

03060

7
Lij



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

**Elaboración de la Carta Aeromagnética
de la
República Mexicana**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS (GEOFÍSICA)

P R E S E N T A:

RAMIRO ORNELAS VALDÉS

Ciudad Universitaria

1999

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

274268



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicada con amor a

... mi esposa

Braulia

... mi hijo

Ramiro

A la memoria de mi

... inolvidable hijo

Miguel Angel

... mis hermanos

Rubén, Rosalba y Dalinda

INDICE

	<i>Pag</i>
I INTRODUCCION	1
II ANTECEDENTES	4
III CONCEPTOS DE CAMPO Y PRINCIPIOS BASICOS DEL POTENCIAL GRAVITACIONAL Y MAGNETICO	8
III.1 FUERZA MAGNETICA	11
III.2 INTENSIDAD DE CAMPO MAGNETICO	12
III.3 MOMENTO MAGNETICO	12
III.4 INTENSIDAD DE MAGNETIZACION	13
III.5 INDUCCION MAGNETICA	14
III.6 EL CAMPO GEOMAGNETICO	16
III.7 COMPONENTES DEL CAMPO GEOMAGNETICO	17
III.8 CORRECCIONES	19
IV FUNDAMENTACION TEORICA	21
IV.1 ECUACIONES DE CAMPOS POTENCIALES	21
IV.2 PROLONGACION ANALITICA DE CAMPO	22
IV.3 PROCESO DE CONTINUACION ANALITICA BIDIMENSIONAL	28
IV.4 FUNCION DE TRANSFERENCIA	31
V ELABORACION DE LA CARTA AEROMAGNETICA DE LA REPUBLICA MEXICANA	36
V.1 RECOPIACION DE INFORMACION	36
VI.2 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACION	36
V.3 REDUCCION POR IGRF	45
V.4 APLICACIÓN DE LA CONTINUACION ANALITICA A LOS DIFERENTES PROSPECTOS	47
V.5 INTEGRACION AEROMAGNETICA	53

VI	MAPA AEROMAGNETICO RESULTANTE DE LA UNIFICACION DE PROSPECTOS	57
VII	ALGUNAS APLICACIONES DE LA CARTA AEROMAGNETICA Y EL USO DE TRANSFORMACIONES PARA FACILITAR LA INTERPRETACION	60
VIII	CONCLUSIONES	68
	BIBLIOGRAFIA	71

I INTRODUCCION

Los métodos de campo potencial de gravimetría y magnetometría han sido ampliamente usados en la exploración petrolera. Sin embargo, al paso del tiempo, los métodos de exploración sísmica se constituyeron paulatinamente en los métodos más empleados: Actualmente, la mayor parte de los recursos económicos y humanos están concentrados en el desarrollo y aplicación de los métodos sísmicos de reflexión. El uso de los métodos de campo potencial no obstante ha continuado y en los últimos años se ha experimentado un resurgimiento importante en este campo. Biegert y Millegan (1998) han listado algunos ejemplos de aplicación exitosa de la prospección gravimétrica y magnética en la exploración petrolera. Entre las aplicaciones se mencionan: (1) el estudio aeromagnético en la zona marina de Inglaterra que permitió documentar una falla que separa dos campos productores de gas, (2) los estudios en el Golfo de México que permitieron identificar estructuras salinas a partir de pequeños mínimos magnéticos (3) la documentación de fallas de basamento en la Cuenca Williston de Montana y North Dakota, (4) el descubrimiento de un campo nuevo en el Golfo de Suez, en una zona difícil para la exploración sísmica y (5) el uso exitoso en la evaluación de prospectos en la zona de las islas Shettard y Aebrides.

En general los desarrollos en la instrumentación (navegación con GPS, nuevos magnetómetros de mayor sensibilidad, etc), procesado y diseño de metodologías de trabajo de campo han permitido incrementar la resolución de los estudios aeromagnéticos. Estos desarrollos, aunados a los bajos costos y economía en tiempo, han permitido que los métodos aeromagnéticos sean herramientas atractivas para la industria petrolera.

La tierra presenta un campo magnético interno cuyas propiedades físicas son útiles en muchos casos, ya que el campo se distorsiona particularmente sobre las zonas de mineralización y sobre algunos tipos de estructuras geológicas. Estas anomalías magnéticas son de gran ayuda pues nos proporcionan información de

trascendente importancia para la localización de recursos minerales y energéticos y para investigar el subsuelo.

El desarrollo de la tecnología de la prospección Aeromagnética que se inició después de la Segunda Guerra Mundial, se ha aplicado con fines petroleros, obteniendo de ésta, la información necesaria para poder determinar la profundidad de rocas cristalinas del basamento que sirven de base a las formaciones de rocas sedimentarias. Este hecho ha permitido usar a la Prospección Magnética como una herramienta importante para evaluar cuencas sedimentarias.

Para poder obtener la carta magnética de la Republica Mexicana, el primer paso fue llevar toda la información a un nivel común. Se escogió como nivel de referencia la altura de vuelo 3500 (m.s.n.m.) que fue muy cercana a la máxima altura usada en la República Mexicana. Las alturas de vuelo utilizadas en los diferentes levantamientos variaron desde 0 hasta 4000 (m.s.n.m.) ya que también se tienen datos en el mar.

Con la finalidad de llevar información aeromagnética a un plano común se utilizaron diferentes operadores de continuación analítica. El proceso permite trasladar matemáticamente la información del plano en que se recabó la información al plano de referencia deseado. La ventaja de este procedimiento es que no es necesario llevar a cabo nuevamente el levantamiento de campo, sino que se procesa la información. Para ello se diseñaron operadores matemáticos que trabajan sobre un reticulado específico; después de hacer pruebas, se escogió como retícula óptima la de 2 km pues el objetivo es ver anomalías de 2 km. en adelante. El operador consistió en un punto central y 19 anillos.

Investigaciones acerca de los operadores de continuación analítica permiten obtener buenos resultados. Los errores cometidos al aplicar los operadores no son de más del 10%. En este estudio se consideró expresar el operador ideal en

el dominio del número de onda y transformarlo al dominio del espacio y de este modo no perder información durante el filtrado. Los errores calculados con datos sintéticos no rebasan el 1%.

Una vez que todos los prospectos fueron normalizados a una misma altura de vuelo, el segundo paso consistió en pasar la información de coordenadas U.T.M. a coordenadas Lambert que son las utilizadas en áreas cuya longitud es mayor en la dirección Este-Oeste.

Para finalmente integrar la información de todos los prospectos, y minimizar problemas en la unión de los mismos, se utilizaron programas de interpolación polinomial. Un aspecto importante adicional es contar con la información aeromagnética en forma digital, permitiendo procesarla en forma particular

La Figura VI-1 muestra la carta aeromagnética de la República Mexicana. Esta es particularmente útil porque permite identificar patrones de anomalías magnéticas que, junto con información geológica y otros datos geofísicos adicionales, como la gravimetría, permiten realizar estudios de interpretación con diferentes enfoques (petrolero, minero, tectónico etc.) en áreas limitadas.

II ANTECEDENTES

Los datos presentados en el mapa de anomalías magnéticas en áreas del continente americano provienen de mapas fuentes ya publicados (Hinze, Hood y el "Committee for the Magnetic Anomaly Map of North América", 1988). La mayor parte de los datos fueron digitizados y sujetos a varios procesos para poder ser integrados. Los datos de las áreas marinas son digitales excepto en el Golfo de México, Mar Caribe y Alaska donde los datos fueron obtenidos de mapas digitizados.

Aproximadamente un 70% del territorio de Canadá está cubierto magnéticamente y la mayoría de los datos, excepto, en áreas montañosas y de costa han sido observados con parámetros de vuelo específicos como: líneas de vuelo espaciadas 800 m y altura de vuelo de 300 m.s.n.m. Las líneas aeromagnéticas de control fueron voladas por el Geological Survey of Canada (GSC) y la National Aeronautical Establishment of the Canadian National Research Council para proporcionar datos que resolvieran problemas de nivel en el sur de Canadá región de James Bay y para verificar datos de nivel en la región del Caribe. También el (GSC) efectuó nuevos vuelos de reconocimiento en los Lagos Ontario, Erie y el Lago de los Bosques, incluyendo porciones de Estados Unidos de América por acuerdo con el Geological Survey (USGS). La mayoría de los datos Canadienses fueron obtenidos digitizando los contornos en mapas que muestran las líneas de vuelo y sus cruces originales. Esa irregularidad en la distribución de los datos fue puesta para su uso en una malla con espaciamiento de 812.8 m y una escala de 1:1,000,000 y transformada a una malla de 2 km para el plano de Norte América.

Los datos de anomalía magnética de Estados Unidos de América no fueron obtenidos con tanto detalle como los datos Canadienses. Los datos fueron originalmente recopilados a mano a una escala de 1:1,000,000 de 700 mapas de anomalía magnética propiedad de la USGS. Las líneas de vuelo aeromagnéticas variaron mucho en dirección, altitud y espaciamiento, las observaciones fueron hechas con elevaciones de 300 m.s.n.m. y otras elevaciones diferentes y con espaciamientos de 1.6 km o menos. Los contornos de la mitad oriente fueron digitizados con intervalos de 200 gammas del mapa GP954A a escala 1:2,500,000, y para la mitad poniente, los contornos fueron digitizados a 100 gammas del mapa GP977 a escala 1:1,000,000. Los datos de Alaska fueron

obtenidos de la digitización del mapa GP954B, contornos cada 200 gammas y escala de 1:2,500,000.

Los mapas de anomalías fueron elaborados usando una base de datos recopilada de 1975-1981 por el Department of Energy's National Uranium Resource Evaluation Program, el cual cubrió casi todo el país. Los datos aeromagnéticos fueron reducidos utilizando la versión actualizada del Campo Geomagnético de Referencia Internacional (IGRF) de 1975. Desafortunadamente, estudios subsecuentes a la preparación del mapa de Estados Unidos mostraron que este campo de referencia dejó un gradiente regional en los datos de anomalía de varios cientos de gammas incrementándose positivamente del sureste al noroeste a través del mapa. Así en la recopilación del plano de Norte América, el original (IGRF) fué nuevamente agregado a los datos, y el Campo Geomagnético de Referencia Definitivo (DGRF) fue quitado. Como resultado, la gran longitud de onda de la anomalía que se incrementaba de sureste a noroeste fue eliminada. Similarmente se usó el apropiado DGRF para reducir los datos de Canadá y Alaska. Las tres series de datos que forman el núcleo del mapa fueron unidos con un mínimo ajuste en proporción a la escala e intervalo de contornos del mapa. Sin embargo existieron algunas excepciones como en la unión de la parte noreste de Estados Unidos con New Brunswick donde la diferencia fué de 70 gammas. En Alaska el ajuste fué de 150 gammas. Para completar el plano también fueron anexados los datos de Groenlandia y la capa de hielo de Groenlandia en un convenio entre el GSC y el Geological Survey of Greenland (GSG). Todos los datos fueron puestos en malla con espaciamiento de 2 km empleando el método de mínima curvatura en la proyección transversal de Mercator con un meridiano central de 100 grados oeste, un factor de escala de 0.926 y un radio de la tierra de 6,371,204 km.

Para realizar la integración magnetométrica de la República Mexicana se tomó muy en cuenta la metodología utilizada en la integración de Norte América, aunque en nuestro caso fue necesario implementar una nueva metodología, ya que los datos proporcionados por Petróleos Mexicanos fueron recopilados con alturas de vuelo muy variables de 0 m.s.n.m. hasta 4000 m.s.n.m.

La integración para Norte América fue digitizada de planos a escalas 1:000,000 y 1:2,500,000 e intervalos de contornos desde 100 gammas hasta 200 gammas por lo que no es muy confiable para trabajos de interpretación de áreas pequeñas, en cambio para la República Mexicana los planos fueron digitizados de planos a escalas 1:50,000, 1:100,000 y 1:200,000 con intervalos de contornos de 2 gammas a 5 gammas y la información restante fue tomada de cintas magnéticas con la información original de vuelo.

Los datos aeromagnéticos de Norte América fueron reducidos utilizando un solo IGRF, en cambio los datos de México fueron reducidos utilizando el IGRF del mes y año en que fueron observados.

Cabe mencionar que del plano aeromagnético de la República Mexicana, si se requiere extraer información de una pequeña porción, ésta es obtenida con una alta confiabilidad para ser utilizada en interpretación.

La información de Norte América es muy útil para estudios muy regionales, en cambio la información de la República Mexicana se puede utilizar tanto para trabajos regionales como para trabajos locales.

En México aparte de Petróleos Mexicanos el Consejo de Recursos Minerales así como algunas compañías mineras han hecho estudios aeromagnéticos en:

- Parte Sur de la República: en porciones aisladas de Oaxaca, Guerrero y Michoacán.
- Parte Oeste de la República Mexicana: en la zona del pacífico de Lázaro Cárdenas a Hermosillo.
- Parte Central de la República Mexicana: Pachuca, Norte de Guanajuato, porciones de aguascalientes, San Luis Potosí, Zacatecas y Durango.

- Parte Norte de la República Mexicana: porciones de Coahuila, Nuevo León, Chihuahua y Durango.
- Parte NW de la república Mexicana: porciones de Sonora y Baja California Norte.

Todos estos estudios aeromagnéticos estan encausados a trabajos de minería.

III. CONCEPTOS DE CAMPO Y PRINCIPIOS BASICOS DEL POTENCIAL GRAVIMETRICO Y MAGNETICO.

Gobernadas por las mismas ecuaciones fundamentales, las técnicas en trabajos gravimétricos y magnéticos son sin embargo diferentes.

En física, el espacio y el tiempo se toman como continuos, de esta manera los campos han sido generalmente asociados con fuerzas continuas, variando fácilmente de cualquier punto en el espacio o tiempo hasta puntos vecinos (fig. III.1).

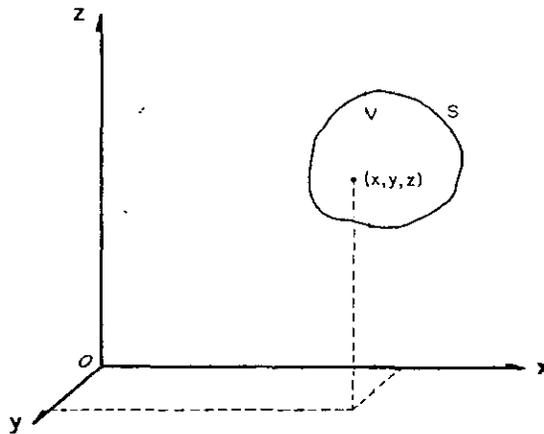


Fig. III.1 Representación de campo.

