Biblioteca Digital
F C E N - U B A

BIBLIOTECA CENTRAL LUIS F LELOIR
BIBLIOTECA CENTRAL LELOIR
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES UBA

Tesis de Posgrado

El magnetómetro U.B.A. 8 Hz y su aplicación en los estudios paleomagnéticos

Vilas, Juan F. A.

1979

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Ciencias Físicas de la Universidad de Buenos Aires

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:
Vilas, Juan F. A.. (1979). El magnetómetro U.B.A. 8 Hz y su aplicación en los estudios paleomagnéticos. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_1630_Vilas.pdf

Cita tipo Chicago:
Vilas, Juan F. A.. "El magnetómetro U.B.A. 8 Hz y su aplicación en los estudios paleomagnéticos". Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 1979.
http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_1630_Vilas.pdf

EXACTAS UBA
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

UBA
Universidad de Buenos Aires

Dirección: Biblioteca Central Dr. Luis F. Leloir, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
Intendente Güiraldes 2160 - C1428EGA - Tel. (++54 +11) 4789-9293

Contacto: digital@bl.fcen.uba.ar

Tesis 1630
ej. 2

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

PABELLON Nº 2 - CIUDAD UNIVERSITARIA
C. P. 1428 NUÑEZ - BUENOS AIRES - ARGENTINA

EL MAGNETOMETRO U.B.A. 8 Hz Y SU APLICACION EN LOS ESTUDIOS PALEOMAGNETICOS

- JUAN F. A. VILAS -

- BUENOS AIRES -
1979

EL MAGNETOMETRO U.B.A. 8 Hz

Y SU APLICACION EN LOS

ESTUDIOS PALEOMAGNETICOS

1630 a

EL MAGNETOMETRO U.B.A. 8 Hz

Y SU APLICACION EN LOS

ESTUDIOS PALEOMAGNETICOS

JUAN F. A. VILAS

Tesis Doctoral

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

PABELLON Nº 2 - CIUDAD UNIVERSITARIA
C. P. 1428 NUÑEZ - BUENOS AIRES - ARGENTINA

1979

INDICE

RESUMEN 1

CAPITULO 1

EL MAGNETOMETRO U.B.A. 8 Hz.

1.1 INTRODUCCION..... 2

1.2 DISEÑO Y CONSTRUCCION

1.2.1 Detección del campo magnético asociado a la magnetización remanente de la muestra 3
1.2.2 El magnetómetro Institut Dr. Förster 4
1.2.3 Diagrama en bloque y principio de operación del magnetómetro U.B.A. 8 Hz 9
1.2.4 Cabezal a nucleo saturado y magnetómetro..... 11
1.2.5 Blindaje magnético 15
1.2.6 Sistema de rotación de la muestra 19
1.2.7 Generador de la señal de referencia 20
1.2.8 Detector sensible a fase 21

1.3 PUESTA EN SERVICIO DEL MAGNETOMETRO

1.3.1 Calibración 27
1.3.2 Ajuste de fase 33
1.3.3 Medición de la magnetización remanente 34
1.3.4 Correcciones en la medición 39
1.3.5 Ruido y precisión 42

1.4 CONCLUSIONES 48

CAPITULO 2

VERIFICACION DE LAS CONDICIONES DE OPERACION
DEL MAGNETOMETRO U.B.A. 8 Hz

2.1 INTRODUCCION 50

2.2 MEDICIONES REALIZADAS 50

2.2.1 Pampa Palauco, (S.O. de Mendoza) 51
2.2.2 Pirgua, (Salta) 51
2.2.3 Amaná-Talampaya y la Colina en Paganzo,(La Rioja) 51
2.2.4 Serie Casange, (Angola) 53
2.2.5 Amaná-Talampaya y la Colina en Mina las Mellizas, (La Rioja) 53
2.2.6 Alcaparrosa, (San Juan) 53
2.2.7 De la Cuesta, La Coipa y Del Creston, (Catamarca) 53
2.2.8 Complejo Igneo Andino,(Antártida Argentina) 54
2.2.9 Bambui, (Brasil) 54
2.2.10 Sedimentos Cenozoicos ,(Plataforma Malvinas) 54
2.2.11 Suri, (Catamarca) 54
2.2.12 Ñuñorco y La Ojota, Catamarca) 54
2.2.13 La Tinta, (Buenos Aires) 55

2.3 CONCLUSIONES 55

CAPITULO 3

APORTES AL CONOCIMIENTO DE LA EVOLUCION
DEL SUPERCONTINENTE GONDWANA

3.1 INTRODUCCION 57

3.2 LA EVOLUCION DEL SUPERCONTINENTE GONDWANA 57

3.2.1 El Supercontinente Gondwana en el Precámbrico tardio y Paleozoico temprano 58
3.2.2 La fragmentación del Supercontinente Gondwana 61

INDICE ALFABETICO DE SIMBOLOS..... 72
AGRADECIMIENTOS..... 75
BIBLIOGRAFIA..... 76

EL MAGNETOMETRO U.B.A. 8 Hz Y SU APLICACION EN LOS ESTUDIOS PALEOMAGNETICOS

por Juan F.A.Vilas

Tesis Doctoral presentada en Diciembre de 1979

RESUMEN

Los estudios paleomagnéticos imponen actualmente la necesidad de contar con magnetómetros que permitan la medición del magnetismo remanente (M.R.) de muestras de rocas de las mas variadas características litológicas y magnéticas. Al comienzo de la decada actual, tales instrumentos no eran fabricados por las empresas comerciales; es por ello que el Laboratorio de Paleomagnetismo de la Universidad de Buenos Aires (U.B.A.) encara el diseño y construcción de un magnetómetro rotativo de bajo número de revoluciones, ($\simeq$ 8 rev./s) y de alta sensibilidad,(magnetómetro U.B.A. 8 Hz).

El magnetómetro U.B.A. 8 Hz fué puesto en servicio en 1973 y demostró, a lo largo de 6 años de uso, ser un instrumento robusto y sencillo de operar. Presenta además las siguientes caracteristicas técnicas, avaladas por la medición de mas de 6000 muestras: i) sensibilidad máxima 2×10^{-9} uem.cm^{-3} ii) alcance maximo 0,8 uem.cm^{-3}; iii) acepta muestras cúbicas de 3cm de lado o cilindrícas de 2,54 cm de diametro y altura variable (máximo 3 cm); iv) permite la medición alternada de muestras friables magnéticamente fuertes y débiles sin riesgo de contaminación; v) permite la medición de muestras sin consolidar como son los fangos provenientes de los fondos de lagos y océanos y vi) permite la medición de muestras que contengan acido clorhidríco en sus poros sin riesgo de causar deterioros en el equipo.

Los estudios paleomagnéticos realizados con rocas de la Argentina, Brasil y Angola en los cuales el magnetómetro U.B.A. 8 Hz sirvió de apoyo, coayuvaron a definir la evolución del Supercontinente Gondwana, el origen del Atlántico Sur, la correlación de rocas de edad Paleozoica temprana y tardía, la evolución magmática de los Andes y la variación paleosecular del campo magnético terrestre en tiempos históricos recientes.

En la parte final de éste trabajo se hace una revisión del estado actual del conocimiento en el tema: la evolución del Supercontinente Gondwana desde el Precámbrico tardío. La curva de desplazamiento polar aparente común para América del Sur y Africa durante el Paleozoico tardío y Mesozoico se tomó como base para lograr la reconstrucción del Gondwana. La posición de los polos paleomagnéticos de los continentes gondwánicos asignados al Precámbrico tardio y Paleozoico temprano son coherentes con tal reconstrucción y sugieren que el Gondwana existió desde hace por lo menos 1000 m.a.. El rápido desplazamiento de este Supercontinente respecto al polo, es coherente con la distribución de los numerosos depositos glaciarios de edad Precámbrica tardía y Ordovicica tardía del Africa, lo cual sugiere que su ubicación y origen estan relacionados con tal proceso.

Las ramificaciones que se observan en la curva de desplazamiento polar aparente del Supercontinente Gondwana desde el Mesozoico tardío, son utilizadas para definir la cronología de los episodios que condujeron a la formación de los actuales Océanos Australes.

CAPITULO 1

EL MAGNEMOMETRO U.B.A. 8 Hz.

1.1 INTRODUCCION

En las últimas decadas, los estudios paleomagnéticos han despertado un interés creciente en los investigadores relacionados con las ciencias de la tierra. Ello se debió, entre otras causas, a los aportes de indiscustible valor que brindan estos estudios en las tres ramas que lo integran: la que estudia las variaciones espacio temporales del campo magnético terrestre en el pasado geológico, la que investiga los aspectos físicos y mineralógicos concernientes al origen del magnetismo fosil de las rocas y la que analiza las implicancias geológicas de las observaciones paleomagnéticas.

Los laboratorios en los que se realizan estudios paleomagnéticos estan provistos con equipos especialmente preparados para tal fin. Entre ellos son de fundamnetal importancia los instrumentos destinados a la medición del magnétismo remanente (M.R.) de muestras de rocas, denominados comunmente magnétometros. Para el diseño de los mismos deben tenerse en cuenta tres factores primordiales: i) la gran variedad litológica de las rocas utilizadas, lo que implica la exigencia de medir sin destruir, muestra que cubren un amplio rango en lo que a su resistencia mecánica se refiere (desde muestras no consolidadas como son los barros provenientes de los fondos de los lagos y mares, hasta rocas graníticas y metamórficas), ii) la gran variedad de intensidades del M.R. presente en las rocas analizadas, los que suelen estar comprendidos entre $1/10^{8}$ uem.cm^{-3} y iii) el alto nivel de ruido magnético presente casi siempre en los laboratorios instalados en centros urbanos . Hasta la pasada decada estos factores haçian imprescindible diseñar por lo menos dos tipos de magnetómetros, uno de sensibilidad media (del orden de 10^{-5} uem.cm^{-3}) por lo general del tipo "spinner" como los descriptos por de Sa (1963),Hesley (1967), Vilas y Valencio (1969) y otro del tipo astático de alta sensibilidad (del orden de 10^{-8}uem.cm^{-3}) limitado a operar en lugares donde las pertubaciones magnéticas son mínimas (As, 1960; Roy, 1963; Collinson, 1967).

El presente trabajo tuvo por objeto el proyecto y construcción de un magnetómetro de alta sensibilidad ($2x10^{-9}$ uem.cm^{-3}), de amplio rango de medición (150db), que pueda operar en presencia de un alto nievl de ruido magnético y que posea la versatilidad suficiente como para poder medir rocas de la mas variada litología.

La construcción del magnetómetro proyectado (Magnetómetro U.B.A. 8 Hz) se realizó en la Facultad de Ciencias Exáctas y Naturales (F.C.E. y N.) de la Universidad de Buenos Aires (U.B.A.), financiado con el subsidio Nº 2205 del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, (C.N.I.C.y T.). Este equipo se encuentra en operación en el Laboratorio de Paleomagnetismo de esa Facultad desde junio de 1973. Desde entonces al presente a operado en forma continua, abocado a las tareas de medición del M.R. de rocas de las mas variadas características litológicas cuyas intensidades van de $8x10^{-1}$ a $2x10^{-8}$ uem.cm^{-3}.

1.2. DISEÑO Y CONSTRUCCION

1.2.1 Detección del campo magnético asociado al M.R. de la muestra.

Con el objeto de medir el M.R. de muestras de rocas es aconsejable, cuando se utilizan procedimientos electrónicos, convertir el campo asociado al momento magnético de la misma en uno variable. Para ello lo mas sencillo es rotar la muestra a un número de revoluciones prefijado.

Con miras a definir la velocidad de rotación que se le debe imprimir a la muestra se debe tener presente las siguientes consideraciones: a) la baja resistencia mecánica que suelen presentar cierto tipo de rocas; por lo tanto no es aconsejable utilizar velocidades de rotación mayores que unas 2000 r.p.m. y b) las perturbaciones que estaran presentes en la medición, de las cuales las mas importantes son los campos magnéticos con frecuencias de 50 Hz asociados a las lineas de distribución de energía y equipos electromecánico comunes en todo laboratorio; en consecuencia, se aconseja utilizar una velocidad de rotación que difiera en aproximadamente un orden de magnitud de la frecuencia de la linea. De a) y b) se desprende el por que se eligió como frecuencia de trabajo del equipo proyectado la de unos 8 Hz, (500 r.p.m.).

Para la elección del sistema que se utilizará en la detección del campo magnético variable asociado a la rotación de la muestra debe tenerse en cuenta: i) el elemento de medición debe ser solo sensible a la componente del campo magnético total y ii) la baja frecuencia del campo magnético a medir (8 Hz). La utilización de bobinas que concatenen el flujo variable (bobinas

"pick-up"), como las utilizadas en los magnetómetros rotativos ("spinner") convencionales (ej. Vilas y Valencio, 1969), satisface la primera de estas condiciones (i) pero la segunda condición restringe su aplicabilidad dado que la f.e.m. en los terminales de la bobina "pic-up" es proporcional a $\frac{d\phi}{dt}$ y por lo tanto proporcional a la pulzación ω del flujo concatenado. Para el magnetómetro proyectado ω es pequeña y por lo tanto la eficiencia de este sistema es baja. Se podría plantear aumentar el número $\mathcal{N}$ de espiras y así mejorar la eficiencia de la detección de este sistema; sin embargo esto tiene un límite pues para el caso de bobinas convencionales (no superconductoras) la resistencia ohmica de estas aumenta en forma proporcional a $\mathcal{N}^2$, aumentando por lo tanto el ruido por agitación térmica en relación directa con $\mathcal{N}$; lo cual fija un límite para el campo variable a ser detectado(Jonson, 1938). Un sistema de detección que cumple satisfactoriamente con las condiciones i) y ii) es el basado en el principio sugerido por Valencio (1966), el que propone la utilización de magnetómetros a nucleo saturado para la medición del M.R. de muestras de rocas. El principio de operación de los magnetómetros a nucleo saturado fué descripto originalmente por Aschenbrenner y Gobau (1936), un desarrollo analítico simplificado puede encontrarse en Runbough y Alldredge (1949). Por las razones expuestas se adoptó utilizar para la detección del campo asociado al M.R. de la muestra, el magnetómetro perteneciente al Laboratorio de Paleomagnetismo de la F.C.E. y N. de la U.B.A., marca Institut Dr. Förster, modelo 1.107 del tipo nucleo saturado.

1.2.2 El magnetómetro Institut Dr. Förster

Este equipo emplea como elemento sensible para la medición del campo magnético un sistema de dos sondas conectados entre si según el esquema mostrado en la Figuar 1 (Förster,1940). Cada sonda esta constituida por un nucleo de un material de alta permeabilidad magnética el que está rodeado por sendos arrollamientos primario y secundario. El arrollamiento primario es alimentado por una corriente alterna de 55 mA, magnitud suficiente como para producir un campo magnético que lleve a la saturación el material del nucleo. En ausencia de todo campo uniforme exterior la variación temporal del flujo en el nucleo no será senoidal, pues estará deformada por el ciclo de histéresis del material y como consecuencia de esto, tampoco será senoidal la tensión en los extremos del arrollamiento secundario. El desarrollo en series de Fourier de la tensión presente en los extremos del arrollamiento secundario indica que, en este desarrollo, solo aparecerán la armónica fundamental y las impares, como consecuencia de que el ciclo de histéresis y el campo magnético son simetricos respecto del origen. Si al estado magnético del nucleo se le superpone un pequeño campo magnético constante(H) en la

dirección del eje del mismo se rompe la simetria impar mencionada apareciendo, por lo tanto, las armónicas pares en el desarrollo de Fourier de la tensión presente en el arrollamiento secundario, las que estarán relacionadas con el campo magnético H. De acuerdo con el conexionado elegido para las sondas (Figura 1,primario en oposición,secundario en el mismo sentido), las armónicas pares en los extremos de cada uno de los arrollamientos secundarios se suman en fase pues, la polaridad de estas, solo depende del sentido del campo H y no de la polaridad de la corriente de excitación; por el contrario la presencia de la fundamental y las armónicas impares será mínima, pues estas se presentan en oposiciones de fase tal cual lo hace el campo de excitación. Para cuantificar la magnitud de H, éste equipo utiliza la segunda armónica de la corriente de exitación solamente; la amplitud de esta armónica es proporcional a H para pequeños valores de éste.

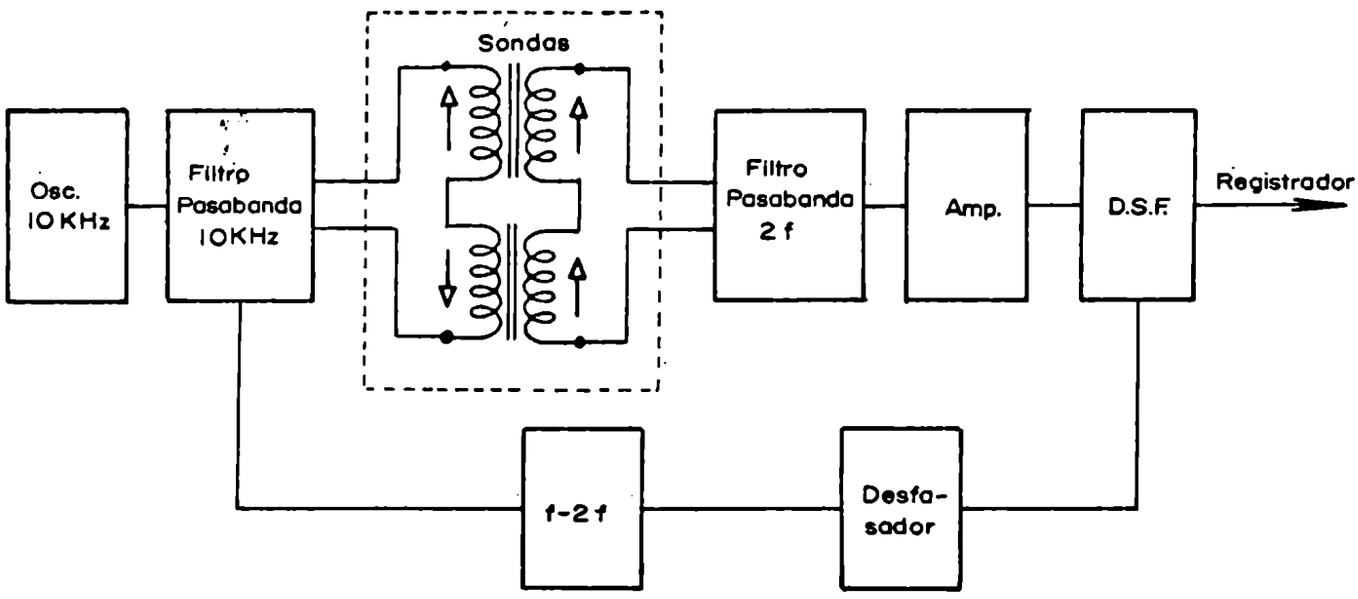


Figura 1. Diagrama en bloque del magnetómetro Institut Dr.Förster, modelo 1.107

Partiendo del diagrama en bloque de la Figura 1 puede comprenderse el principio de funcionamiento de éste magnetómetro, (Kühne,1952).La señal que alimenta el primario de las sondas es generada por un oscilador de 10 KHz y filtrada por un filtro pasabanda sintonizado en 10 KHz, de tal manera que la presencia de las armónicas superiores en la señal de alimentación es mínima. Este filtro alimenta simultaneamente a los rpimarios de las sondas y al doblador de frecuencia f-2f. La señal a la salida de los secundarios de las sondas alimenta a un filtro pasabanda (2f) sintonizado en 20 KHz; la señal a la salida del filtro es amplificada en un amplificador de alterna y luego detectada por medio de un detector sensible a fase,(D.S.F.) que es comandado por una señal de referencia en fase con la señal a medir.La señal de referencia se obtiene del doblador de frecuencia con la fase convenientemente ajustada por medio del desfasador. La tensión de continua a la salida

del D.S.F. es proporcional a la segunda armónica y por lo tanto proporcional al campo H; la polaridad de la misma indica la dirección de H.

El magnetómetro Institut Dr. Förster, modelo 1.107 tiene como accesorio opcional un sistema de 4 sondas modelo 2FGK-32-T9-4 (Figura 2). Este sistema esta constituido por dos pares de sondas; uno de estos pares es adecuado para la medición de campos magnéticos (sondas blancas); el otro es para la medición de gradientes (sondas rojas). Cada sonda está constituida por un nucleo de alta permeabilidad magnética, con los arrollamientos secundarios y primarios superpuestos cubriendo toda la longitud del núcleo, formando el conjunto un cilíndro de unos 30 mm de longitud y 5 mm de diámetro, el que se encuentra alojado en un prisma de micarta de sección cuadrada de 10 mm de lado por 70 mm de longitud. En este prisma se ha maracado por medio de una flecha la zona sensible. Cada sonda mide el campo H/2 presente en la dirección de su eje longitudinal (error ± 1%) y en el sentido de la flecha.

El magnetómetro Förster está capacitado para medir campos magnéticos variables cuando las variaciones no sean superiores a 10^{-2} s. En la tabla 1 se ha representado la atenuación del campo medido en función de su frecuencia.

Frecuencia (Hz)	0	10	20	30	40	50
Atenuación (%)	100	99	97,5	95	93,5	92

Tabla 1. Atenuación en la medición en función de la frecuencia para un magnetómetro Förster modelo 1.107.

El rango de medición de éste equipo es muy amplio:desde 1 μ Oe a 1 Oe, y la sensibilidad máxima es de 1 μOe por división. Además está provisto con un terminal de salida del tipo diferencial,(0,5 KΩ de resistencis interna) en el que aparece una tensión de 1,5 V para una deflexión a plena escala (100 divisiones en el instrumento); es decir, la relación entre el campo magnético H (expresado en γ) presente en las sondas y la diferencia de po-

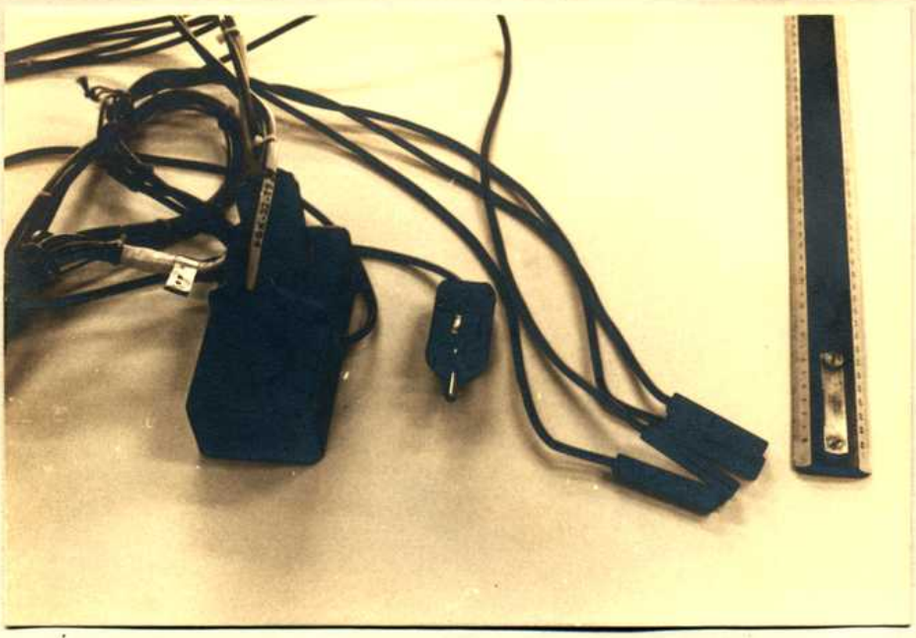


Figura 2. Sistema opcional de 4 sondas modelo 2FGK-32-T9-4.

tencial e (en mV) que aparecerá en esta salida está dada por:

$$e\ [mV] = \frac{15}{B}\ H[\gamma] \qquad (1.1)$$

donde B es la constante de escala, pudiendose elegir para ésta los siguientes valores: 1-2-5-10-20-50-100-200-500-1000. El fabricante prevee la presencia de zumbido en la salida del magnetómetro equivalente a un campo alterno comprendido entre 20γ y 80γ .

Con miras a determinar los valores de zumbido y ruido propios del equipo que se va a utilizar en la construcción del magnetómetro U.B.A. 8 Hz se realizaron los siguientes dos ensayos:

1) Determinación del nivel de zumbido:

Como el interés es detectar el zumbido propio del equipo, es necesario evitar que las sondas sean sensibilizadas por campos magnéticos de 50 Hz; para ello se las ubicó dentro del blindaje de μ metal perteneciente a un fotomultiplicador (campo externo/campo interno en blindajes de fotomultiplicadores $>10^5$, Wadey,1956). La señal presente en la salida de tipo diferencial del Magnetómetro Förster se introduce en la entrada de un preamplificador de bajo ruido Princenton Applied Research Modelo CR4, obteniendose en su salida ("single-ended") una señal referida a tierra amplificada 10 veces. En la Fi-

gura 3 se muestra esta señal cuando se coloca el magnetómetro en su máxima sensibilidad (B=1;15 mV/γ). Teniendo en cuenta la ganancia del preamplificador CR4, el zumbido en la salida del magnetómetro es de 400 mV pico a pico o lo que es lo mismo equivalente a un campo magnético alterno de 27γ pico a pico, valor que está dentro de los límites estipulados por el fabricante.

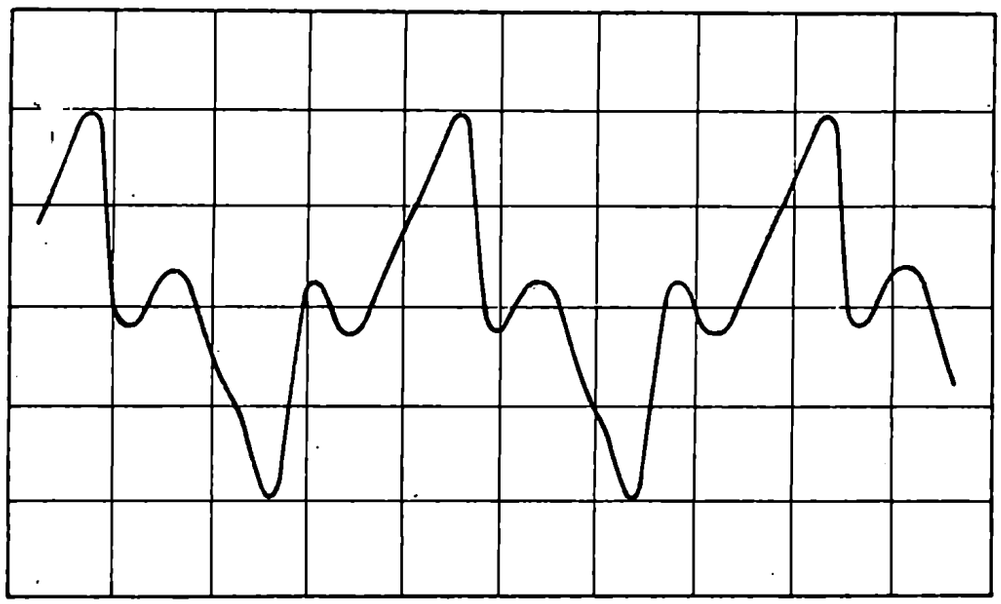


Figura 3. Zumbido propio del magnetómetro Förster (para B=1) amplificado 10 veces.Escala vertical:1 V/div.;escala horizontal: 5 ms/div.

2) Determinación del nivel de ruido blanco:

El límite para la máxima sensibilidad en los magnetómetro de núcleo saturado está fijado por el ruido blanco causado por agitación térmica en las sondas. Para poder medir este nivel de ruido en el magnetómetro es preciso eliminar previamente el zumbido de 50 Hz.Este objetivo se logra mediante un esquema de medición similar al anterior, sólo que a la salida del preamplificador CR4 se agrga ahora un filtro activo pasabajos con frecuencia de corte f_c=10 Hz y atenuación de 20 db/Oct.; de esta manera el zumbido de 50 Hz aparecerá atenuado en 45 db,es decir con un valor cuadrático medio (v.c.m.) de 0,7 mV (Figura4). Con este esquema de medición se pudo observar un valor de ruido blanco de aproximadamente 2 mV (v.c.m.) en la banda 1-10 Hz, superpuesto al zumbido atenuado (Figura 5).

Teniendo en cuenta que la magnitud del ruido blanco para un ancho de banda dado es proporcional a la raíz cuadrada del ancho de banda, de acuerdo con los valores observados se puede plantear la siguiente relación:

$$e_R = 0,7 \ (\ \Delta f \ [Hz] \ )^{1/2} / B \qquad (1.2)$$

donde e_R es el ruido blanco (en v.c.m.) en la banda Δf (en Hz).

Para obtener el ruido del equipo expresado en unidades de campo magnético, se igualan las expresiones (1.1) y (1.2).

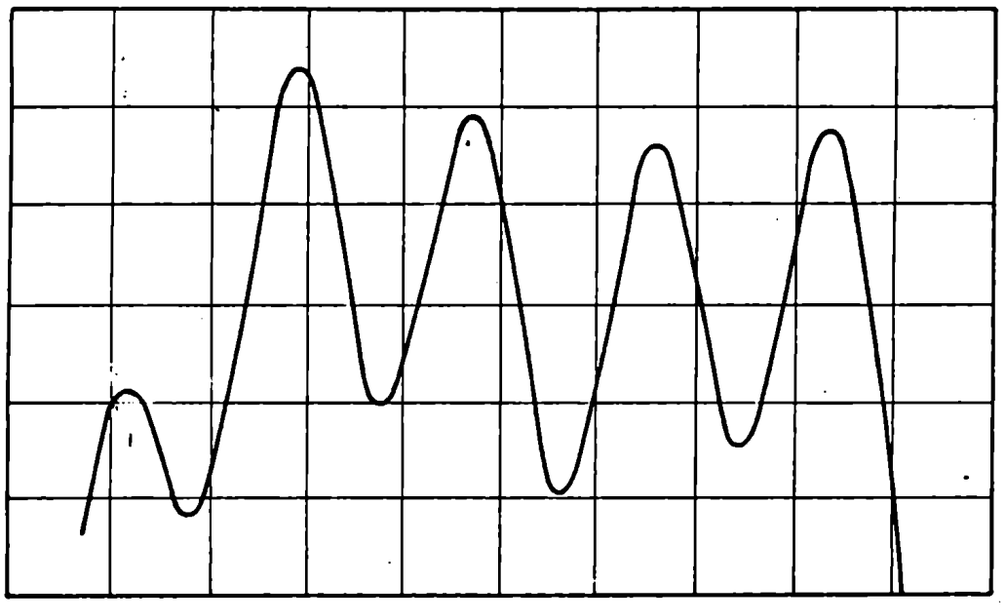


Figura 4. Zumbido residual del magnetómetro Förster (para B =1) con filtro activo pasabajos. Escala vertical amplificada 10 veces 5 mV/div.;escala horizontal: 10 ms/div.

