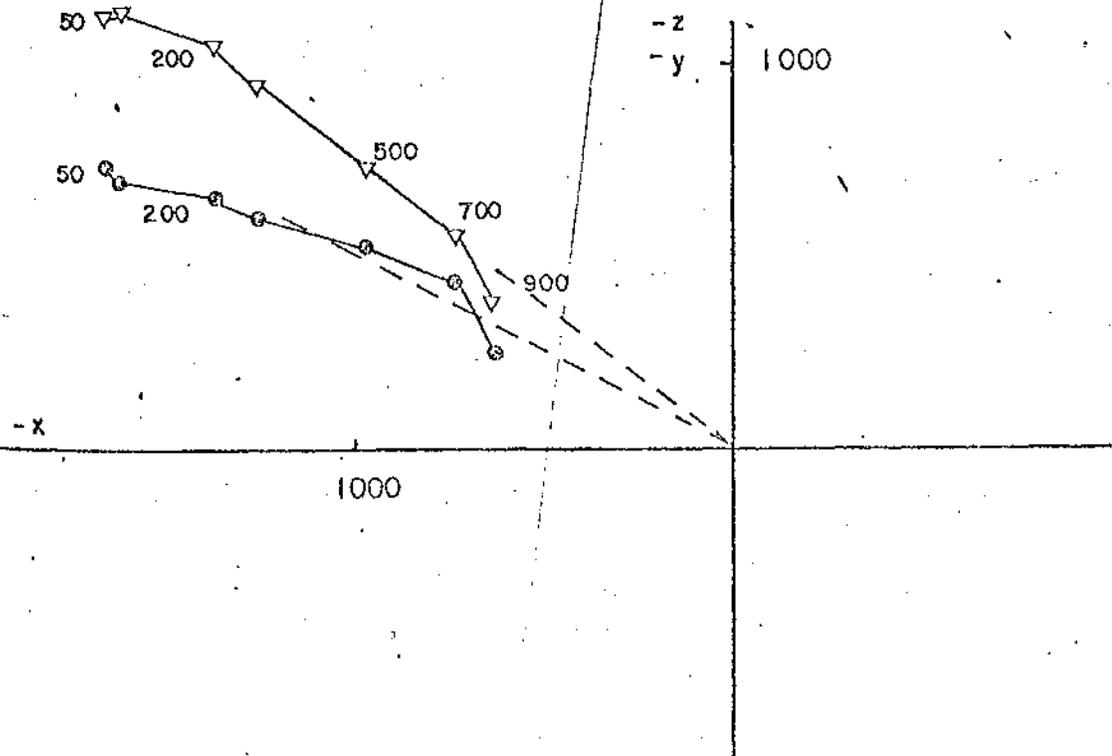


FIGURA II.- PROYECCION ORTOGONAL QUE MUESTRA EL PROCESO DE DESMAGNETIZACION POR CMAD (SITIO VII, MUESTRAS 53 Y 55)