En general los campos pueden ser escalares o vectoriales:

Campo Escalar. Si en cada punto (x,y,z) de una región R del espacio se le puede asociar un escalar $\varphi(x,y,z)$, hemos definido un campo escalar φ en R . La función φ depende del punto y , por ello se llama función escalar de posición o bien, función de punto escalar.

Campo Vectorial. Si en cada punto (x,y,z) de una región R del espacio se le puede asociar un vector $\mathbf{V}(x,y,z)$, hemos definido un campo vectorial \mathbf{V} en R . La función \mathbf{V} depende del punto y , por ello se llama función vectorial de posición, o bien función de punto vectorial.

Potencial Magnético.- De la misma manera que en el espacio que rodea a una masa se forma un campo gravitatorio, en el espacio que rodea a un conductor (fig.III.2) por el que circula una corriente eléctrica, se forma un campo llamado campo magnético.

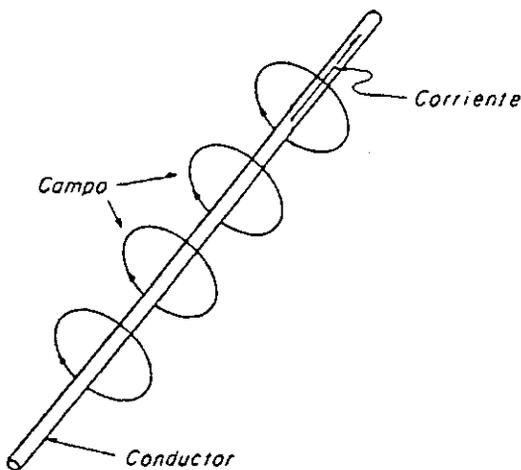


Fig.III.2 Campo causado por una corriente

Este campo magnético se manifiesta por las fuerzas que actúan sobre los conductores que se introducen en él (fig. III.3) y por los cuales circula una corriente eléctrica.

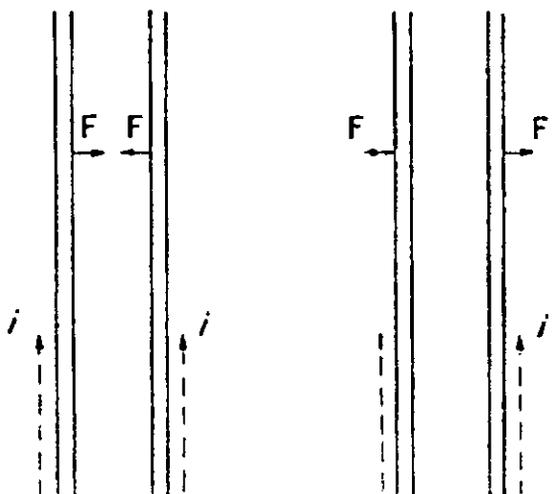
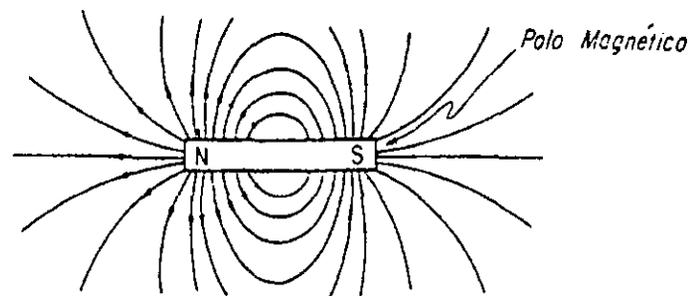


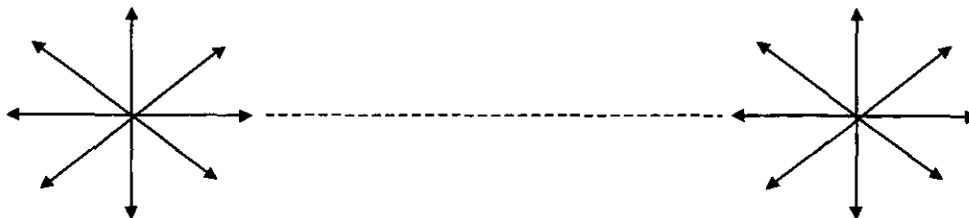
Fig. III.3 Acción mutua de corrientes eléctricas

Al iniciarse la investigación del magnetismo, se pensó que las causas de la interacción magnética entre corrientes eléctricas eran diferentes a la de la interacción entre imanes. Ampere enunció su hipótesis de que los fenómenos eran similares y que en el interior de los imanes existen pequeñas corrientes cerradas.

Los experimentos con imanes de tipo de barra, muestran que las líneas de fuerza entran y salen sobre todo cerca de los extremos de la barra (fig. III.4). Esta circunstancia condujo a la noción de la existencia de dos polos (norte y sur) en los imanes.



Campo de un Imán Recto



Campo de dos Cargas Magnéticas Puntiformes
Fig. III.4

En base a numerosos estudios (Von Wrede, 1843) podemos decir que la Tierra se comporta como un gran imán y la dirección e intensidad del campo magnético varía considerablemente de un punto a otro de la superficie terrestre.

III.1 Fuerza Magnética

La expresión para la fuerza magnética se obtiene de la ley de Coulomb para polos magnéticos y simbólicamente es casi idéntica a la Ley de Newton de fuerza de gravedad. La expresión es:

$$F = C \frac{PP_0}{r^2}$$
$$\vec{F} = C \frac{PP_0}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} = C \frac{PP_0}{r^3} \vec{r}$$

(\vec{r} = vector unidad dirigido de P a P_0)

donde, usando unidades electromagnéticas en el sistema *cgs*, F es la fuerza en dinas sobre P_0 , r es la distancia entre P y P_0 en cm., C es una constante de proporcionalidad ($C = 1/\mu$, μ es la permeabilidad magnética del medio que rodea los imanes; es una cantidad adimensional cuyo valor es prácticamente 1 en el aire), y P y P_0 es la intensidad magnética de cada polo.

Se define como unidad de intensidad magnética ó unidad de polo (en el sistema c.g.s.), la intensidad de dos polos magnéticos que a la distancia de 1 cm., en un medio no magnético, tal como el aire, se repelen con la fuerza de una dina. A diferencia de la gravedad, en la cual la fuerza es siempre de atracción, la fuerza magnética es de atracción si los polos son de signos opuestos, y repulsiva si lo son del mismo. La convención del signo adoptada, es que un polo positivo o polo norte es aquel que es atraído hacia el polo norte magnético terrestre y un polo negativo o polo sur es aquel que es atraído hacia el polo sur magnético terrestre.

Un imán es pues un dipolo magnético a semejanza de los dipolos eléctricos, pero existe una diferencia radical entre ellos; en un dipolo eléctrico podemos separar las dos cargas que forman el dipolo, obteniéndose así dos cargas libres, mientras que si un imán lo dividimos, obtenemos dos imanes cuyos polos tienen la misma intensidad que los polos del imán primitivo. No existen, por lo tanto polos magnéticos libres. Sin embargo, si consideramos un imán de gran longitud y muy fino, puede hablarse de polos magnéticos puntiformes. (fig. III.4)

III.2 Intensidad de Campo Magnético (H)

Una cantidad más práctica que la fuerza, es la intensidad de campo magnético existente en un punto en el espacio, resultado de un polo de intensidad P localizado a una distancia r de él. La intensidad de campo magnético H se define como la fuerza por unidad de intensidad de polo que se ejercería cuando un pequeño polo de fuerza P_o se coloca en dicho punto:

$$H = \frac{F}{P_o} = C \frac{PP_o}{P_o r^2} = C \frac{P}{r^2}$$

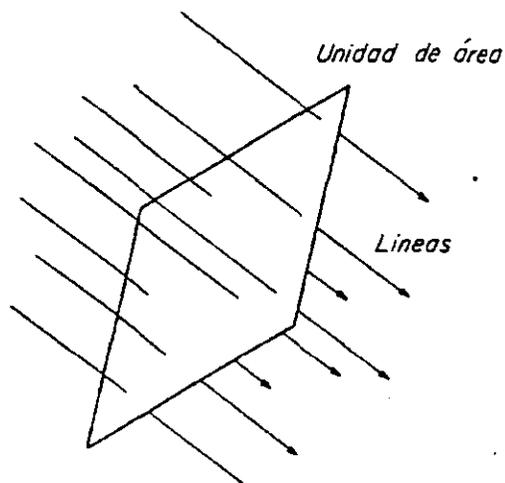
La unidad de campo magnético, en el sistema c.g.s, es el Oersted, que se define como el campo creado por un polo magnético de intensidad unitaria a 1 cm de distancia. El Oersted también se define como el número de líneas de fuerza por centímetro cuadrado que cruzan una sección perpendicular a la dirección de las líneas (fig. III.5).

En Geofísica se utiliza como unidad la Gamma (γ), que corresponde a 10^{-5} Oersteds, ya que el Oersted resulta una unidad demasiado grande para fines prácticos.

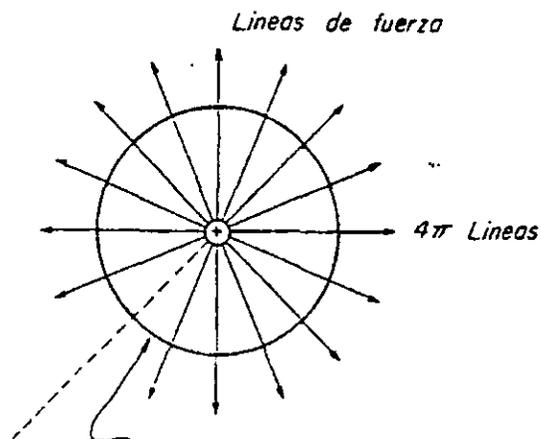
III.3 Momento Magnético (\vec{M})

Se define como momento magnético de un dipolo el vector $\vec{M} = P\vec{r}$; siendo \vec{r} el vector de posición del polo magnético positivo respecto del negativo. Para un dipolo elemental se tendrá su momento magnético elemental:

$$d\vec{M} = P d\vec{l} = P d\vec{r}$$



Flujo por unidad de Area



Flujo de una Masa Magnética Unitaria

Fig. III.5

III.4 Intensidad de Magnetización (J)

Si los materiales expuestos a un campo inductor son moderadamente magnéticos y el campo poco fuerte, como los que se presentan en trabajos Geofísicos, la magnetización estará en la dirección del campo aplicado y su intensidad será proporcional a la intensidad del campo inductor:

$$\begin{aligned} \vec{J} &\propto \vec{H} \\ J &= KH \end{aligned} \quad (12)$$

donde "K" es la susceptibilidad magnética del material.

La intensidad de magnetización se define como el momento magnético por unidad de volumen, esto es:

$$J = \frac{M}{V}$$

El grado en que el cuerpo es magnetizado, está determinado por su SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA K. La susceptibilidad es el parámetro fundamental en prospección magnética, puesto que la respuesta magnética de

rocas y minerales está determinada por la cantidad de materiales magnéticos en ellos. La susceptibilidad de varios materiales se muestra en la tabla III.1. Sheriff (1991)

III.5 Inducción Magnética (B)

La acción mutua entre polos magnéticos o imanes dependen de las propiedades del medio circundante. Esto se debe a que dicho medio se magnetiza bajo la acción del campo generado por los polos, convirtiéndose a su vez en fuente de un campo magnético que da lugar a la aparición de fuerzas adicionales. Por lo anterior, la intensidad de campo magnético en un punto no es igual si éste se encuentra en el vacío que si se encuentra en el interior de un cuerpo magnetizado. Se define inducción magnética como el campo total en el interior de un cuerpo magnetizado.

El valor medio del campo en un punto se compone del campo H generado por los polos magnéticos y del campo creado por la magnetización de intensidad J denominado H' por lo tanto:

$$B = H + H' = H + 4 J \pi$$

combinando esta ecuación con (12) obtenemos:

$$B = (1 + 4K\pi) H$$
$$B = H \mu$$

donde μ es la permeabilidad magnética del material, la cual se define como la facilidad que tiene una substancia para magnetizarse o permitir el paso del flujo magnético, y es igual a $1 + 4K\pi$.

		Susceptibilidad x 10⁶ emu				Susceptibilidad x 10⁶ emu	
TIPO		RANGO	PROMEDIO	TIPO		RANGO	PROMEDIO
SEDIMENTARIAS				IGNEAS			
Dolomita		0 - 75	10	Granito		0-4000	200
Caliza		2-280	25	Riolita		20-300	
Arenisca		0-1660	30	Augita-Sienita		2700-3600	
Pizarra		5-1480	50	Olivino-Diabasa			2000
METAMORFICAS				Diabasa		80-13000	4500
Anfibolita			60	Gabro		80-7200	6000
Esquisito		25-240	120	Basalto		20-14500	6000
Gneiss		10-2000		Piroxenita			10 500
Cuarcita			350	Diorita		50-10000	7000
Serpentina		250.1400		Andesita			13 500
Grafito			-8	Pirita		4-420	130
Hematita		40-3000	550	Limonita			220
Cuarzo			-1	Cromita		240-9400	600
Calcita		-0.6- -1		Sal de Roca			-1
Calcopirita			32	Pirrotita		10 ² - 5 x 10 ⁵	125000
Casiterita			90	Magnetita		10 ² - 1.6x10 ⁵	5x10 ⁵

TABLA III.1

**SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA DE VARIAS
ROCAS Y MINERALES**

III.6 El Campo Geomagnético

Las propiedades del campo geomagnético son muy importantes en muchos aspectos. Sufre distorsiones sobre las zonas mineralizadas y sobre algunos tipos de estructuras geológicas; esta distorsión es la que nos da información para la localización de recursos naturales.

El carácter de este campo es similar a aquel que genera una esfera uniformemente magnetizada (fig. III.6) o al de un potente imán dipolar colocado cerca de la Tierra.

El campo geomagnético, de acuerdo a los estudios realizados por Gauss (1971) quien fue el primero en describir la distribución del campo magnético terrestre en una forma matemática precisa, está constituido por dos partes, de las cuales la primera se origina en el interior de la Tierra (campo interno) y presenta un 94% del total (fig. III.7), mientras que el resto es atribuida a fuentes extraterrestres (campo externo). Esta fuente exterior se cree sea debida al efecto inductivo de corrientes eléctricas que circulan en la ionosfera, dicha actividad afecta la ionización y parece explicar las tormentas magnéticas y las auroras boreales; los cambios y efectos que sufre son rápidos y en períodos de tiempos cortos, son conocidos como variaciones magnéticas diarias o variación diurna y deben ser tomadas en cuenta en las correcciones.