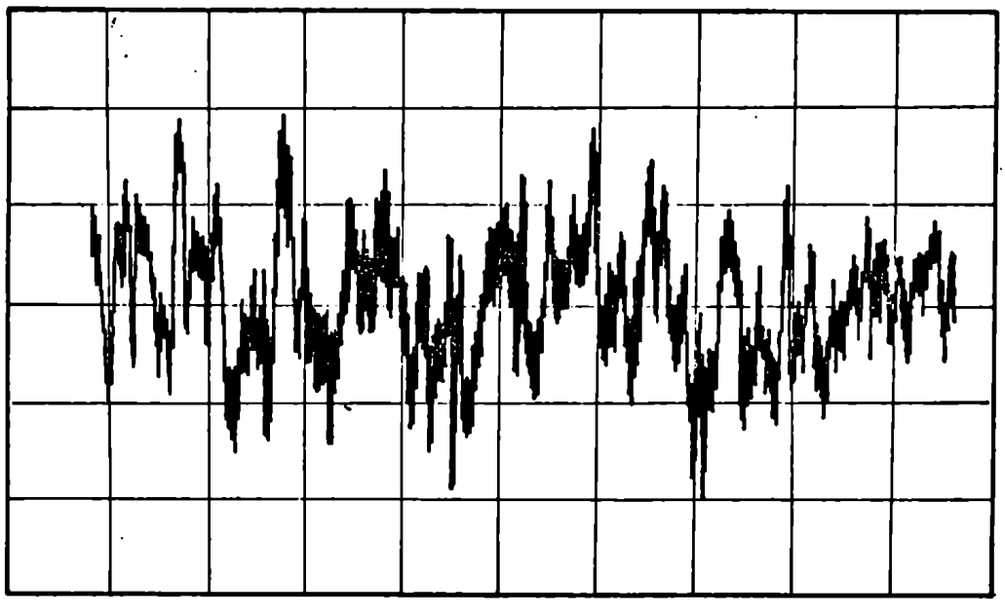


Figura 5. Ruido blanco y zumbido residual del magnetómetro Förster (para B=1) en la banda 1-10 Hz. Escala vertical amplificada 10 veces: 20 mV/div.; escala horizontal: 1 s/div.

$$H_R\,[\gamma] = 0{,}044\ (\Delta f\ [Hz])^{1/2} \qquad (1.3)$$

1.2.3 Diagrama en bloque y principio de operación del magnetómetro U.B.A. 8Hz

En la Figura 6 se muestra el diagrama en bloque del magnetómetro "spinner" proyectado;su principio de operación puede comprenderse sobre la base de este diagrama.El sistema de rotación de la muestra ④ está constituido por un elemento no magnético y es accionado por un motor sincrónico.Este sistema tiene acoplado un dispositivo ⑤ que tiene por finalidad generar una se-

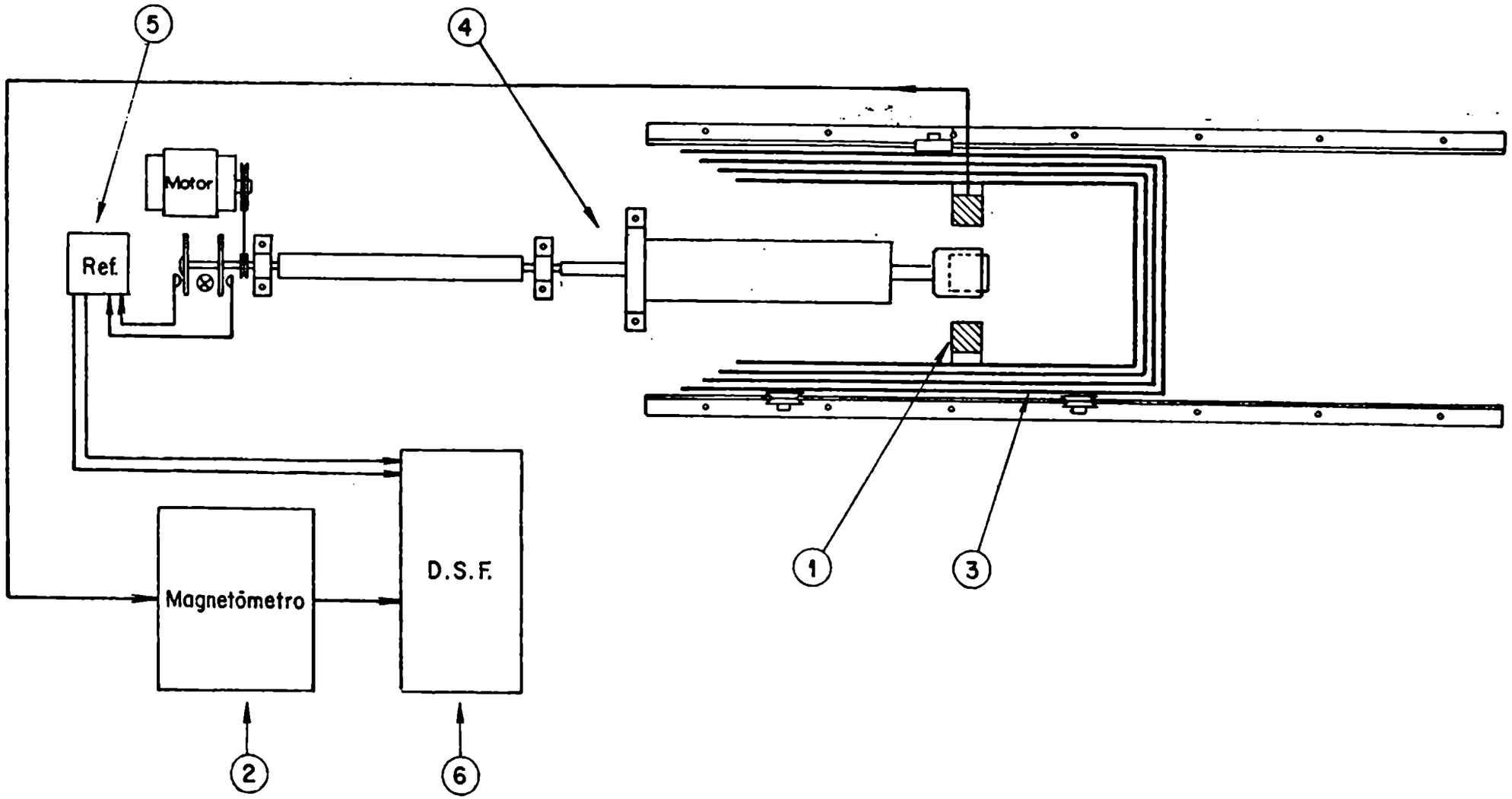


Figura 6. Diagrama en bloque del magnetómetro U.B.A. 8 Hz. (1) cabezal a nucleo saturado; (2) magnetómetro Förster; (3) blindaje magnético; (4) sitema de rotación de la mustra, (5) generador de señal de referencia; (6) detector sensible a fase.

ñal de referencia. El campo magnético variable asociado a la muestra en rotación es detectado por el cabezal a núcleo saturado ① cuya señal es elaborada por un magnetómetro ② ; este cabezal está protejido de los ruidos magnéticos ambientales por medio del blindaje de μ metal ③ . El detector sensible a fase ⑥ está alimentado por la señal de salida del magnetómetro y la señal de referencia y tiene por finalidad medir la señal en fase y cuadratura a la salida del magnetómetro con la señal de referencia.

1.2.4 Cabezal a núcleo saturado y magnetómetro

Para proyectar el cabezal de medición se tuvo en cuenta que la sensibilidad del magnetómetro rotativo depende de éste diseño a travez de los siguientes factores: i) disposición geométrica de las sondas de núcleo saturado y ii) volúmen de la muestra a medir. En la Figura 7 se muestra un caso ideal en el que se mide el campo magnético en los puntos D y B de un espécimen esférico de diámetro d, con magnetización uniforme $\vec{M}$. Se puede demostrar que el campo magnético suma del observado en D y en B es $4\pi\vec{M}$ es decir, independiente de d. Esto indica que solo es necesario colocar las sondas sobre la superficie de la muestra a medir para obtener la sensibilidad máxima, la que es independiente del tamaño de la muestra. Sin embargo, esto es imposible de llevar a la práctica pues ni las sondas son puntuales ni es posible ponerlas sobre la superficie de una muestra en rotación. Sea entonces el caso de sondas con longitud X ubicadas a una distancia menor que X del borde del espécimen, el caso que más se aproximaría al modelo de la Figura 7 será cuando se cumpla que $X \ll d$. Si se tiene en cuenta que X=3 cm (Item 1.2.2) el tamaño del espécimen ideal debería ser del orden de medio metro, magnitud inaceptable pues de lo contrario, se tendra que contar con un sofisticado mecanismo de rotación del espécimen y además las técnicas de muestreo y obtención de especimenes serían sumamente complicadas y costosas. Una solución de compromiso para este problema fué la de elegir X=d; como se demostrará mas adelante esta relación asegura una pérdida poco significativa de sensibilidad respecto de la máxima posible, brindando además, un tamaño adecuado para los especímenes (d=3 cm). La forma elegida para los mismos es la cúbica o cilíndrica pues su preparación es mucho mas simple que la esférica.

En la Figura 8 se muestra la disposición adoptada para las 4 sondas tipo 2FGK-32-T9-4 utilizadas y la posición relativa a las mismas de un espécimen cúbico en rotación. La orientación de las sondas elegida tiene la ventaja que campos magnéticos homogéneos no sensibilizan el conjunto. Sobre la base de la disposición geométrica adoptada se proyectó y construyó el cabezal de medición mostrado en la Figura 9 .

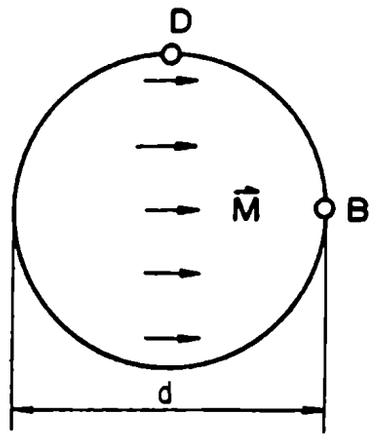


Figura 7. Caso ideal de espécimen esférico y sondas puntuales.

A continuación se desarrolla un cálculo estimado de la sensibilidad del sistema; para ello será necesario encontrar la relación que existe entre el módulo M del vector M.R. del espécimen y los campos magnéticos asociados a este que sensibilizan las sondas DDBB. Para simplificar se introduce la aproximación de un espécimen esférico de 27 cm^3 de volumen; de esta manera el campo magnético externo asociado a la magnetización remanente del espécimen será, en primera aproximación, equivalente a la de un dipolo con momento magnético $\vec{m}$ [uem] = 27 $\vec{M}$ [Gauss] ubicado en el punto O y se supone, sin perdida de generalidad, que la dirección de $\vec{m}$ coincide con la del eje x. El campo magnético $H_D/2$ que sensibiliza a la sonda D es el campo promedio a lo largo de la sonda en la direcciónde x; para calcularlo se parte de la expresión del campo H_x en el punto Q producido por el dipolo $\vec{m}$, (Q, θ y r están definidos en la Figura 8):

$$H_x = \frac{m}{r^3} (2 \operatorname{sen}^2 \theta - \cos^2 \theta) \qquad (1.4)$$

El campo promedio en la dirección de x a lolargo de la sonda D se obtiene mediante la (1.5):

$$\bar{H}_D / 2 = \frac{1}{x} \int_{-x/2}^{x/2} H_x \, dx \qquad (1.5)$$

Reemplazando e integrando se obtiene:

$$\bar{H}_D/2 = \frac{m}{[R_D^2 + (x/2)^2]^{3/2}} \qquad (1.6)$$

en donde R_D es la distancia entre el dipolo y la mitad de la sonda D.

Procediendo de manera análoga se obtiene el campo magnético promedio $\bar{H}_B/2$ que sensibiliza la sonda B:

$$\bar{H}_B = \frac{m X}{R_B^2 (R_B^2 + X^2)} \qquad (1.7)$$

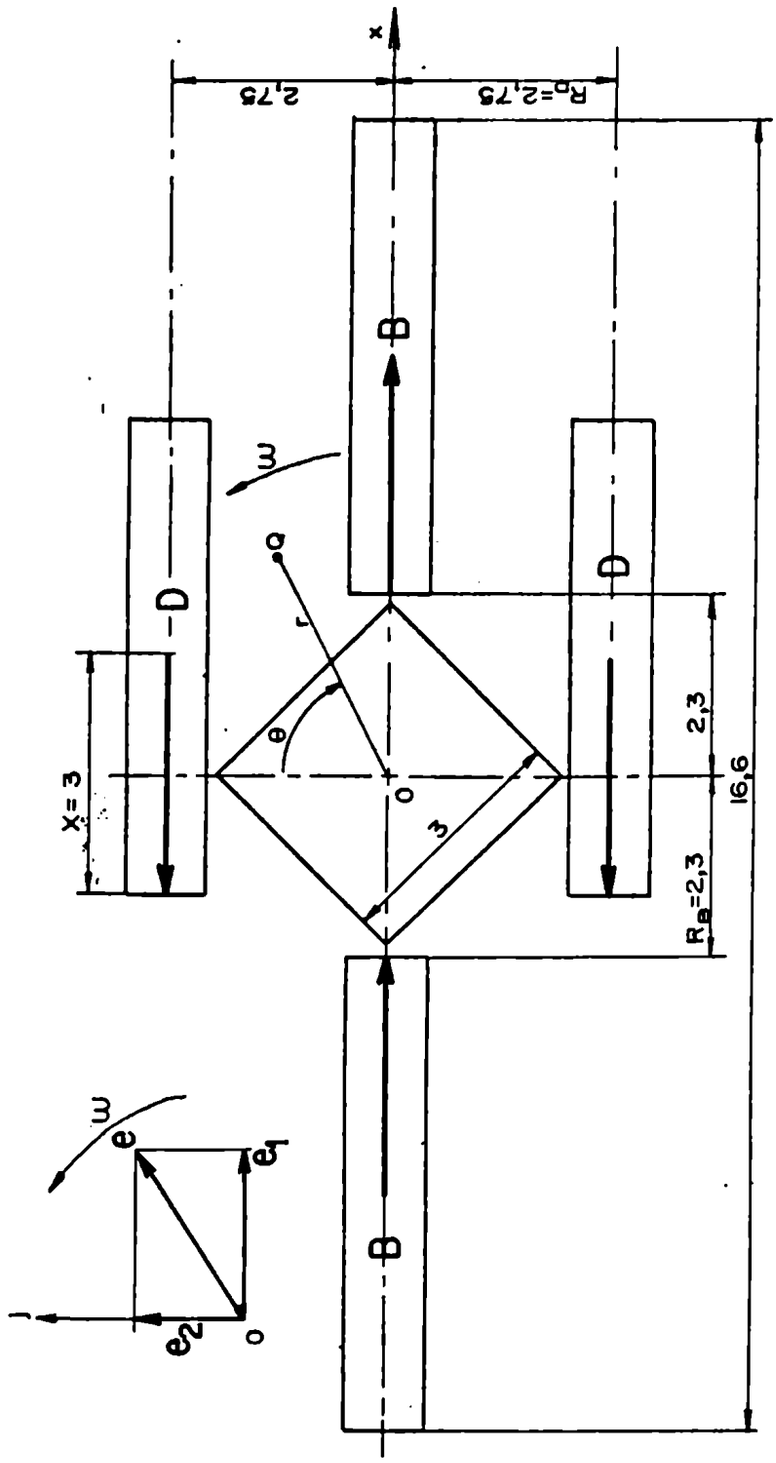


Figura 8. Disposición geométrica del sistema de 4 sondas y muestra cúbica en rotación. Parte superior izquierda: sistema de coordenadas complejas respecto del cual se mide la tensión e a la salida del magnetómetro.

en donde R_B es la distancia entre el dipolo y el extremo de la sonda B.

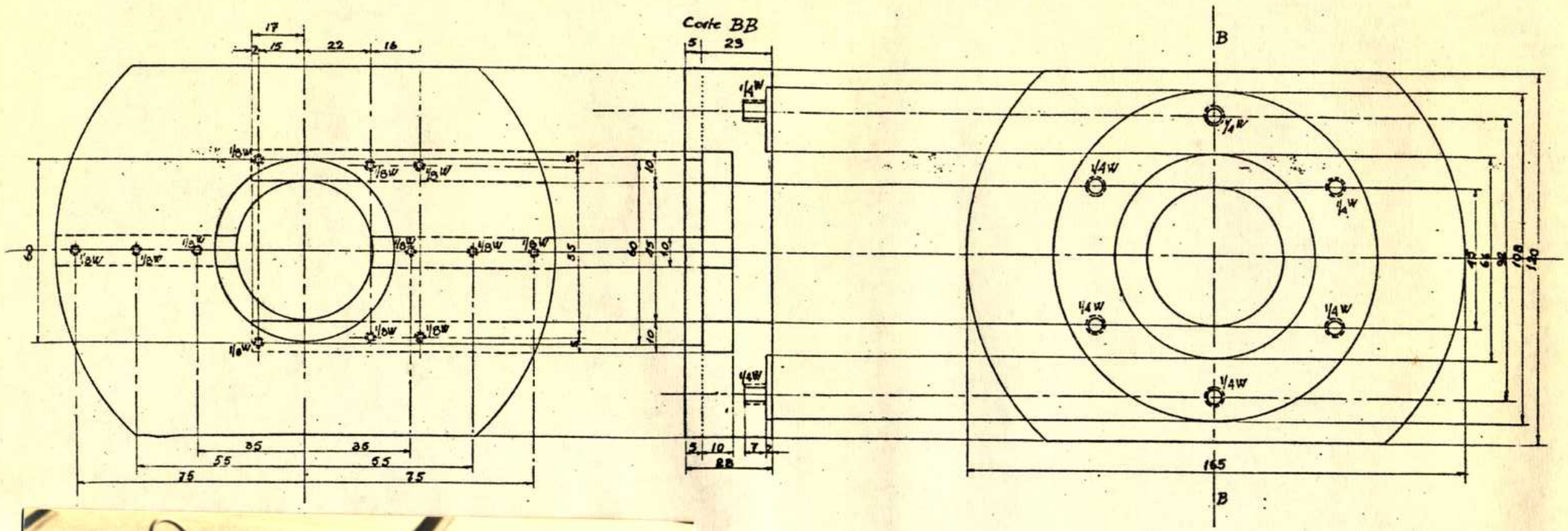
Luego, el campo H que sensibiliza el conjunto de las 4 sondas es:

$$H = 2\ \overline{H}_D/2 + 2\ \overline{H}_B/2 \qquad (1.8)$$

Reemplazando en (1.6) y (1.7) los valores indicados en la Figura 9 se obtiene:

$$H \cong 2M \quad \text{ó} \quad H\ [\sigma] \cong 0.2M\ [\mu\text{Gauss}] \qquad (1.9)$$

Comparando este valor con el máximo posible ($H=4\pi M$), se observa que la pérdida de sensibilidad de éste cabezal con espécimen cúbico de 3 cm de lado



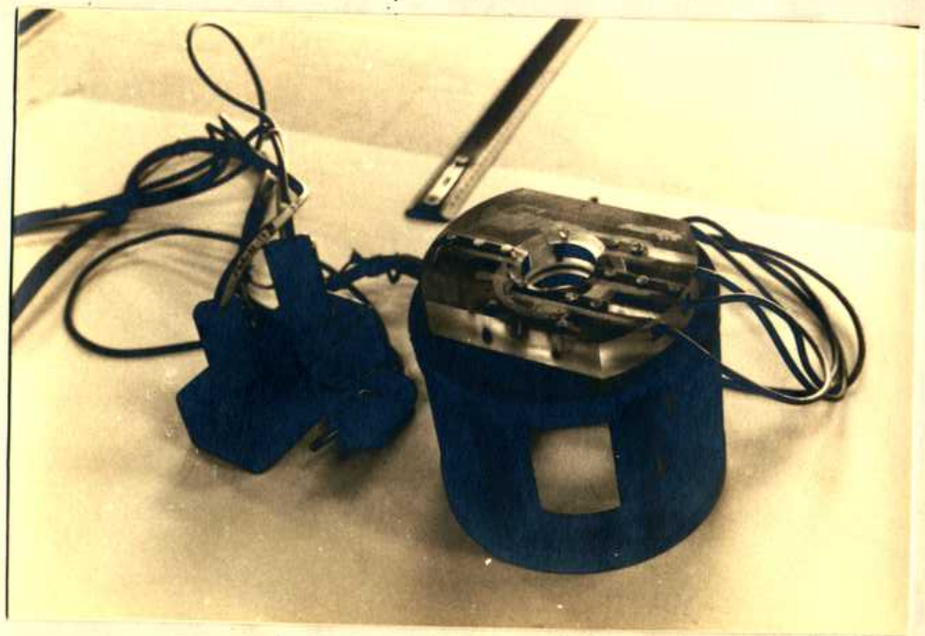


Figura 9. Cabezal de medición . Arriba : proyecto del cabezal.
Izquierda : cabezal construído en acrílico y madera.

es de unas 6 veces.

Teniendo en cuenta la (1.9) y el nivel de ruido del magnetómetro Institut Dr. Förster 1.107 (1.3) se determinó el ruido blanco expresado en μGauss como función del ancho de banda:

$$M\ [\mu Gauss] = 0.22\ (\ \Delta f\ [Hz]\ )^{1/2} \qquad (1.10)$$

Un análisis estimativo de la sensibilidad máxima en μGauss que es dable esperar para el magnetómetro de éste proyecto puede hacerse a partir de la (1.10) fijando el valor de Δf sobre la base de los valores mínimos con que operan los detectores sensibles a fase convensionales. Dado que los diferentes fabricantes dan como máximo tiempo de integración unos 300 segundos, el ancho de banda mínimo puede calcularse por:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi T} = 5{,}3\times10^{-4}\ Hz \qquad (1.11)$$

Reemplazando este valor en (1.10) se enceuntra que la sensibilidad máxima será de 5×10^{-9} Gauss valor que justifica la fabricación del magnetómetro rotativo proyectado. Reemplazando este Δf en la (1.2) se obtiene el valor de 16 μV, mínima señal eléctrica que se puede discriminar del ruido.

La señal eléctrica senoidal e que aparece en la salida del magnetómetro cuando se hace girar una muestra con magnetización $\vec{M}$ (Figura 8) puede expresarse por:

$$e = e_1 + j\ e_2 \qquad (1.12)$$

Teniendo en cuenta las expresiones (1.1) y (1.9):

$$|e|\ [mV] \simeq (3/B)\ \ M_\perp\ [\mu\ uem.cm^{-3}] \qquad (1.13)$$

En donde $M_\perp$ es la proyección de $\vec{M}$ sobre el plano perpendicular al eje de rotación. El valor exacto de la (1.13) se obtiene por calibración (Item 1.3.1).

1.2.5 Blindaje magnético

En el diseño del magnetómetro se tuvieron en cuenta los campos magnéticos ajenos al megnétismo remanente de la muestra en rotación pues la presencia de estos puede dar lugar a los siguientes errores: a) errores aleatorios causados por campos magnéticos de frecuencias semejantes a las de la muestra en rotación ($f \simeq 8$ Hz) y b) errores sistemáticos causados por la presencia en el recinto donde rota la muestra, de campos magnéticos constantes (Gough,1967). Se previó la eliminación de estas fuentes de error median-

te la utilización de un adecuado blindaje de μ metal. El cálculo estimativo del factor de blindaje para campos magnéticos de frecuencias bajas, o factor de blindaje incremental (Patton, 1967),

$$S_\Delta = \frac{H'e}{H'_i} \qquad (1.14)$$

donde H'_e es el campo magnético de baja frecuencia exterior al blindaje y H'_i el campo magnético residual de baja fracuencia dentro del blindaje, se realizó de manera de asegurar que las fuentes de error tipo a) esten ausentes. Para ello, con la disposición de las sondas mostradas en la Figura 8 se determinaron las perturbaciones magnéticas que se presentan normalmente en el Laboratorio para la frecuencia de 8 Hz; se observó que estas perturbaciones no superan las 50γ. Para evitar totalmente que las mismas produzcan alteraciones en las mediciones se utilizó un factor de seguridad de dos ordenes de magnitud; por lo tanto el blindaje deberá ser efectivo aun en presencia de campos de baja frecuencia de intensidad:

$$H'_e = 5\times10^{3}\,\gamma$$

El valor del campo magnético variable de baja frecuencia (H'_i) que puede estar presente en el interior del blindaje deberá ser menor que el campo magnético de ruido propio de las sondas; teniendo en cuenta las expresiones (1.3) y (1.11) se establece que $H'_i < 10^{-3}\gamma$, por lo tanto el factor de blindaje incremental deberá ser:

$$S_\Delta \geq 140 \text{ db} \qquad (1.15)$$

Un factor de blindaje incremental de este valor asegura también la ausencia de errores sistemáticos (errores tipo b). Esto se demuestra teniendo en cuenta que dichos errores se tornan desprecaibles cuando el campo magnético constante H_i, presente en el recinto de medición, es inferior a unas 30γ, (Gough, 1967) y que el campo magnético constante presente, medido en el laboratorio, es $H_e \simeq 3\times10^{4}\gamma$. Luego, por lo tanto el factor de blindaje estático $S = H_e/H_i \geq 60$db. Es fácil demostrar que ésta desigualdad se cumple con holgura cuando se asume $S_\Delta \geq 140$ db, pues para un mismo blindaje siempre es $S > S_\Delta$.

El blindaje proyectado consiste en un número adecuado de cilíndros concentricos de μ metal, con uno de sus extremos cerrados, separados entre si por un espacio libre de 1,25 cm (0,5''). Se eligió un espesor de 1,5 mm (0,06'') para las láminas de μ metal, valor que asegura una buena resistencia mecánica. El diámetro del cilindro interior queda fijado por las dimensiones del sistema de 4 somdas (Figura 9) en 19 cm (7,5''). Sobre la base del estudio hecho por Wadey (1956), se eligió la distancia en que deben ubicarse las 4 sondas en 1,4 del diámetro respecto del extremo abierto del cilíndro y en un diámetro respecto del extremo cerrado del mismo, asegurandose con esto, que el

factor de blindaje S no esté afectado prácticamente por los extremos. De lo expuesto surge que la longitud del cilíndro interior debe ser de 45,7 cm (18"). Bajo estas consideraciones puede emplearse una expresión simple que permite obtener el factor de blindaje magnético estático para un sistema de n cilindros de longitud infinita, lograda mediante aproximaciones en las formulas presentadas por Wills (1899), cuando se cumple que $\mu_i \; t_i/d_i \gg 1$, (donde: d_i = diámetro, t_i = espesor y μ_i = permeabilidad magnética integral del cilíndro i-ésimo). En este caso el factor de blindaje S está dado por la siguiente relación:

$$S \simeq S_1 \quad \Pi_{i=2}^{n} \quad S_i \quad [1 - (\frac{d_i}{d_{i-1}})^3] \qquad (1.16)$$

en donde el factor de blindaje del cilíndro i-ésimo es:

$$S_i \simeq \frac{\mu_i \; t_i}{d_i} \qquad (1.17)$$

El factor de blindaje incremental S_Δ puede calcularse sin pérdida de generalidad utilizando las expresiones (1.16) y (1.17) reemplazando la permeabilidad integral μ por la permeabilidad incremental μ_Δ. Recuerdese que μ_Δ es función del estado magnético del material, siendo generalmente $\mu_\Delta < \mu$; para el caso de los cilíndros interiores del blindaje puede asumirse que μ_Δ es igual a la permeabilidad inicial, (máximo valor que puede alcanzar μ_Δ), pues en ellos el valor del campo estático es practicamente nulo.

El número n de cilíndros que integran el blindaje se determinó realizando el cálculo de S_Δ con las expresiones (1.16) y (1.17) aumentando n hasta obtener un factor de blindaje que cumpla con la condición (1.15). El número así obtenido (n=4), conjuntamente con la geometría elegida, permitió lograr el diseño mostrado en la Figura 10 para el blimdaje del megnetómetro.

La inducción magnética en el material del cilíndro exterior del blindaje puede calcularse mediante la expresión aproximada (Patton,1967):

$$\mathcal{B} \simeq \frac{H_o \; d_1}{2 \; t_1} = 26 \text{ Gauss} \qquad (1.18)$$

donde: H_o (campo magnético estático en el laboratorio) $\simeq$ 0,3 Oe

d_1 (diámetro del cilíndro exterior) =10,5"

t_1 (espesor del cilíndro exterior) =0,06"

Conocida la inducción magnética presente en el material del cilíndro exterior se obtiene, de los ábacos $\mathcal{B}$, H, μ, para μ metal, los valores de la permeabilidad incremental y permeabilidad integral:

$$\mu_{\Delta_1} = 2 \times 10^4 \quad ; \quad \mu_1 = 4 \times 10^4$$

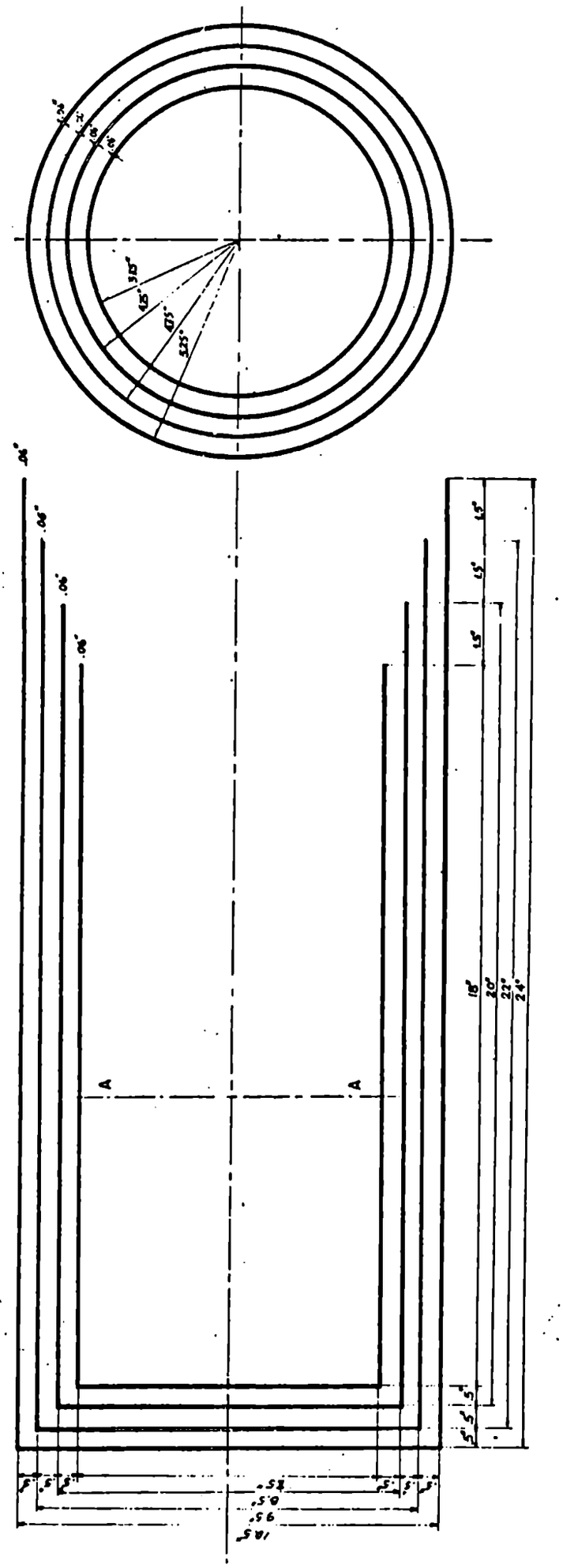


Figura 10. Blindaje de μ metal de cuatro capas construído sobre medidas por Williams Manufacturing Corp.- 561 Emory Street- San José, California- U.S.A.