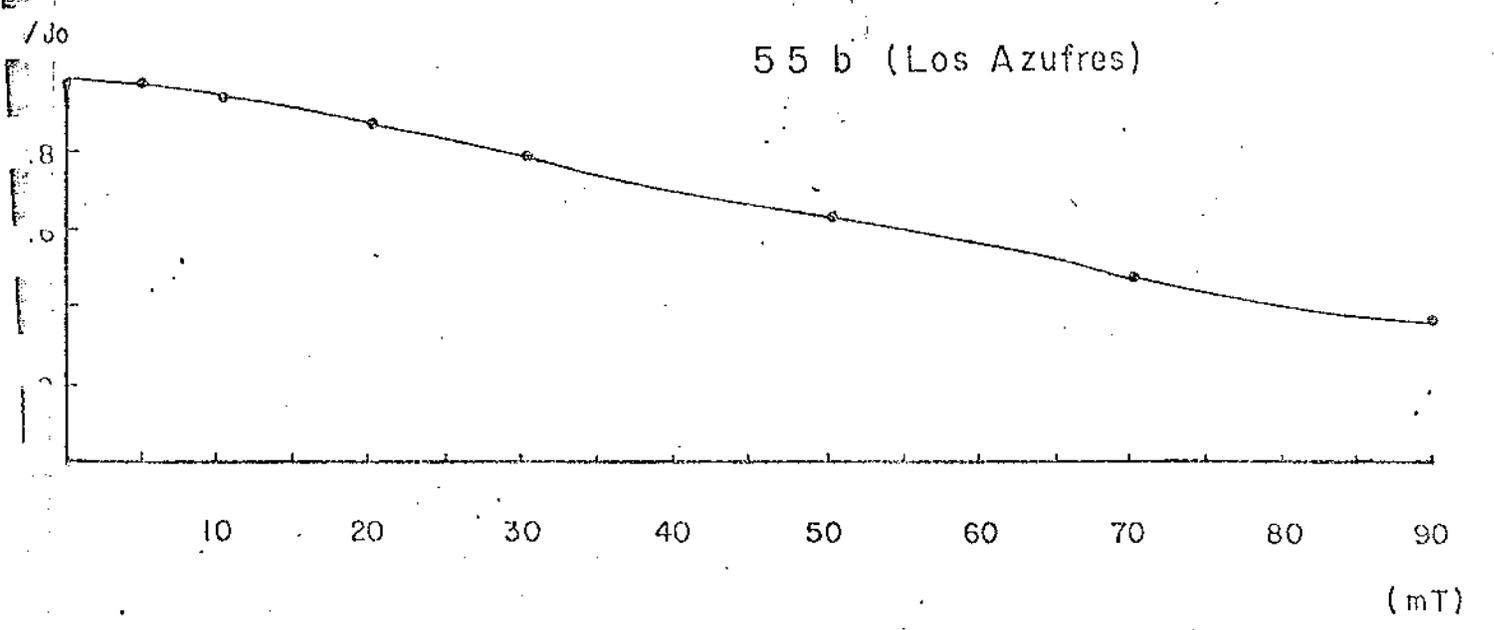
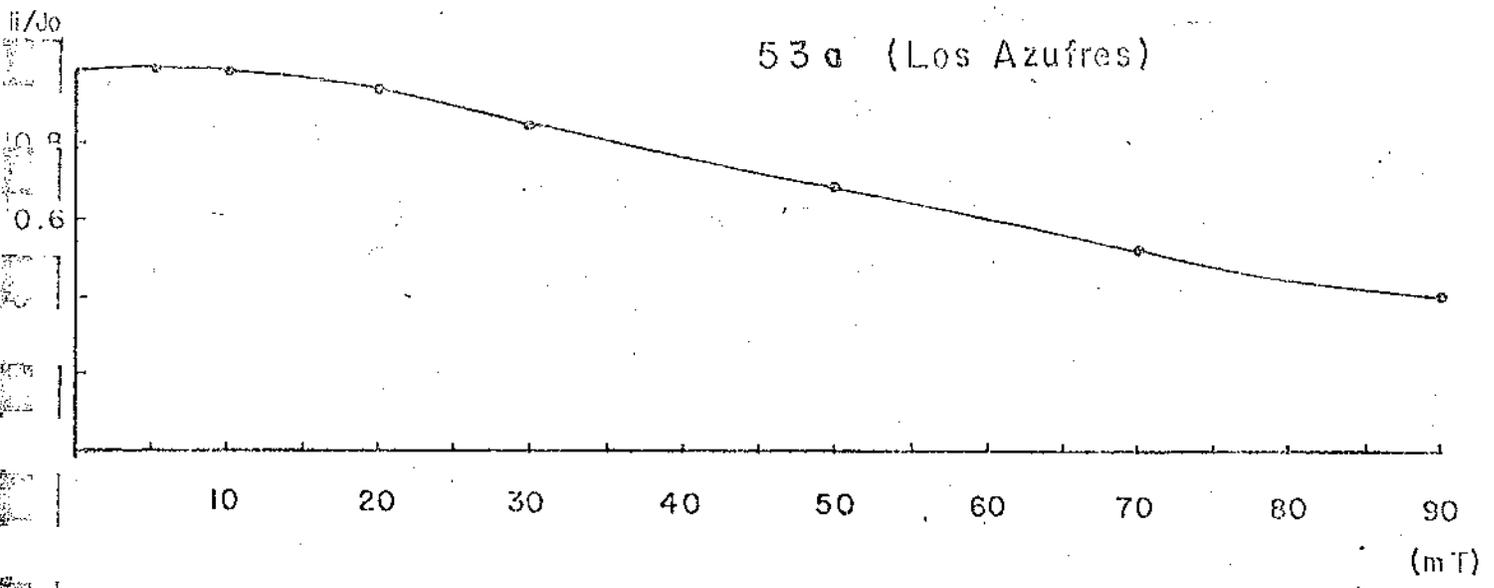