El campo interno no es constante, es decir, está variando lentamente debido tal vez, a los cambios en las corrientes que fluyen en el interior de la Tierra. Estos cambios producen la variación secular.

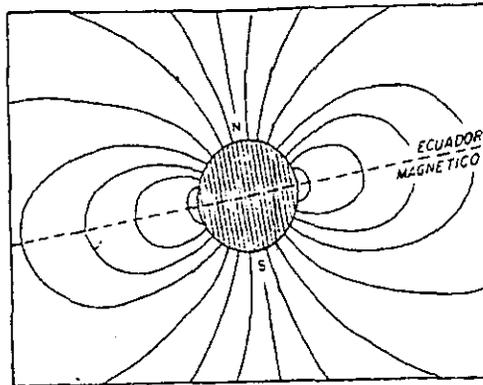


Fig. III.6 Campo de una Esfera Uniformemente Magnetizada

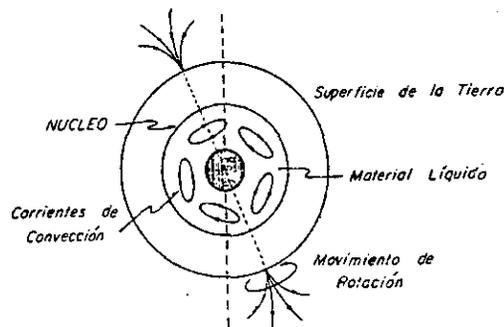


Fig. III.7 Origen del Campo

III.7 Componentes del Campo Geomagnético

Debido a la desviación que existe entre el eje geográfico y el eje geomagnético, los aparatos de medición han sido diseñados para medir únicamente la componente vertical u horizontal del campo, ya que la magnitud y la dirección que tiene éste en cualquier punto sobre la superficie terrestre, puede ser representada por un vector paralelo a la dirección del campo total.

La (figura III.8) representa las componentes del campo, en donde:

F = vector intensidad total

H = componente horizontal

V = componente vertical

x = componente norte

y = componente este

D = declinación (ángulo formado por x y H)

I = inclinación (ángulo de buzamiento de F)

En prospección aeromagnética se utilizan principalmente F y V , y en algunas ocasiones V , H , D e I .

Los elementos anteriores los relacionamos por medio de las siguientes razones trigonométricas:

$$F^2 = H^2 + V^2, \quad H^2 = x^2 + y^2$$

$$x = H \cos D, \quad y = H \sin D$$

$$V = H \tan I, \quad F = H \sec I$$

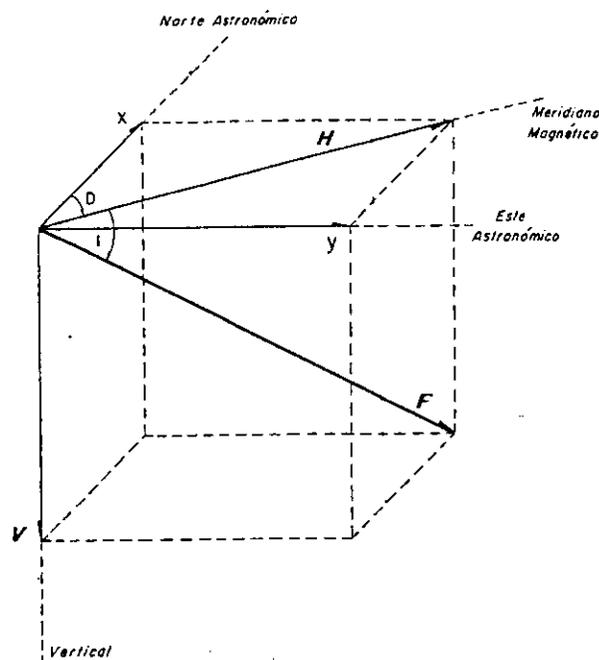


Fig. III.8 Componentes del Campo.

III.8 Correcciones

Debe quedar claro que el objetivo de la prospección magnética es el de registrar la parte anómala del campo, por lo que será necesario efectuar previamente una serie de correcciones para llegar finalmente a la obtención de los valores con los que se efectuará la configuración del plano de Intensidad Magnética Total.

En esta discriminación de información debe ponerse especial cuidado tratando de preservar la respuesta más fiel de las anomalías regionales, producidas generalmente como respuesta de las estructuras basamentales, las cuales en prospección petrolera son muy importantes, a diferencia de las anomalías locales, las cuales corresponden a estructuras más superficiales y con un mayor interés minero.

III.8.1 Corrección por Variación Diurna

Se procede a elegir una hora determinada para la cual se van a reducir todos los valores obtenidos, como si se hubieran obtenido todos estos valores a esta hora, así de acuerdo a las variaciones que presente el registro de variación diurna, el cual depende del tiempo, se restarán o sumarán estas variaciones para reducir los valores observados a una misma hora. La magnitud de esta variación oscila entre 10 y 100 gammas.

III.8.2 Corrección por Variación de Altura

Esta corrección consiste en ajustar los valores leídos a una altura de vuelo establecida, ya que durante el vuelo el avión sufre variaciones de altura.

III.8.3 Eliminación del Gradiente Regional

Esta corrección esta dentro de las correcciones llamadas normales, las cuales son efectuadas para eliminar la variación espacial de la intensidad del campo magnético, esto significa que los cambios continuos en magnitud y dirección que sufre el campo magnético según la posición en la superficie, no se comportan regularmente en función de la latitud, como ocurre en el caso de la gravedad, por

lo que para estas correcciones existen tablas o mapas publicados por los observatorios magnéticos.

IV FUNDAMENTACION TEORICA

IV.1 Ecuaciones de Campos Potenciales

En puntos fuera del volumen V , las integrales de volumen que representan las funciones potenciales $U(r)$ y $T(r)$, claramente satisfacen la ecuación:

$$\nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}$$

o bien $\nabla^2 U = 0$ para el campo gravitacional,
 $\nabla^2 T = 0$ para el campo magnético.

La expresión obtenida se denomina ecuación de Laplace y las funciones que la satisfacen en determinadas zonas son continuas junto con las primeras y segundas derivadas y se denominan funciones armónicas. Así pues, el potencial de atracción es una función armónica en todo el espacio no ocupado por masas atrayentes.

Si el punto atraído se halla en el interior del cuerpo atrayente, tanto las distancias $(\varepsilon-x)$, $(\eta-y)$ y $(\zeta-z)$, como r , pueden tender a cero. De ahí que la expresión de la integral en el límite toma la forma de una indeterminación. Para ilustrar esta indeterminación describamos alrededor del punto una esfera de radio finito, pero tan minúsculo que la densidad σ de la esfera pueda considerarse constante. Lógicamente la esfera habrá de hallarse por entero dentro del cuerpo. Entonces el potencial U puede representarse en forma de la suma:

$$U = U_1 + U_2$$

donde U_1 es el potencial de atracción de todo el cuerpo en el punto interior (centro de la esfera) y U_2 , el potencial de dicha esfera.

En virtud de que r nunca se anula para U_1 , esta es una función armónica y $\Delta U_1 = 0$.

Para determinar la función ΔU_2 , formemos las segundas derivadas de la expresión:

$$U = \frac{2}{3} G\pi\sigma(3R^2 - \rho^2) \text{ potencial en el interior de una esfera homogénea.}$$

según las coordenadas x, y, z que implícitamente entran en ella en función de ρ :

$$\frac{\partial U_2}{\partial x} = -\frac{4}{3}G\pi\sigma\rho\frac{\partial\rho}{\partial x} = -\frac{4}{3}G\pi\sigma(x - \xi)$$

$$\frac{\partial^2 U_2}{\partial x^2} = -\frac{4}{3}G\pi\sigma$$

Análogamente vemos que:

$$\frac{\partial^2 U_2}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 U_2}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 U_2}{\partial z^2} = -\frac{4}{3}G\pi\sigma$$

Sumando las segundas derivadas y teniendo en cuenta que $\Delta U_1 = 0$, tenemos que:

$$\Delta U_2 = \Delta U = -4G\pi\sigma$$

La expresión obtenida, que vincula las segundas derivadas del potencial de atracción dentro de la zona de masas atrayentes, se denomina ecuación de Poisson.

Por consiguiente, el potencial de atracción y todas sus derivadas, si están dadas en cierta región del espacio fuera de las masas atrayentes, son funciones armónicas en todo el espacio libre de las mencionadas masas. En determinados puntos de la zona de las masas atrayentes, bien la propia función armónica, bien sus derivadas pierden su continuidad, es decir no son armónicas. Estos puntos en los que la función armónica pierde sus propiedades armónicas, se denominan singulares.

IV.2 Continuación Analítica de un Campo

Al trasladar el campo medido en la superficie del terreno o a un determinado nivel de altura (este último sería el caso de mediciones en vuelos aéreos) a un nuevo plano de referencia, se supondrá que en el espacio comprendido entre ambos niveles se dan las condiciones físicas para que se cumpla la ecuación:

$$\nabla^2[\Delta U(x, y, z)] = 0 \quad (1)$$

siendo $\Delta U(x, y, z)$ el potencial del campo de fuerzas en estudio, ya sea éste un campo potencial magnético. Dichas condiciones son, para el caso de su estudio gravimétrico, que no haya masa gravitatoria alguna en el espacio mencionado; para el caso de un estudio magnetométrico, el

campo tiene que ser estático y no tienen que existir en el espacio considerado corrientes libres o inducidas (Landau y Lifshitz, 1951).

En aquellos casos en que la prolongación analítica implique atravesar fuentes de campo, se considerará a la aportación al campo por dichas fuentes como "ruido", ya sea al azar o coherente, y se tratará de eliminarlo mediante una operación óptima de filtro.

La componente de la anomalía de intensidad total en la dirección del campo normal terrestre esta dada por:

$$\Delta \vec{T} = - \frac{\partial(\Delta U)}{\partial a} \vec{i} \quad (2)$$

donde \vec{i} es el vector unitario en la dirección de \vec{T} . Aplicando el operador ∇^2 en cada lado de la ecuación anterior, tenemos

$$\nabla^2(\Delta T) = -\nabla^2 \frac{\partial(\Delta U)}{\partial a} = - \frac{\partial}{\partial a} \nabla^2(\Delta U) = 0 \quad (3)$$

El intercambio del orden de diferenciación es permitido puesto que ΔU y sus derivadas son continuas. De éste modo está establecido que ΔT satisface la ecuación de Laplace y está, por consiguiente, sujeto a los métodos de teoría del potencial.

Usando la segunda fórmula de Green es posible deducir un operador para obtener el campo de fuerzas en un plano superior al plano en donde los datos fueron tomados (Henderson y Zietz, 1949) (fig. III.1).

Para deducir el operador se tratará con dos funciones:

- 1) $U(x, y, z)$ que representa el campo anómalo y
- 2) $W(x, y, z)$ función auxiliar que se seleccionará en forma adecuada

El teorema de Green establece que si U y W son funciones continuas dentro de un volumen V , con primeras y segundas derivadas parciales que son ambas continuas e integrables, entonces

$$\int_V (U \nabla^2 W - W \nabla^2 U) d^3 r_0 = \int_S \mathbf{n} \cdot (U \nabla W - W \nabla U) d^2 r_0 \quad (4)$$

donde $d^3 r_0$ es el elemento diferencial de volumen,
 $d^2 r_0$ es el elemento diferencial de superficie,
 \mathbf{n} es el vector unitario normal a la superficie s ,

la superficie S encierra el volumen V . Las limitaciones impuestas a U y W , se satisfacen si hacemos que U sea el potencial gravitacional debido a las masas encerradas en V , y W sea la función de la forma $1/r - r_0$ / $= 1/R$, donde r es el

vector de posición de un punto P exterior a V y r_o es el vector de posición de un punto Q en el interior de V .

Sabemos que para cualquier punto P fuera del Volumen V , U es igual a:

$$U(r) = -G \int_v \frac{\rho(r_o) d^3 r_o}{r - r_o} \quad (5)$$

y en el interior de V .

$$\nabla^2 U(r_o) = 4\pi G \rho(r_o)$$

Por consiguiente, substituyendo $\rho(r_o)$ de la ecuación anterior en (5), encontramos que:

$$U(r) = -\frac{1}{4\pi} \int_v \frac{\nabla^2 U(r_o) d^3 r_o}{r - r_o} \quad (6)$$

Puesto que P está situado fuera de V , $\nabla^2 W = 0$ por doquiera, por lo tanto la ecuación (4) se reduce a:

$$-\int_v W \nabla^2 U d^3 r_o = \int_s (U \frac{\partial W}{\partial n} - W \frac{\partial U}{\partial n}) d^2 r_o \quad (7)$$

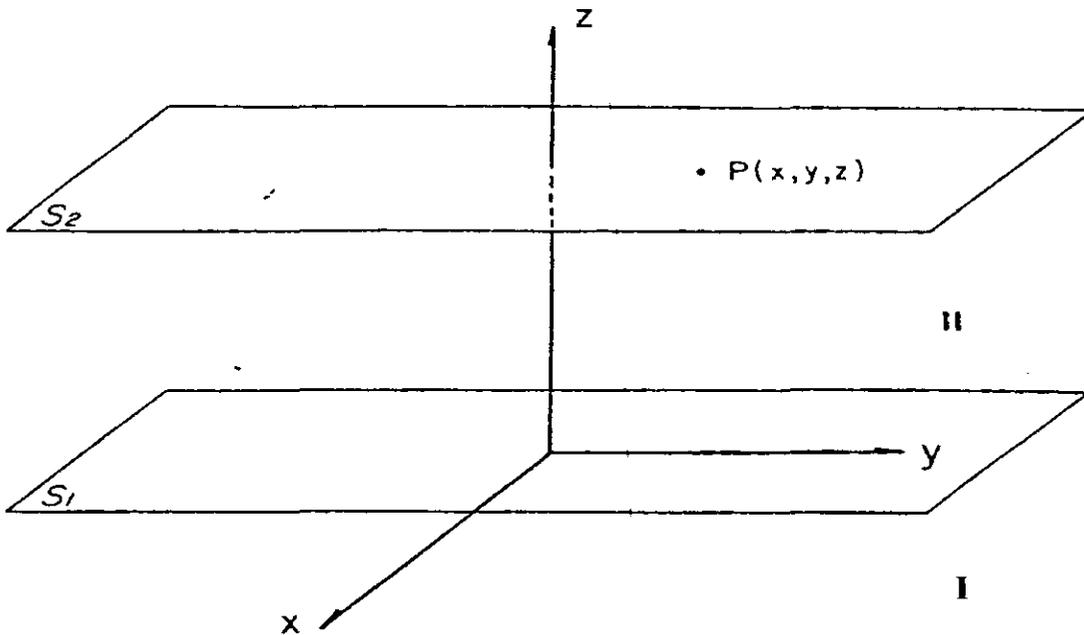
ya que $\mathbf{n} \cdot \nabla U = \frac{\partial U}{\partial n}$. Como $W = 1/(r - r_o)$, entonces:

$$-\int_v \frac{\nabla^2 U(r_o)}{r - r_o} d^3 r_o = \int_s (U \frac{\partial W}{\partial n} - W \frac{\partial U}{\partial n}) d^2 r_o \quad (8)$$

Comparando (6) y (8) obtenemos

$$U(r) = \frac{1}{4\pi} \int_s \left[U \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{R} \right) - \left(\frac{1}{R} \right) \frac{\partial U}{\partial n} \right] d^2 r_o \quad (9)$$

Ahora, si suponemos que toda la masa está dentro de una región finita del semiespacio $z > 0$, podemos hacer que s llegue a ser un hemisferio muy grande en $z < 0$ cerrado por el plano $z = 0$ (fig. IV.2). Si el radio se hace bastante grande, el integrado en (9) decrece como R^{-3} en todos los puntos sobre la superficie curva de S .