Remplazando estos valores en la expresión (1.17) se obtienen los factores de blindaje del cilindro exterior: $S_{\Delta 1} = 115$ y $S_1 = 230$. La inducción magnética en el cilindro 2 puede calcularse mediante la expresión aproximada:

$$\mathfrak{B}_2 \simeq \frac{H_o \; d_2}{4t_2 \; S_1 \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^3\right]} = 0.2 \text{ Gauss} \qquad (1.19)$$

Este pequeño valor de la inducción magnética en el material del cilindro 2 (valor que será aun menor en los cilindros 3 y 4) nos lleva al caso en que pueden considerarse las permeabilidades incremental e integral iguales a la inicial es decir:

$$\mu_{\Delta 2} = \mu_2 = \mu_{\Delta 3} = \mu_3 = \mu_{\Delta 4} = \mu_4 = 2{,}9 \times 10^4$$

Reemplazando en la expresión (1.17) se obtiene:

$$S_{\Delta 2} = S_2 = 183 \; ; \; S_{\Delta 3} = S_3 = 205 \; ; \; S_{\Delta 4} = S_4 = 232$$

valores que reemplazados en (1.16) dan:

$$S_\Delta = 2{,}3 \times 10^7 = 147 \text{ db}$$
$$S = 4{,}6 \times 10^7 = 153 \text{ db}$$

los que cumplen con las exigencias requeridas .

1.2.6 Sistema de rotación de la muestra

Se eligió como velocidad angular de rotación de la muestra un valor próximo a los 8 Hz (Item 1.2.1); por lo tanto se selecciono como sistema de impulsión un motor sincrónico de 300 r.p.m. acoplado al eje que rota la muestra por medio de dos poleas y correa de goma. Con el objeto de evitar acoplamientos indeseables entre motor y sistema de medición, se fijó la relación de diámetro entre las poleas en 17/11, es decir que la muestra rota con una frecuencia de 7,73 Hz.

El diseño del mecanismo de rotación de la muestra debe cumplir con las siguientes especificaciones técnicas: 1) El elemento porta muestra y el estremo del eje de rotación próximo a las sondas de medición no pueden tener magnetismo remanente superior al ruido del equipo (5×10^{-9} Gauss); 2) eje, poleas y cojinetes deben ser construidos con materiales no magnéticos y debe evitar-

se que el motor de impulsión del sistema y el generador de señal de referencia produzcan señales que puedan ser detectadas por las sondas de medición; 3) deben evitarse ruidos y vibraciones mecánicas y 4) debe permitir la medición de muestras friables magnéticamente fuertes y que ello no implique un riesgo de contaminación del portamuestras. Ello se logra mediante los cuidados que ordenadamente se detallan para cada una de las especificaciones mencionadas: 1) se tuvo presente que las herramientas utilizadas para el maquinado de las piezas constitutivas del portamuestras son de acero, lo que produce una contaminación superficial del mismo, por ello será necesario, una vez finalizada la pieza, someterla a un baño desengrasante de tetracloruro de carbono y luego a otro de acido clorhídrico 12N para el ataque de las partículas de hierro que pudieran haber quedado adheridas a la superficie del portamuestra. Por lo tanto el material a utilizar, además de no poseer ningún tipo de propiedad ferromagnética, deberá ser resistente a los lavados químicos. En el mercado local el material de menor costo que cumple satisfactoriamente con estos requerimientos es el acrílico, el que fué utilizado para la fabricación del portamuestra y accesorios (Figura 11a, b y c). El eje que rota la muestra está constituido por dos secciones; una sección fué construida en madera dura con un extremo roscado para colocar el portamuestras (Figura 11 d); la otra sección fué construída en acrílico, con sus extremos de bronce (Figura 11 e) uno de los cuales lleva la polea impulsora f, construída en micarta, y los dos discos pantalla P_1 y P_2 del generador de la señal de referencia. El conjunto tiene una longitud total de 1350 mm siendo esta suficiente como para evitar el acoplamiento del cabezal de medición con el motor l y el generador de señal de referencia g. 3) Para obtener un sistema de rotación con vibraciones mínimas el eje se sustentó por medio de 3 bancadas; la bancada h, ubicada del lado del portamuestras, tiene un cojinete de teflón-teflón; las dos restantes (i y j) tienen cojinetes de bronce--teflón. El motor sincrónico de impulsión se lo montó sobre una plataforma de goma. 4) Para la medición de muestras friables magnéticamente fuertes se diseñó un dispositivo que evita totalmente el riesgo de contaminación del portamuestras (c); éste consiste de un porta espécimen cúbico construído en acrílico (Figura 11 b) el que permite alojar en su interior, perfectamente cerrado, muestras cilíndricas de 2,5 cm de diámetro por 1 cm de alto. Para la medición de muestras cilíndricas de 2,5 cm de diámetro y de altura variable se diseñó el portamuestras cúbico, construído en acrílico, mostrado en la Figura 11 a.

1.2.7 Generador de la señal de referencia

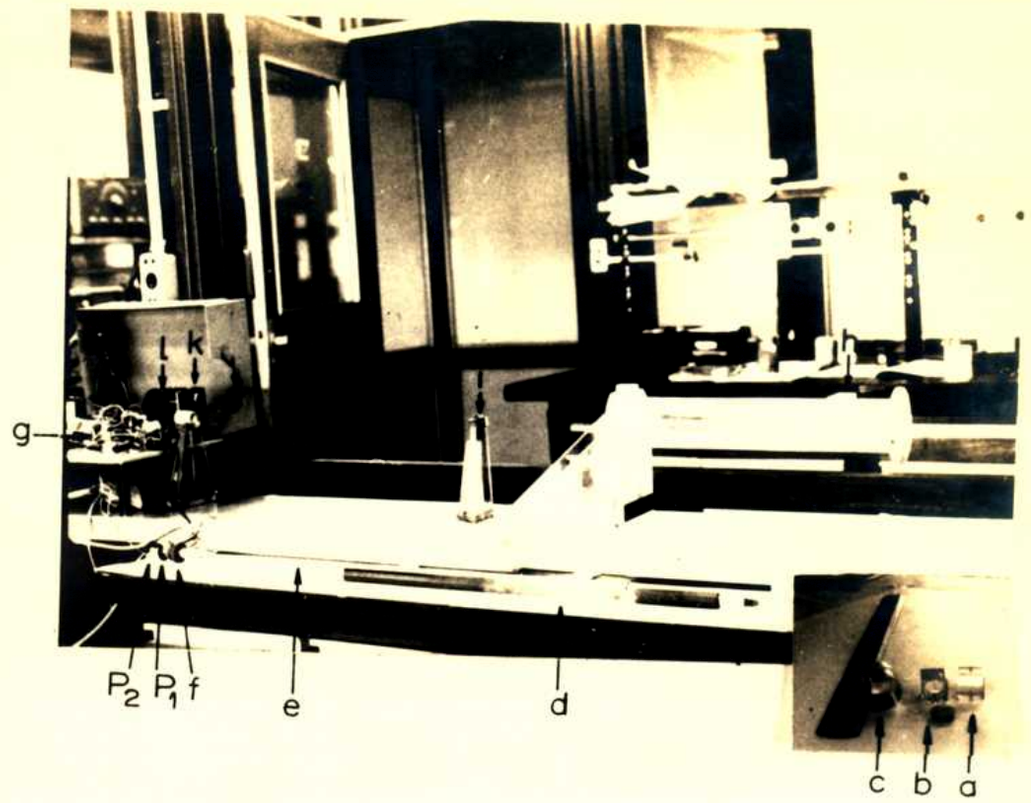


Figura 11. Sistema de rotación de la muestra. a y b: accesorios para especimenes cilíndricos de diferentes alturas.c: portamuestras. d: semieje de madera dura.e:semieje de acrílico.f: polea impulsora del eje. P_1 y P_2: pantallas del generador de la señal de referencia.g:generador de la señal de referencia.l: motor sincrónico. k: polea del motor.h,i y j: bancadas.

El generador de la señal de referencia tiene por finalidad producir dos señales cuadradas, en cuadratura de fase, las cuales conjuntamente con la señal obtenida en la salida del magnetómetro Förster, serán utilizadas por el detector sensible a fase para cuantificar las proyecciones del vector magnetización remanente de la muestra en un sistema de coordenadas ortogonales contenido en un plano perpendicular al eje de rotación. El dispositivo que permite obtener estas señales cuadradas (Figura 12), esta integrado por dos pantallas P_1 y P_2 las que giran solidariamente unidas al eje de rotación de la muestra interrumpiendo en cada media vuelta los haces luminosos L_1 y L_2; estos haces, así, al incidir en forma intermitente sobre los fototransistores T_1 y T_2 producen sendas señales cuadradas con niveles de -1,5 V en las salidas σ_1 y σ_2, pudiendose variar la fase entre ellas girando P_1 respecto de P_2.

1.2.8 Detector sensible a fase

El amplificador y detector sensible a fase (D.S.F.) tiene por finalidad amplificar, filtrar y cuantificar la intensidad y la fase de la señal e

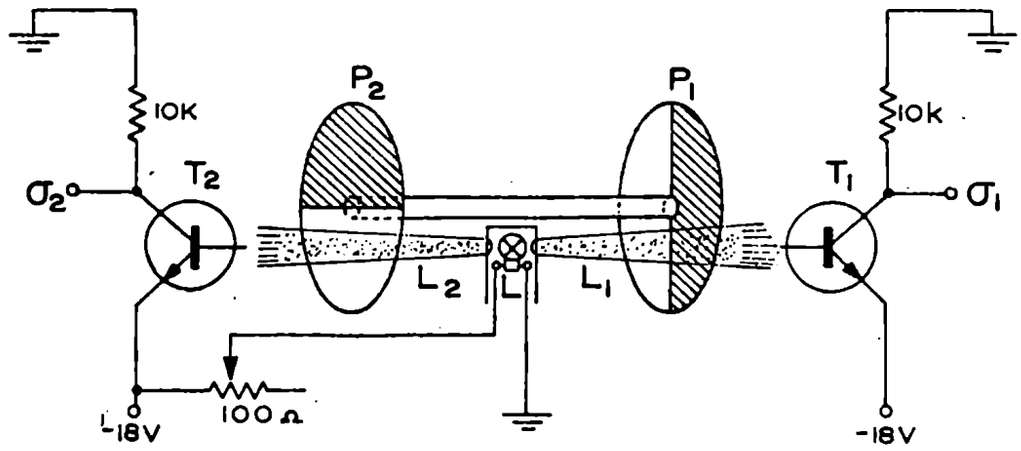


Figura 12. Generador de la señal de referencia T_1 y T_2: fototransistores Motorola MRD3050. P_1 y P_2: semidiscos pantalla. L: lámpara 18V, 3W. L_1 y L_2 : haces luminosos. σ_1 y σ_2: salidas de señal cuadrada, nivel 1,5V.

(expresión 1.12) presente a la salida del magnetómetro Förster respecto de sendas señales de referencia entregadas por el generador correspondiente (1.2.7). De lo hasta aquí expuesto se pueden establecer las siguientes especificaciones técnicas a las que deberá ajustarse el D.S.F.: 1) frecuencia de operación mínima 5 Hz (Item 1.2.1); 2) entrada de señal modo diferencial (Item 1.2.2); 3) sensibilidad máxima 15 μV (Item 1.2.4); 4) mínimo ancho de banda $5x10^{-4}$ Hz (fórmula 1.11) y 5) poseer dos canales que permitan medir simultáneamente la señal en fase (e_1) y en cuadratura (e_2) respecto de la señal de referencia (expresión 1.12). Teniendo en cuenta estas espécificaciones se seleccionó un D.S.F. comercial eligiendo entre aquellos que ofrecían mejor calidad; esto condujo a adquirir un D.S.F. Ithaco modelo 353. En la tabla 2 se transcriben las características de este equipo garantizadas por el fabricante.

El D.S.F. Ithaco modelo 353 está constituído por cinco unidades enchufables. Estas unidades se muestran en la Figura 13, de izquierda a derecha son: pos-amplificador D_1, amplificador B_1 , demodulador C_1, demodulador C_1 y pos-amplificador E_1.

El amplificador B_1 está integrado por 3 amplificadores y un atenuador los cuales tienen por finalidad proveer al demodulador C_1 una señal balanceada ; esto se logra mediante la llave S_1 lo cual permite obtener desviaciones a plena escala cuando la señal a la entrada es de 1 μV (v.c.m.)-3-10-30-100--300-1 mV (v.c.m.)-3-10-30-100-300. Esta llave tiene 12 posiciones las cuales estan individualizadas de 1 a 12 (a= 1...12) en sentido horario; la constante de escala A está dada por la siguiente relación:

Sensibilidad	1 μV a 300 mV para una salida de 10 V.
Presición	± 5%
Estabilidad en la aplificación	± 1% por 24 horas, 0.05 % por °C
Entrada	Entrada diferencial, impedancia de 300Mn en paralelo con 30 pF
Sobrecarga	Señal de entrada incoherente de 3V ó 1000 veces de la deflexión a plena escala
Salidas	1) ± 10V plena escala para cargas dentro de los 3K; conectores BNC en el panel y en la parte posterior 2) 0-1 V plena escala ajustable,conector BNC para registrador en la parte posterior
Deriva en la salida	0,1% de plena escala/24 h;0,5% de plena escala/°C
Supresor de cero	Calibrado de 0 a 1000% de plena escala.Presición ± 3%
Detección en 2 canales	2 demoduladores y postamplificadores independientes permiten la detección simultanea de la señal respecto de dos referencias independientes
Ancho de banda de ruido equivalente	$5x10^{-4}$ Hz a 250 Hz
Filtro en la salida del detector	Constantes de tiempo: 1 ms a 300 s ± 10%, en la secuencia 1-3-10;corte 6 ó 12 db/oct.
Señal de referencia	100 mV a 20 V pico a pico cualquier forma de onda con valor eficaz mayor que 40 mV. Impedancia entrada 5 MΩ
Desfasador	De control continuo de 0°-180°y de a pasos de 0°-90°-180°-270°. Presición del control continuo: ± 5%.Presición del control de a pasos:± 3%
Detección de segunda armónica	Una llave en el panel permite detectar automáticamente la segunda armónica.El rechazo mínimo de la fundamental es de -60 db
Alimentación	110 V/220 V, 50-400 Hz

Tabla 2. Características técnicas del amplificador y detector sensible a fase Ithaco modelo 353.

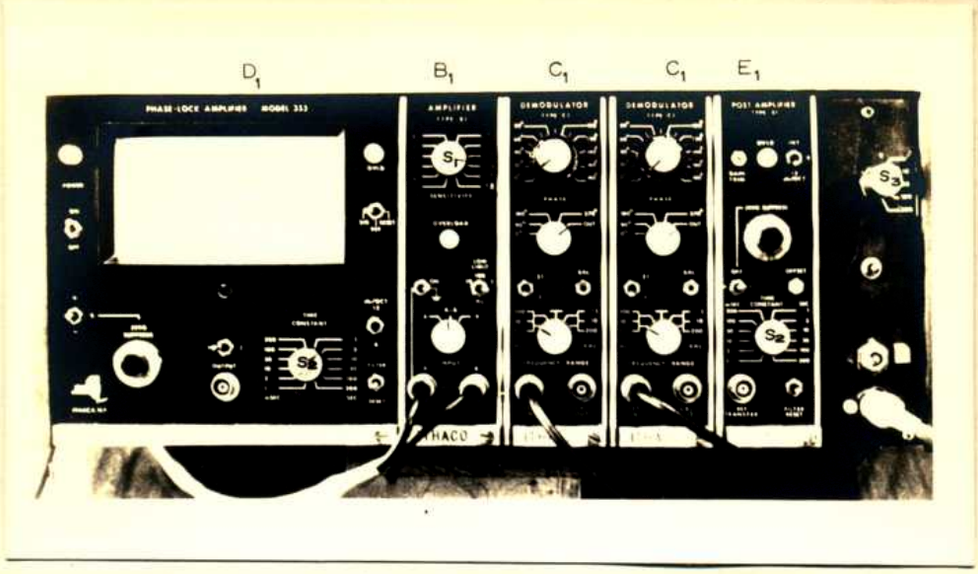


Figura 13. Detector sensible a fase Ithaco 353.

$$\text{Si a par} \quad A = 10^{\frac{a}{2}-2}$$
$$\text{Si a impar} \quad A = \frac{10^{\frac{a-3}{2}}}{3} \qquad (1.20)$$

Los demoduladores C_1 procesan la señal de salida del amplificador B_1 con sendas señales de referencia para entregar dos señales cuyas componentes de continua son proporcionales al valor de pico de la 1ª armónica de la señal del B_1 y al coseno de la diferencia de fase entre esta 1ª armónica y las señales de referencia respectivas.

El pos-amplificador tipo D_1 incluye la fuente de poder para las cinco unidades enchufables y un instrumento con cero al medio. Los pos-amplificadores (el D_1 y el E_1) tienen por finalidad amplificar y filtrar sendas componentes de continua entregadas por los demoduladores; para ello, cada uno cuenta con un filtro activo que permite seleccionar el ancho de banda equivalente Δf, mediante la llave S_2, de acuerdo con las siguientes constantes de tiempo T = 1 ms-3-10-30-100-300-1 s-3-10-30-100-300. El fabricante establece para estos filtros la siguiente relación entre Δf y T:

$$\Delta f\,[\text{Hz}] = \frac{1}{8T\,[\text{s}]} \qquad (1.21)$$

indicando que para obtener el 60% del valor final de la señal es necesario dejar trancurrir dos constantes de tiempo. Como esta información no permite conocer que proporción de la señal se tendrá al cabo de un tiempo de medición

arbitrario (t), fué necesario establecer una relación mas completa entre las constantes de tiempo (T), el tiempo (t) trancurrido en la medición y la señal a la salida del D.S.F. Para ello se lo alimentó con una señal conocida que diera a su salida una desviación a plena escala (E_f) , se dejo trancurrir un tiempo t y se midió, para diferentes constantes de tiempo, la señal (E_t) presente en la salida. Los valores de la relación E_t/E_f así obtenidos se muestran en la tabla 3; en la Figura 14 se representó E_t/E_f para cada t/T. De estas observaciones se desprende que si se desea obtener una señal E_t que no sea inferior al 98% del valor final de la señal será necesario dejar trancurrir un tiempo de medición de por lo menos 6 constantes de tiempo (t=6T). En el caso de tratarse de mediciones en las que la constante de tiempo elegida es inferior al segundo solo bastará,para realizar la medición, esperar que la aguja del instrumento se detenga. De haberse elegido constantes de tiempo mayores será necesario cuantificar t=6T y luego realizar la medición. Para tal fin se diseñó el medidor de tiempo mostrado én la Figura 15 que permite seleccionar los tiempos de medición por medio de la llave selectora S_3 (Figuras 13 y 15) de acuerdo con los siguientes valores en segundos:6x3; 6x10; 6x100 y 6x300.

T [s] / t/T	3	10	30	100	300
1	0,23	0,22	0,24	0,24	0,24
2	0,55	0,54	0,54	0,55	0,55
3	0,76	0,76	0,76	0,76	0,75
4	0,87	0,87	0,88	0,87	0,86
5	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94
6	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97

Tabla 3.D.S.F. Ithaco 353. Relación E_t/E_f en función de t/T para constantes de tiempo comprendidas entre 3 s y 300 s..

Para obtener un funcionamiento adecuado del conjunto magnetómetro-D.S.F. es importante limitar el zumbido (Figura 3, Item 1.2.2) presente en la salida del magnetómetro; para ello se intercala un filtro pasabajos de 20 db/Oct con frecuencia de corte de 10 Hz. El diseño de este filtro y el ensamble del conjunto magnetómetro-filtro-D.S.F. se realizó siguiendo las indicaciones del manual de instrucciones y mantenimiento del D.S.F. Ithaco 353. Así, el ensamble más adecuado es conectar la salida del magnetómetro a la entrada del amplificador B_1 e intercalar el filtro entre la 1ª y 2ª etapa amplificadora. Este fil-

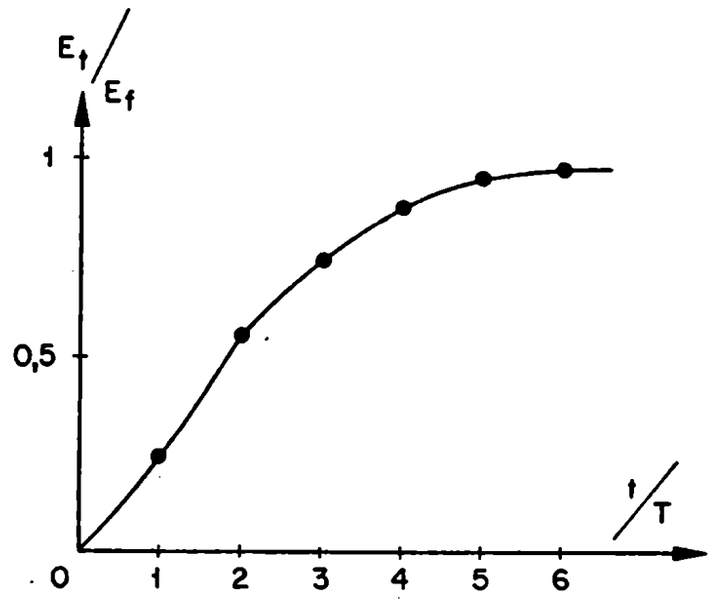


Figura 14. Señal a la salida del D.S.F. Ithaco 353 en función del tiempo transcurrido en la medición.

tro deberá cumplir con las siguientes especificaciones: i) poseer una impedancia de entrada $\geqslant 25$ KΩ, ii) funcionar con impedancia de carga de 10 KΩ, iii) tener un rango dinámico $\simeq$ 10 V. y iv) poseer un ruido propio muy por debajo del nivel de señal a la salida de la primera etapa. En la Figura 16 se muestra el diseño del filtro activo que cumple con estos requerimientos. Para evitar la inducción de ruidos y/o zumbidos en el filtro se lo instaló dentro del modulo del B_1 alimentandolo con su misma fuente estabilizada; el filtro puede ser conectado en forma remota por medio de un relevador.

El autoruido del D.S.F. se determinó con y sin filtro, para f = 8 Hz con un ancho de banda Δf = 1 Hz, y con una resistencia en la entrada de 500Ω (equivalente a la del magnetómetro); el valor obtenido fué de 0,23 μV y 0,14 μV respectivamente. Estos valores son despreciables frente al ruido blanco de 670 μV del magnetómetro para el ancho de banda considerado (Item 1.2.2).

A modo de verificaión del funcionamiento del filtro se lo alimentó con señales senoidales con frecuencias comprendidas entre 5 Hz y 70 Hz, obteniéndose a la salida una atenuación de la señal segun los valores indicados en la Tabla 4 y representados en la Figura 17. Puede observarse en esta figura que la atenuación del zumbido que se logra con el filtro es de $5{,}5\times10^{-3}$; luego dado que el zumbido del magnetómetro es de 200 mV, por acción del filtro el zumbido se reduce a 1,1 mV magnitud admisible pues es del mismo orden que el

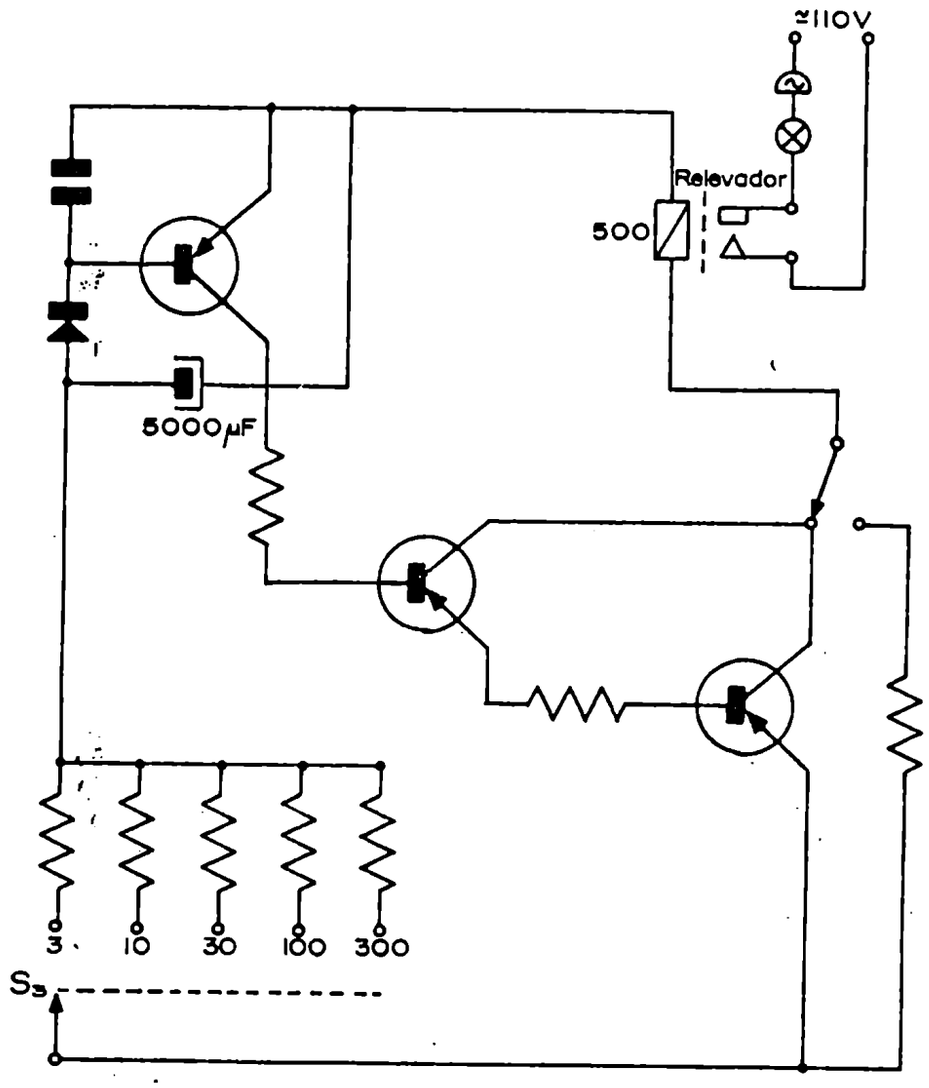


Figura 15. Circuito del medidor de tiempo colocado en el extremo derecho del D.S.F.

ruido blanco del magnetómetro Förster.

1.3. PUESTA EN SERVICIO DEL MAGNETOMETRO

1.3.1 Calibración

Para poner en servicio el magnetómetro U.B.A. 8 Hz, diseñado y construído segun lo expuesto en el Item 1.2 (Figura 18), fue necesario previamente calibrarlo pues, aunque los equipos que lo integran fueron calibrados por los fabricantes, el conjunto no posee una calibración absoluta de la medida de la magnetización debido a que solo se conoce en forma apróximada el factor geometrico del cabezal de medición (formula 1.9).

Para la calibración se partió de la expresión que vincula la magneti-

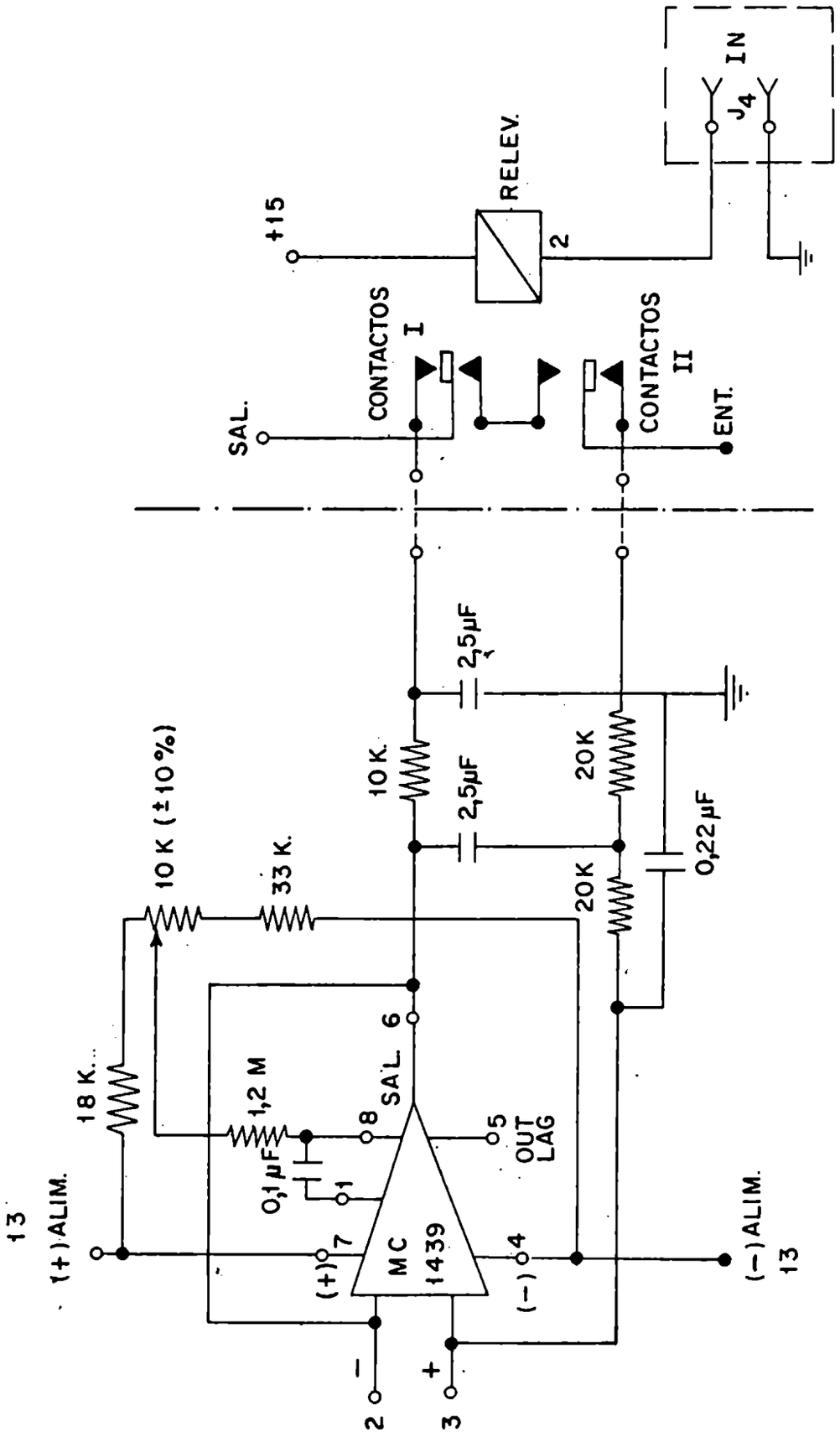


Figura 16. Filtro activo pasabajos de 20 db/oct. y frecuencia de corte de 10 Hz.