FIGURA 12.- CURVAS DE DESMAGNETIZACION POR CMAD  
(SITIO VII, MUESTRAS 53 a Y 55 b)

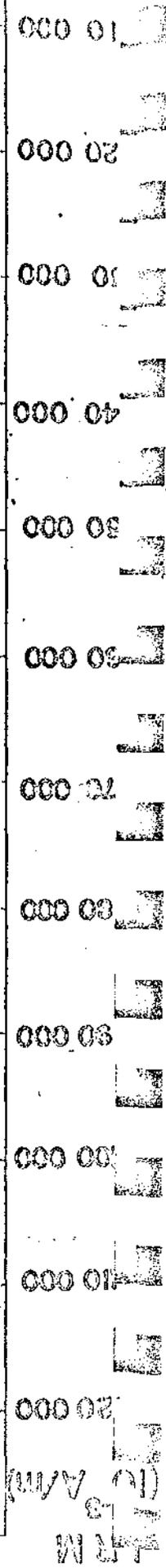
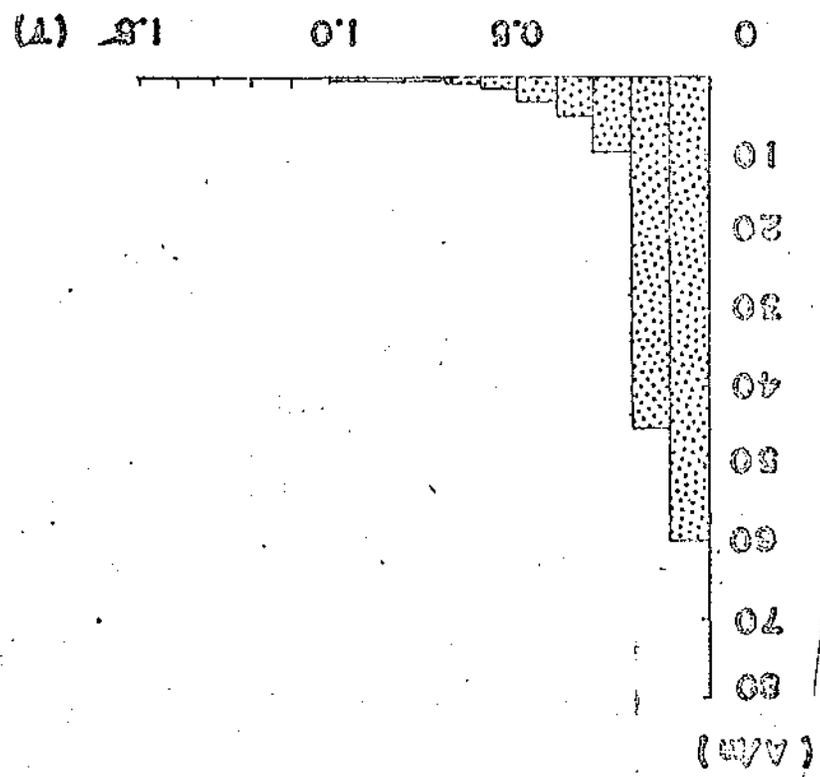


FIGURA 13.-CURVA DE MRI DE LABORATORIO (SITIO VII, MUESTRA 53)

53 (Los Azules, Mich.)