Considérese el plano S_1 donde fueron hechas las observaciones del campo;

- (I) es el semiespacio inferior, en donde están alojadas las fuentes del campo,*
- (II) es el semiespacio superior que contiene al plano S_2 paralelo al plano S_1 y en cuyos puntos se tratará de estimar el valor del campo medido en el plano S_1 .*

Fig. IV.1 Disposición del nuevo nivel de referencia frente al original

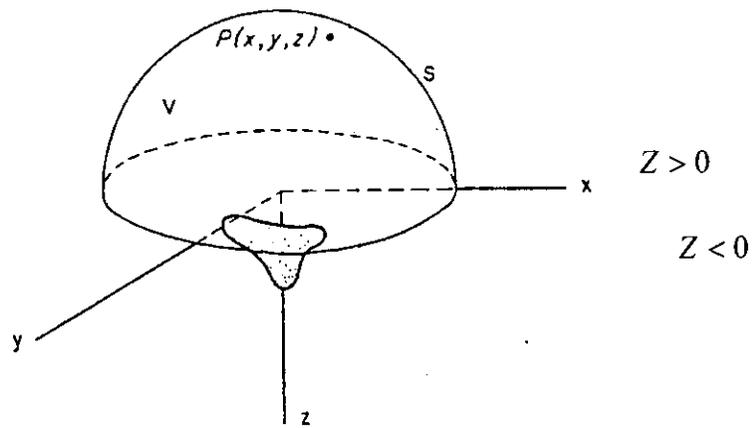
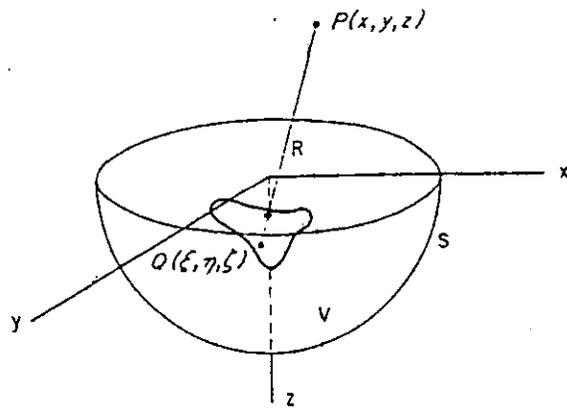


Fig. IV.2 Teorema de la continuación.

Integrando (9) sobre el hemisferio limitado por el plano $z=0$

$$\frac{1}{4\pi} \int_{s_1} \left[U \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{R} \right) - \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial n} \right] ds = \int_{z_1} \left[U \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{R} \right) - \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial n} \right] ds + \int_{z=0} \left[U \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{R} \right) - \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial n} \right] ds \quad (10)$$

El vector normal a la superficie, n , tiene la misma dirección del vector R en la superficie S , y sobre el plano $z=0$ tiene una dirección opuesta a ξ por lo tanto:

$$\int_{z=0} \left[U \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{R} \right) - \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial n} \right] ds = \int_{z=0} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial \xi} - U \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{R} \right) \right]_{\xi=0} ds \quad (11)$$

Tomando el límite $R \rightarrow \infty$ obtenemos:

$$U(r) = \frac{1}{4\pi} \lim_{R \rightarrow \infty} \left[\int_{s_1} \left(U \frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{1}{R} \right) - \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial R} \right) ds + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial \xi} - U \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{R} \right) \right]_{\xi=0} d\xi d\eta \right]_{z \leq 0} \quad (12)$$

Observamos que U decrece como R^{-1} , $\frac{\partial U}{\partial R}$ decrece como R^{-2} y

$$\left[U \frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{1}{R} \right) - \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial R} \right] \quad (13)$$

decrece como R^{-3} , por lo tanto:

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \int_{s_1} \left[U \frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{1}{R} \right) - \frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial R} \right] ds = 0 \quad (14)$$

$$U(r) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial \xi} - U \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{R} \right) \right]_{\xi=0} d\xi d\eta \quad z \leq 0 \quad (15)$$

donde $R = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2}$. Por otra parte, puesto que no hay masas en $z < 0$, $\nabla^2 U = 0 = \nabla^2 W$ por toda esta región, por consiguiente si cerramos a S sobre $z=0$ en vez de abajo, encontramos que la ecuación (6) resulta:

$$0 = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[U \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\frac{1}{R} \right) + \frac{1}{R} \left(\frac{\partial U}{\partial \zeta} \right) \right]_{\zeta=0} d\xi d\eta \quad (16)$$

Si sumamos (15) y (16) obtenemos

$$U(r) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{1}{R} \frac{\partial U}{\partial \zeta} \right]_{\zeta=0} d\xi d\eta \quad (17)$$

Puesto que U es el potencial gravitacional debido a la masa localizada en el interior de $z > 0$ podemos proponer

$$\frac{\partial U}{\partial z} = \Delta g(z) \quad (18)$$

por lo tanto:

$$U(r) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta g(\xi, \eta) d\xi d\eta \quad z \leq 0 \quad (19)$$

diferenciando la expresión anterior respecto a z , encontramos que:

$$\Delta g(r) = \frac{\partial U(r)}{\partial z} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{z \Delta g(\xi, \eta)}{R^3} d\xi d\eta \quad z \leq 0 \quad (20)$$

mostrando que si Δg es conocida por todas partes en $z=0$, podemos determinarlo en $z \leq 0$. El cálculo de Δg a cualquier nivel por encima del suelo por medio de la ecuación (20) se conoce como **continuación hacia arriba**, y consiste de una integración numérica directa de los datos de superficie.

IV.3 Transformación de la Continuación Analítica para Datos Digitizados

El propósito principal de esta transformación, es cambiar el operador implícito en la ecuación de continuación, para que pueda manejar datos en forma digital y de esta manera poder trasladar la información tomada en la superficie hacia diferentes niveles de observación, esto es:

$$\Delta T(x, y, 0) \rightarrow \boxed{\phi(x, y, h,)} \rightarrow \Delta T(x, y, h)$$

donde $\Delta T(x, y, 0)$ son los valores de la anomalía (datos de entrada).
 $\phi(x, y, h)$ operador de continuación analítica.
 $\Delta T(x, y, h)$ datos de salida.

Para nuestro caso, $\frac{z}{2\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}}$ = operador en forma analógica.

Convirtiendo a coordenadas cilíndricas la ecuación (20), las cuales son más convenientes para evaluación numérica, e introduciendo el valor constante $z=h$ podemos computar la anomalía ΔT ó Δg sobre algún plano S a una altura fijada h. Sobreponiendo una rejilla cuadrículada sobre la anomalía e interpolando los valores de ésta en cada esquina de la cuadrícula, podemos trabajar con $\Delta T(z)$ ó $\Delta g(z)$ que es el promedio de valores de la anomalía sobre un círculo de radio r. Tomando como centro cualquier esquina de la rejilla, una familia de "n" círculos concéntricos se hacen pasar a través de todas las esquinas de la cuadrícula como sea posible. Para cada círculo tendremos un valor del operador que multiplicado por el promedio de la anomalía nos dará una evaluación de la integral de la ecuación (20) (Henderson e Zietz 1949). Sin embargo, como se mencionó en un principio, para trabajar con datos digitizados, como lo requiere el proceso de continuación, es necesario modificar el operador analógico a uno que trabaje como un sistema digital.

Cabe mencionar que un sistema digital es aquel en que la información es almacenada y manipulada como una serie de números discretos tomados a intervalos uniformes de tiempo (Δt) o de frecuencia (Δw) y registrados como una secuencia de números, en combinación de dígitos binarios, en una cinta magnética.

Para la transformación del operador es necesario poner en función del intervalo de muestreo las variables del operador analógico, esto es:

$$\begin{array}{l} X \longrightarrow n \Delta \\ X \longrightarrow m \Delta \\ X \longrightarrow l \Delta \end{array} \quad \text{donde } \Delta = \text{intervalo de muestreo y } n, m, l \text{ son variables dadas en unidades de } \Delta.$$

Así tenemos que:

$$\begin{array}{l} z \quad 1 \\ 2\pi (x^2 + y^2 + z^2)^{3/2} \\ l\Delta \quad 1 \\ 2\pi \left[\Delta^2 (n^2 + m^2 + l^2) \right]^{3/2} \\ l\Delta \quad 1 \\ 2\pi (n^2 + m^2 + l^2)^{3/2} \Delta^3 \\ l \quad 1 \\ 2\pi (n^2 + m^2 + l^2)^{3/2} \end{array}$$

La última expresión nos representa al operador en forma digital.

Para procesos digitales, las integrales en la ecuación (20) se pueden aproximar en sumatorias y las diferenciales representar como intervalos, de esta manera si hacemos una evaluación de las sumatorias veríamos que debido al límite infinito de las mismas, es imposible llevarlo a la práctica y obviamente se tiene que truncar y en consecuencia la ecuación (20) nunca se podrá realizar en una computadora digital ya que tienen memoria finita.

De una manera gráfica tendríamos:

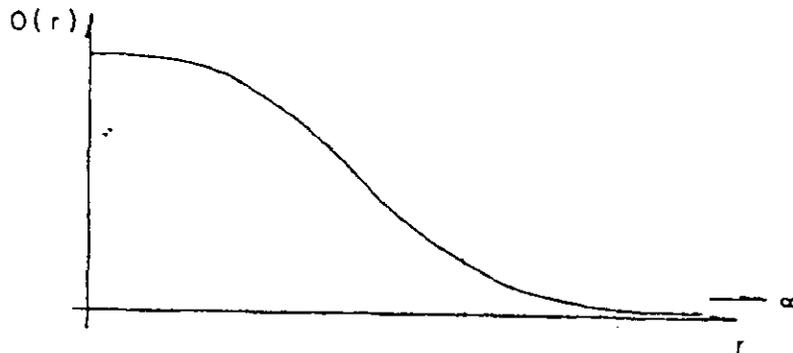


Fig. IV.9

observando que el extremo de la curva tiende al infinito produciendo un efecto llamado de "cola" que se origina precisamente por tener límites infinitos. Para evitar dicho efecto debemos controlar el número de muestras.

Sabemos por Análisis de Fourier que si se tienen N muestras en la información igualmente espaciadas a un intervalo $\Delta t = 2T/N$, el índice que controla la frecuencia toma los valores desde $k=0$ a $N/2$, siendo $N/2$ la muestra correspondiente a la frecuencia de Nyquist (frecuencia de doblado asociada al muestreo); de manera semejante debemos hacer intervenir el número de muestras en nuestro operador digital para poder computarlo en una computadora digital. Así, pasando el operador analógico al dominio del número de onda tenemos

$$\frac{z}{2\pi(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \xrightarrow{TF} e^{-2\pi\sqrt{(kx)^2 + (ky)^2}}$$

en forma digital, estará en función del intervalo de muestreo, así :

$$F(kx, ky) = e^{-2\pi[(kx)^2 + (ky)^2]^{1/2}} \quad (***)$$

$$\begin{array}{ll}
 k_x \longrightarrow n \Delta & \text{donde } \Delta k \text{ es el intervalo} \\
 k_x \longrightarrow m \Delta & \text{en frecuencia y } \Delta x \text{ es el} \\
 z \longrightarrow l \Delta & \text{intervalo de tiempo.}
 \end{array}$$

Recordando de procesamiento de datos que los parámetros N , Δx y Δk están relacionados de acuerdo a:

$$\begin{array}{ll}
 fs = \frac{1}{\Delta x} & \text{fs= frecuencia de muestreo} \\
 \Delta k \Delta x = \frac{1}{N} & \text{teorema fundamental de} \\
 & \text{procesado de datos.}
 \end{array}$$

Despejando Δk de la última relación y substituyendo los valores de k_x , k_y y z en ecuación (***)

$$\begin{aligned}
 F(n,m) &= e^{-2\pi i \Delta x \sqrt{(n\Delta k)^2 + (m\Delta k)^2}} \\
 &= e^{-2\pi i \Delta x \sqrt{(\Delta k)^2 (n^2 + m^2)}} \\
 &= e^{-2\pi i \Delta x \sqrt{n^2 + m^2} \Delta k} \\
 &= e^{-2\pi i \Delta x \left(\frac{\sqrt{n^2 + m^2}}{N \Delta x} \right)} \\
 F(n,m) &= e^{-2\pi i \left(\frac{\sqrt{n^2 + m^2}}{N} \right)}
 \end{aligned}$$

Aplicando la Transformada de Fourier a la última expresión obtendremos el operador de Continuación Analítica en forma digital.

IV.4 Función de Transferencia o Filtro

Como primer paso para iniciar la presente discusión se revisarán los conceptos de regional y residual .