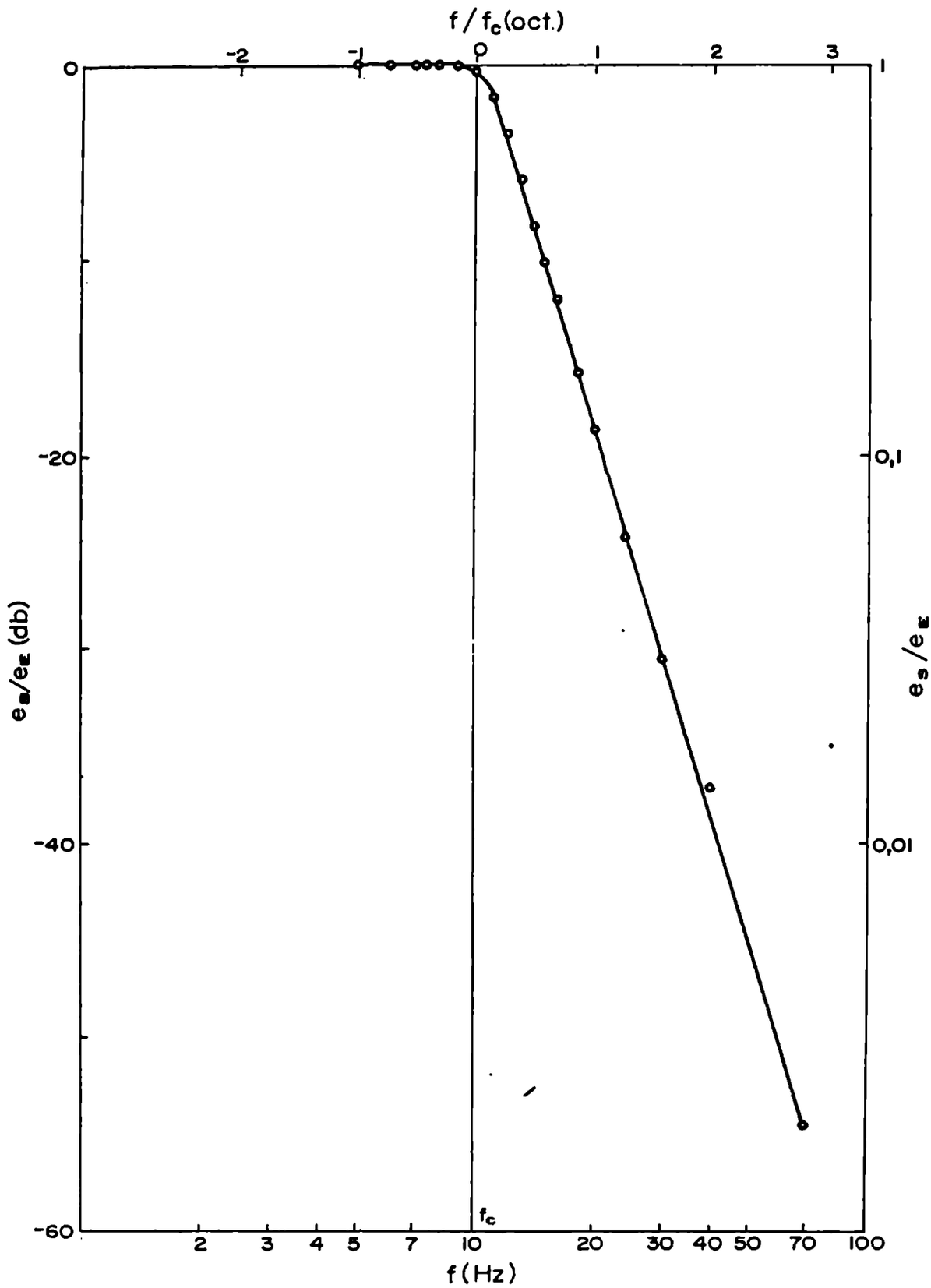


Figura 17. Respuesta del filtro activo pasabajos.

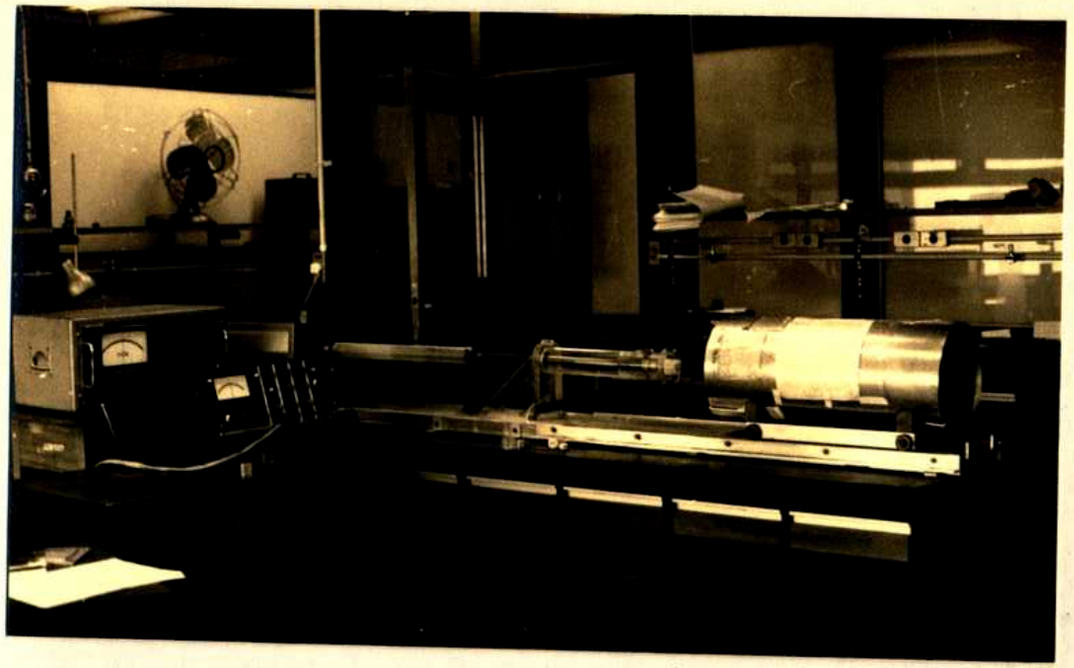


Figura 18. "Magnetómetro U.B.A. 8 Hz" diseñado y construído en la F.C.E. y N. de la U.B.A.

f [Hz]	5	6	7	7,5	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	20	24	30	40	70
e_s/e_E	1	1	1	1	1	1	0,97	0,83	0,67	0,51	0,39	0,31	0,25	0,164	0,118	0,061	0,03	0,014	0,0018

Tabla 4. Respuesta del filtro activo (Figura 16). f: frecuencia de la señal. e_s / e_E: atenuación de la señal a la salida del filtro (e_s) respecto de la señal a la entrada (e_E).

zación M en unidades de 10^{-6} uem.cm^{-3} medida por el magnetómetro en sus propias unidades:

$$M\ [10^{-6}\ \text{uem.cm}^{-3}] = CAB\cdot\delta\ [\text{unid.mag.UBA 8Hz}] \qquad (1.22)$$

donde

C: Constante de calibración

B: Constante de escala del magnetómetro Förster

A: Constante de escala del D.S.F., fórmula (1.20)

δ: Número de divisiones leidos en el instrumento del D.S.F.

El valor de C se determinó con el auxilio de una bobina patrón cúbica de $3 \pm 0{,}01$ cm de lado de 10 vueltas (Figura 19), ubicada en el magnetómetro en posición de medición de manera tal que su eje sea paralelo al eje de las sondas; esta bobina es alimentada con una señal senoidal de 7,73 Hz mediante un

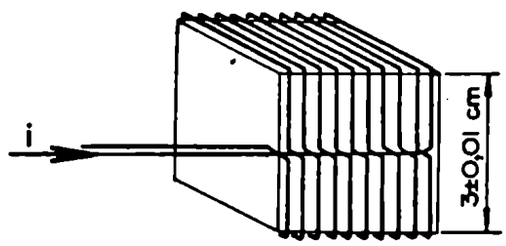


Figura 19. Bobina cúbica patrón utilizada en la calibración del Magnetómetro U.B.A. 8 Hz

circuito como el mostrado en la figura 20. De esta manera la corriente alterna senoidal que circula por la bobina patrón producirá un campo magnético sobre las sondas similar al de una muestra cúbica que gira con 7,73 r.p.s. con magnetización:

$$M\ [\text{uem.cm}^{-3}] = \frac{1}{3 \pm 0{,}01}\ i\ [A] \qquad (1.23)$$

expresión en la cual i es el valor pico de la corriente de alimentación en Amper.

La determinación de i se realizó mediante un osciloscopio el que permitió medir e_{pp}, valor pico a pico de la caída de tensión sobre la resistencia de $116 \pm 0{,}6\Omega$ (Figura 19). La circulación de la corriente i a través de la bobina patrón produce entonces una deflección δ en el D.S.F. (fórmulas

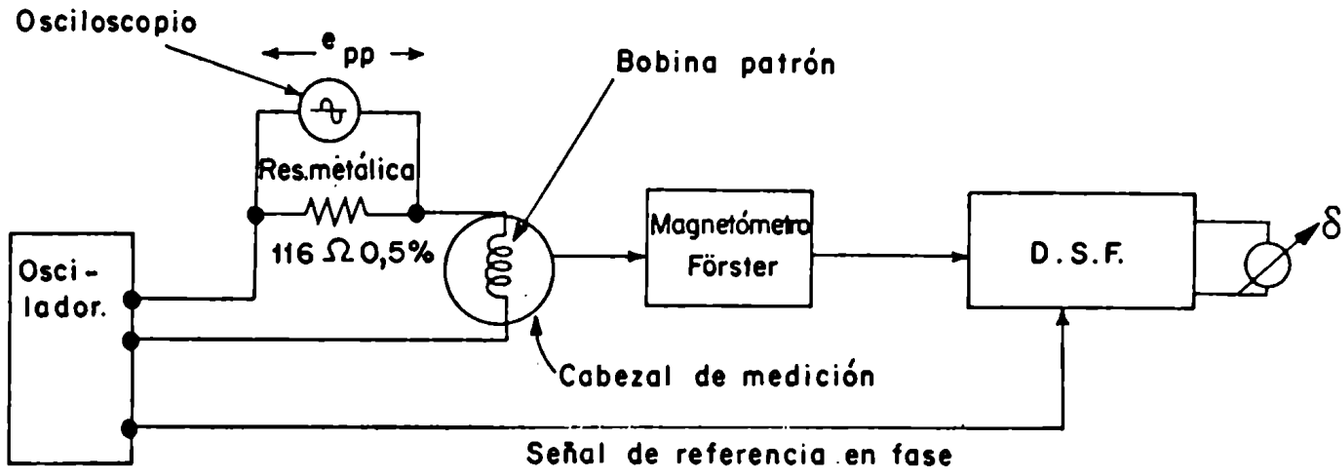


Figura 20. Circuito utilizado en la calibración del Magnetómetro U.B.A 8 Hz

1.22 y 1.23) que estará relacionada con la constante de calibración C y la caída de potencial e_{pp} por:

$$C = 1437\ (\pm\ 12)\ \frac{e_{pp}\quad [V]}{AB\cdot\delta\ [\text{divisiones}]} \qquad (1.24)$$

En la Tabla 5 se muestran los valores de e_{pp}; δ y $e_{pp}/AB\cdot\delta$ obtenidos de 8 ensayos los que permitieron determinar el valor más probable y el error de $e_{pp}/AB\delta$. Reemplazando estos valores en la (1.24) se obtiene la constante de calibración con su error:

$$C = (51\pm1)\times10^{-5} \quad [10^{-6}\ \text{uem.cm}^{-3}\ /\ \text{unid.mag. UBA 8 Hz}] \qquad (1.25)$$

Reemplazando en (1.22) se obtiene

$$M[10^{-6}\ \text{uem.cm}^{-3}] = 0{,}00051\ AB\delta,\ \text{error 2\%} \qquad (1.26)$$

fórmula que será utilizada para muestras cúbicas de 3 cm de lado. Si las muestras son cilindros de 2,54 cm de diámetro y h (cm) de altura, la magnetización estará dada, con buena aproximación, por:

$$M[10^{-6}\ \text{uem.cm}^{-3}] = 0{,}00272\ \frac{AB\cdot\delta}{h} \qquad (1.27)$$

B	a	A	δ [divisiones]	e_{pp} [V]	$e_{pp/AB\cdot\delta}$ $\times 10^{-7}$
50	11	$10^4/3$	30	1,8	3,60
			25	1,48	3,55
			20	1,2	3,60
			15	0,88	3,52
50	10	10^3	30	0,53	3,54
			25	0,44	3,52
			20	0,35	3,50
			15	0,27	3,60

Tabla 5. Valores experimentales de $e_{pp/AB\cdot\delta}$ obtenidos para la determinación de la constante de calibración. El valor medio es $e_{pp/AB\cdot\delta} = 3,55\times10^{-7}$ con una desviación estandar de $0,04\times10^{-7}$.

1.3.2 Ajuste de la fase

Se utilizará el plano complejo para representar el vector magnetización $M_\perp$ en rotación (Item 1.2.4) quedando en este caso definido por la siguiente expresión:

$$M_\perp = P + jQ \qquad (1.28)$$

En la Figura 21 puede observarse que se ha hecho coincidir el eje real con la marca fiducial que posee el portaespécimen (C) y si se impone la condición de que el canal 1 del D.S.F.debe medir solamente la parte real P y el canal 2 la parte imaginaria Q, será necesario realizar un ajuste adecuado de la fase de la señal e respecto de la de referencia. Para tal fin se construyó en madera una muestra patrón cilíndrica (derecha en Figura 21), con un dipolo magnético coaxial con su eje ubicado en el centro. El ajuste de la fase se realizó en tres etapas utilizando la muestra patrón y el accesorio (a) mostrado en la Figura 11: i) se colocó la muestra patrón de tal manera de hacer coincidir $\vec{M}$ con el eje real y se midió en el canal 1, variando la fase de la señal girando el sistema de 4 sondas (Item 1.2.4) de tal manera de obtener una deflección positiva máxima; ii) se colocó la muestra patrón haciendo coincidir $\vec{M}$ con el eje imaginario y se realizó el ajuste final de la fase del canal 1 girando el sistema de 4 sondas de tal manera de obtener una indicación nula en el canal 1, luego se varió la fase del canal 2 girando la pantalla P_2 (Item 1.2.7) hasta obtener en este una deflección positiva máxima; y iii) se colocó nuevamente la muestra con $\vec{M}$ coincidiendo con el eje real y se realizó

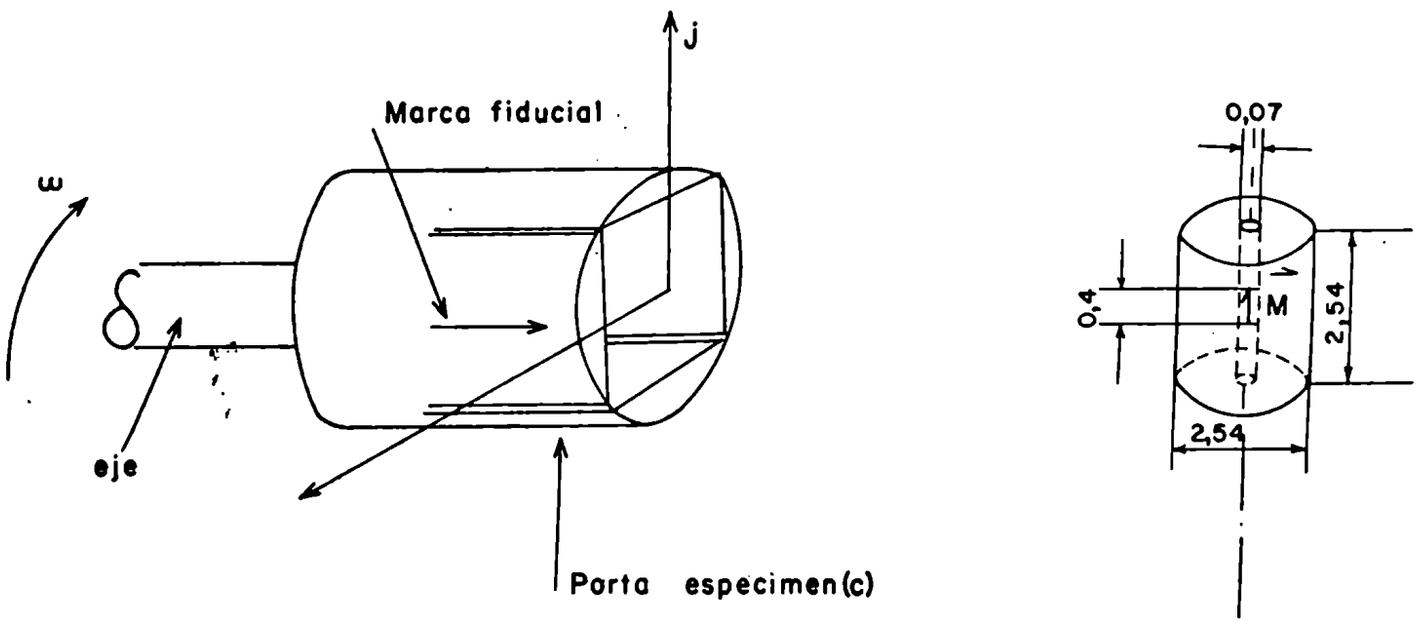


Figura 21. Izquierda: portaespécimen cúbico (c en Fig.11) con el sistema de coordenadas elegido para la medición .
Derecha: muestra patrón utilizada para el ajuste de la fase.

el ajuste final de la fase del canal 2 girando P_2 hasta obtener en éste una indicación nula.

Una vez realizados los ajustes descriptos , se puede decir que al hacer rotar una muestra con magnetización desconocida $\vec{M}$, las indicaciones del canal 1 y canal 2 serán las proyecciones P y Q de este vector sobre los ejes real e imaginario respectivamente.

1.3.3 Medición de la magnetización

El sistema de coordenadas que en general se utiliza en paleomagnetismo para definir la magnetización remanente de muestras de rocas es el ilustrado en la Figura 22. Este sistema es el adoptado para el magnetómetro, es decir se determinarán los valores de:

$\vec{M}$ { M: Modulo
D': declinación respecto de la marca de orientación
I': inclinación respecto de la cara orientada

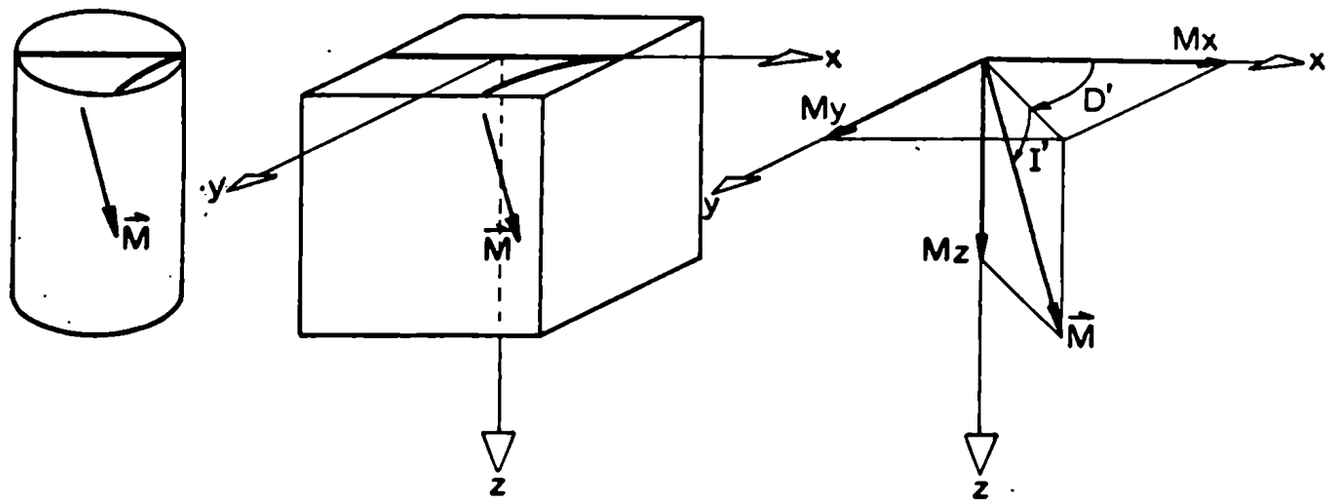


Figura 22. Especímenes con sus correspondientes marcas de orientación y sistema de coordenadas "muestra" respecto al cual se mide $\vec{M}$ en el magnetómetro U.B.A. 8 Hz

El principio de medición consiste en ubicar el espécimen en 6 posiciones diferentes en el portaespécimen, (Figura 23) y realizar correspondientemente las mediciones de P,Q (fórmula 1.28). Los valores así obtenidos podran eventualmente estar afectados por sendas constantes p,q, consecuencia de la magnetización remanente del portaespécimen adquirida por contaminación. De acuerdo con las 6 posiciones adoptadas por el espécimen se pueden establecer las siguientes relaciones entre los valores medidos P_i , Q_i, las proyecciones del vector M.R. $(\vec{M})$ y la contaminación p,q:

Posición 1: $P_1 = M_{x1} + p$
$Q_1 = M_{y1} + q$

$$\text{Posición 2:}\quad \begin{aligned} P_2 &= -M_{x2} + p \\ Q_2 &= -M_{y2} + q \end{aligned}$$

$$\text{Posición 3:}\quad \begin{aligned} P_3 &= M_{y3} + p \\ Q_3 &= M_{z1} + q \end{aligned}$$

$$\text{Posición 4:}\quad \begin{aligned} P_4 &= -M_{y4} + p \\ Q_4 &= -M_{z2} + q \end{aligned} \qquad (1.29)$$

$$\text{Posición 5:}\quad \begin{aligned} P_5 &= M_{z3} + p \\ Q_5 &= M_{x3} + q \end{aligned}$$

$$\text{Posición 6:}\quad \begin{aligned} P_6 &= -M_{z4} + p \\ Q_6 &= -M_{x4} + q \end{aligned}$$

El subíndice de P, Q representa la posición en la medición y el subíndice de las proyecciones de $\vec{M}$ representa la repetición en la medición. Los valores de p, q se calculan mediante la expresión :

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{6} P_i \\ q &= \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{6} Q_i \end{aligned} \qquad (1.30)$$

Conocidos los valores de p, q se calculan las proyecciones M_{xi}, M_{yi}, M_{zi} por simple despeje en las fórmulas (1.29). La magnetización remanente ($\vec{M}$) estará entonces exenta de errores experimentales sistématicos y quedará definida en forma redundante por cuatro vectores:

$$\vec{M}_i = \begin{Bmatrix} M_{xi} \\ M_{yi} \\ M_{zi} \end{Bmatrix} \quad ; \; M_i = \sqrt{M_{xi}^2 + M_{yi}^2 + M_{zi}^2} \qquad (i = 1 \ldots 4) \qquad (1.31)$$

Se puede suponer que la distribución de direcciones de estos vectores es una distribución de Fisher (1953). Para el cálculo de la dirección más probable será necesario conocer los cosenos directores de $\vec{M}_i$ es decir:

$$\ell_{xi} = \frac{M_{xi}}{M_i} \; ; \; \ell_{yi} = \frac{M_{yi}}{M_i} \; ; \; \ell_{zi} = \frac{M_{zi}}{M_i} \qquad (1.32)$$

El $\vec{R}$ de la distribución Fisheriana quedará definido por:

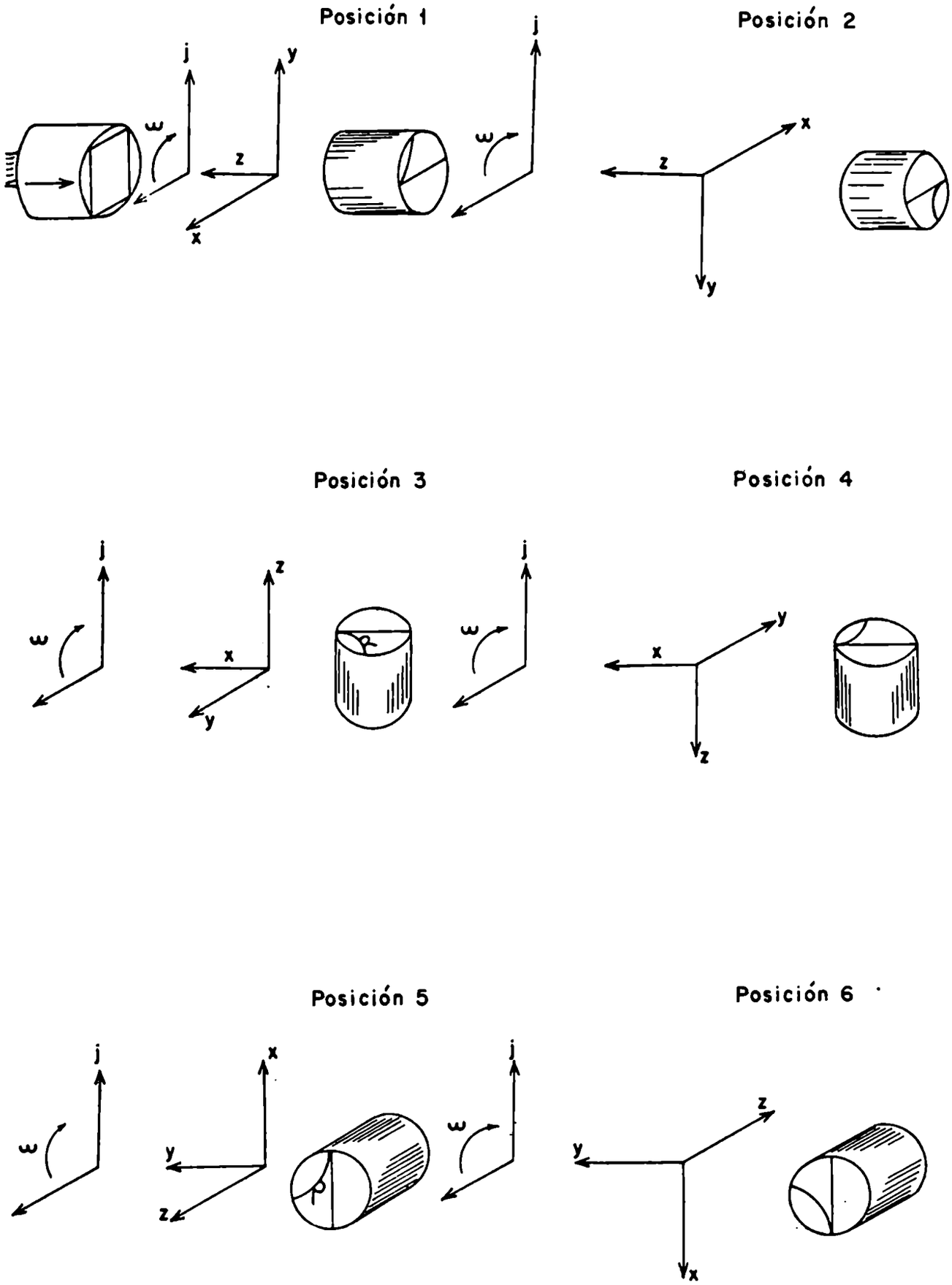


Figura 23. Posiciones en que debe colocarse el espécimen en el portaespécimen.

$$R_x = \sum_{i=1}^{4} \rho_{xi} \quad ; \quad R_y = \sum_{i=1}^{4} \rho_{yi} \quad ; \quad R_z = \sum_{i=1}^{4} \rho_{zi} \quad ; \quad R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2} \qquad (1.33)$$

La dirección más probable será entonces:

$$D' = \text{arctg} \frac{R_y}{R_x}$$

$$I' = \text{arcsen} \frac{R_z}{R} \qquad (1.34)$$

la que está determinada con una seguridad del 95% de que la dirección verdadera esté dentro del cono cuyo eje es la dirección media y su semiángulo vale

$$\alpha_{95} = \arccos \left[1 - \frac{N - R}{R} \left(20^{\frac{1}{N-1}} - 1\right)\right] \qquad (1.35)$$

cuando se cumpla:

$$\left[1 - \frac{N - R}{R} \left(20^{\frac{1}{N-1}} - 1\right)\right] < 0 \text{ será } \alpha_{95} > 90°$$

donde N es el número de vectores; cuando N = 4 se tiene:

$$\alpha_{95} = \arccos \frac{2{,}7114\, R - 6{,}8577}{R} \qquad (1.36)$$

Si $R < 2{,}53$ será $\alpha_{95} > 90°$

La precisión en la medición se define por :

$$k = \frac{N - 1}{N - R} \qquad (1.37)$$

Para el cálculo del modulo de $\vec{M}$ se puede utilizar la siguiente expresión:

$$M = \frac{1}{4} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{4} M_{xi}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{4} M_{yi}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{4} M_{zi}\right)^2} \qquad (1.38)$$

En el caso que la muestra a medir sea suficientemente fuerte ($M > 10^{-5}$ uem.cm^{-3}) no es necesario realizar la medición en las 6 posiciones indicadas; en ese caso es suficiente medir en las posiciones impares y despreciar los valores de p, q. Se obtendrán entonces, por aplicación de las (1.29) solo dos vectores $\vec{M}_i$ careciendo de sentido suponer una distribución de Fisher. Sin embargo, dado que cuando las muestras son fuertes los errores son pequeños , se puede utilizar el mismo algoritmo para el cálculo de D', I', M y α_{95} Se debe tener presente que α_{95} no tiene en este caso el sentido de un intervalo de confianza, pero pese a todo será útil para valorar la calidad de la medición, pués en el caso de cometerse errores groseros ($\vec{M}_1 . \vec{M}_2 / M_1 \cdot M_2 \leq 0.80$)

la expresión (1.35) indicará $\alpha_{95} > 90°$

1.3.4 Correcciones en la medición

Una de las exigencias que debe cumlirse para la recolección de material destinado a estudios paleomagnéticos es la de obtener muestras orientadas respecto al Norte y plano horizontal. Esto permite referir al sistema de coordenadas geográfico la dirección del M.R. ($\vec{M}$) medido de las mismas. En la Figura 24a puede observarse una muestra con su cara y flecha de orientación antes de ser retirada del afloramiento, como así también, los espécimenes que se cortarán de ella luego en el laboratorio. En el campo se miden los ángulos rumbos (r) y buzamientos (β) los que serán utilizados para realizar la transformación de coordenadas que permite definir $\vec{M}$ en el sistema de coordenadas geográficas mostrado en la Figura 24b.