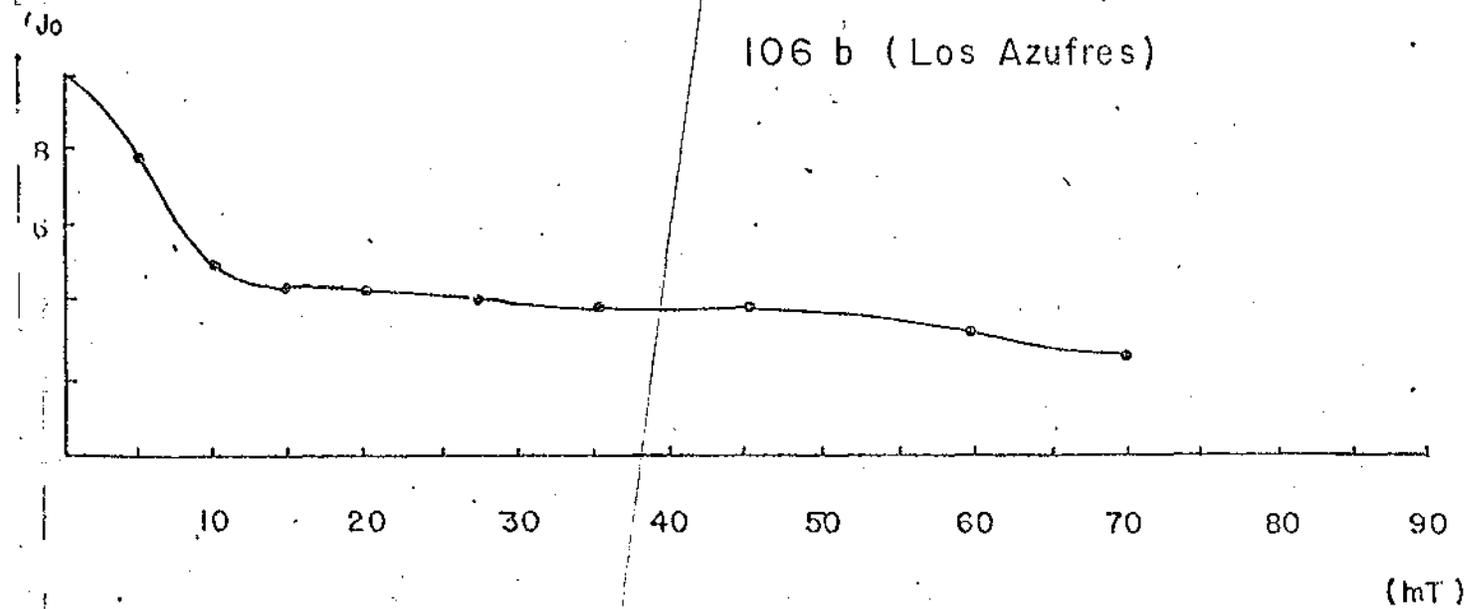
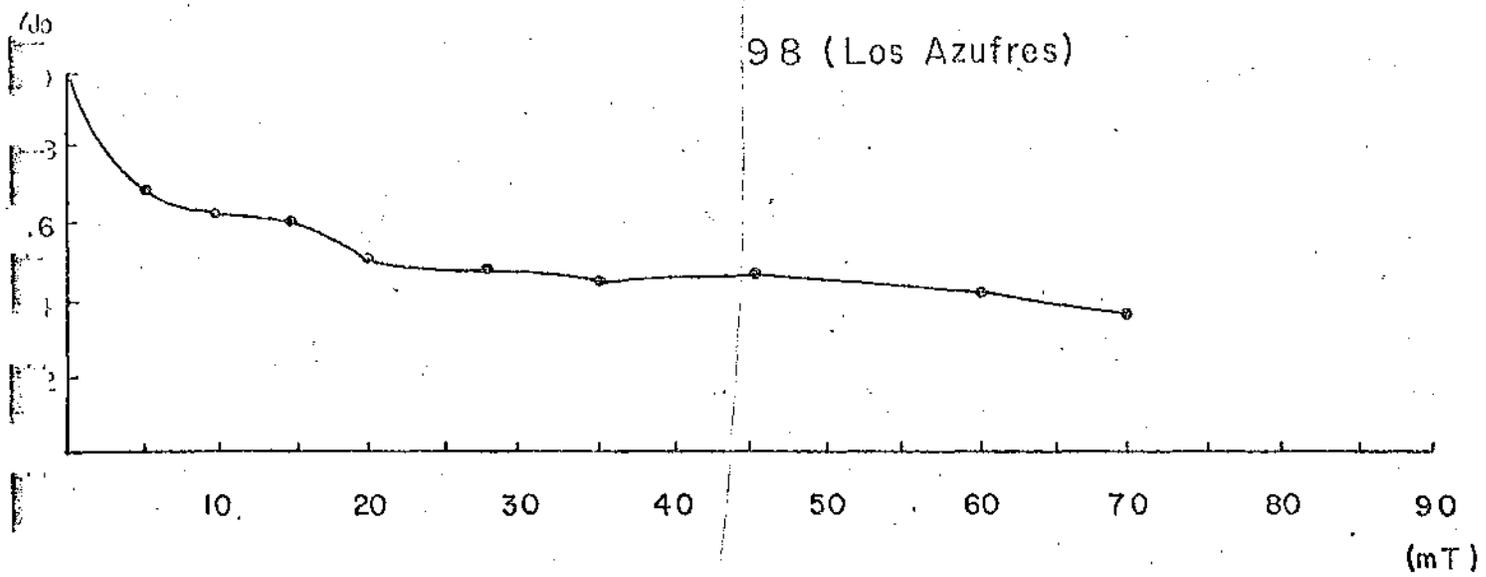