Al igual que en un plano de anomalía de Bouguer, en un plano magnético generalmente se observan dos tipos de tendencias en la configuración correspondiente. Una de estas tendencias es uniforme y cubre grandes extensiones. A esta tendencia se le da el nombre de anomalía Regional y es provocada por los cuerpos grandes muy profundos como el basamento y sus irregularidades; producen anomalías suaves. Las otras tendencias de anomalía, tienen un carácter muy irregular y dan la impresión de definir alguna estructura.

Estas anomalías son llamadas residuales y son provocadas por estructuras locales y más someras con respecto al basamento.

El concepto regional - residual está ligado, invariablemente, a una longitud límite **L** que el responsable del análisis establecerá. Aquellas características del campo menores que **L** constituyen nuestro residual y las mayores nuestro regional.

IV.4.1 Filtros Digitales en El Dominio del Número de Onda

Cabe aclarar que las transformadas de Fourier en el dominio del tiempo y/o en el dominio de las frecuencias, son igualmente válidas para transformar la información del dominio del espacio (x) al dominio del número de onda (k), es decir, el tiempo en sismología es equivalente al espacio en gravimetría o magnetometría y la frecuencia al número de onda. El número de onda es igual al recíproco de la longitud de onda,

$$\lambda = \frac{1}{K}$$

donde

$$\begin{aligned}\lambda &= \text{Longitud de onda,} \\ K &= \text{número de onda}\end{aligned}$$

Los cuerpos profundos y el basamento, provocan anomalías de longitud de onda grande y número de onda pequeño, llamándoseles anomalías Regionales, y las estructuras someras dan como resultado anomalías de longitud de onda baja y alto número de onda denominadas Residuales.

Los filtros digitales dejan pasar solo ciertas longitudes de onda de acuerdo al diseño del mismo. Así tenemos filtros regionales y residuales. Un filtro regional deja pasar longitudes de onda grandes y discrimina las longitudes de onda baja, por el contrario, un filtro residual deja pasar solamente longitudes de onda pequeñas y elimina las altas. Un filtro de paso de banda deja pasar las longitudes de onda especificadas eliminando a las restantes.

El proceso de filtrado elimina las amplitudes de ciertas longitudes de onda de la función de entrada, de tal manera que la función de salida contiene solamente las longitudes de onda deseadas.

Para filtrar la información magnética o gravimétrica en el dominio espacial (dado que ésta se comporta dentro de ciertos límites en forma lineal) se aplica el proceso convolución cuya expresión en una dimensión es:

$$O(X) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x - \lambda)S(\lambda)d\lambda$$

$I(x)$ es la información de entrada,
 $s(\lambda)$ es el filtro,
 $o(x)$ es la información de salida.

Esta integral se conoce como la integral convolución, la cual se representa simbólicamente como:

$$o(x) = I(x) * s(x)$$

Para funciones bidimensionales, la convolución se lleva a cabo mediante la ejecución de la siguiente expresión:

$$o(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} I(x-\tau, y-\lambda) S(\tau, \lambda) d\tau d\lambda$$

Sin embargo en la práctica es muy difícil poder obtener una expresión matemática de los mapas geofísicos y aún cuando se tuviera, dicha ecuación sería casi imposible integrarla pues resultarían bastantes complicadas sus integrales, de tal manera que para implementar el filtrado espacial, digitalmente se aproximan las funciones que intervienen por una serie de impulsos discretos tomados a un intervalo de distancia uniforme, así la expresión de la convolución para señales muestreadas o discretas es:

$$o(x,y) = \sum_{\lambda=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} I(x-\tau\Delta x, y-\lambda\Delta y) S(\lambda\Delta x, \tau\Delta y) \Delta x \Delta y$$

Tal como se mencionó en el tema anterior, debido al límite infinito de las sumatorias, es imposible obtener una evaluación de las mismas en una computadora digital, ya que éstas tienen memoria finita, así que para simplificar el procedimiento y tener un control del número de muestras, los filtros digitales se pueden diseñar en el dominio del número de onda. Utilizando la técnica de la Transformada de Fourier se puede pasar del dominio del espacio al dominio del número de onda y viceversa. La transformada de Fourier Bidimensional está dada por:

$$f(x,y) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(kx, ky) e^{i(kxX+kyY)} dkx dky$$

$$F(kx, ky) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) e^{-i(kx+kyY)} dx dy$$

donde $f(x,y)$ define la información en el dominio del espacio (Transformada Inversa de Fourier) y $F(kx, ky)$ define la información en el dominio del número de onda (Transformada Directa de Fourier).

Los mapas tienen dimensión finita, de tal manera que los valores fuera de las orillas se consideran como cero. Por lo tanto el par de transformadas bidimensionales en forma digital quedan:

$$f(n, m) = \frac{1}{NM} \sum_{a=0}^{N-1} \sum_{\beta=0}^{M-1} F(a, \beta) e^{2\pi i (\frac{na}{N} + \frac{m\beta}{M})}$$

$$F(a, \beta) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{m=0}^{M-1} f(n, m) e^{-2\pi i (\frac{na}{N} + \frac{m\beta}{M})}$$

y la convolución:

$$O(n, m) = \sum_{a=0}^{N-1} \sum_{\beta=0}^{M-1} S(n-a, m-\beta) I(a, \beta)$$

donde:

N = número de muestras en la dirección X,
M = número de muestra en la dirección Y.

IV.4.2 Consideraciones para el Diseño y Filtrado Espacial

Sea cual fuere la función escogida para operar como filtro, al trabajar en el dominio del número de onda, la función de transferencia puede tener parte real e imaginaria, en cuyo caso el filtro actuará en amplitud y dirección, o únicamente poseer parte real o imaginaria. Sea $F(k)$ la función de transferencia del filtro, entonces:

$$F(k) = R(k) + I(k)$$

donde:

$R(k)$ es la componente real, y
 $I(k)$ es la componente imaginaria.

Los espectros de amplitud y fase están dados por:

$$|F(k)| = \sqrt{R^2(k) + I^2(k)} \quad y \quad \theta(k) = \tan^{-1} I(k) / R(k)$$

Durante el proceso de filtrado, los ángulos de fase de la señal de entrada y del filtro se suman, por lo tanto, si únicamente se quieren filtrar las amplitudes sin importar la fase, se deben diseñar filtros de fase cero para que las características de fase de entrada original no se alteren.

Un filtro de fase cero es aquel que posee únicamente armónicas coseno las cuales son funciones par en el dominio espacial.

Puesto que el filtro espacial se diseña con el fin de eliminar longitudes de onda indeseables manteniendo a la señal con el mínimo de distorsión, el primer paso es

conocer las longitudes de onda predominantes en el plano original. Una forma de determinar dichas longitudes consiste en trazar varios perfiles a través del plano y obtener sus espectros de amplitud. Una vez conocidas las longitudes de onda que deseamos enfatizar podremos diseñar el filtro más conveniente.

Para el proceso de continuación analítica, la función de transferencia o filtro es el mismo operador encontrado en el capítulo (III.3) puesto que la continuación analítica, además de utilizarse para la integración de datos aeromagnéticos, actúa como proceso de filtrado.

V ELABORACION DE LA CARTA AEROMAGNETICA DE LA REPUBLICA MEXICANA

V.1 Recopilación de la Información

La información de los prospectos proporcionado por Petróleos Mexicanos consistió en:

- Planos a diferentes escalas con la información de intensidad magnética total.
- Planos a diferentes escalas con la información de anomalía magnética.
- Cintas con la información de intensidad magnética total.

En la tabla V.1 se dan las características de los diferentes prospectos utilizados para configurar el mapa magnético de la República Mexicana y en la figura V.1 la ubicación de los mismos.

V.2 Procesamiento de la Información

Para trabajar un prospecto partiendo de la información recopilada se estableció una metodología para su Proceso (figura V.2).

- a) Si la información provenía exclusivamente de planos, esta fue reproducida y capturada por medio de la digitalización, generandose un archivo X, Y, Z.
- b) En caso de que la información proviniera de cintas entregadas por las compañías el trabajo fue más sencillo pues el proceso consistió en leer la información y generar el archivo X, Y, Z.
- c) Para prospectos, con parte de la información en planos y la otra parte en cintas el proceso para obtener el archivo X, Y, Z. consistió en una combinación de los dos anteriores.

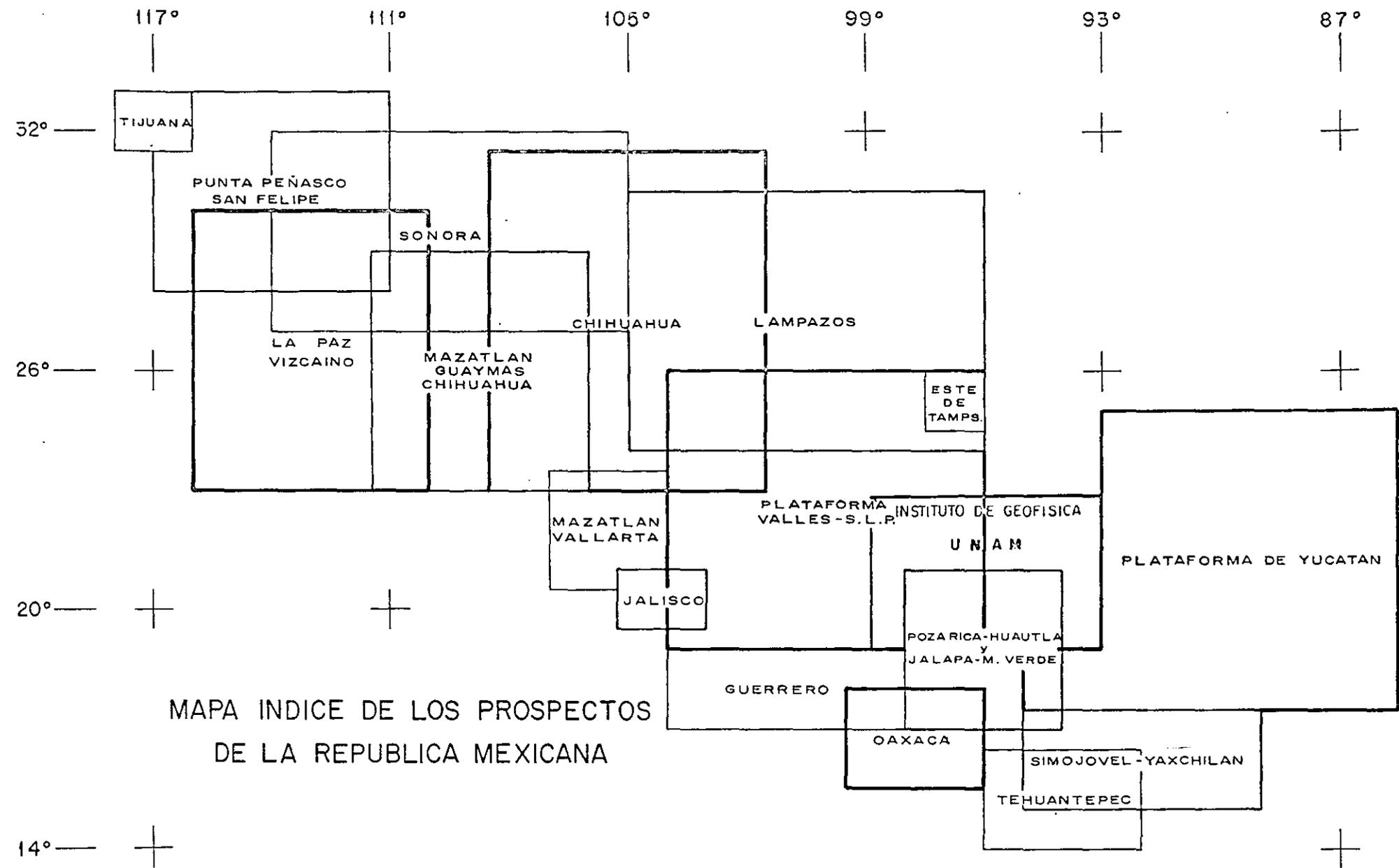
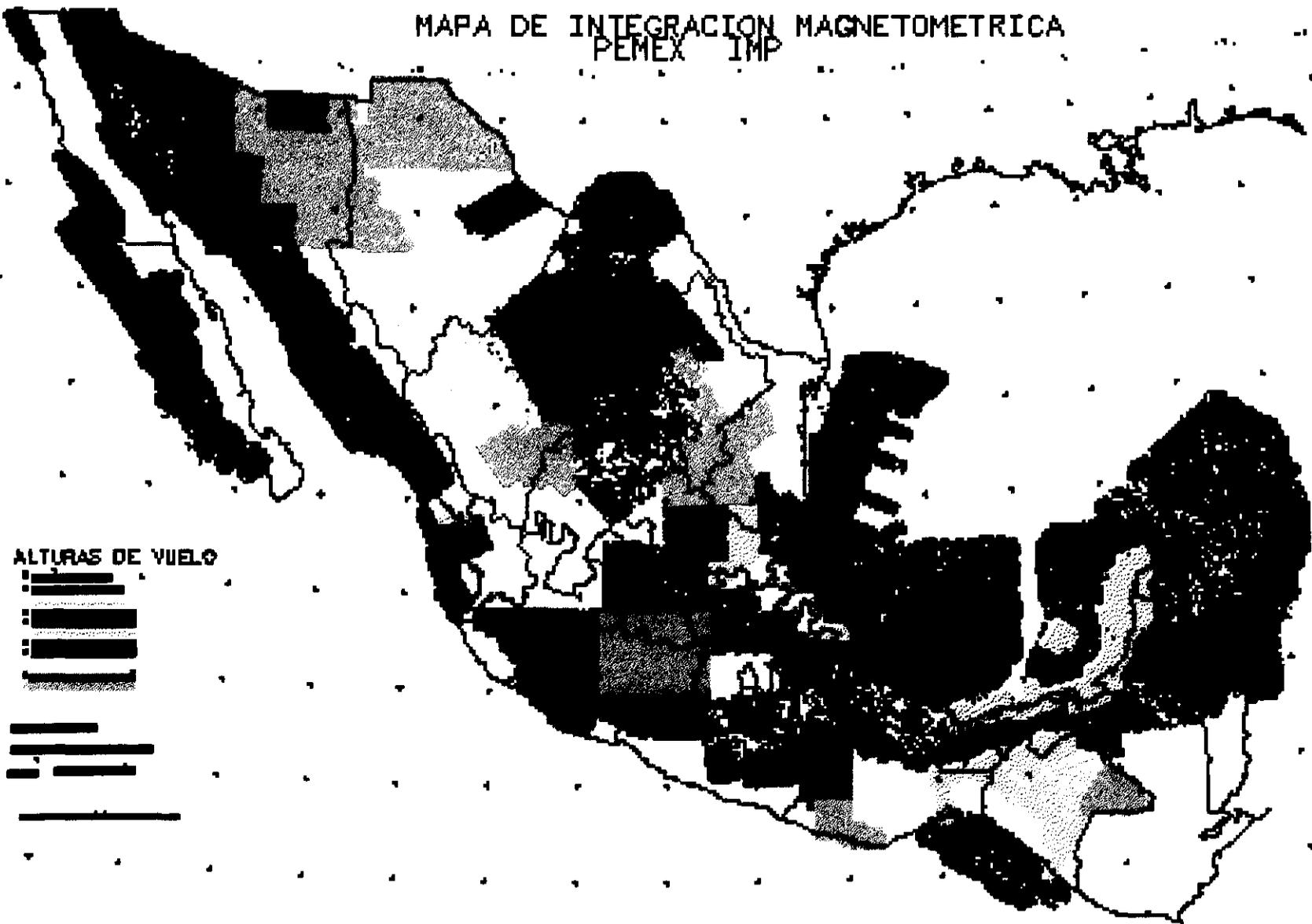
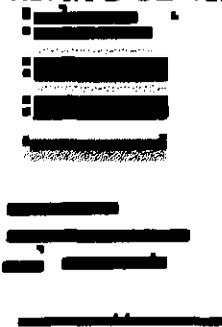


FIG. V.1 MAPA INDICE DE LOS PROSPECTOS DE LA REPUBLICA MEXICANA.