El "Magnetómetro U.B.A. 8 Hz" mide $\vec{M}$ en el sistema muestra (M, D', I' en Figura 22), para realizar la transformación de coordenadas mencionada, comunmente llamada "corrección de campo", será necesario girar el sistema muestra alrededor de x un ángulo β medido en el sentido horario y luego girarlo alrededor del eje vertical un ángulo r medido también en sentido horario. De esta manera el vector $\vec{R}$ definido por la (1.33) en el sistema xyz quedará definido en el sistema de coordenadas geográfico mediante la transformación:

$$\vec{R}_G = \vec{\vec{r}}.\ \vec{\vec{\beta}}.\ \vec{R} \qquad (1.39)$$

Donde las matrices $\vec{\vec{\beta}}$ y $\vec{\vec{r}}$ representan las transformaciones por rotación alrededor de los ejes x y vertical respectivamente y se define por :

$$\vec{\vec{\beta}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & -\operatorname{sen}\beta \\ 0 & \operatorname{sen}\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \qquad (1.40)$$

$$\vec{\vec{r}} = \begin{pmatrix} \cos r & -\operatorname{sen} r & 0 \\ \operatorname{sen} r & \cos r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (1.41)$$

Finalmente la dirección de $\vec{M}$ quedará definida en el sistema de coordenadas geográficas por:

$$D = \operatorname{arctg} \frac{R_{Gy}}{R_{Gx}} \qquad I = \operatorname{arcsen} \frac{R_{Gz}}{R} \qquad (1.42)$$

Si se desea realizar el cálculo en forma trigonométrica se puede utilizar D' e I' definidos por (1.34) y las expresiones siguientes:

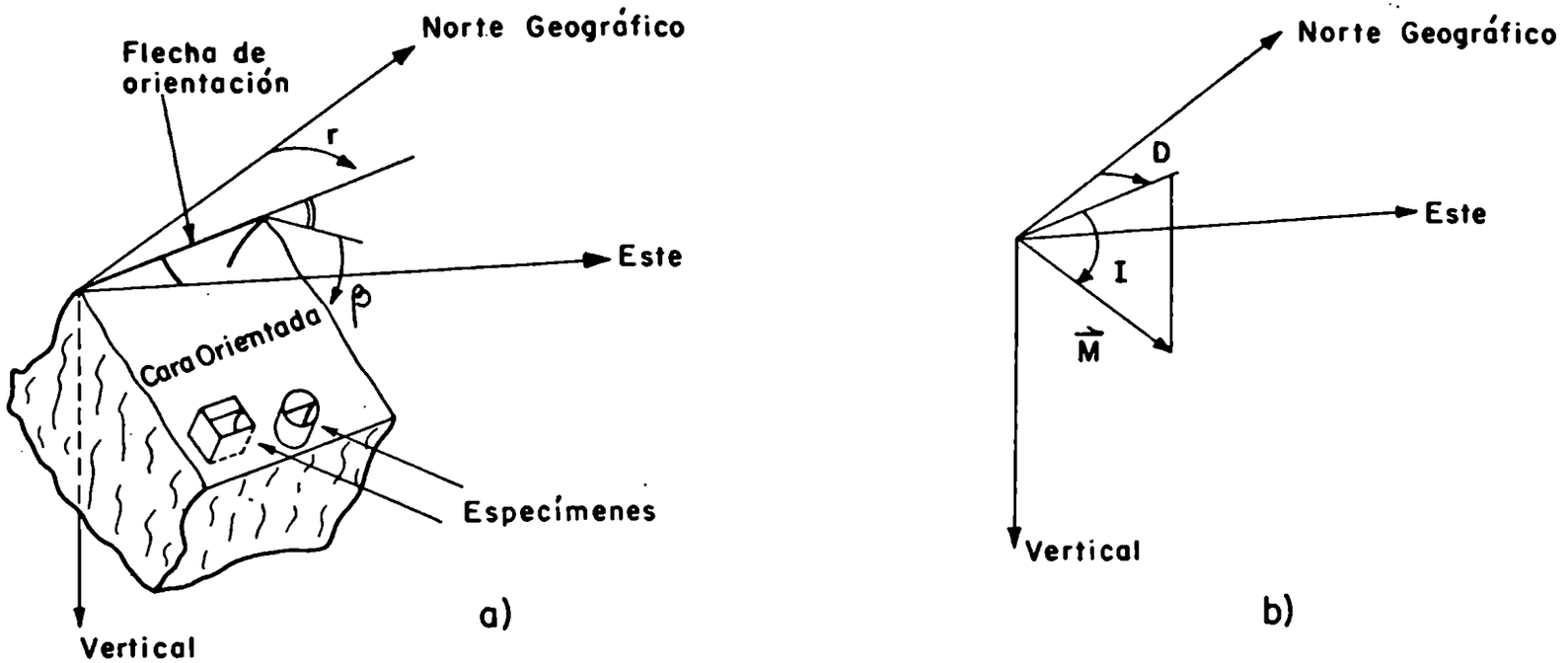


Figura 24. a) Muestra de roca orientada. r: rumbo de la flecha de orientación respecto del norte geográfico. β: buzamiento de la cara orientada respecto de la horizontal.
b) Sistema de coordenadas geográfico respecto del cual se mide la dirección del M.R. ($\vec{M}$).

$$I = \text{arc sen } (\text{sen } I' \cdot \cos \beta + \cos I' \cdot \text{sen } D' \cdot \text{sen } \beta)$$
$$D = r + \sigma \text{ arc cos } \frac{\cos D' \cdot \cos I'}{\cos I} \qquad (1.43)$$

en la que σ es el signo definido por la expresión:

$$\sigma = \text{signo } (\cos I' \cdot \text{sen } D' \cdot \cos \beta - \text{sen } I' \cdot \text{sen } \beta) \qquad (1.44)$$

Con frecuencia es necesario medir el M.R. de formaciones que han visto alterada la posición original, en la cual se originaron, por acción de fuerzas telúricas de distinto origen; se trata de formaciones que no afloran horizontales, es decir que el plano que primitivamente era horizontal (plano paleohorizontal ilustrado en la Figura 25), tiene un buzamiento dado por un rumbo (r_p) y una inclinación (β_p). En estos casos, para los fines específicos de los estudios paleomagnéticos es necesario conocer cual es el M.R. de dicha formación referido a la paleohorizontal. Para ello bastará con restituir a la formación (conjuntamente con $\vec{M}$) a su primitiva posición (corrección por estructura); para ello hay que rotar a la formación alrededor del

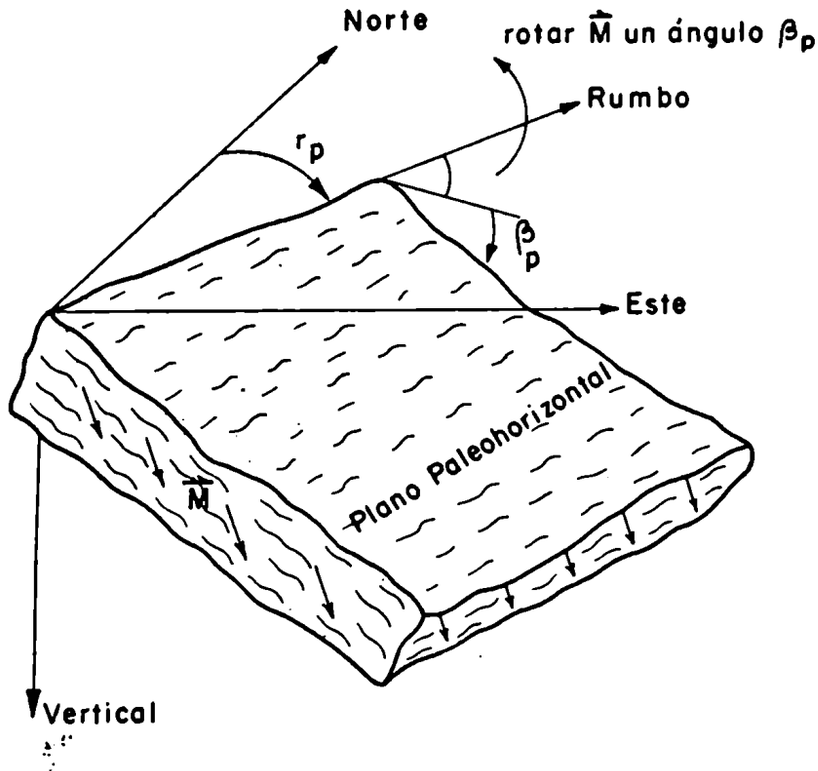


Figura 25. Plano paleohorizontal buzante con rumbo r_p e inclinación β_p.

eje del rumbo un ángulo β_p medido en el sentido horario o sea:

$$\vec{R}_p = \vec{P} \cdot \vec{R}_G \qquad (1.45)$$

Donde $\vec{R}_G$ está definido por la (1.39) y $\vec{\vec{p}}$ es la matriz de rotación que se expresa como la transformación de similaridad siguiente:

$$\vec{\vec{p}} = \vec{\vec{r}}_p^{-1} \cdot \vec{\vec{\beta}}_p \cdot \vec{\vec{r}}_p \qquad (1.46)$$

las matrices $\vec{\vec{r}}_p$ y $\vec{\vec{\beta}}_p$ estan definidas por :

$$\vec{\vec{r}}_p = \begin{pmatrix} \cos r_p & \operatorname{sen} r_p & 0 \\ -\operatorname{sen} r_p & \cos r_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad ; \quad \vec{\vec{\beta}}_p = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta_p & \operatorname{sen}\beta_p \\ 0 & -\operatorname{sen}\beta_p & \cos\beta_p \end{pmatrix} \qquad (1.47)$$

La dirección de $\vec{M}$ quedará entonces referida a la paleohorizontal mediante las siguientes expresiones:

$$D_p = \operatorname{arctg} \frac{R_{py}}{R_{px}}$$

$$I_p = \operatorname{arcsen} \frac{R_{pz}}{R} \qquad (1.48)$$

Si se desea evitar el producto matricial se puede partir de las (1.43) y utilizar las expresiones trigonométricas siguientes:

$$I_p = \operatorname{arc\,sen} \left[\operatorname{sen} I \cdot \cos\beta - \cos I \cdot \operatorname{sen} (D - r) \cdot \operatorname{sen}\beta \right]$$

$$D_p = r + \sigma \operatorname{arc\,cos} \frac{\cos (D - r) \cdot \cos I}{\cos I_p} \qquad (1.49)$$

en donde:

$$\sigma = \operatorname{signo} \left[\cos I \cdot \operatorname{sen} (D - r) \cdot \cos\beta + \operatorname{sen} I \cdot \operatorname{sen}\beta \right] \qquad (1.50)$$

1.3.5 Ruido y precisión

Se define como ruido ($\vec{M}_R$) al valor de magnetización indicado por el magnetómetro (fórmulas 1.34 y 1.38) cuando en el recinto de medición no hay espécimen; en éste caso es de esperar que se cumpla que $\alpha_{95} > 90°$ (fórmula 1.36).

De acuerdo a lo expuesto en los Items (1.2.4) y (1.2.8) se puede establecer que el ruido ($\vec{M}_R$) está relacionado con el tiempo de medición (t) por una relación del tipo:

$$M_R \cdot \sqrt{t} = \mathcal{E} \qquad (1.51)$$

donde $\mathcal{E}$ es una constante cuya magnitud depende del ruido blanco del magnetómetro a nucleo saturado, del tipo de filtro del D.S.F. , del volumen de la muestra y de la redundancia en la medición.

Para determinar el valor de $\mathcal{E}$ se realizarón 42 determinaciones de $\vec{M}_R$, seis para cada uno de los siguientes tiempos de integración (T): 0,3-1-3--10-30-100-300. Los valores de $\vec{M}_R$ obtenidos para los diferentes t (t=6T), suponiendo muestras cúbicas de 27 cm^3, están representados en escala bilogarítmica en la Figura 26 y las direcciones en la Figura 27. En 37 determinaciones de $\vec{M}_R$ se obtuvo : $\alpha_{95} > 90°$ y en cinco: $90° > \alpha_{95} > 70°$. Estos valores y el hecho de que las direcciones de $\vec{M}_R$ estan distribuidas sobre toda la esfera (Figura 27), confirma la ausencia de errores sistemáticos en las mediciones. El valor $\mathcal{E}$ se obtuvo aplicando el método de cuadrados mínimos a los M_R y t mostrandos en la Figura 26: $\log \mathcal{E} = -1,07 \pm 0.17$, es decir:

para muestras cúbicas de 27 cm^3 $\quad M_R = 0,085/\sqrt{t}$

(1.52)

para muestras cilíndricas de 2,54 cm de diámetro y altura h $\quad M_R = 0,46/h\sqrt{t}$

La aplicación de las expresiones (1,52) permite establecer a que ruido estará sujeta una medición que se realiza en el tiempo t. Por otra parte si se tiene en cuenta que el máximo T que permite el D.S.F. es de 300 s se obtiene que la sensibilidad máxima del magnetómetro es de $2x10^{-9}$ uem.cm^{-3}.

En la tarea de medición es importante predecir que parámetro de precisión k (Fisher,1953) tiene la población de direcciones a la que pertenece $\vec{M}$. Si $\vec{\mathcal{M}}$ es la verdadera dirección del M.R. y $\vec{M}$ es la magnetización medida en presencia de un ruido $\vec{M}_R$ será $\vec{M} = \vec{\mathcal{M}} + \vec{M}_R$. Sobre la base que $\vec{M}_R$ tiene una distribución uniforme de direcciones sobre toda la esfera (ver Figura 27), se puede utilizar el modelo de Irving (1964) para predecir el parámetro de precisión k de la población que pertenece $\vec{M}$ mediante la expresión aproximada;

$$k \simeq 3 \left(\frac{M}{M_R}\right)^2 \qquad (1.53)$$

Teniendo en cuenta (1.52) y despejando se tiene :

para muestra cúbica de 27 cm^3 : $\quad t = 2,4x10^{-3}\ k/M^2$

(1.54)

para muestras cilíndricas de 2,54 cm de diámetro y altura h (cm) : $\quad t = 7,1x10^{-2}\ k/(hM)^2$

Expresiones que permiten determinar el tiempo de medición necesario para cuantificar $\vec{M}$ con precisión k.

Sobre la base de las expresiones (1.54), (1.26) y (1.27) se confecciono un ábaco útil para muestras de cualquier volúmen, (representación en escala bilogarítmica, Figura 28). El mismo solo puede emplearse cuando la constante

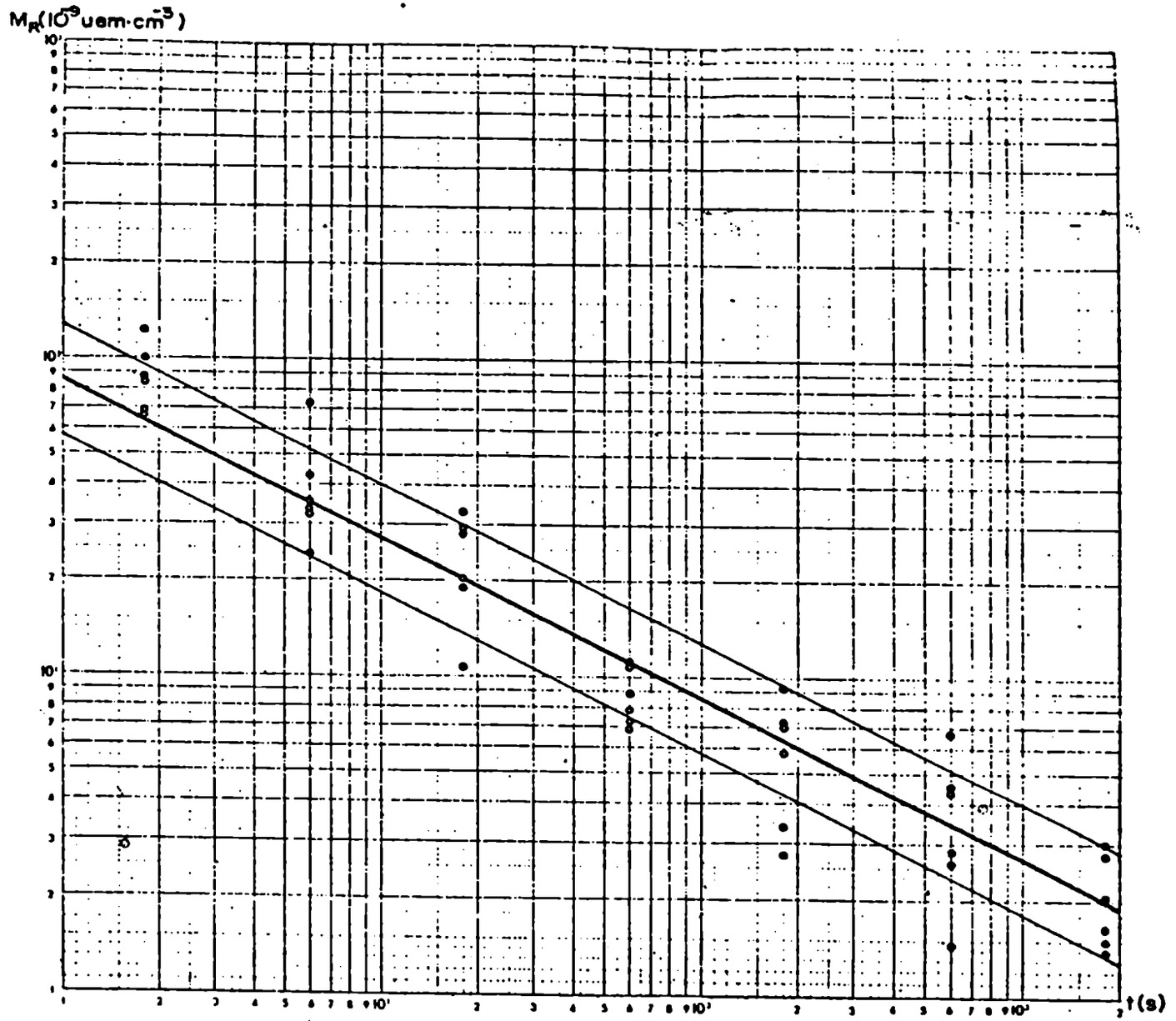


Figura 26. Valores de M_R en función de t (t=6T). La recta de trazo grueso se determinó por cuadrados mínimos; las de trazo fino muestran la desviación estandar de las mediciones de ruido.

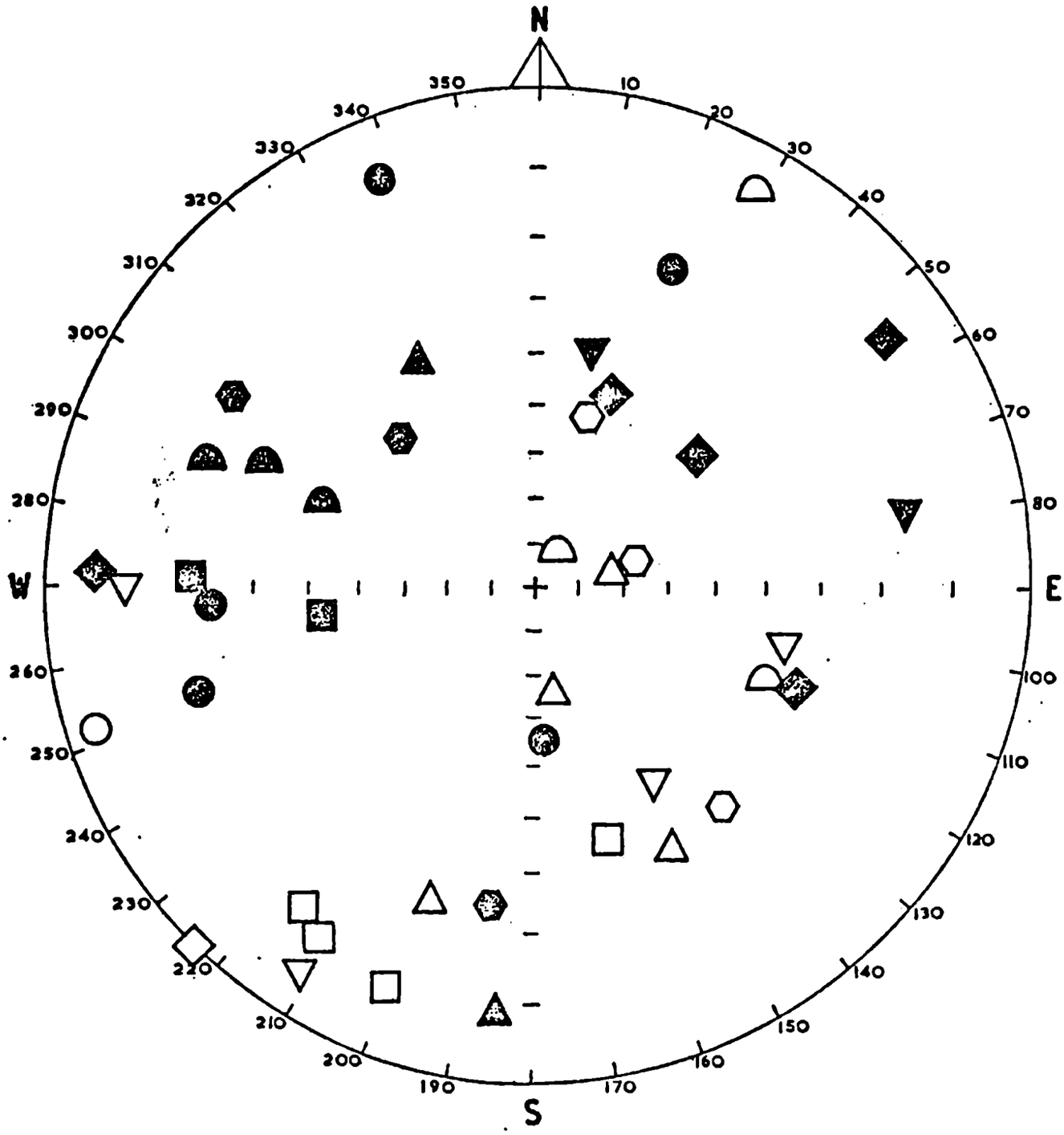


Figura 27. Direcciones de $\vec{M}_R$ para los siguientes valores de T: (○) 300 s, (□) 100 s, (△) 30 s, (▽) 10 s, (◇) 3 s, (○) 1 s, y (⌓) 0,3 s. Los símbolos negros significan $I>0$ y los abiertos $I<0$. (Sistema de representación: red estereográfica del Gulf).

de escala del magnetómetro Förster es de 10 σ/división (B=10). En la escala horizontal se representó el parametro de presición k y en las escalas verticales el número de divisiones δ indicado por el D.S.F.; el número dentro del círculo que se encuentra por encima de cada una de ellas corresponde a la posición de la llave S_1 del D.S.F. (a en las 1.20). Las rectas representan la relación que existe entre δ y k para los distintos tiempos de integración (T) indicados dentro de los rectángulos de cada una de ellas. Mediante la realización de una medición preliminar que permita establecer en forma grosera el valor δ , será posible utilizar este ábaco para determinar el tiempo de integración (T) que asegure una precisión (k) dada.

. Ejemplo de medición: El espécimen elegido es el M37-1, un cilíndro de 2,54 cm de diámetro y h= 2 cm; a la medición debe aplicarse una corrección de campo de : Rumbo=343°y Buzamiento=88° y una corrección de estructura de: Rumbo=80° y Buzamiento=25°, (Item 1.3.4).

Como primera aproximación se realizó la medición de $\vec{M}$ en las posiciones 1 y 3 con un T=3 s elegido en forma tentativa. Se obtuvieron los valores

Posición 1				Posición 3			
a	B	δ can.1	δ can.2	a	B	δ can.1	δ can.2
5	10	10	-5	5	10	-3	-6

Tabla 6. Medición preliminar de $\vec{M}$ con T=3 s.

indicados en la tabla 6, los que por aplicación de las expresiones (1.29) permiten estimar δ como:

$$\delta = \sqrt{P_1^2 + \left(\frac{Q_1 + P_3}{2}\right)^2 + Q_3} = \sqrt{10^2 + \left(\frac{-5 - 3}{2}\right)^2 + (-6)^2} = 12$$

Con este valor se entra en la escala vertical (5) del ábaco δ vs. k (Figura 28) y se obtiene, para T=3 s, un valor de k estimado en : $k < 300$. En las mediciones es normal exigir $k > 300$, por lo tanto el valor tentativo T =3 s es insuficiente. Si se elige el tiempo de integración que le sigue , es decir T=10 s, se obtiene del ábaco δ vs. k una estimación de k en: $k \simeq 900$. Como se consideró aceptable este valor, se realizó la medición del espécimen M37-1 con T=10 s; los valores obtenidos (Tabla 7) fueron procesados utilizando una computadora HP9830 mediante un programa especialmente preparado. Los resultador logrados son:

$$M = 0,484 \times 10^{-6} \text{ uem.cm}^{-3}$$

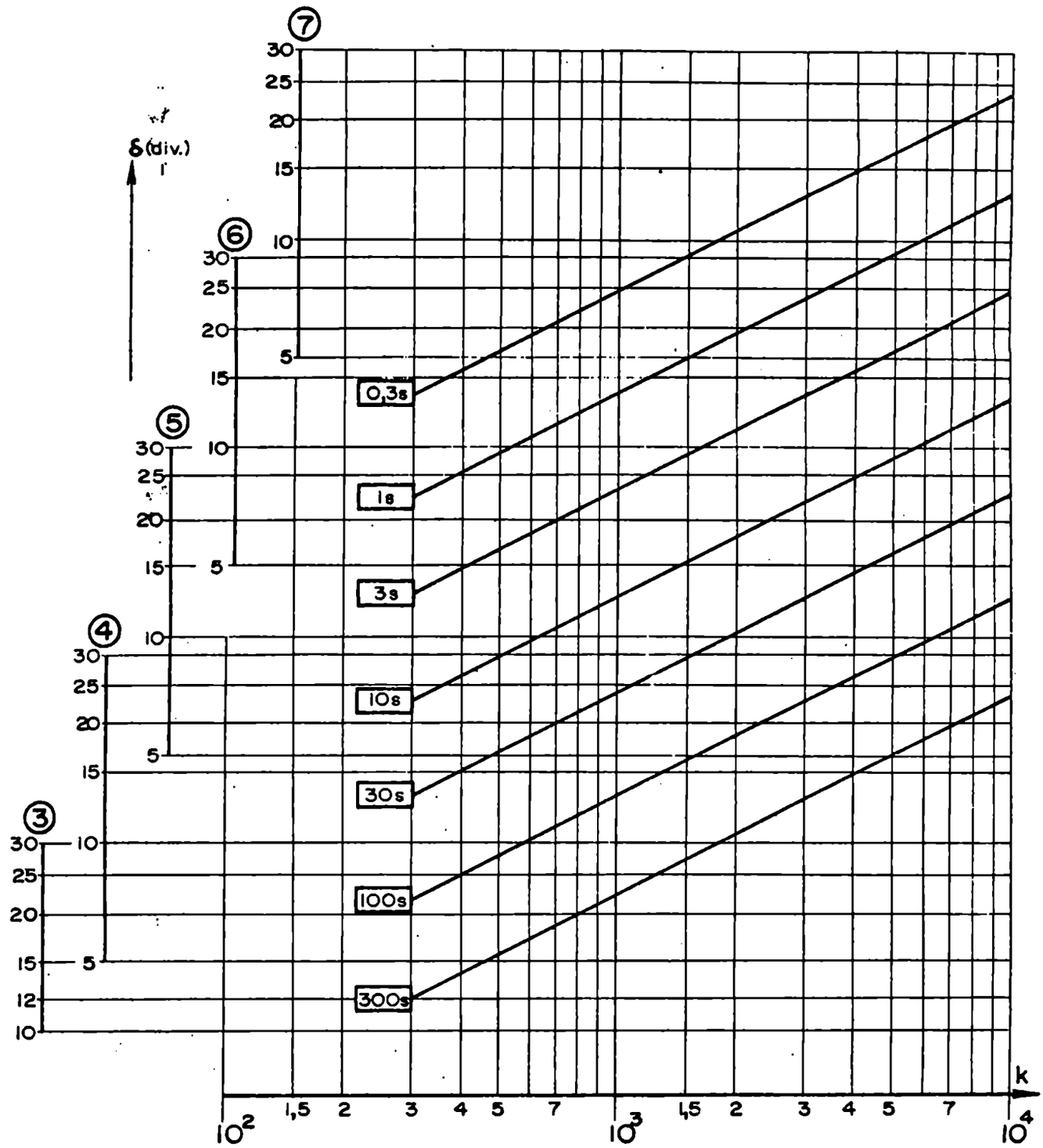


Figura 28. Abaco para muestras de cualquier vólumen que permite predecir la precisión k de la población Fisheriana de la cual proviene $\vec{M}$. Magnetómetro Förster en 10σ/div. (B=10). ⓐ posición de la llave S_1 del D.S.F.. T tiempo de integración del D.S.F. (llave S_2).

Direcciones { sistema muestra: D=355,6°; I=-24,7°
con corrección de campo: D=7,6°; I=-48°
con corrección por estructura: D=8,6°; I=19,0°

La consistencia interna de la medición es : $\alpha_{95} = 4,9°$.

Posición	a	B	δ can.1	δ can.2
1	5	10	10	- 1
2	5	10	-12	1
3	5	10	- 1	- 6
4	5	10	0	5
5	5	10	- 4	9
6	5	10	3	- 8.

Tabla 7. Valores obtenidos en la medición del espécimen M37-1 con un T= 10 s.

Con el objeto de efectuar una comprobación experimental del ábaco de la Figura 28, se realizaron 6 mediciones reiteradas del espécimen M37-1, obteniendose los valores que se resumen en la Tabla 8. Sobre la base de los

M (10^{-6} uem.cm^{-3})	Dirección de $\vec{M}$ referida a la paleohorizontal D(°)	I(°)	α_{95}(°)
0,484	8,6	19,0	4,5
0,453	8,3	14,4	5,6
0,423	9,2	19,9	6,4
0,429	10,4	18,1	15,0
0,462	8,0	16,0	8,4
0,440	6,3	18,9	10,0

Tabla 8. Módulos y direcciones de $\vec{M}$ del espécimen M37-1 obtenidas en 6 mediciones reiteradas para T=10 s (t=1').

mismos se calculó la dirección mas probable, el círculo del 95% de confianza (α_{95}), y el parámetro de precisión k (Fisher,1953); los valores obtenidos fueron: D=8,4°; I=17,7°; α_{95}=2°; k=1114. Como puede observarse éste valor del parámetro de precisión es coherente con el predicho por medio de la medición preliminar y el ábaco k vs. δ .

1.4. CONCLUSIONES

La capacidad de operación del magnetómetro construído se puede valorar por su bajo número de revoluciones por segundo (8 r.p.s.), su sensibilidad máxima ($2x10^{-9}$ uem.cm^{-3} para un tiempo de medición de 1800 s) y su rango de medición de 152 db (0,8 - $2x10^{-8}$ uem.cm^{-3}). Esto permite afirmar que el equipo construído cumple con las exigencias técnicas previstas en el proyecto.

Con el fin de valorar la calidad del "Magnetómetro U.B.A. 8 Hz" frente a otros equipos semejantes que actualmente se producen en serie se lo comparó con el "Balanced Fluxgate Rock Magnetometer", que opera como perisférico de una minicomputadora; este conjunto es fabricado por DIGICO Limited a un precio aproximado de U$S 25.000. Un elemento determinante para contrastar las cualidades de estos equipos es el factor ε definido por la expresión (1.51). Se determinó un ε=0,27 para el magnetómetro de la DIGICO. Sobre la base de éste valor y la expresión (1.52), se estableció la relación entre los tiempos de medición de ambos equipos para un ruido (M_R):

$$\frac{t_{Digico}}{t_{U.B.A.}} = \left(\frac{\varepsilon_{Digico}}{\varepsilon_{U.B.A.}} \right)^2 \simeq 10$$

Valor que indica que el magnetómetro U.B.A. 8 Hz es un orden de magnitud mas veloz que el DIGICO.

Para concluir es importante destacar que el mantenimiento del magnetómetro construído es fácil y económico dado su simplicidad y robustez. Esto permitió realizar más de 6000 determinaciones del M.R. de rocas durante el transcurso de 6 años con un costo de mantenimiento insignificante.

CAPITULO 2

VERIFICACION DE LAS CONDICIONES DE OPERACION DEL MAGNETOMETRO U.B.A. 8 Hz

2.1 INTRODUCCION

En el capítulo anterior se detallan las caulidades operativas previstas para el magnetómetro U.B.A. 8 Hz de acuerdo al plan trazado. Este magnetómetro está en operación desde junio de 1973 y desde entonces hasta el presente ha sido empleado por los distintos investigadores y becarios como así también alumnos de los Departamnetos de Física y Ciencias Geológicas de nuestra Facultad. Se estima que se han realizado un total aproximado de 6000 mediciones con rocas de distinto orígen de la Argentina, Brasil y Angola, cuyas edades van desde el Precámbrico tardío ($\simeq$ 1000 m.a.) hasta tiempos históricos y con intensidades del M.R. que van de 0,04 μ Gauss a 10^5 μ Gauss. El análisis de estas mediciones permite verificar si las condiciones operacionales del instrumento satisfacen las estipulaciones para su diseño.

En este capitulo se hará una suscinta descripción de las mediciones realizadas, la que no pretende ser exhaustiva, en orden cronológico de ejecución, clasificadas según el lugar en el cual se recolectaron las muestras para el estudio en cuestión. Cabe mencionar que estos estudios forman parte de programas de investigación propios del Laboratorio de Paleomagnétismo de la F.C.E. y N. de la U.B.A., en colaboración con otros institutos de investigación científica y/o aplicada de la Argentina y de Brasil.