FIGURA 14.- CURVAS DE DESMAGNETIZACION POR CMAD  
( SITIO XII, MUESTRAS 98 Y 106 b )

# ESQUEMA DE MUESTREO

Tabla 1

SITIO	MUESTRAS	UNIDADES GEOLOGICAS		COORDENADAS GEOGRAFICAS	OBSERVACIONES
		De la Cruz et al (1982)	Cosacho (1976) Aumento et al (1980)		
I	1 - 7	Tmsa	Tps	100° 39' 24" , 19° 50' 46"	
II	8 - 13	Orf	Rpi	100° 40' 32" , 19° 47' 14"	
III	14 - 17	Tmsa	Am	100° 40' 54" , 19° 47' 32"	
IV	18 - 28	Orf		100° 39' 39" , 19° 47' 32"	
V	29 - 36	Tmsa	Am	104° 41' 32" , 19° 45' 46"	
VI	37 - 44	Tmsa	Am	104° 41' 35" , 19° 45' 46"	
VII	45 - 61	Orf	Rpi	100° 37' 46" , 19° 45' 21"	
VIII	62 - 72	Orf	Rpi	100° 37' 42" , 19° 45' 24"	
IX	73 - 85	Tmsa	Am	100° 40' 99" , 19° 45' 3"	
X	86 - 88	Tmsa	Am	100° 41' 26" , 19° 45' 34"	
XI	89 - 95	Tmsa	Am	100° 41' 30" , 19° 48' 30"	
XII	96 - 107	Qrv	Tpi	100° 41' 30" , 10° 47' 30"	