MAPA DE INTEGRACION MAGNETOMETRICA
PEMEX IMP



ALTURAS DE VUELO



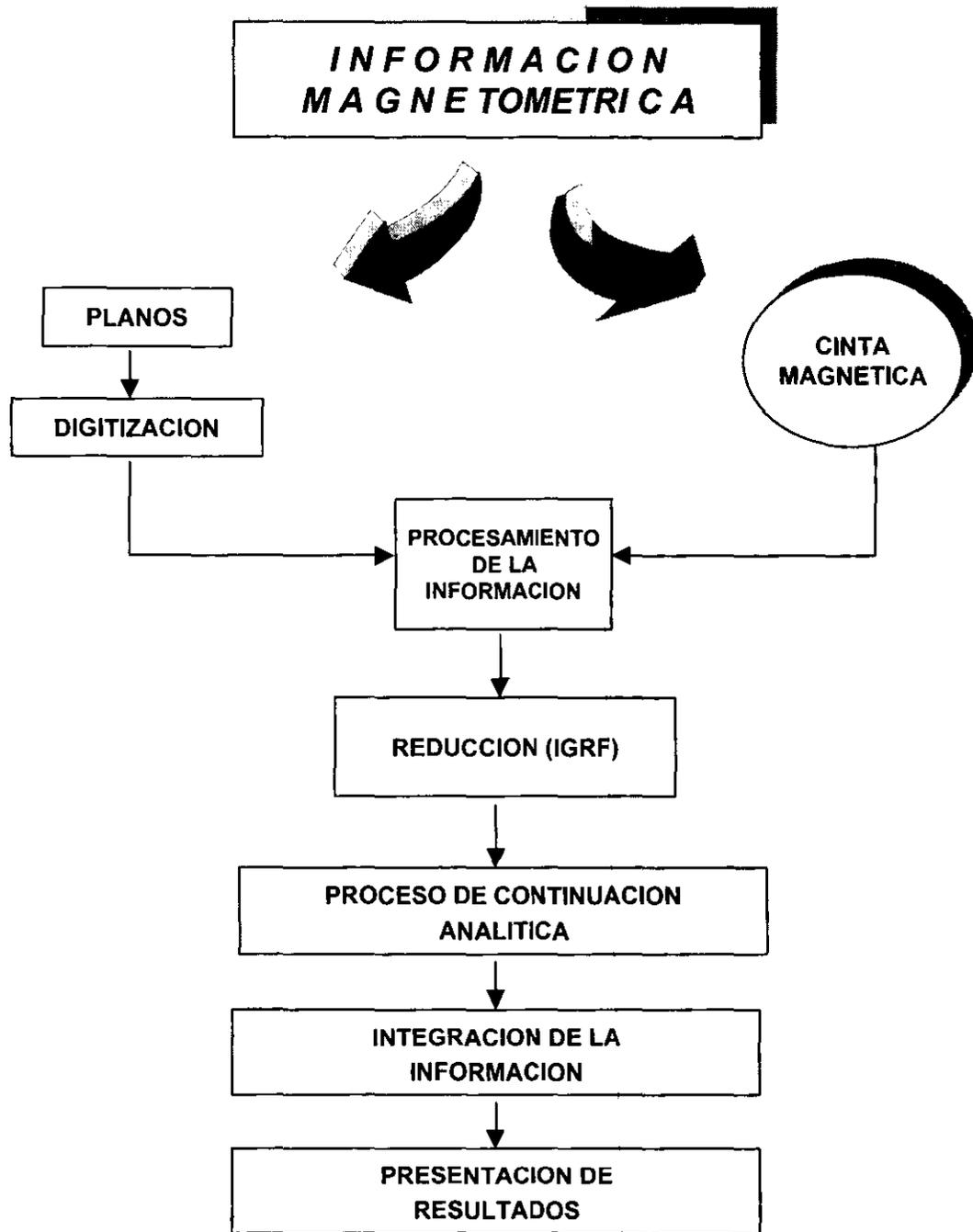


FIG. V.2 DIAGRAMA DE FLUJO EN EL PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

PROSPECTO	TIPO	FECHA DE OBSERVACION	COMPAÑÍA	ALTURAS DE VUELO (M.S.N.M.)	RUMBO	MUESTREO MALLAS DE VUELO KMS	ESCALA	INFORMACION	
								PLANOS	CINTAS
TIJUANA	AEREA	1-Jun-79 31-Dic-79	AEROSERVICE	1220	N 60 E	5 X 7.5 5 X 15.0	1:200000	4	5
PUNTA PEÑASCO SAN FELIPE	AEREA	1-Nov-79 19-Ene-80	AEROSERVICE	1830 1370	N 60 E	5 X 15	1:200000	20	15
BAHIA DE VIZCAINO	MARINA	Ene-72 Dic-72	WESTERN	0	N 51 E	4 X 5 4 X 10	1:250000	13	20
BAHIA DE MAGDALENA	MARINA	Ene-72 Dic-72	WESTERN	0	N 52 E	4 X 7.5 4 X 1.5	1:200000	10	5
PURISIMA SANTA RITA	AEREA	Ago-79 Oct-79	AEROSERVICE	1070 2130	N 50 E	5 X 15	1:200000	11	20
AGUA PRIETA	AEREA	Sep-80 Oct-80	CARSON	2896	N-S	4 X 4	1:200000	6	4
GUAYMAS, MAZATLAN	AEREA	Abr-80 Ago-80	AEROSERVICE	1680	N 55 E	5 X 15	1:100000	14	30
JANOS	AEREA	12-Oct-80 30-Oct-80	AEROSERVICE	3050	E-W	6 X 18	1:100000	6	10
PORCION NORTE DE CHIHUAHUA	AEREA	Jul-67 Ago-67	AEROSERVICE	2135 2290 2590	E-W	2.4 X 16 2.4 X 10	1:100000	11	
EL SUECO	AEREA	Sep-78 Oct-78	AEROSERVICE	3050	N 60 E	6 X 18	1:200000	6	4
CUENCA DE PARRAS PENINSULA DE COAH. PLACER DE GPE., CHIH.	AEREA	Dic-74 Ene-75	AEROFOTO L.K.B.	2590	N 60 E N 49 E	4 X 10 4 X 20 4 X 2.5 4 X 40	1:100000	50	1
LA PERLA TORREON DELICIAS	AEREA	Ene-78 Dic-78	AEROSERVICE	2600 2800 3050	N 50 E N 60 E	6 X 18	1:200000	11	7
LAMPAZOS	AEREA	Ene-78 Jun-78	AEROSERVICE	1700 3500 2600 800	N 50 E E-W	6 X 18	1:200000	23	1

PROSPECTO	TIPO	FECHA DE OBSERVACION	COMPAÑÍA	ALTURAS DE VUELO (M.S.N.M.)	RUMBO	MUESTREO MALLAS DE VUELO KMS	ESCALA	INFORMACION	
								PLANOS	CINTAS
TORREON MONTERREY	AEREA	Feb-75 May-75	GEOTERREX	2740	N 50 E	4 X 20 8 X 20	1:100000	20	4
ESTE DE MATAMOROS	MARINA	Dic-72 Mar-73	G.S.I.	0	N 22 E	5 X 10	1:200000	4	
SAN JOSE DE LAS RUSIAS	AEREA	Ago-68 Sep-68	AEROSERVICE	915	N 72 E	3 X 12	1:100000	6	
BUSTAMANTE	AEREA	Mar-80 Abr-80	AEROSERVICE	3500	N-S	6 X 18	1:100000	10	
MANTE	AEREA	Feb-80 Mar-80	AEROSERVICE	1327	N 55 E	2 X 4 2 X 16	1:100000	5	3
C. DE TAMPICO	AEREA	Dic-74 Feb-75	GEOTERREX	2500 2195 490	N-S	3 X 10	1:200000	5	
MAZATLAN VALLARTA	AEREA	Ago-79 Ene-80	CARSON	610 450 3048	N 33 W N 57 E	4 X 4 3 X 9	1:200000	2	12
MAZATLAN VALLARTA	MARINA	Sep-72 Oct-72	AEROFOTO	0	N 60 E	3.8 X 22.2	1:200000	1	9
TAMPICO	AEREA	Nov-68 Dic-68	AEROSERVICE	305	N 72 E	2X 10 2 X 16	1:200000	2	
DELTA DEL RIO COLORADO	AEREA	Jun-81 Ago-81	CARSON	760	N-S	4 X 4	1:200000	2	
ARRASTRADERO	AEREA	Feb-81 Mar-81	CARSON	305	E-W	4 X 4	1:200000	2	
CUENCA DE JALISCO	AEREA	Ene-79 Mar-79	CARSON	3050	N-S E-W	3 X 9	1:200000	2	9
COLIMA-HUETAMO GUADALAJARA-LEON	AEREA	Oct-78 Jun-79	AEROSERVICE	3500	N-S N 55 E	3 X 6 3 X 12	1:200000	20	20
MORELIA-PACHUCA TAMAZUNCHALE-HUAUTLA	AEREA	Oct-78 Jun-79	AEROSERVICE	3000 4000	N-S N 55 E	3 X 9 3 X 18	1:200000	10	22
CUENCA DE HUAYACOTLA	AEREA	Mar-80 Nov-80	CARSON	3050	N 54 E	3 X 9	1:200000	2	6

PROSPECTO	TIPO	FECHA DE OBSERVACION	COMPAÑÍA	ALTURAS DE VUELO (M.S.N.M.)	RUMBO	MUESTREO MALLAS DE VUELO KMS	ESCALA	INFORMACION	
								PLANOS	CINTAS
CUENCA DE GUERRERO-MORELOS	AEREA	Sep-74 Dic-74	AEROFOTO L.K.B.	2745	N 81 E	2 X 4 2 X 16 2 X 32	1:100000	20	
JALAPA-MATA VERDE	AEREA	Mar-79 Feb-80	AEROSERVICE	3000 450	N 55 E	4 X 16	1:200000	7	8
CUENCA SALINA DEL ISTMO Y MACUSPANA	AEREA	Jul-74 Sep-74	AEROFOTO L.K.B.	450 2135	N 55 E	5 X 10	1:200000	4	
PARGOS-XPUJIL CINTALAPA- BACHAJON	AEREA	Feb-81 Mar-81	AEROSERVICE	450 2500 3660	N-S N 36 E	4 X 12 4 X 16	1:200000	5	
CAMPECHE	MARINA	Mar-81 Jun-81	WESTERN	0	N 31 E	5 X 10 5 X 20 10 X 10	1:200000	5	
PROGRESO	AEREA	Mar-78 Ago-78	AEROSERVICE	450	E-W	5 X 20 6 X 18 12 X 36	1:200000	20	18
PUERTO ARISTA PUERTO MADERO	MARINA	Ene-78 Dic-78	DIGICON	0	N 43 E	5 X 10 10 X 20	1:200000	2	5
CUAUHTEMOC	AEREA	Nov-80 Dic-80	AEROSERVICE	3048	N 50 E	4 X 12 4 X 16	1:200000	9	
SAN ALTO	AEREA	Nov-80 Mar-81	AEROSERVICE	3353 3810	N 50 E	4 X 12 4 X 16	1:200000	12	
SANTO DOMINGO SONORA	AEREA	Mar-81 Jun-81	AEROSERVICE	3350 2600	N 60 E	4 X 12 4 X 16	1:200000	15	50
TEPESCOLULA- TLAXIACO	AEREA	Ene-85 Feb-85	AEROSERVICE	2743 3353	N 60 E	4 X 12 4 X 16	1:250000	6	
PUERTO ANGEL	AEREA	Ene-85 Dic-85	AEROSERVICE	3505	N 55 E	4 X 12 4 X 16	1:250000	4	
CHAMPOTOXI	AEREA	Nov-85 Dic-85	AEROSERVICE	457	N-S	5 X 20	1:200000	8	
COATZACOALCOS- MARBELLA	AEREA	Nov-80 Dic-80	CARSON	610	N-S	5 X 2 0	1:200000	7	

	TIPO	FECHA DE OBSERVACION	COMPAÑÍA	ALTURAS DE VUELO (M.S.N.M.)	RUMBO	MUESTREO MALLAS DE VUELO KMS	ESCALA	INFORMACION	
								PLANOS	CINTAS
AMPLIACION COATZACOALCOS-MARBELLA	AEREA	Dic-80 May-81	CARSON	610	N-S	5 X 20	1:200000	6	
LAGUNA DE TERMINOS CANTARES-CAMPECHE	AEREA	Ene-81 May-81	CARSON	610 915	N-S	5 X 20	1:200000	20	50
GOLFO DE MEXICO	MARINA		UNAM	0	N-S E-W				1

TABLA V-1

INFORMACION DE LOS DIFERENTES PROSPECTOS UTILIZADOS PARA CONFIGURAR EL MAPA MAGNETICO DE LA REPUBLICA MEXICANA.

d) Para prospectos con diferentes alturas de vuelo se generó un archivo, para cada altura.