2.2 MEDICIONES REALIZADAS

Resumidamente, la técnica de análisis a seguir en un estudio paleomagnético en la faz de gabinete consiste en medir el M.R. de las rocas tal como estas lo conservan en los afloramientos (magnetismo remanente natural, M.R.N.) y luego someter a las mismas a pruebas de estabilidad de su remanencia. Estas son de 3 tipos: i) desmagnetización por altas temperaturas (T), ii) desmagnetización por campos magnéticos alternos decrecientes (AC), y iii) ataque por ácido clorhídrico concentrado (Q). Estas pruebas se rea-

lizan en etapas crecientes de temperatura, magnitud de campo alterno o de horas de ataque químico. Antes y después de cada etapa de desmagnetización se procede a medir el M.R. residual de la muestra. Luego, se comprende que a lo largo de estos procesos, la intensidad del M.R. de las muestras sometidas a ensayo va disminuyendo; así es común que las muestras que presentan remanencia de menor estabilidad, reduzcan la intensidad de su magnetización a menos del 20% de la intensidad del M.R.N. luego de las primeras etapas de desmagnetización. Esta es una de las razones de la necesidad de emplear instrumentos de alta sensibilidad.

2.2.1 Pampa Palauco (S.O. de Mendoza)

Se estudiaron cinco muestras de una corona sacatestigo proveniente de un pozo de exploración de Yacimientos Petrolíferos Fiscales (Y.P.F.) ubicado en las proximidades de Malargüe, Provincia de Mendoza. Se trata de una sedimentita asignada al Liásico-Doggérico. Las muestras fueron sometidas a desmagnetización por medio de CA y T. La intensidad del M.R.N. osciló entre 1 μGauss y 3 μGauss (tiempo de medición de una posición t=18", item 1.3.5.); la intensidad del M.R. residual mínimo luego del proceso de lavado fue de 0,08 μGauss (t=30'). En la Tabla 9 en las primeras 8 columnas están sintetizados los datos mencionados.

2.2.2 Pirgua (Salta)

Se estudiaron 85 muestras provenientes del Subgrupo Pirgua aflorantes en la Provincia de Salta. Se trata de rocas efusivas y sedimentarias de edad Cretácica; las mismas fueron sometidas a desmagnetización por medio de AC y T. La intensidad del M.R.N. de las rocas igneas osciló entre 10^4 μGauss y $5x10^4$ μGauss, (t=1,8") y de las sedimentarias entre 8 μGauss y 30 μGauss, (t=6"). La intensidad del M.R. residual mínimo de las rocas igneas después de lavado fué de 10^3 μGauss, (t=1,8") y el de las sedimentarias de 0,2 μGauss, (t=10').

2.2.3 Amaná - Talampaya y La Colina (La Rioja)

Se estudiaron 182 muestras provenientes de las Formaciones La Colina y Amaná - Tampalaya aflorantes en Paganzo. Se trata de areniscas rojas de edad Pérmica temprana a media y Permotriásica respectivamente. Estas muestra fueron sometidas a desmagnetización T. La intensidad del M.R.N. por lo general estuvo comprendida entre5 μGauss y 50 μGauss, (t=6"). La intensidad del M.R.

Formación, Localidad	Ubicación	Edad	K-Ar	Numero de muestras	Numero aprox. de mediciones	Tratamiento	M.R.N. (μG)	M_{min} (μG)	M.R. estable D (°)	I (°)	N	k	α_{95} (°)	Polo paleomagnético lat. (°)	long. (°)	N	k	$d\varphi$ (°)	$d\lambda$ (°)	α_{95} (°)	polo	Referencias
Pampa Palauco	Argentina	J		5	30	AC;T	1-3	0,08	-	-65	5	53	10	-	-	-	-	-	-	-	-	Vilas et al, 1975
Paqua	Argentina	K	114-77	85	250	AC;T	10^{-5}-5×10^{-4} 8-130	10^{-5} 0,2	5	-46	14	27	8	85°S	222	14	222	7	10	-	SAK_{pa}	Valencio et al, 1977a
Amand-Talampaya, Paganzo	Argentina	P/Tr		50	300	T	5-50	0,3	155	67	43	4	12	75°S	285	12	12	-	-	13	$SAPTr_{a}$	Valencio et al, 1977b
La Colina, Paganzo	Argentina	Pl-m	>263	132	790	T	5-50	0,3	189	59	129	15	3	78°S	249	120	15	-	-	3	SAP_{r}	Valencio et al, 1977b
Serra Cassanje	Angola	Pu/Trl		27	270	T	30-130	8	325	-41	25	21	6	54°S	77	25	16	-	-	7	$AfPTr_{i}$	Valencio et al, 1978
Amana-Talampaya, Las Melizas	Argentina	P/Tr		33	260	T;Q	5-50	0,2	176	5	30	2	21	63°S	96	14	14	-	-	11	-	Sinito et al, 1979
La Colina, Las Melizas	Argentina	Cu	295	68	540	T;Q	5-50	0,2	116	65	68	6	8	49°S	343	57	16	-	-	5	SAC_{a}	Sinito et al, 1979
Alcaparrosa	Argentina	Ou	416	75	750	AC	1-100	0,04	136	35	9	6	22	56°S	33	8	12	-	-	16	$SAOu_{i}$	Vilas y Valencio, 1978
De la Cuesta	Argentina	Pu		417	1700	T;Q	1-3	0,4	-	-	-	-	-	83°S	114	33	11	-	-	8	SAP_{co}	Tetzlaff, 1978
La Capa, inferior	Argentina	Trl					10-30	1	-	-	-	-	-	44°S	196	25	19	-	-	7	$SATr_{ia}$	Selles Martinez, 1979
La Capa, superior	Argentina	Trl					10-30	1	-	-	-	-	-	47°S	192	31	20	-	-	5	$SATr_{sa}$	Selles Martinez, 1979
Del Crestón	Argentina	Tr?					10-30	1	-	-	-	-	-	52°S	189	58	20	-	-	4	$SATr_{cr}$	Gleizer, 1979
Complejo Igneo Andino	Antártida Argentina	K	94-102	22	130	AC	5×10^{-6}-10^{-4}	10^{-5}	0	-73	5	199	5	86°S	117	5	77	-	-	9	AnK_{a}	Valencio et al, 1979a
Bambuí	Brasil	Pr€	886	57	470	T	0,4-3	0,05	-	-	-	-	-	65°N	336	102	13	-	-	4	$SAPr€_{i}$	Vilas y Pocco, 1979
Sedimentos Cenozoicos	Plataforma Malvinas	Qp-Tp		86	510	AC	0,5-5	0,06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Vilas y Nuñez, 1979
Sur	Argentina	Ol	>416	53	470	AC;T	5-80	2	-	-	-	-	-	6°S	9	30	21	-	-	6	SAO_{i}	Valencio et al, 1979b
Ñuñorco y La Ojota	Argentina		416-435	33	300	AC	4-40	0,2	-	-	-	-	-	30°S	337	4	41	-	-	14	-	Valencio et al, 1979b
Ñuñorco y La Ojota	Argentina		416-435						-	-	-	-	-	36°N	316	2	227	-	-	17	-	Valencio et al, 1979b
La Tinta	Argentina	Pr€	709	77	620	T;Q	1-3	0,1	-	-	-	-	-	79°S	301	53	17	-	-	5	$SAPr€_{ca}$	Valencio et al, 1979c

Tabla 9: Estudios paleomagnéticos realizados y resulatdos obtenidos con el magnetómetro U.B.A. 8 Hz ordenados según el momento de su ejecución.

residual mínimo después de lavado fué de 0,3 μGauss,(t=10').

2.2.4 Serie Cassange(Angola)

Se estudiaron 27 muestras de sedimentos rojos aflorantes en el centro norte y en el noroeste de Angola pertenecinetes a la Serie Cassange asignada al Permotriásico. Las mismas fueron sometidas a desmagnetización T. La intensidad del M.R.N. osciló entre 30 μGauss y 130 μGauss (t=1,8''). La intensidad del M.R. residual mínimo después del lavado fué de 8 μGauss,(t=6'').

2.2.5 Amaná - Tampalaya y La Colina en Mina Las Mellizas (La Rioja)

Se estudiaron 101 muestras de sedimentos rojos provenientes de las Formaciones La Colina y Amaná - Tampalaya asignadas al Carbónico tardío y al Pérmico respectivamente, aflorantes en las inmediaciones de La Mina Las Mellizas. Las muestras fueron sometidas a desmagnetización T y Q. La intensidad del M.R.N. osciló entre5μGauss y 50 μGauss, (t=6''). La intensidad del M.R. residual mínimo después del lavado fué de 0,2 μGauss, (t=10').

2.2.6 Alcaparrosa (San Juan)

Se estudiaron 75 muestras de rocas extrusivas pertenecientes a la Formación Alcaparrosa, asignadas al Ordovícico Superior, aflorante en las proximidades de Calingasta, (Provincia de San Juan). Estas muestras fueron sometidas a desmagnetización AC. La intensidad del M.R.N. varió de 1 μGauss a 100 μGauss, (t=18'' a 1,8''). La intensidad del M.R. residual mínimo después del lavado fué de 0,04 μGauss, (t=30').

2.2.7 De La Cuesta, La Coipa y Del Cretón (Catamarca)

Se estudiaron 410 muestra de sedimentos rojos aflorantes en la quebrada del Río Colorado (Provincia de Catamarca). Las muestras provienen de las Formaciones De La Cuesta, La Coipa y Del Crestón, asignadas al Pérmico tardío, Triásico temprano y Triásico con dudas respectivamente. Las muestras fueron sometidas a desmagnetización T y Q. La intensidad del M.R.N. osciló entre 1 μGauss y 3 μGauss, (t=18'') para la Formación De La Cuesta y entre 10 μGauss y 30 μGauss, (t=6'') para las dos restantes. La intensidad del M.R. residual mínimo después del lavado fué de 0,4 μGauss,(t=10') para la Formación De La Cuesta y de 1 μGauss (t=18'') para las dos restantes.

2.2.8 Complejo Igneo Andino (Antártida Argentina)

Se estudiaron 22 muestras de rocas igneas aflorantes en Cabo Primavera (Península Antártica), las mismas pertenecen al Complejo Igneo Andino cuya edad geocronológica fué determinada por el método K-Ar en 94 m.a./102 m.a. (Cretácico tardío). Las muestras fueron sometidas a desmagnetización AC. La intensidad del M.R.N. por lo general estuvo comprendida entre $5x10^4$ μGauss y 10^5 μGauss, (t=1,8''). La intensidad del M.R. residual mínimo después del lavado fué de 10^3 μGauss, (t=1,8'').

2.2.9 Babui (Brasil)

Se estudiaron 57 muestras de sedimentos rojos aflorantes en el Estado de Bahía, Brasil. Los sedimentos estudiados pertenecen al Grupo Bambui asignado al Precámbrico tardío (886 ± 11 m.a.). Las muestras fueron sometidas a desmagnetización T. La intensidad del M.R.N. osciló entre 0,4 μGauss y 3 μGauss (t=10' y t=18''). La intensidad del M.R. residual mínimo después del lavado fué de 0,05 μGauss, (t=30').

2.2.10 Sedimentos Cenozoicos (Plataforma Malvinas)

Se estudiaron 86 muestras de un testigo extraído por el buque Islas Orcadas (Armada de la República Argentina) en la Plataforma Malvinas, Océano Atlántico Sur. Se trata de sedimentos marinos muy poco consolidados asignados al Plioceno y Pleistoceno. Las muestras fueron sometidas a desmagnetización por medio de AC. La intensidad del M.R.N. osciló entre 0,5 μGauss y 5 μGauss, (t=3' y t=6''). La intensidad del M.R. residual mínimo después del lavado fué de 0,06 μGauss, (t=30').

2.2.11 Suri (Catamarca)

Se estudiaron 53 muestras de lavas y tobas aflorantes en las proximidades del Puesto Chaschuil, Provincia de Catamarca, las mismas pertenecen a la Formación Suri asignada al Ordovícico inferior. Estas muestras fueron sometidas a desmagnetización por medio de AC y T. La intensidad del M.R.N. osciló entre 5 μGauss y 80 μGauss, (t=6'' y t=1,8''). La intensidad del M.R. residual mínimo después del lavado fué de 0,4 μGauss, (t=10').

2.2.12 Nuñorco y La Ojota (Catamarca)

Se estudiaron 33 muestras de rocas igneas aflorantes en las proximida-

des del Puesto Chaschuil, Provincia de Catamarca , pertenecientes a las Formaciones Ñuñorco y La Ojota. La edad radimétrica que se le asigna es dudosa quedando comprendida en el lapso 416 m.a. / 430 m.a., valores obtenidos por el método Ar-K. Estas muestras fueron sometidas a desmagnetización por medio de AC. La intensidad del M.R.N. osciló entre 4 μGauss y 40 μGauss,(t=6'' y t=1,8''). La intensidad del M.R. residual mínimo después del lavado fué de 0,2 μGauss,(t=10').

2.2.13 La Tinta (Buenos Aires)

Se estudiaron 77 muestras de rocas sedimentarias recolectadas en canteras y afloramientos próximos a Olavarria y Barker,(Provincia de Buenos Aires). Las mismas pertenecen a la Formación La Tinta asignada al Precámbrico tardío, (709 m.a.).Estas muestras fueron sometidas a desmagnetización por medio de T y Q.La intensidad del M.R.N. estuvo por lo general comprendida entre 1 μGauss y 3 μGauss,(t=18''). La intensidad del M.R. residual mínimo después del lavado fué de 0,1 μGauss,(t=30').

2.3 CONCLUSIONES

Las cualidades operativas observadas en el magnetómetro U.B.A. 8 Hz durante las tareas de medición del M.R. de más de 6000 muestras permitieron extraer las siguientes conclusiones:i) se pudo medir el M.R.N. y el M.R. residual después del lavado, sin ninguna dificultad operativa, de muestras extremadamente friables como son los fangos marinos recientes(2.2.10); ii) fué posible medir muestras cuya intensidad de M.R. cubre un amplio rango: desde intensidades del orden de los 0,04 μGauss (2.2.6) a los 10^5 μGauss (2.2.8),empleando tiempos de medición razonables, acordes con la labor de gabinete y iii) la determinación del M.R. de muestras friables magnéticamente fuertes, no produce contaminación en el equipo, pudiéndose en aquellos casos que la programación de las tareas así lo exijan, medir en forma alternada muestras friables magnéticamente fuertes y debiles. En síntesis, el uso cotidiano ha demostrado que el instrumento construído satisface holgadamente las exigencias impuestas en el item 1.2 para su diseño.

Además, es de mencionar aquí, que la operación del magnetómetro es la adecuada para los fines propuestos: su utilización en tareas de gabinete diarias por el personal de distinto nivel de educación.

Las bondades constructivas del instrumento han quedado reflejadas por la experiencia recogida durante los seis años de su uso continuo: mínimo

mantenimiento, y pocas horas fuera de servicio por reparaciones. El inconveniente más frecuente es la rotura de la correa de transmición de movimiento al eje de rotación en el que va montado el portamuestras. Además, la experiencia ha indicado que el magnetómetro no ha sufrido la acción corrosiva de los vapores residuales de ácido clorhidrico presente en los poros de aquellas muestras que fueron sometidas a tratamiento químico, lo que constituye otra característica favorable.

CAPITULO 3

APORTES AL CONOCIMIENTO DE LA EVOLUCION DEL SUPERCONTINENTE GONDWANA

3.1 INTRODUCCION

En el capítulo anterior se han mencionado los estudios realizados en el Laboratorio de Paleomagnetismo de la U.B.A. empleando el magnetómetro cuyo diseño y construcción se detalla en el Capítulo 1. El autor ha participado en la programación, ejecución y/o interpretación de los mismos, los que han sido publicados o presentados en congresos según se detalla en la tabla 9.

Los estudios mencionados son parte integrante de programas de investigación más generales que abarcan temas tales como la evolución del Supercontinente Gondwana, el origen del Océano Atlántico Sur, la correlación de rocas de edad Paleozoica temprana y tardía, la evolución magmática de los Andes y la variación paleosecular del campo magnético terrestre en tiempos históricos y recientes. En este capítulo solo se hará, por razones de extensión, una revisión del estado actual del conocimiento en el tema: la evolución del Supercontinente Gondwana; se tratará particularmente de dar énfasis a los progresos alcanzados en el conocimiento merced a los resultados obtenidos en los estudios ya mencionados.

3.2 LA EVOLUCION DEL SUPERCONTINENTE GONDWANA

Los datos geológicos, morfológicos, paleontológicos, paleobotánicos, paleomagnéticos, geocronológicos y oceanográficos disponibles hacia el año 1974, coincidían en indicar la existencia de un gran supercontinente, llamado Gondwana, integrado por América del Sur, Africa, Madagascar, India, Australia y Antártida (Figura 29), en los períodos Carbónico y Pérmico (aproximadamente de 320 a 260 m.a.). Dos temas de estudio referente a este Supercontinente preocupaban a los estudiosos en las Ciencias de la Tierra en aquel entonces: I) la configuración del Supercontinente en tiempos anteriores al Carbónico (Precámbrico y Paleozoico temprano, $\simeq$ 1000-400 m.a.) y II)

la definición de la cronología de los episodios que dieron origen a los Océanos Atlántico e Indico con posterioridad al Pérmico (eras Mesozoica y Cenozoica).

Particularmente, el estudio paleomagnético de rocas de América del Sur asignadas al Precámbrico y al Paleozoico temprano era considerado necesario para poder definir la configuración del Gondwana en tales eras. El estudio paleomagnético de formaciones de América del Sur de edades Mesozoicas y Cenozoicas era imprescindible para definir la cronología de la formación de los Océanos Australes.

El aporte de los estudios paleomagnéticos realizados en el Laboratorio de Paleomagnetismo de la U.B.A. en relación a estos dos aspectos serán tratados aquí a continuación en forma separada para su mejor comprensión.

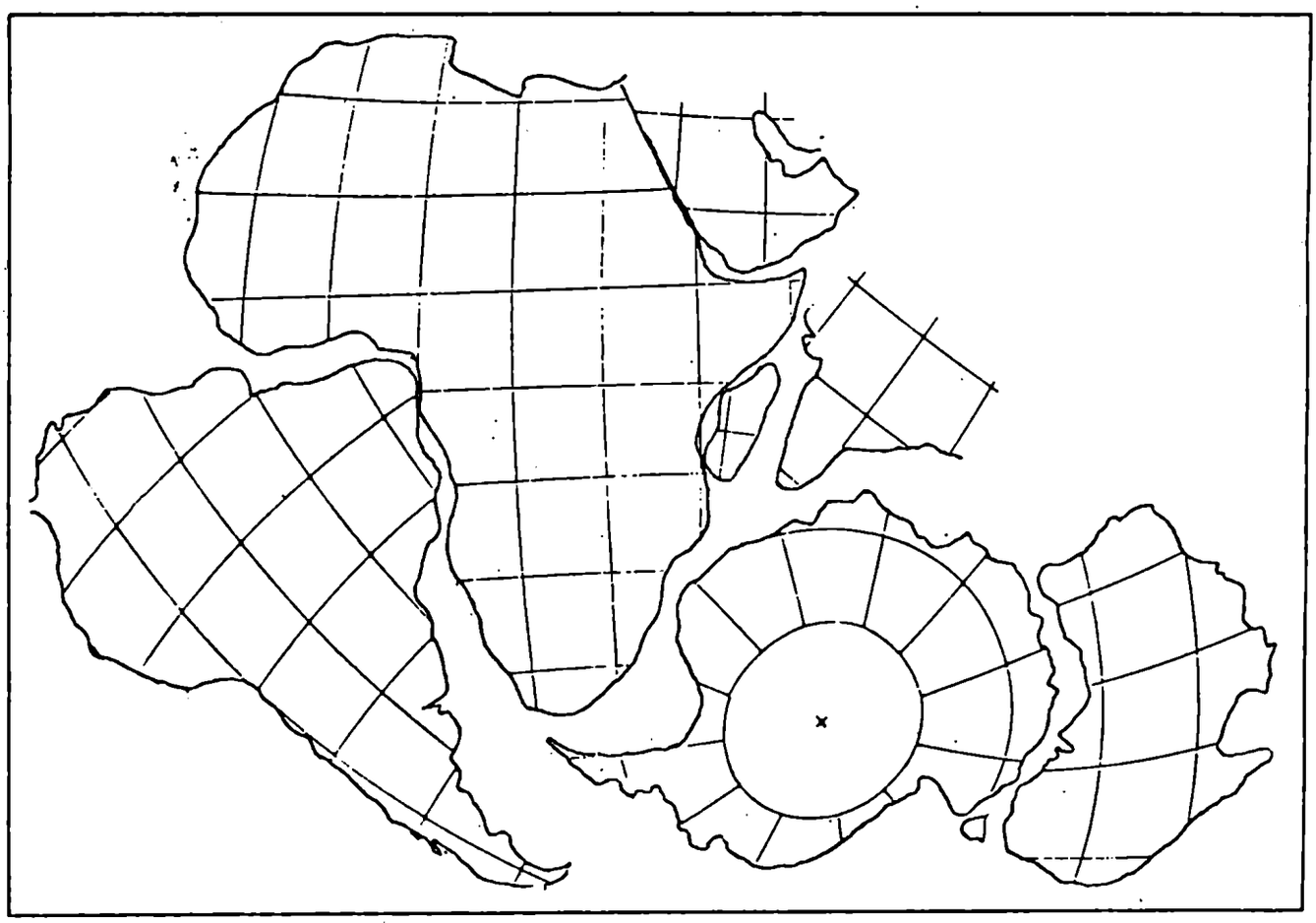


Figura 29. Reconstrucción del Supercontinente Gondwana según Vilas (1976) y Vilas y Valencio (1977). Proyección de igual area.

3.2.1 El supercontinente Godwana en el Precámbrico y Paleozoico temprano

Hacia el año 1974 se disponía de datos paleomagnéticos de rocas de

edad Precámbrica y Paleozoica temprana de Australia y Africa, y en menor cantidad de la India, que permitían esbozar la hipótesis de trabajo de que el Gondwana existía en dichas eras. Sin embargo los datos paleomagnéticos de América del Sur eran insuficientes como para definir la posición de este continente con relación al resto de los continentes Gondwánicos en tales eras. En la Figura 30 se muestran las posiciones de los polos paleomagnéticos de América del Sur de edad Precámbrica y Paleozoica temprana disponibles hasta esa fecha, clasificados de acuerdo a su confiabilidad según Vilas y Valencio, 1978 a. En la misma figura está representada la curva de desplazamiento polar aparente (aquella que define el movimiento relativo de un bloque litosférico con respecto al polo geográfico) para el Supercontinente Gondwana desde el Precámbrico tardío (aproximadamente 1000 m.a.)hasta el Ordovícico tardío (aproximadamente 450 m.a.). Puede observarse, que los datos disponibles no eran suficientes como para poder aceptar que América del Sur había formado parte del supercontinente y por lo tanto, haber tenido igual movimiento con respecto al polo durante tales períodos. Para resolver éste problema se programaron y realizaron estudios paleomagnéticos en rocas de formaciones sudamericanas de edad Precámbrica tardía y Paleozoica temprana. Fruto de ésta labor son los resultados obtenidos en : Grupo Bambui (polo $SAP_r\mathcal{E}_1$, Precámbrico tardío, Brasil), Formación La Tinta (polo $SAP_r\mathcal{E}_2$, Precámbrico tardío, Argentina), Formación Suri(polo $SA01_1$, Ordovícico temprano, Argentina) y Formación Alcaparrosa (polo $SA0u_1$, Ordovícico tardío, Argentina) mencionados en el Capítulo 2 (Tabla 9). En la Figura 31 se muestra la posición relativa de estos polos con respecto a América del Sur. Obsérvese, que la posición de los polos paleomagnéticos mencionados se ubican sobre la curva de desplazamiento polar aparente Precámbrica tardía-Paleozoica temprana del Gondwana, sugiriendo que América del Sur formó parte de éste supercontinente durante ese lapso.

La figura 32 muestra los polos paleomagnéticos de los distintos continentes godwánicos con edades comprendidas entre 1000 m.a. y 450 m.a. aproximadamente (clasificados según Vilas y Valencio, 1978 a) dibujados sobre la reconstrucción de la Figura 30. Un análisis de ésta figura permite observar que las posiciones polares aquí representadas están razonablemente bien ordenadas en forma cronológica y distribuidas según una banda de unos 15°de ancho, la que define el desplazamiento polar aparente del supercontinente. Tales evidencias son coherentes con la existencia, hacia fines del Precámbrico y comienzo del Paleozoico, de un Gondwana de igual morfología que en el Paleozoico tardío (Mc Elhinny y Embleton , 1976; Vilas y Valencio, 1978 a). Sin embargo es de hacer notar que,dado el ancho propio de la banda de desplazamiento polar aparente, dichas evidencias no excluyen la posibilidad de movimientos menores, intercontinentales o intracratónicos, que hayan origi-

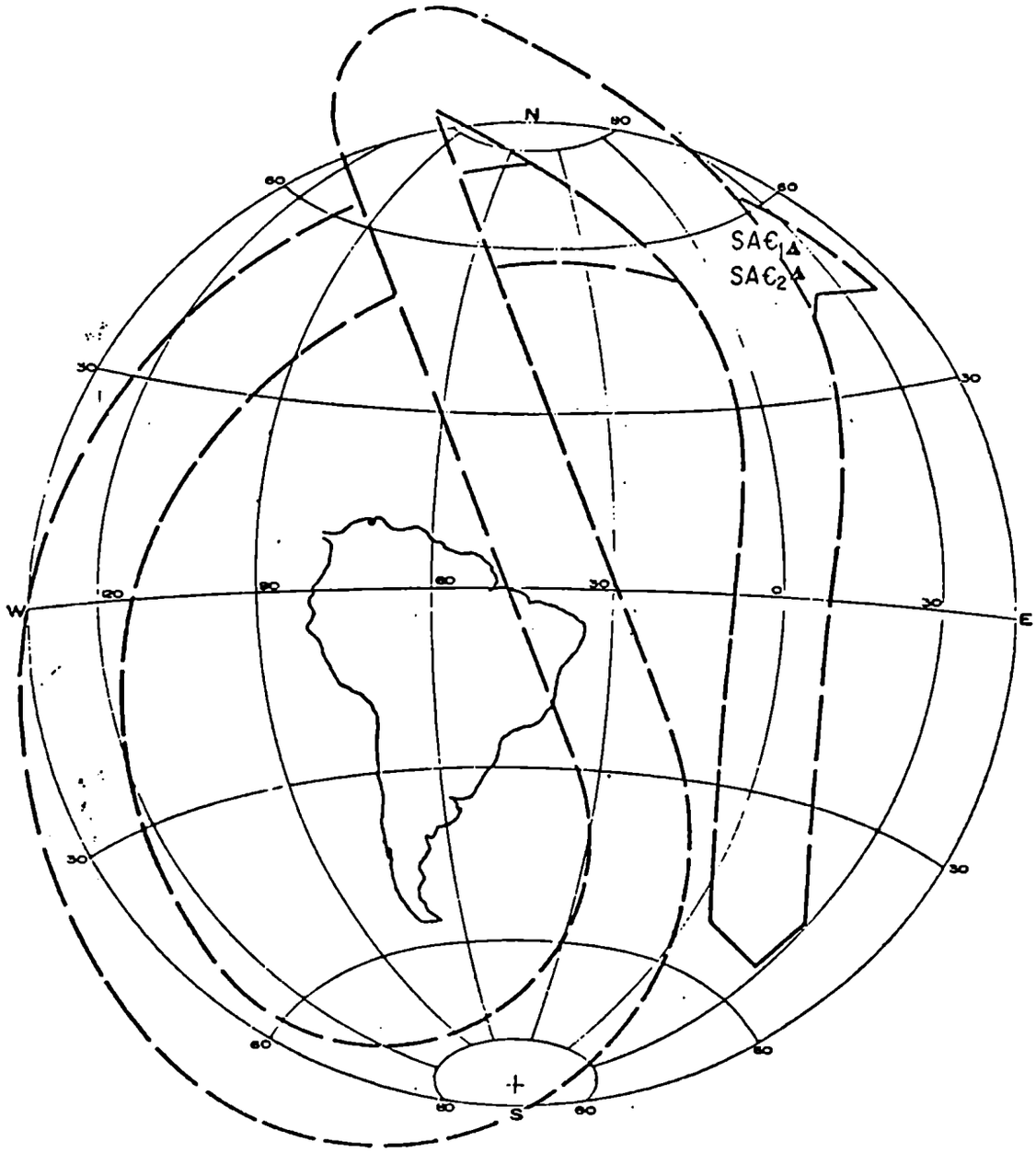


Figura 30. Polos paleomagnéticos de América del Sur de edad Precámbrica y Paleozoica temprana publicados hasta 1974 y curva de desplazamiento polar aparente del Gondwana. Proyección de igual area.

nado la formación y/o destrucción de mares menores. Es decir no excluyen, para los continentes gondwánicos, la posibilidad que los cordones orogénicos eopaleozoicos presentes entre ciertos cratones se hayan formado por la destrucción de océanos primitivos, pero le impone la restricción que si tal es el caso, los mismos debieron ser mares intracratónicos de tamaño menor.

La Figura 32 muestra el rápido desplazamiento con relación al polo que el Gondwana tuvo hacia fines del Precámbrico y en tiempos eopaleozoicos; particularmente obsérvese que Africa pasó por encima del polo en sentidos opuestos, hacia fines del Precámbrico y en el Ordovícico, lo cual explicaría los numerosos afloramientos de rocas de origen glaciario de edad Precámbrica tardía y Ordovícica tardía presentes en ese continente. Estas manifestaciones permiten además, sustentar la hipótesis de que, en el lapso considerado el campo magnético terrestre fué en promedio para lapsos mayores que

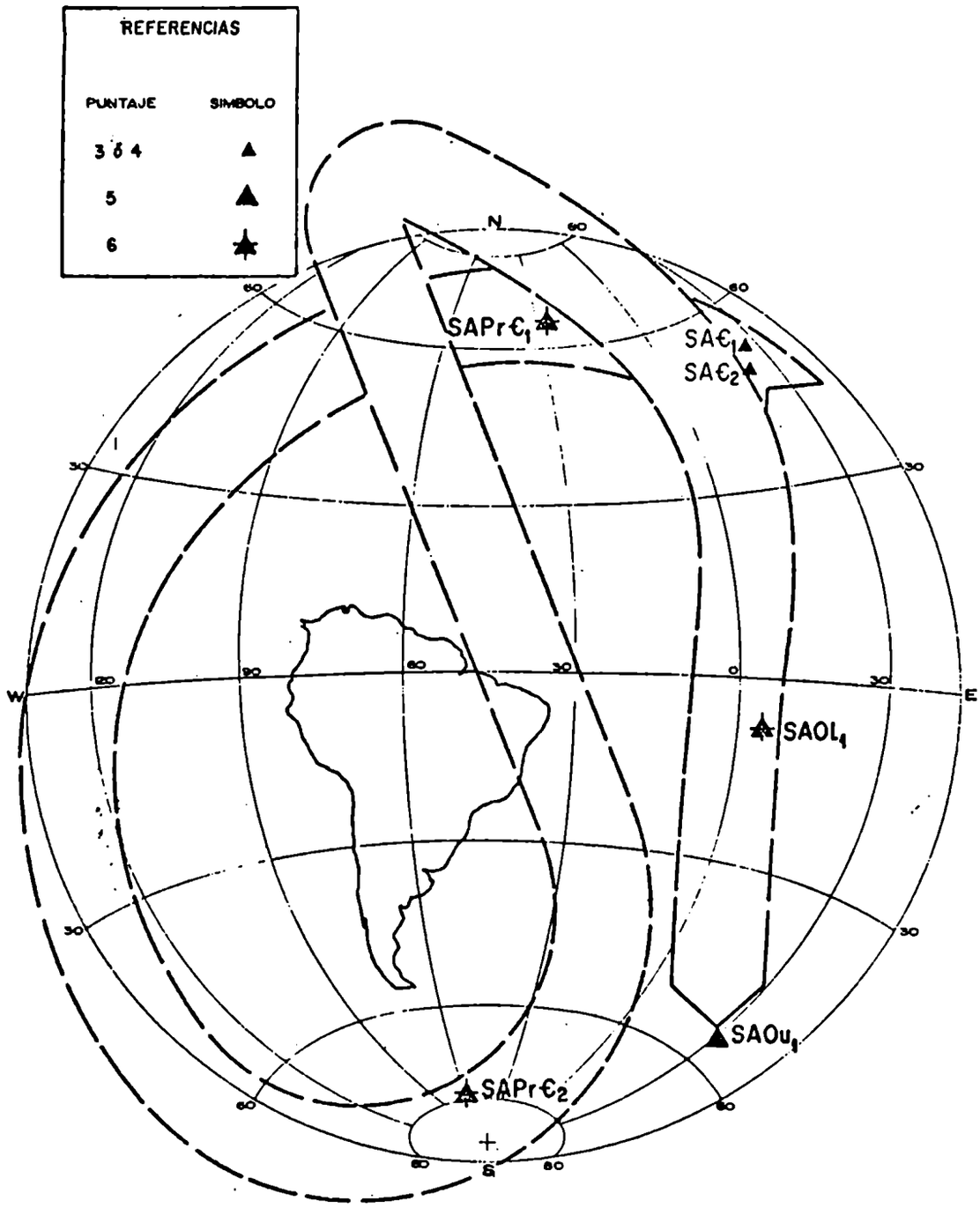


Figura 31. Posiciones relativas de los polos paleomagnéticos de América del Sur de edad Precámbrica y Paleozoica temprana con respecto a la curva de desplazamiento polar aparente del Gondwana para el período considerado. Proyección de igual area.