TABLA 2. SITIOS Y CARACTERISTICAS PETROGRAFICAS DE LAS UNIDADES ESTUDIADAS

LOCALIDAD	CLASIFICACION	TEXTURA	FALDESPATOS	FERROMAGNESIANOS	FERROMAGNETICOS	TIPO DE ALTERACION	ALTERACION	UNIDAD	OBSERVACIONES
SITIO I	Andesita basáltica	Pilotaxítica	Labradorita-andesina	Ortopiroxeno	Titanomagnetita	Oxidación	3 %	Tmsa	Minerales opacos microcristalinos y criptocristalinos
SITIO II	Vidrio silíceo	Holalalina - Perlitica			Titanomagnetita	Argilitización	29 %	QRF	Minerales opacos criptocristalinos
SITIO III								Tmsa	
SITIO IV	Riolita	Esferulítica	Sanidino y - Albita	Biotita	Hematita Titanomagnetitas	Oxidación Argilitización Cloritización	5 %	QRF	
SITIO V	Andesita	Pilotaxítica	Andesina	Clinopiroxeno Olivino	Hematita Titanomagnetita	Oxidación Cloritización	5 %	Tmsa	Minerales opacos criptocristalinos
SITIO VI								Tmsa	
SITIO VII	Ignimbrita	Esferulítica	Oligoclasa	Biotita y hornblenda	Hematita Titanomagnetita	Oxidación Cloritización	5 %	QRF	Minerales opacos criptocristalinos y microcristalinos
SITIO VIII	Ignimbrita								
SITIO IX	Andesita	Pilotaxítica	Andesina	Clinopiroxeno	Hematita	Cloritización	10 %	Tmsa	Minerales opacos criptocristalinos y microcristalinos
SITIO X	Andesita	Pilotaxítica	Plagioclasa	Clinopiroxeno	Hematita magnetita	Oxidación Cloritización Silicificación	5 %	Tmsa	
SITIO XI	Andesita	Pilotaxítica	Plagioclasa	Oxidados	Hematita	Oxidación Argilitización Cloritización	20 %	Tmsa	Minerales opacos criptocristalinos
SITIO XII	Riolita	Esferulítica	Sanidino Albita Perfita	Biotita hornblenda ortopiroxeno	Hematita magnetita	Cloritización Argilitización	3 %	QRF	

Tabla 3. Resultados magnetoestratigráficos de las unidades volcánicas del campo geotérmico, Los Azufres, Michoacán.

	No. de muestras	Polanidad (Inclinación)	Correlación con la escala de Polaridades
<u>Tmsa</u> (Andesitas basales)			
Sitio IX		Reverso (negativa)	Matuyama
Sitio V		Normal/Reverso (positiva) (negativa)	Matuyama
Sitio VI		Intermedia (negativa)	Matuyama
Sitio X		Intermedia (negativa)	Matuyama
<u>Qrf</u> (Riolitas Agua Fria)			
Sitio IV	11	Reversa (negativa)	Matuyama
Sitio VII		Intermedia (negativa)	Matuyama
Sitio VII		Intermedia (negativa)	Matuyama
<u>Qrv</u> (Riolita Yerhabuena)			
Sitio XII		Normal (positiva/negativa)	Brunhes (?)

Tabla 4. Edades K-Ar por las unidades volcánicas del Campo Geotérmico Los Azufres, Michoacán (Dobson, 1984)

Unidad	Edad en millones de años	Material
Qrv	0.14 ± 0.02 (3)	Vidrio
Riolita vitrea	0.15 ± 0.05 (3)	Biotita
(Riolita Yerbabuena)	0.30 ± 0.07 (3)	Biotita
Qrf	0.84 ± 0.04 (3)	Vidrio
Riolita esferulítica	0.93 ± 0.04 (3)	Roca total
con ignimbritas	1.03 ± 0.02 (3)	Vidrio
(Riolita Agua Fria)	1.2 ± 0.4 (2)	Roca total
Tmsa	1.03 ± 0.02 (3)	Roca total
Andésitas	3.1 ± 0.2 (2)	Roca total
(basamento)	5.0 ± 0.4 (2)	Roca total

1. Demant et al., 1975
2. Aumento y Gutiérrez, 1980
3. Dobson, 1984