Las coordenadas utilizadas en áreas relativamente pequeñas donde la longitud no sobrepasa 6° son las Universal Transversa de Mercator (UTM).

La información proporcionada por Petróleos Mexicanos presenta la posición de las medidas magnéticas en coordenadas UTM o Geográficas (Latitud y Longitud) con su correspondiente Meridiano Central, por lo que fue necesario hacer la transformación de los archivos obtenidos para cada prospecto a la proyección conforme de Lambert.

Puesto que la República Mexicana se encuentra comprendida entre los Meridianos Centrales 87° y 117° con su longitud mayor en dirección Este-Oeste la proyección que debe utilizarse es la de Lambert, considerando el meridiano 102° como centro y los paralelos tipo $17^\circ 30'$ y $29^\circ 30'$ con origen en $(14^\circ, -102^\circ)$ (fig. V-3).

El programa utilizado convierte las coordenadas de un sistema de proyección a otro. Un par de coordenadas latitud - longitud se convierte a un par de coordenadas X-Y y viceversa. Cuando se requiere pasar de un par de coordenadas X-Y a otro es necesario convertir a un par de coordenadas latitud-longitud como un paso intermedio. El programa considera los sistemas de coordenadas más usados. (LCT 1998).

Los parámetros generales utilizados para este sistema son:

. Meridiano Central	102°
. Paralelo Norte Estándar	$17^\circ 30'$
. Paralelo Sur Estándar	$29^\circ 30'$
. Latitud origen	14°
. Este falso	0

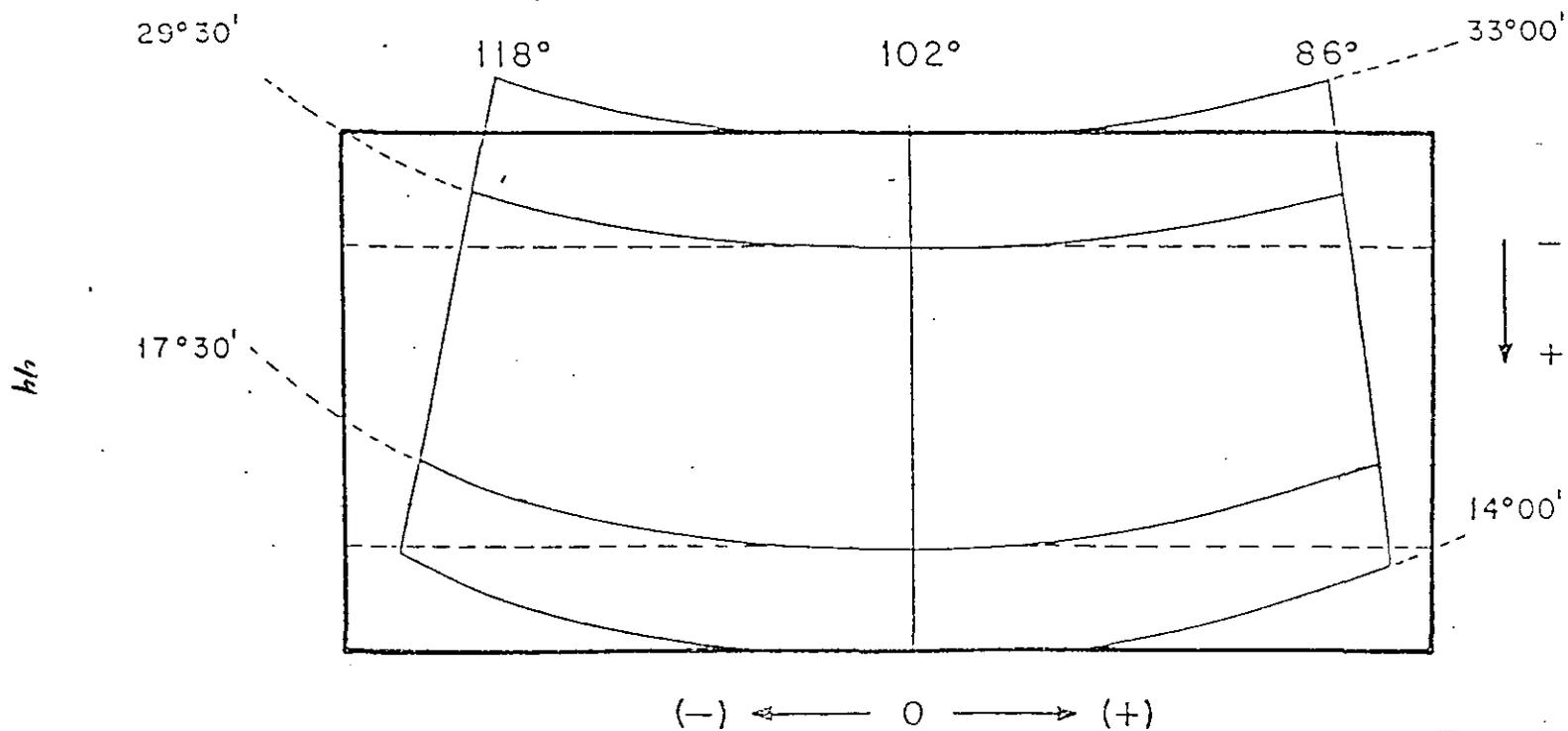


FIG. V.3 PROYECCION CONICA CONFORME DE LAMBERT

. Norte falso	0
. Factor de Escala	0.9996 (a lo largo del meridiano central)
. Elipsoide	Clark 1866.

Una vez generados los archivos de datos para cada altura de vuelo se obtuvieron sus correspondientes mallas de datos igualmente espaciados (2 Kms). Para tal efecto se utilizó un programa que genera una malla bidimensional a partir del archivo mencionado anteriormente y utilizando el método de mínima curvatura. El algoritmo (Briggs, 1974) produce una malla suavizada como resultado de la solución de un conjunto de ecuaciones diferenciales para minimizar la curvatura de la superficie, utilizando los datos originales.

V.3 Reducción por IGRF

Las mallas obtenidas fueron de 2 tipos:

- . Mallas de Anomalía Magnética.
- . Mallas de Intensidad Magnética Total.

Como el objetivo del presente trabajo es la obtención de la Anomalía Magnética de la República Mexicana, las mallas de Intensidad Magnética total (Aeromagnéticas) fueron reducidas utilizando el (IGRF) Campo Geomagnético de referencia Internacional, calculado para la fecha en que se realizó la observación.

En la figura. V.4 se muestra el IGRF de la República Mexicana para una fecha y altura específicas.

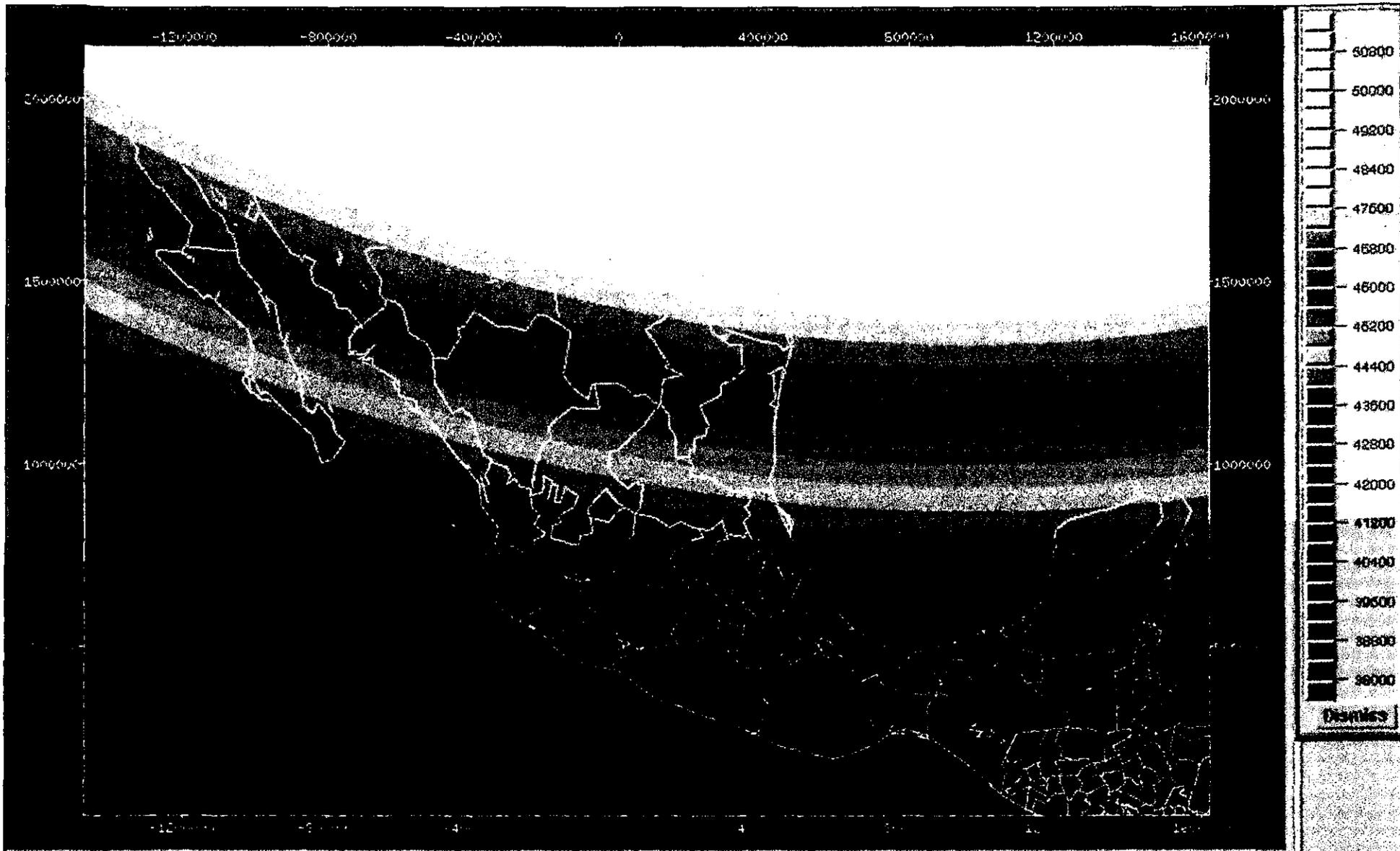


FIG. V.4 IGRF DE LA REPUBLICA MEXICANA
 (calculada para julio de 1990 y 3500 m.s.n.m.)

V.4 Aplicación de la Continuación Analítica a los Diferentes Prospectos

Los operadores de continuación analítica de campo armónico son empleados frecuentemente para mejorar planos magnéticos o gravimétricos. Su uso amplifica y resalta el efecto producido por fuentes cerca de la superficie y puede llegar a producir anomalías espúreas.

En nuestro caso, dado que la mayoría de los prospectos fueron realizados a diferentes alturas de vuelo (ver tabla V.1) y que el objetivo de este estudio fue la obtención de la carta magnética nacional, se tuvo que realizar el proceso de continuación analítica para llevar la información a un nivel común. Se escogió, de acuerdo con personal de Petróleos Mexicanos, una altura de vuelo de 3,500 m.s.n.m., que es de las más altas en los levantamientos de campo de la República Mexicana.

El proceso de continuación analítica de campos potenciales consiste en trasladar matemáticamente la información del plano en que se recabó la información al plano seleccionado. La ventaja de este proceso es que no es necesario realizar de nuevo el levantamiento de campo. Para ello se diseñaron operadores matemáticos que trabajan sobre un reticulado específico, cuyo valor óptimo resultó de 2 kms., para un punto central, 19 anillos y 121 puntos.

Se investigaron diferentes operadores matemáticos publicados en la literatura y se vió que estos daban errores hasta de 10%. El método usado consistió en expresar la función de transferencia ideal en el dominio del número de onda y transformarlo al dominio espacial, mediante una transformada de Fourier bidimensional para obtener el operador correspondiente. Experimentación realizada con datos sintéticos dieron errores menores al 1.5%.

Con el fin de probar los operadores obtenidos, se escogió un área piloto en el sureste de México, cerca de la Península de Yucatán (Fig. V.5), donde se presenta una gran anomalía de baja frecuencia, alrededor un derrame ígneo caracterizado por su respuesta magnética de alta frecuencia. Entonces, lo que se hizo fue trasladar esta información del nivel de 610 m.s.n.m., a una altura de 3,500 m.s.n.m. (Fig. V.6), observándose que la anomalía de baja frecuencia se

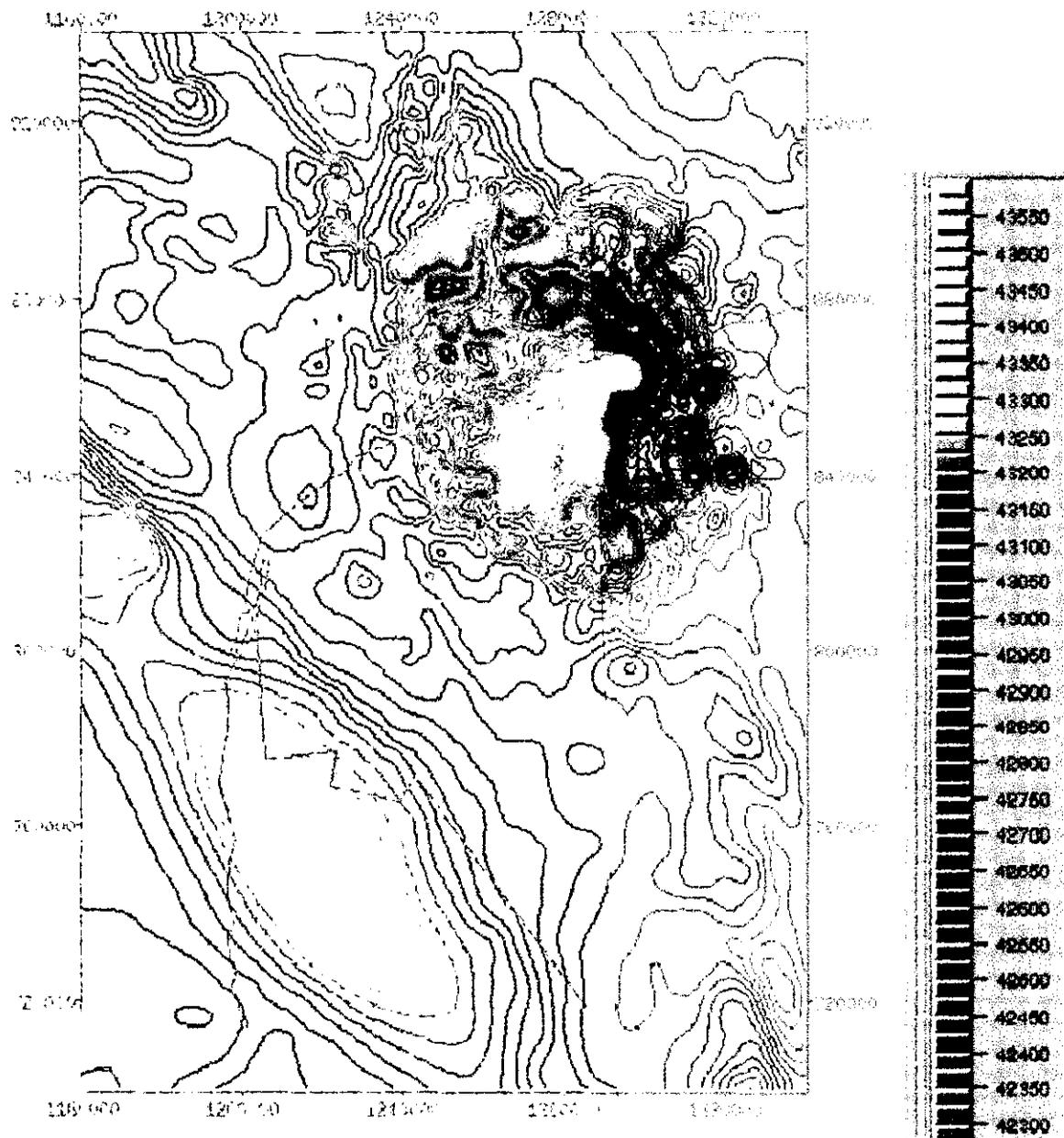


FIG. V.5 ANOMALIA MAGNETICA
(Datos originales 610 m.s.n.m.)