10^4 años, dipolar axial y geocéntrico.

3.2.2 La fragmentación del supercontinente Gondwana

Como ya fué mencionado en 3.2, los datos paleomagnéticos disponibles en 1974 indicaban que el supercontinente Gondwana existió en tiempos Carbónicos y Pérmicos. En la Figura 33 se muestra la curva de desplazamiento polar aparente de este supercontinente para tales períodos. Obsérvese que, de acuerdo a este camino polar, el supercontinente pasó por encima del polo sur a fines del Carbónico, esto es coherente con los rastros dejados por glaciaciones continentales, hallados en algunas formaciones neopaleozoicas de algunos de los continentes Gondwánicos (particularmente Africa, América del

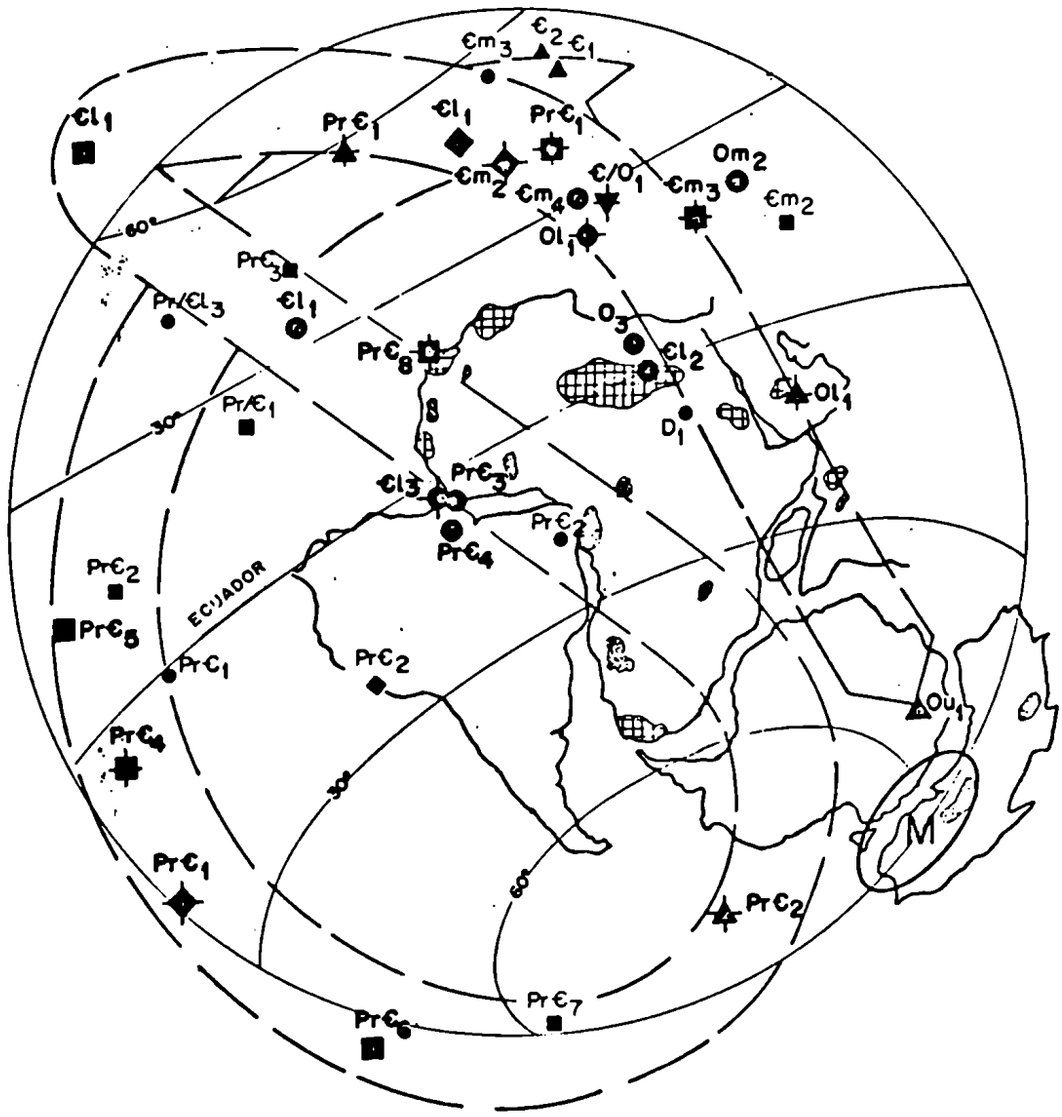


Figura 32. Polos paleomagnéticos de los distintos continentes gondwánicos con edades comprendidas entre 1000 m.a. y 450 m.a. apróxomadamente;paleolatitudes válidas para el Precámbrico tardío, 710 m.a. apróximadamente, (Valencio, 1979).Obsérvese el rápido desplazamiento polar aparente neoprecámbrico y eopaleozoico y su relación con las glaciaciones precámbrica (▨) y ordovícica (▦). Otras referencias en Figuras 32 y 36. ▲ América del Sur; ■ Africa; ◆ India ● Australia; ▼ Antártida

Sur y Australia) y ubicadas durante su génesis cerca del polo paleomagnético. Sin embargo, subsitían incongruencias entre la información paleomagnética Neopaleozoica y Mesozoica de algunos de los continentes gondwánicos, las que fueron indicadas por varios autores(Creer,Embleton y Valencio, 1969; Irving y Robertson, 1969; Vilas y Valencio, 1970; Valencio y Vilas, 1972; Valencio, 1973); en consecuencia se definía con ambigüedades la cronología de la fragmentación del Gondwana y la edad de la formación de los Océanos Australes.

Los estudios paleomagnéticos realizados con rocas Neopaleozoicas, Mesozoicas y Cenozoicas de América del Sur han coayuvado a definir los episodios de desintegración del Supercontinente Gondwana y, particularmente,

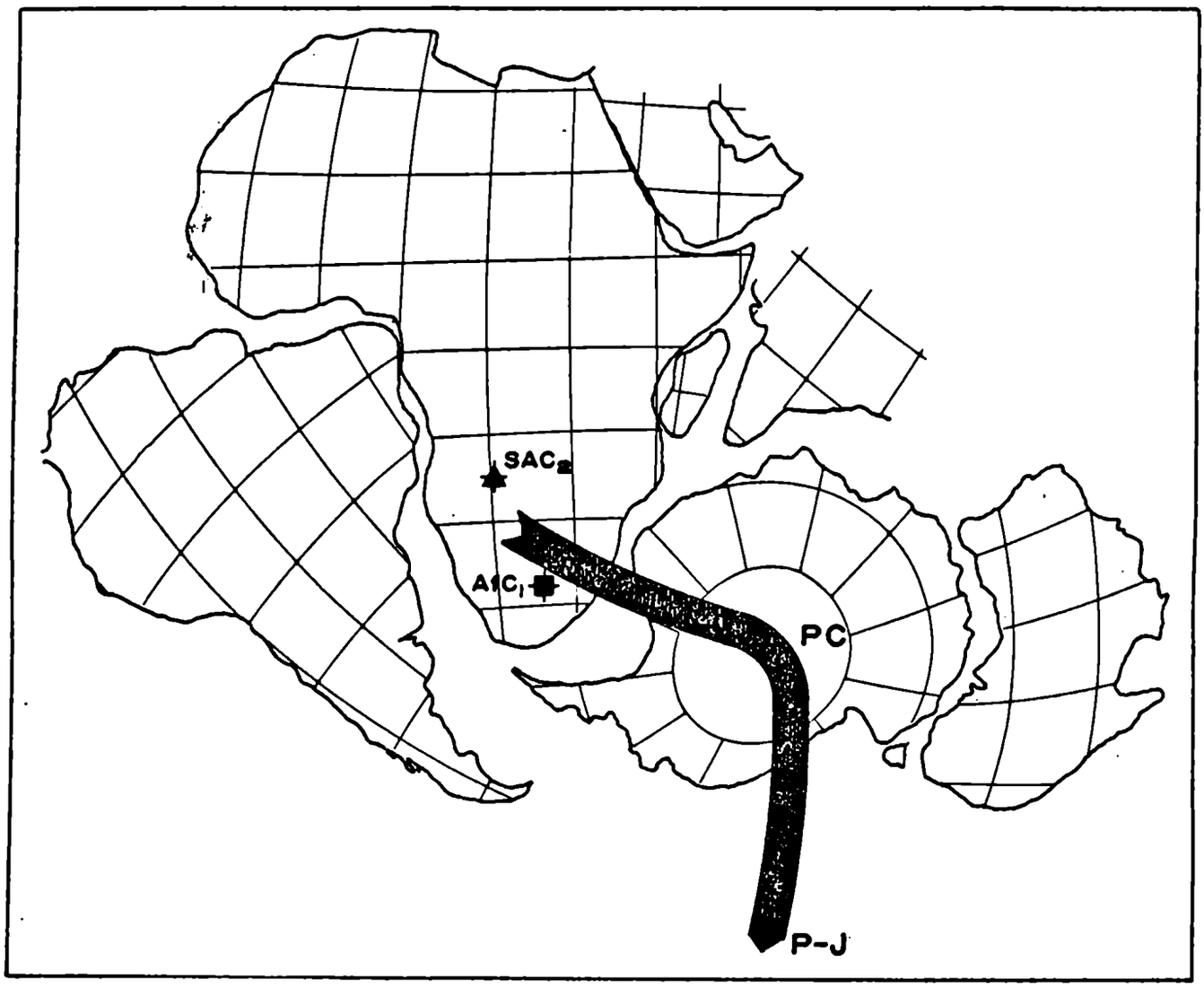


Figura 33. Curva de desplazamiento polar aparente Neopaleozoica del Gomdwana. Proyección de igual area.

aquellos que dieron origen al Atlántico Sur. Así, a partir de los trabajos realizados en el Laboratorio de Paleomagnétismo de la U.B.A. desde 1974 al presente, fué posible detallar los movimientos relativos al polo de América del Sur que a continuación se detallan:

1) Rápido desplazamiento polar aparente presente en el período Carbónico tardío-Pérmico medio. Los estudios paleomagnéticos realizados en la Formación La Colina aflorante en Mina Las Mellizas (Sinito, Valencio y Vilas, 1979) permitió obtener un polo paleomagnético (SAC_4, 295 ± 5 m.a., Tabla 9) cuya posición lo ubica dentro de la población de polos paleomagnéticos gondwánicos con edades próximas al límite Carbónico-Pérmico (grupo PC en las Figuras 33 y 34). Por su parte, los realizados en rocas de la misma forma-

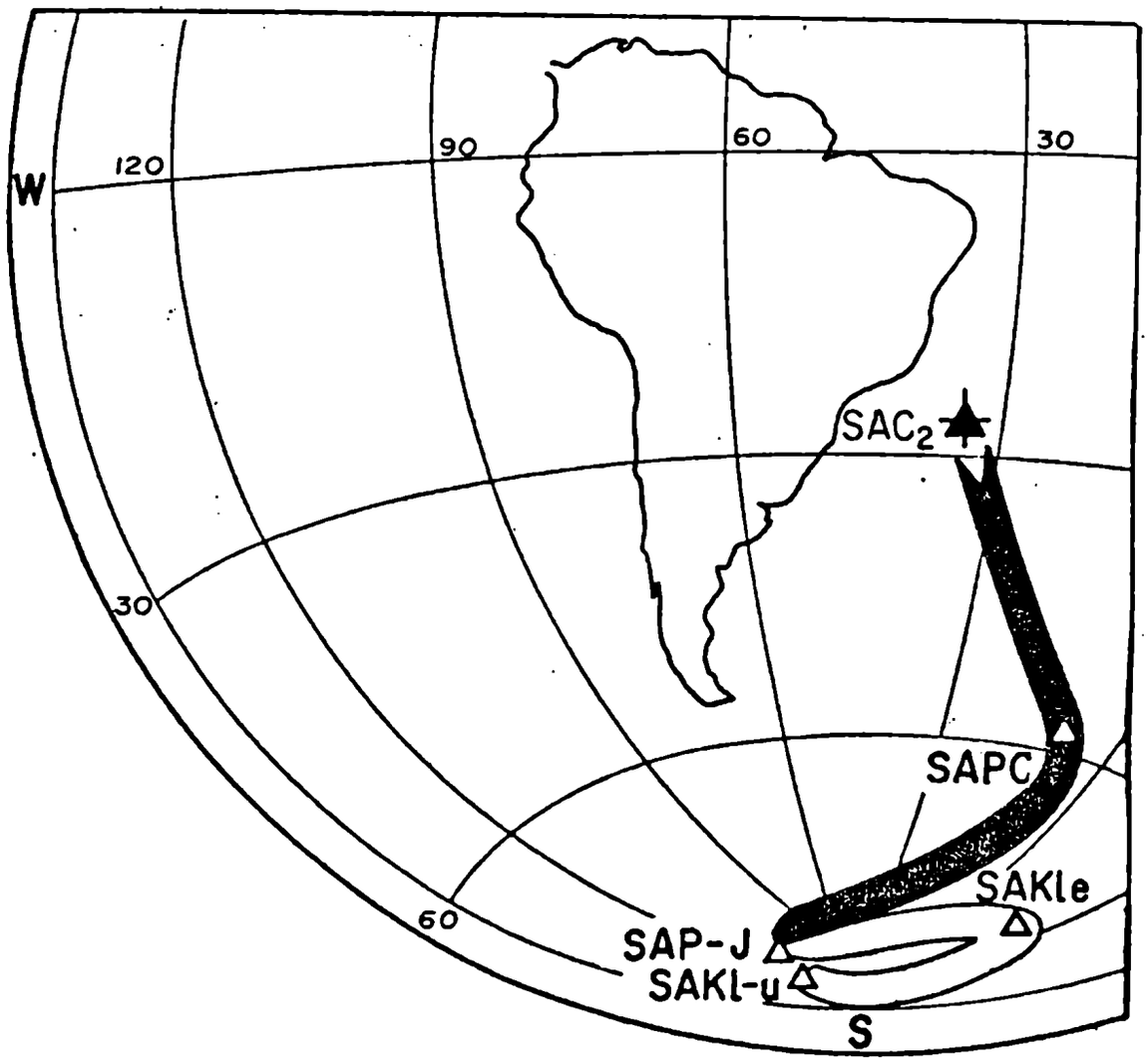


Figura 34. Curva de desplazamiento polar aparente Neopaleozoica y Mesozoica de América del Sur. Proyección de igual area.

ción aflorantes en Paganzo, (Valencio, Vilas y Mendía, 1977 b) dieron un polo paleomagnético ($SAP_7 \geq 266 \pm 7$ m.a.) que forma parte de la población de polos paleomagnéticos gondwánicos con edades que van del Pérmico medio al Jurásico medio (grupo P-J en las Figuras 33 y 34). Esta diferencia en las posiciones polares de SAC_4 y SAP_7 confirmó el rápido desplazamiento polar aparente postulado para América del Sur a fines del Paleozoico (Embleton, 1970).

II) El período de desplazamiento polar aparente casi estático Neopaleozoico-Mesozoico de América del Sur. Los polos paleomagnéticos obtenidos para : rocas pérmicas y permotriásicas en la localidad de Paganzo, Argentina (polos SAP_7 y $SAPTr_2$, Tabla 9, Valencio et al, 1977 b), sedimentos rojos de la Formación Corumbatai, Brasil (polo $SAPTr_1$, Valencio, Rocha Campos y Pacca, 1975 a), rocas igneas de la Formación Ischigualasto-Ischichuca (polo $SATr_2$, 224 m.a.) y Formación Puesto Viejo, Argentina (polo $SATr_3$, 232 m.a., Valencio, Mendía y Vilas, 1975 b) y rocas igneas de la Formación Chon-Aike, Ar-

tina (polo SAJ_1, 161 m.a., Vilas, 1974), pertenecen todos a una misma población con edades comprendidas en el período Pérmico medio-Jurásico medio (grupo de tiempo P-J en las Figuras 33 y 34). De esta manera se confirmó para América del Sur la existencia de un período de desplazamiento polar aparente casi estático, el que estuvo presente desde el Pérmico medio (267 m.a.) hasta el Jurásico medio (161 m.a.).

III) Los movimientos ocurridos en el Cretácico. Los estudios paleomagnéticos realizados por Valencio y Vilas (1976) en magmatitas de la Formación Cerro Colorado, Linares y Valencio (1975) en los diques basálticos del Río de los Molinos, Mendía (1978) en las vulcanitas de Almafuerte y Vilas y Valencio (1978 b) en sedimentitas de la Serie Andacollo, han permitido definir una población de polos paleomagnéticos para el Cretácico temprano (grupo de edad Cretácico temprano) cuya posición polar media está individualizada por SAKIe en la Figura 34. Por otra parte, sobre la base de los estudios realizados por Valencio y Vilas (1976) en vulcanitas de la formación Rumipalla y Valencio et al (1977 a) en sedimentos y vulcanitas del Grupo Pirgua fué posible definir que los polos paleomagnéticos sudamericanos con edades comprendidas entre el fin del Cretácico temprano y el Cretácico tardío pertenecen a una misma población, siendo éste el síntoma de un período de desplazamiento polar aparente casi estático para América del Sur para esa edad (posición polar media SAKI-u en la Figura 34). Por lo tanto el camino polar definido por SAP-J, SAKIe y SAKI-u es la manifestación de un episodio de movimiento reversible de América del Sur, el que comenzó al finalizar el período de desplazamiento polar aparente casi estático Pérmico medio-Jurásico medio (SAP-J) ya definido, estuvo presente en el Cretácico temprano y finalizó cuando éste continente detiene su movimiento relativo al polo hacia fines del Cretácico temprano (SAKI-u).

Un análisis detallado de los datos paleomagnéticos Paleozoicos tardíos y Mesozoicos de los restantes continentes gondwánicos permitió definir las curvas de desplazamiento polar aparente para cada uno de dichos continentes desde el Carbónico hasta el Cenozoico (Vilas, 1976; Vilas y Valencio, 1977). Ajustando los tramos neopaleozoicos de las curvas de desplazamiento polar aparente de estos continentes con la cohetanea de América del Sur (tramo negro en Figura 34) se definen las posiciones relativas que guardaban estos continentes cuando integraban el Gondwana. En la Figura 35 se muestra esta reconstrucción; las paleolatitudes son las que corresponden a la posición media de los polos paleomagnéticos de América del Sur, Africa, Madagascar, Australia y Antártida con edades comprendidas en el lapso Pérmico medio-Jurásico medio (Grupo de Tiempo P-J). También se muestra en esta figura el tramo final (Neopaleozoico) de la curva de desplazamiento polar aparente del

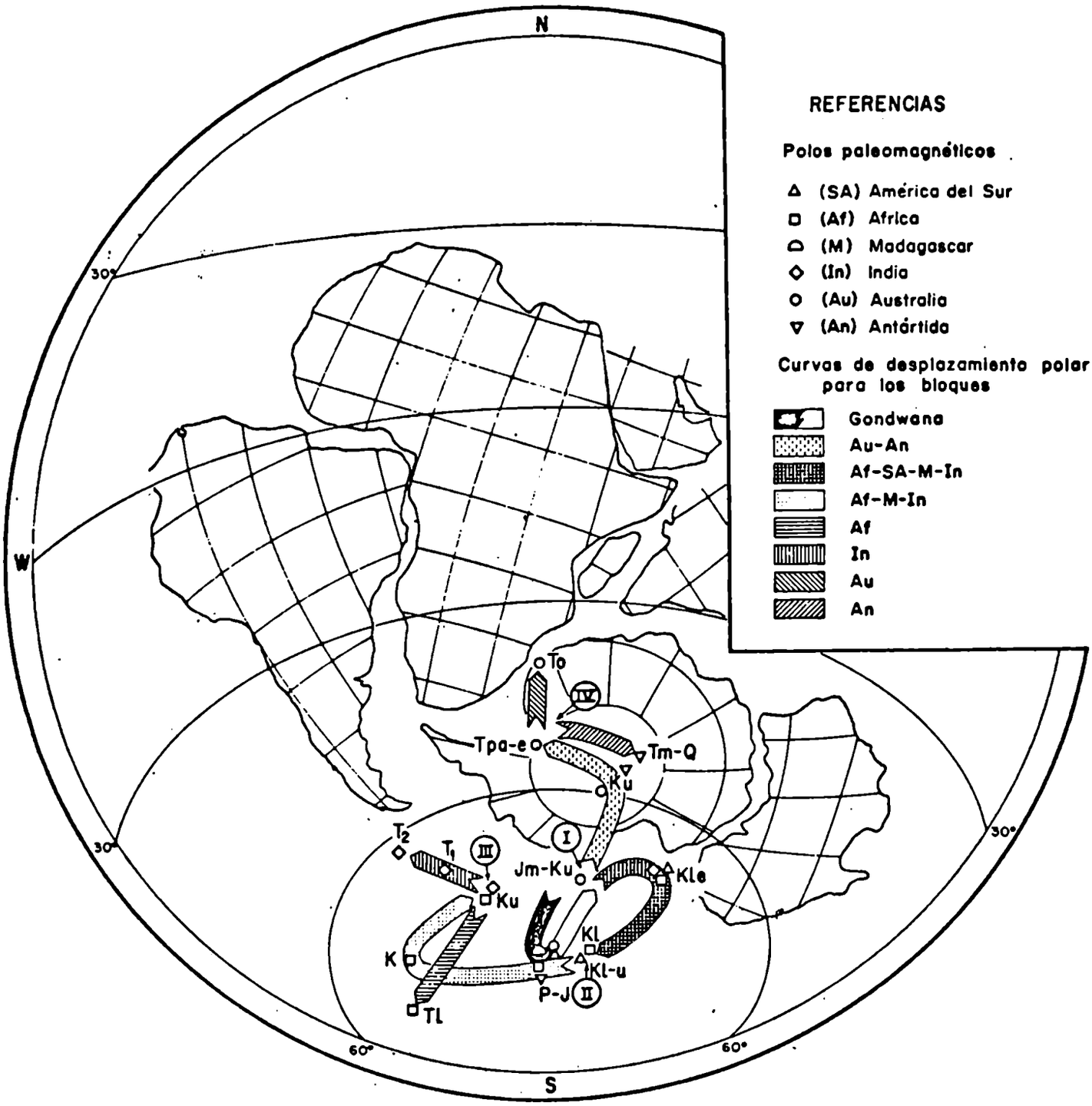


Figura 35. Curvas de desplazamiento polar aparente para el Mesozoico y Cenozoico de los distintod continentes gondwánicos. Los números romanos indican, en orden cronológico, los episodios de fragmentación. Paleolatitudes válidas para el lapso Pérmico medio-Jurásico medio. Proyección de igual area.

Gondwana (en rastra negra) y las ramificaciones que a partir de ella se van definiendo con el transcurrir del tiempo geológico (I, II, III y IV); estas son las manifestaciones paleomagnéticas de los sucesivos episodios de fragmentación que sufrió este supercontinente en el Mesozoico y Cenozoico.

IV) El primer episodio de la fragmentación y la génesis del Océano Indico (I). La primera fragmentación del gondwana está vinculada con la fi-

nalización de su período de desplazamiento polar casi estático Pérmico medio-Jurásico medio (P-J en la Figura 35) y está definida por la diferencia existente entre la posición polar representativa del grupo de tiempo Jurásico medio-Cretácico tardío del bloque Australia-Antartida (AuJm-Ku en la Figura 35) con los de los grupos de esdades asignados a los albores del Cretácico temprano del bloque América del Sur-Africa-Madagascar-India (grupo de paleopolos Kle en la Figura 35). Sobre la base de esta diferencia y las edades asignadas a las posiciones polares mencionadas queda establecido que la primera fragmentación del Gondwana (ramificación I) se produjo en el lapso comprendido entre fines del Jurásico medio y el comienzo del Cretácico temprano, lo cual es compatible con evidencias paleontológicas que establecen que este supercontinente aun existía en el Jurásico medio (Savage, 1973). En ese lapso tuvo lugar entonces, una ingresión marina desde el Oeste-Sudoeste que separó al Gondwana en dos bloque supercontinentales: América del Sur-Africa-Madagascar-India por el Norte y Australia-Antártida (Figura 36). La reconstrucción paleogeográfica mostrada en esta figura se obtuvo al imprimir a los dos bloques supercontinentales un movimiento de rotación relativo simple coherente con la Teoría de la Propagación del Fondo de los Océanos (Dietz, 1961; Hess, 1965; Dietz, 1966) y de tal manera que las posiciones poalres AuJm-Ku (bloque Australia-Antártida) y Kle (bloque América del Sur, Africa, Madagascar, e India) se superpongan; el polo de rotación así obtenido está ubicado en la zona sonbreada de la Figura 36 siendo el ángulo de rotación de 10° aproximadamente (Vilas, 1978; Vilas, 1979).

V) El segundo episodio de fragmentación y la génesis del Atlántico Sur (II). Valencio y Vilas (1976) mostraron que los polos paleomagneticos Mesozoicos de América del Sur y el Africa definen, para el lapso comprendido entre el Jurásico medio y el fin del Cretácico temprano, un desplazamiento polar aparente común y recurrente (tramos que unen los polos paleomagneticos P-J→Kle→AfKl-SAKl-u, Figura 35. Al finalizar el desplazamiento polar recurrente señalado, América del Sur detiene su movimiento relativo al polo iniciando un período casi estático (posición polar Kl-u en la Figura 35), el que se define, como mínimo, hasta el fin del Cretácico tardío; por el contrario Africa no detiene su desplazamiento polar aparente en el Cretácico tardío, tal como lo muestra los polos paleomagnéticos K y Ku (ramificación II). Esta incompatibilidad de movimientos polares es el síntoma de desplazamientos relativos entre los dos bloques los cuales se iniciaron a fines del Cretácico temprano.

El esquema representativo del primer movimiento relativo entre América del Sur y el bloque Africa-Madagascar-India puede obtenerse haciendo recorrer al polo paleomagnético SAKl-u de América del Sur, el tramo de curva de desplazamiento polar aparente del Africa Kl→K (primera parte del tramo de

curva de rastra de puntos en la figura 35). Procediendo de esa manera se obtuvo la evolución del Atlántico Sur (Figura 37). El esquema obtenido es coherente con el modelo de propagación del fondo del Atlántico Sur propuesto por Le Pichon y Hayes (1971) y Larson y Ladd(1973). La Figura 37a válida para el límite Crétacico temprano /tardío, muestra la formación de un estrecho mar desde el Sur hacia el Norte el que fué separando a América del Sur respecto de Africa-Madagascar-India; este mar fué desarrollandose y habría tenido la morfología indicada en la Figura 37b en el Cretácico tardío (Vilas,1978; Vilas,1979). Las implicancias geológicas y paleontológicas del modelo de génesis del Atlántico Sur aquí presentado son coherentes con las observaciones realizadas por Reyment (1969) y Reyment y Tait(1972).

VI) El tercer episodio de fragmentación y la génesis de las cuencas de Arabia y Somalía (III). El desplazamiento relativo al polo que el supercontinente Africa-Madagascar-India tuvo en el Crétacico tardío está definido en la Figura 35 por el tramo de curva de desplazamiento polar, común a dichos continentes, representada por rastra de puntos. Durante el episodio de magmatismo que dió origen a las Deccan Traps (64 m.a. - 59 m.a., Wellman y Mc Elhinny, 1970), India definió un camino polar (rastra vertical) diferente del de Africa (polo paleomagnético AfKu) lo que sugiere la aparición de movimientos relativos entre India y Africa, estos movimientos ocurrieron entre el Crétacico tardío y el Terciario temprano (ramificación III). Vilas (1976) y Vilas y Valencio (1977), sugirieron que la separación de Madagascar debió ser simultánea o posterior al inicio de ese movimiento relativo.

Partiendo de las posiciones relativas de Africa, Madagascar e India en el Gondwana y teniendo en cuenta los movimientos que debieron estar presentes entre el Africa y la India de acuerdo a los tramos divergentes de sus curvas polares y a los indicados para dichos continentes por Fischer, Sclater y Mc Kencie (1971) según el modelo de propagación del fondo del Océano Indico Oeste, Vilas (1976) y Vilas y Valencio (1977) cuantificaron los primeros movimientos relativos realizados por esos bloques litosféricos. En la Figura 38 se indican las posiciones relativas de Africa, Madagascar e India en el límite Crétacico/Terciario (efusiones de las Deccan Traps), obtenidas por aplicación de estos movimientos con los ángulos de rotación que llevan a la posición de mínima distancia a los polos InT_2 y AfKu. Los ángulos de rotación son: 15°entre India y Madagascar (polo de rotación 177°E, 19°S en las coordenadas de Madagascar), 8°entre Africa y Madagascar (polo de rotación 105°E, 1°N en las coordenadas de Madagascar); los mismos representan, apróximadamente , la mitad del movimiento de rotación que estos bloques realizaron desde el inicio de la fragmentación y hasta 53,5 m.a.(anomalía magnética 21 en el Océano Indico Oeste, Fischer et al, 1971). Las lineas de flujo de es-

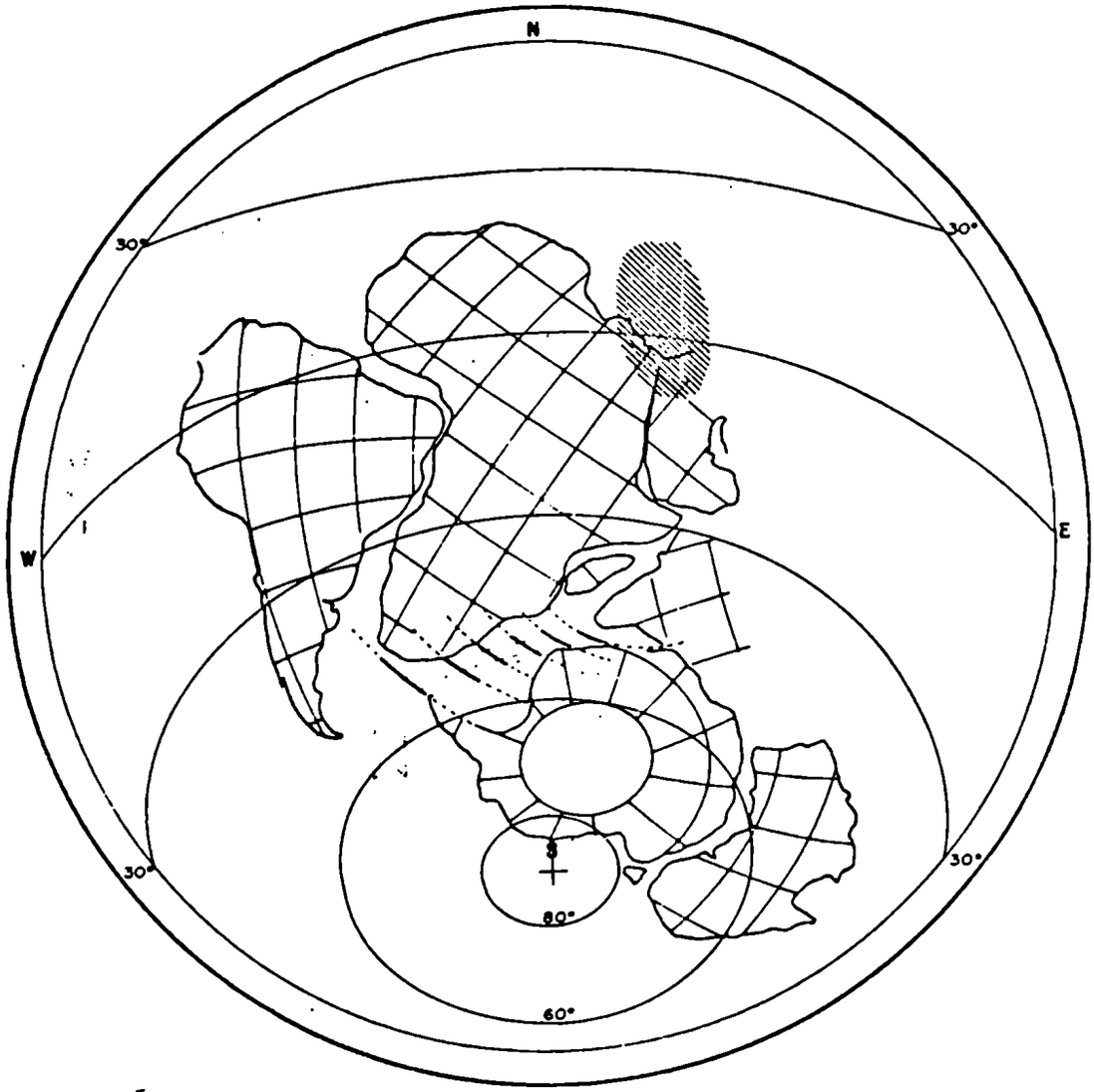
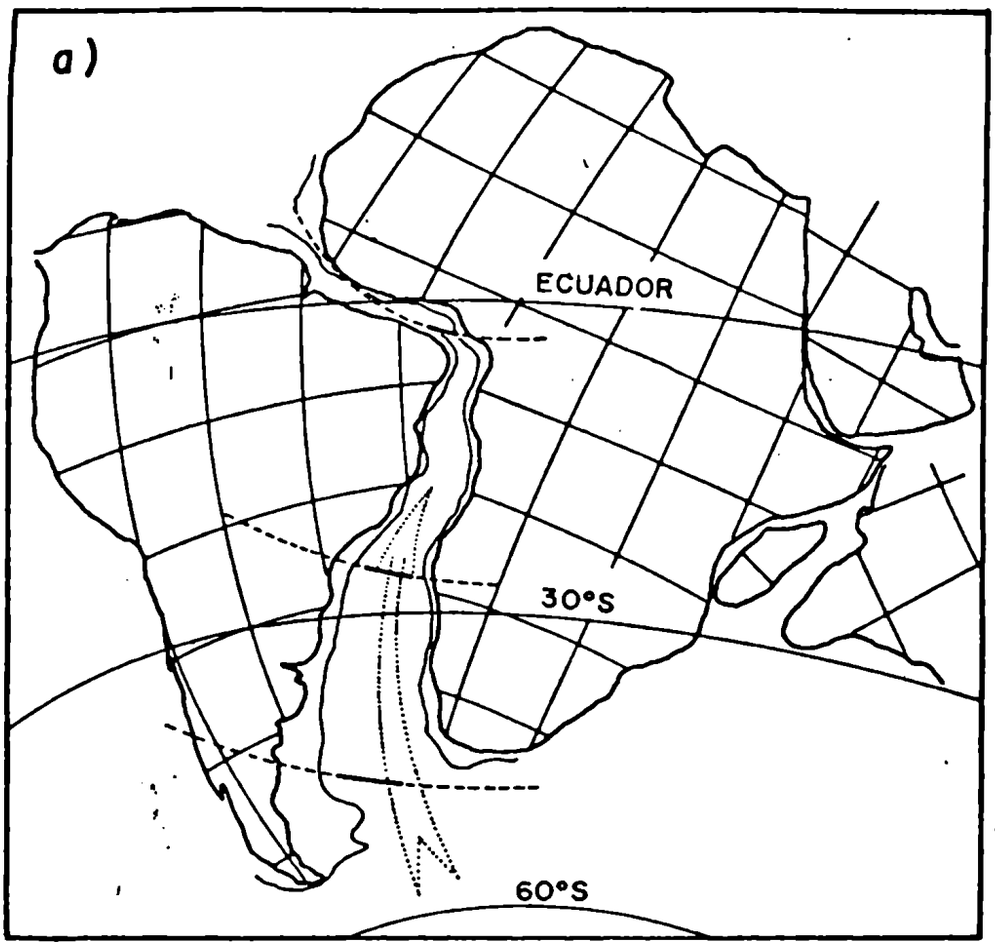


Figura 36. Formación de un mar estrecho (génesis del Indico)en el límite Jurásico, asociado al primer episodio de fragmentación del Gondwana. Las líneas de flujo del movimiento de rotación relativo impreso por este episodio se muestran en traza punteada y en traza llena el desplazamiento involucrado en la separación. Paleolatitudes válidas para el límite Jurásico-Cretácico. Proyección de igual area.

tos primeros movimientos relativos y los desplazamientos involucrados están representados en la Figura 38 por líneas de puntos y llenas respectivamente; una consecuencia problable de estos movimientos es la génesis de las cuencas de Arabia y Somalía (Vilas, 1978; Vilas,1979). En esta figura también puede observarse la posición relativa entre América del Sur y Africa para el límite Crétacico/Terciario. Esta parte de la reconstrucción fué obtenida sobre la base del modelo presentado por Ladd (1974) para la propagación del fondo del Océano Atlántico Sur.

VII) El cuarto episodio de fragmentación y la génesis del Océano Indico Sur (IV). Los estudios paleomagnéticos realizados por Valencio, Mendía y Vilas (1979) con rocas de la Antártida (Tabla 9) confirmaron la existencia del bloque Australia-Antártida para el Crétacico tardío, (coincidencia de los polos promedio AuKu y AnKu, Figura 35). Este bloque supercontinental mostró en el Cenozoico temprano un rápido desplazamiento polar aparente (curva con rastra vertical entrecortada) el que se mantuvo hasta el Paleoce-



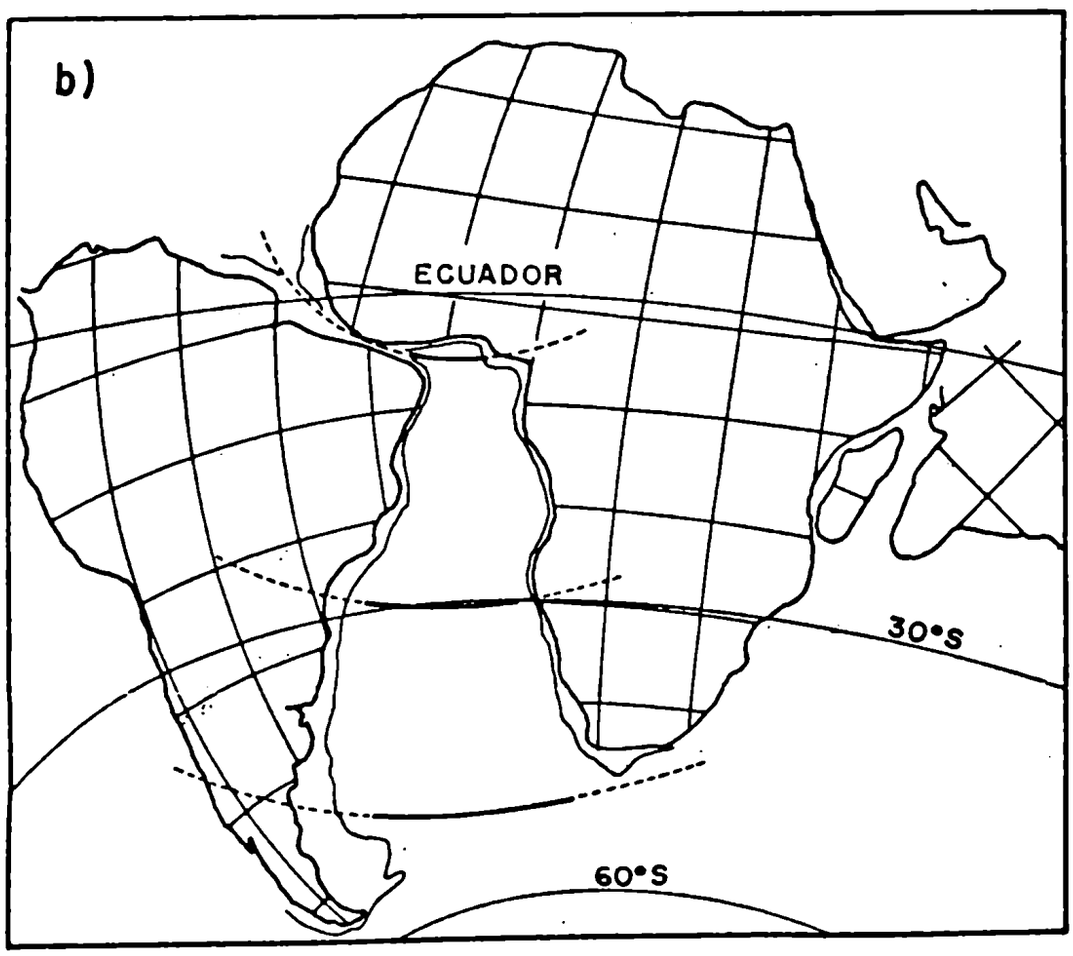


Figura 37. segundo episodio de la fragmentación del Gondwana y el desarrollo del Atlántico Sur en el Cretácico. a) Formación de un mar estrecho en el límite Cretácico temprano/tardío fruto de la fragmentación de América del Sur y Africa. b) Océano Atlántico Sur en el Cretácico tardío. Paleolatitudes válidas para las edades consideradas.

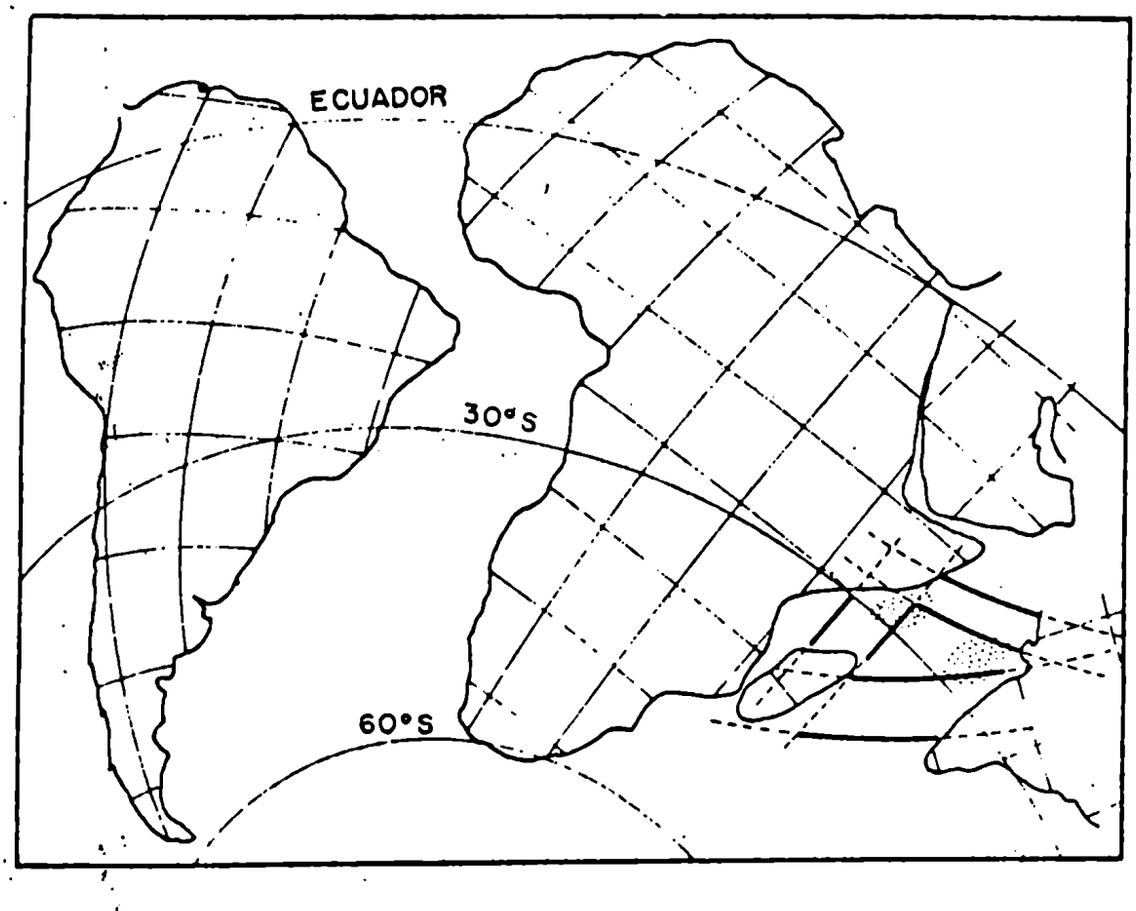


Figura 38. Tercer episodio de fragmentación del Gondwana y las cuencas de Arabia y Somalía en el límite Cretácico/Terciario. Estado de desarrollo del Atlántico Sur en éste límite. Paleolatitudes válidas para la edad considerada.

no-Eoceno (Tpa-e en la Figura 35). Sobre la base de los datos de la propagación del fondo del Océano Indico Sur, Vilas y Valencio (1970) sugirieron que la separación de Australia y Antártida (ramificación IV) y la génesis del Océano Indico Sur ocurrió en el Eoceno-Oligoceno.

Juan F.A. Vilas

Daniel A. Valencio

INDICE ALFABETICO DE SIMBOLOS

SIMBOLO	UNIDAD	SIGNIFICADO
A	1	Constante de escala del detector sensible a fase
Af	—	Africa
An	—	Antártida
Au	—	Australia
α_{95}	°	Semiángulo del cono centrado en la dirección media dentro del cual hay un 95% de probabilidad de encontrar la verdadera dirección.
B	1	Constante de escala del magnetómetro Förster.
$\mathcal{B}$	Gauss	Inducción magnética.
β	°	Inclinación de un plano respecto de la horizontal.
$\vec{\vec{\beta}}$	1	Matriz de rotación
C	—	Cárbonico.
Cu	—	Carbónico tardío.
ϵ	—	Cámbrico.
ϵm	—	Cámbrico medio.
ϵl	—	Cámbrico temprano.
D	°	Declinación de la magnetización remanente.
$d\psi$	°	Semieje menor del óvalo centrado en la dirección media dentro del cual hay un 95% de probabilidad de encontrar la verdadera dirección.
$d\chi$	°	Semieje mayor del óvalo centrado en la dirección media dentro del cual hay un 95% de probabilidad de encontrar la verdadera dirección.
Δf	Hz	Ancho de banda.
e	V	Diferencia de potencial senoidal.
e_R	V	Diferencia de potencial de ruido blanco.
f	Hz	Frecuencia.
ϕ	Maxwells	Flujo magnético.
$\vec{H}$	Oe ($10^5\gamma$)	Campo magnético.

H_R	Oe($10^5\gamma$)	Campo magnético de ruido blanco.
I	°	Inclinación de la magnetización.
i	A	Corriente eléctrica.
In	—	India.
J	—	Jurásico
Jm	—	Jurásico medio.
Ju	—	Jurásico tardío.
K	—	Cretácico.
k	1	Parámetro de precisión de Fischer (1953).
Kl	—	Cretácico temprano.
Kle	—	Comienzo de Cretácico temprano.
Kl-u	—	Cretácico temprano-tardío.
Ku	—	Cretácico tardío.
M	—	Madagascar.
$\vec{M}$	uem.cm^{-3}	Magnetización.
$\vec{\mathcal{M}}$	uem.cm^{-3}	Verdadero valor de la magnetización.
$\vec{m}$	uem	Momento magnético.
$\vec{M}_R$	uem.cm^{-3}	Ruido magnetómetro U.B.A. 8 Hz
μ	1	Permeabilidad magnética integral
μ_Δ	1	Permeabilidad magnética incremental.
N	1	Número de vectores que siguen una distribución fisheriana.
$\mathcal{N}$	1	Número de espiras de una bobina.
O	—	Ordovícico.
Ol	—	Ordovícico temprano.
Om	—	Ordovícico medio.
Ou	—	Ordovícico tardío.
ω	Hz	Pulsación.
P	—	Pérmico.
$\vec{\vec{p}}$	1	Matriz de rotación para la corrección por estructura.
PC	—	Permocarbónico.
Pr€	—	Precámbrico.
Q	—	Cuartario.
$\vec{R}$	1	Dirección mas probable de una distribución fisheriana.
r	°	Rumbo de un plano respecto del Norte geográfico.
$\vec{\vec{r}}$	1	Matriz de rotación.

$\varphi_{x,y,z}$	1	Cosenos directores.
S	1	Factor de blindaje estático.
S_Δ	1	Factor de blindaje incremental.
SA	—	América del Sur.
σ	—	Función de signo.
T	s	Tiempo de integración o constante de tiempo en detectores sensibles a fase.
t	s	Tiempo.
Te	—	Eoceno.
Tl	—	Terciario temprano.
Tm	—	Mioceno
To	—	Oligiceno.
Tpa	—	Paleoceno.
Tr	—	Trlásico.

AGRADECIMIENTOS

He de dejar sentado mi agradecimiento a aquellas personas e instituciones que de una manera u otra han posibilitado la realización de éste trabajo; en especial a mi Director de Tesis Ing. D.A. Valencio, que supo dar las directivas generales fomentando la iniciativa personal, al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, sin cuyo concurso económico no hubiérame sido posible llevar a cabo este trabajo y a la Facultad de Ciencias Exáctas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires con cuyos laboratorios e instrumentos conté a discreción.

BIBLIOGRAFIA

AS, J.A., 1960. Instrument and measuring methos in palaeomagnetism research. Mededel. Verhandel. K.N.M.I., 78, 1-56

Aschenbrenner, H. y Goubau. G., 1936. Eine Anordnumg zur Registrierung Rascher magnetischer Störungen, Hochfrequenztechniku. Electroakustik, 47, 177-181.

Creer, K.M., Embleton, B.J.J. y Valencio, D.A., 1969. Comparison between the Upper Palaeozoic and Mesozoic palaeomagnetic poles for South America, Africa and Australia. Earth. Planet. Sci. Lett.,7, 288-292.

Collinson,D.W.,1967. The astatic magnetometers at Newcastle upon Tyne. In: D.W.Collinson, K.M. Creer and S.K. Runcorn (Editors), Methods in Palaeomagnetism. Elsevier, Amsterdam, 60-65.

De Sa, A.,1963. Applications of electronic to the measurement of geophysical phenomena. Tesjs Doctoral, Univ. Newcastle upon Tyne,130 pp

Dietz, R.S., 1961. Continent and ocean basin evolution by spreading of the sea floor. Nature, 200, 1085.

Dietz, R.S., 1966. Passive continents spreading sea floors and collapsing continental rises. Amer. J.Sci.,264, 177-193.

Embleton, B.J.J.,1970.Nuevos estudios paleomagnéticos del Neopaleozoico (Paganzo II)de la República Argentina. Rev. As. Geol. Arg. , XXV,1,101-110.

Fisher, R.A.,1953. Dispersion on a sphere.Proc. Roy. Soc. London A,217,295-305.

Fisher, R.L., Sclater.J.G. y Mc Kencie, D.P., Evolution of the Central Indian Ridge, Western Indian Ocean. Geolog. Soc. Amer. Bull.,82, 553-562.

Förster,F.,1940. Zeitschriff für Metallkunde, 32, 184.

Gleizer, H.M.,1979. Variaciones paleoseculares del campo magnético terrestre registradas en sedimentos del Paleozoico Superior y Mesozoico Inferior del Noroeste Argentino. Trabajo final de Licenciatura. Depto. de Física, Univ. Buenos Aires, Inédito.

Gough, D.I.,1967. The spinner magnetometer at Salisbury. Proceedings of the NATO Advances Study Institute on Palaeomagnetic Methods, Elsevier Publishing Co., 119-130.

Helsley, C.E.,1967. Design of spinner magnetometer In;D.W.Collinson, K.M.Creer and S.K.Runcorn (Editors), Methods in Palaeomagnetism Elsevier, Amsterdam, 115-118.

Hess, H.H., 1965. Submarine geology and geophysics. Vol.17, Colston Papers, Butterworths. London.

Irving, E.,1964.Palaeomagnetism and its application to geological and geophysical problems. John Wiley & Sons, Inc.

Irving , E.y Robertson, W.A.,1969. Test for polar wandering and some possible implications. J. Geophys. Res.,74,1026-1036.

Johnson,E.A.,1938.The limiting sensitivity of an alternating current methods of measuring small magnetic moments, Rev. Sci. Instr.,9, 263-266.

Kühme, R.,1952. Archive für technische Messen, V392-1 (Agost.1952).

Ladd, J.W.,1974.South Atlantic sea-floor spreading and Caribbean tectonics, Ph.D.Thesis:New York, Columbia Univ., 251 p.

Larson, R.L., y Ladd. J.W., 1973. Evidences for the opening of the South Atlantic in the Early Cretaceous. Nature, 246,209-212.

Le Pichon, X. y Hayes,D.E.,1971.Marginal offsets, fracture zones and the early opening of the South Atlantic. J.Geophys.Res.,26,6283-6293.

Linares, E. y Valencio, D.A.,1975.Palaeomagnetic and K-Ar ages of some trachybasaltic dikes from Rio de los Molinos,Province of Córdoba, República Argentina. J.Geophys.Res.,80,3315-3321.

Mc Elhinny,M.W. y Embleton,B.J.J.,1976. Precambrian and Early Palaeozoic palaeomagnetism in Australia. Phil.Trans. R.Soc. Lond.A. 280,417-431.

Mendía,J.E.,1978.Palaeomagnetic study of alcaline vulcanites from Almafuerte Province of Córdoba, Argentina. Geophys.J.R. astr. Soc.,54, 539-546.

Patton,B.J.,1967.Magnetic shielding. Proceedings of the NATO Advances Study Institute on Palaeomagnetic Methods, Elsevier Publishing Co., 568-588.

Reyment,R.A.,1969.Ammonite biostratigraphy, continental drift and oscilatory transgressions.Nature,224,137-140.

Reyment.R.A. y Talt,E.A.,1972.Biostratigraphycal dating of the early history of the South Atlantic Ocean. Phil.Trans. R.Soc. Lond., B264, 55-95.

Roy,J.L.,1963.The measurement of the magnetic properties of rock specimens. Publ.Dominion Obs. Ottawa, 27(9),429-439.

Runbough,L.M. y Alldredge,L.R.,1949.Airborne equipment for geomagnetic measurements, Trans.Amer.Geophys. Union,30,836-848.

Savage,J.M.,1973.The geographic distribution of frogs:patterns and predictions on evolutionary biology of the anurans,Contemporay Research on Mayor Problems, Ed.J.L.Vial, Univ. of Missouri Press,Columbia.351-445.

Selles Martinez,J.,1979. El estudio paleomagnetico de sedimentos y su utilización en la correlación geológica. Trabajo Final de Licenciatura, Depto. Cs. Geológicas,Univ. Buenos Aires. Inédito.

Sinito,A.M., Valencio,D.A. y Vilas.J.F.A.,1979. Palaeomagnetism of a sequence of Upper Palaeozoic.Lower Mesozoic red beds from Argentina. Geophys. J.R. astr. Soc.,58,237-247.

Tetzlaff,D.M.,1978.Geología y paleomagnétismo de formaciones aflorantes en las adyacencias del Río Colorado,Departamento de Tinogasta, Provincia de Catamarca. Trabajo Final de Licenciatura, Depto. Cs. Geológicas, Univ. de Buenos Aires , Inédito.

Valencio,D.A.,1966. La posibilidad de usar el magnetómetro de flujo para medir el magnétismo remanente de las rocas. Boletín de Informaciones Petroleras,328,45-51.

Valencio,D.A.,1973. Paleogeografía del Gondwana a partir de datos paleomagnéticos.II Congreso Latinoaméricano de Geología,Caracas, Venezuela I, 162-195,(1975).

Valencio.,D.A.,1979. Palaeomagnetism of Lower Ordovician and Upper Precambrian rocks from Argentina.Symposium global reconstruction and the geomagnetic field during the Paleozoic, XVII General Assembly IUGG,Camberra,2-15 Diciembre.

Valencio,D.A. y Vilas,J.F.A.,1972. Palaeomagnetism of Late Palaezoic and Early Mesozoic rocks of South America.Earth Planet. Sci. Lett.,15, 75-85.

Valencio,D.A. y Vilas, J.F.A.,1976.Sequence of the continental movements occurred prior to and after the formation of the South Atlantic.An. Acad. Bras. Ciênc.,18 (suplem),377-386.

Valencio,D.A.,Mendía,J.E. y Vilas,J.F.A.,1975b. Palaeomagnetism and K-Ar ages of Triassic igneous rocks from the Ischigualasco-Ischichuca Basin and Puesto Viejo Formation. Argentina. Earth Planet. Sci.Lett.,26,319-330

Valencio,D.A.,Mendía,J.E. y Vilas,J.F.A.,1979. Palaeomagnetism and K-Ar age of Mesozoic and Cenozoic igneous rocks from Antarctica.Earth Planet.Sci.Lett.,45,61-68

Valencio,D.A.,Rocha Campos,A. y Pacca,I.G.,1975a. Palaeomagnetism of some sedimentary rocks of the Tubarão and Passa Dois groups from the Paraná Basin.Rev.bras. Geoci.,5,186-197.

Valencio,D.A.,Rocha Campos,A.C. y Pacca,I.G.,1978.Palaeomagnetism of the Cassange"Series" ("Karroo System"),Angola.An. Acad. Bras. Ciênc.,50,353-364.

Valencio,D.A.,Sinito,A.M. y Vilas.J.F.A.,1979c.Palaeomagnetism of Late Precambrian La Tinta Formation,Argentina,en prensa

Valencio,D.A.,Vilas,J.F.A. y Mendía,J.E.,1977b. Palaeomagnetism of a sequence of red beds of the middle and Upper Sections of Paganzo group (Argentina) and the correlation of Upper Palaeozoic-Lower Mesozoic rocks. Geophys. J.R.astr.Soc.,51,59-74.

Valencio,D.A.,Vilas,J.F.A. y Mendía,J.E.,1979b. "Palaeomagnetism and K-Ar ages of Lower Ordovician and Upper Silurian-Lower Devonian rocks from north western Argentina, en prensa.

Valencio,D.A.,Mendía,J.E.,Giudici,A.yGascón,J.O.,1977a. Palaeomagnetism of the Cretaceous Pirgua Subgroup (Argentina) and the age of the South Atlantic.Geophys.J.R.astr.Soc,51,47-58.

Vilas.J.F.A.,1974. Palaeomagnetism of some igneous rocks of the Middle Jurassic Chon-Aike Formation from Estancia La Reconquista, Province of Santa Cruz,Argentina,Geophys.J.R.astr.Soc.,39, 511-522.

Vilas,J.F.A.,1976.Reconstrucción y evolucióan del continente Gondwana.9ª Reunión Científica de la Asos. Arg. de Geof. y Geod.,Buenos Aires,Geoacta,9,93-108.

Vilas,J.F.A.,1978.La fragmentación del Gondwana y la evolución de los Océanos Australes en el Jurásico-Cretácico. I Congreso Latinoamericano de Paleontología, Buenos Aires,2-6 Abril,(en prensa).

Vilas,J.F.A.,1979.Palaeomagnetism of Southamerican rocks and the dynamic processes related with the fragmentation of Western Gondwana. International Comission for Geodynamics,final report for year 1970-1979,Pre-Cenozoic Palaeomagnetism of South America, en prensa.

Vilas,J.F.A.y Nuñez,S.,1979.Estudios Paleomagnéticos de sedimentos Cenozoicos de la Plataforma Malvinas.10ª Reunión de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas,San Juan,Marzo de 1979.

Vilas,J.F.A. y Pacca, I.G.,1979. Palaeomagnetism of some sedimentary rocks of the Precambrian Bambui group,Brasil, en prensa.

Vilas,J.F.A. y Valencio,D.A.,1969. El Magnetómetro "Spinner" de la Universidad de Buenos Aires. Anales Soc. Cient. Argentina,CLXXXVII,130-143

Vilas,J.F.A. y Valencio, D.A.,1970. Palaeogeographic reconstruction of the Gondwanic continents based on palaeomagnetic and sea-floor Spreading data.Earth Planet.Sci.Lett.,7,397-405.

Vilas,J.F.A. y Valencio,D.A.,1977. Palaeomagnetism of South American rocks and the Gondwana continent.Seminar on Past configuration of Gondwana and geological correlation through time.Fourth International Gondwana Symposium,Calcuta, en prensa.

Vilas,J.F.A.y Valencio,D.A.,1978a.Palaeomagnetism and K-Ar age of the late Ordovician Alcaparrosa Formation,Argentina.Geophys.J.R. astr.Soc.,55,143-154.

Vilas,J.F.A. y Valencio,D.A.,1978b.Palaeomagnetism and K-Ar dating of the Carboniferous Andacollo Series (Argentina) and the age of its hidrothermal overprinting.Earth Planet.Sci.Lett.,40, 101-106.

Vilas,J.F.A.,Valencio,D.A. y Gianolini,L.,1975.Orientación de testigos de pozos a partir de su remanencia magnética.II Congreso Ibero-Americano de Geología Económica,Buenos Aires,IV,275-287.

Wadey,W.G.,1956.Magnetic shielding with multiple cylindrical shells.Rev.Sci. Instr.,27,910-916.

Wellman,P. y Mc Elhinny, M.W.,1970.K-Ar age of the Deccan Traps,India.Nature, 227,595-596.

Wills,A.P.,1899.The magnetic shielding effect of trilamellar spherical and cylindrical shells.Phys.Rev.,9,193-213.