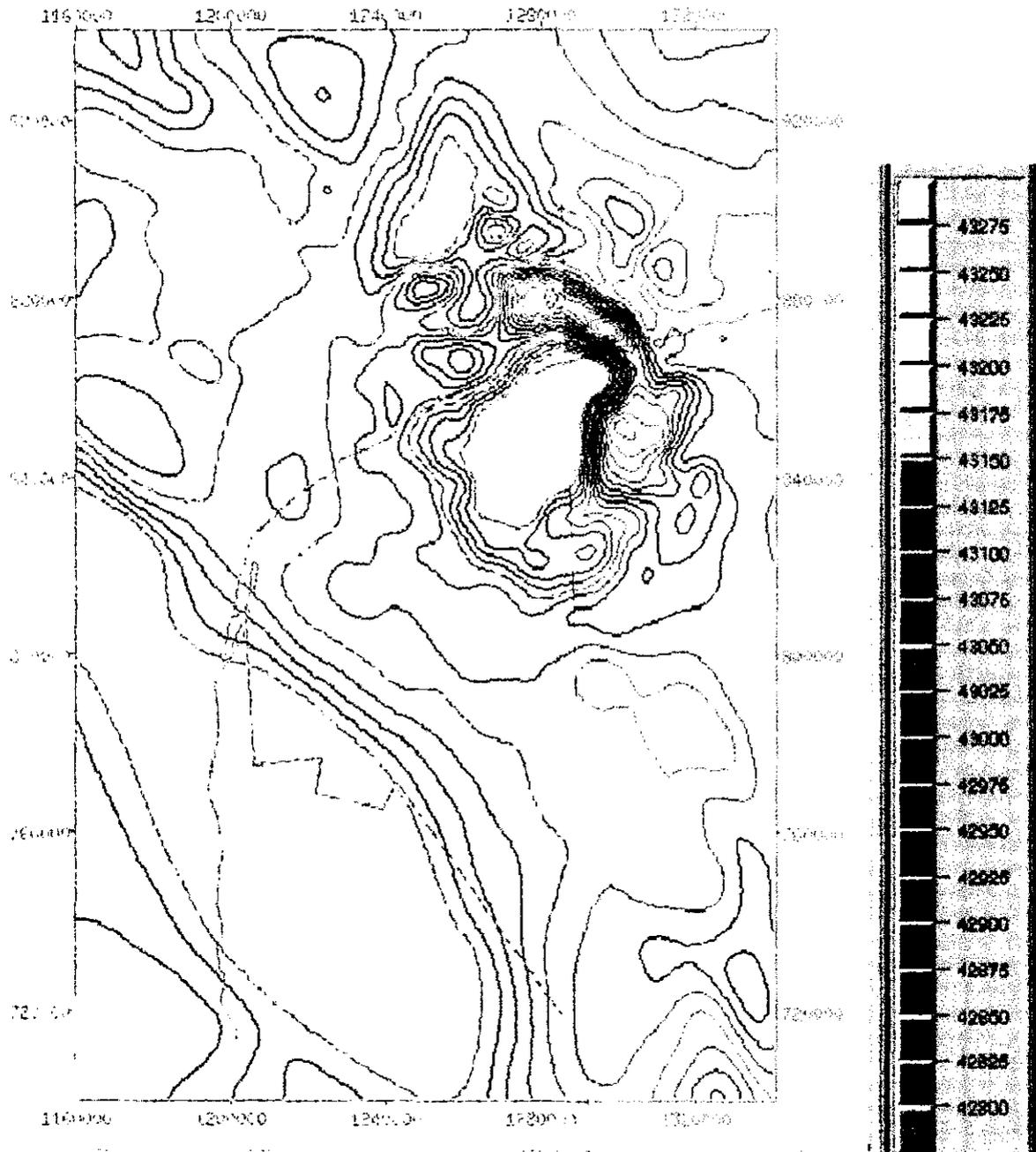
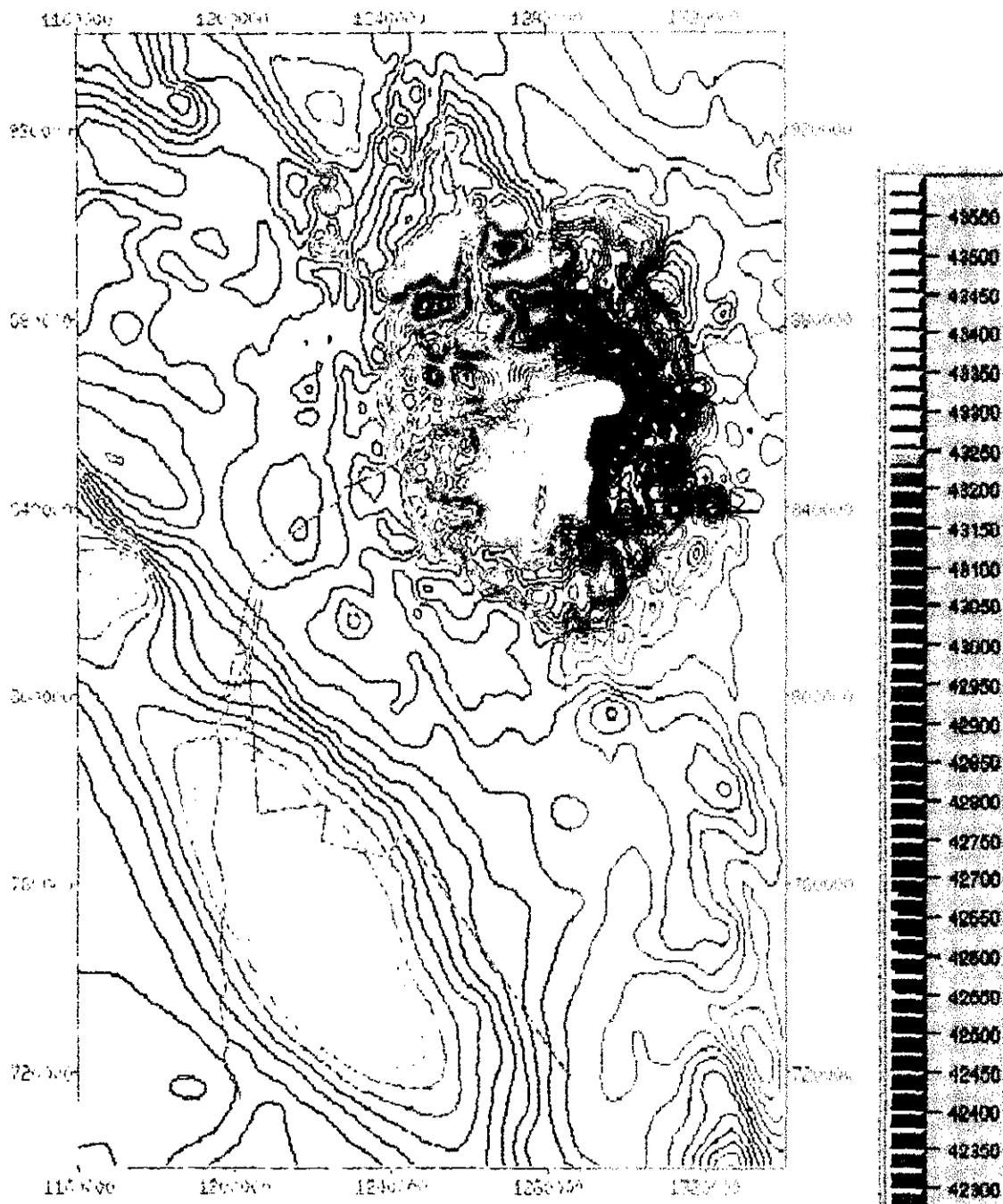


FIG. V.6 CONTINUACION ANALITICA ASCENDENTE
(de 610 a 3500 m.s.n.m.)



**FIG. V.7 CONTINUACION DESCENDENTE
(de 3500 a 610 m.s.n.m.)**

conserva sin ninguna distorsión, en cambio las anomalías de alta frecuencia se atenúan notablemente.

Para verificar si el operador estaba funcionando correctamente, se bajó la información por un proceso de continuación descendente de 3500 m.s.n.m., (Fig. V.7), notándose que se recuperaban todos los valores de la anomalía de baja frecuencia, en tanto que las altas frecuencias sufrieron una variación casi imperceptible.

El diseño de los operadores fue hecho con el programa CONTI, que calcula los operadores de continuación analítica hacia arriba y hacia abajo, por medio de una doble transformada de Fourier aplicada a la función de transferencia ideal, para un punto central y 19 anillos.

El operador de continuación analítica en el dominio de la frecuencia está dado por:

$$F(k_x, k_y) = e^{-2\pi\sqrt{k_x^2+k_y^2} Z} \quad (1)$$

Donde K_x , K_y son los números de onda en las direcciones X, Y respectivamente y Z es la altura a la que se traslada la información.

A fin de implementar el proceso en forma digital, se tienen que hacer las siguientes transformaciones:

$$k_x = n\Delta k$$

$$k_y = m\Delta k$$

$$Z = l\Delta x$$

$$n, m = 0, 1, \dots$$

$$l = \pm 1, \pm 2, \dots$$

l = Nivel de continuación en unidades del intervalo de muestreo espacial

ΔK = Intervalo de muestreo en el dominio del número de onda

Δx = Intervalo de muestreo en el dominio del espacio

En consecuencia la función de transferencia del sistema para el proceso de continuación analítica hacia arriba, queda adaptada para el proceso digital.

$$F_{mn} = e^{-2\pi\sqrt{m^2+n^2} l \Delta x \Delta k} \quad (2)$$

Haciendo uso de la ecuación fundamental que relaciona los intervalos de muestreo Δk , Δx , con el número de muestras N ,

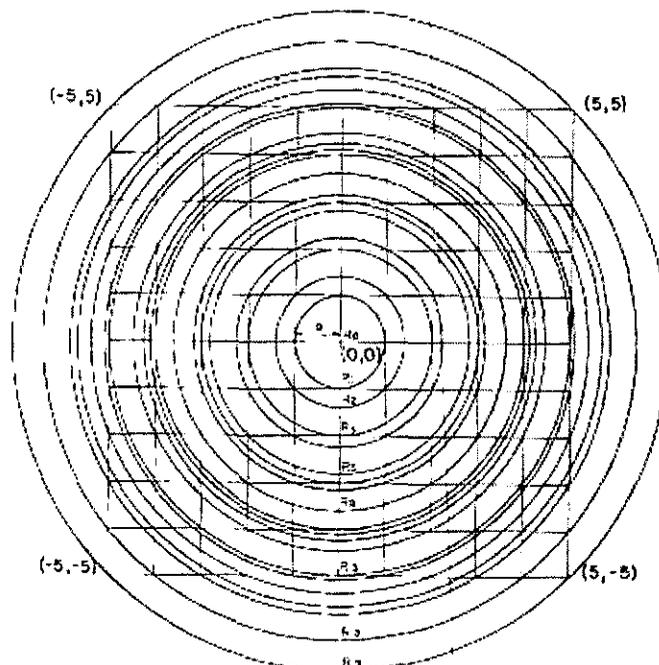
$$\Delta k \Delta x = \frac{l}{N}, \quad (3)$$

La ecuación anterior queda como:

$$F_{mn} = e^{-2\pi\sqrt{m^2+n^2} l / N} \quad (4)$$

De esta manera, el parámetro l se tiene que expresar en unidades del intervalo de muestreo espacial.

Se aplicaron a las diferentes áreas que componen la República Mexicana, operadores con un número de muestras $N = 121$, para evitar el corte en los bordes.



V.5 Integración Aeromagnética

Todos los prospectos fueron referidos a la altura de 3,500 m.s.n.m., observándose que en prospectos adyacentes las curvas de configuración siguen la misma tendencia, pero sin coincidir su valor absoluto, esto es debido a varias razones:

- a) Dado que la toma de los datos fue realizada en diferentes épocas y por diversas compañías, no utilizándose la misma cota de referencia.
- b) Los operadores aplicados pierden definición en las orillas de los mapas, pues el número de muestras se reduce considerablemente.
- c) Otra razón es que la dirección de vuelo entre dos prospectos adyacentes es diferente.
- d) La reducción de los datos por el IGRF fue mal aplicado.

Al integrarse todos los prospectos de que está formada un área y graficarse, se observó que en términos generales los ensambles entre los diferentes prospectos son adecuados en las fronteras. Las pequeñas distorsiones en las uniones fueron eliminadas aplicando un filtro de suavizamiento a la información unificada, para eliminar las altas frecuencias que aparecen en los límites de los diferentes prospectos, con lo que se obtuvo una unificación casi perfecta.

El plano final de la República Mexicana se muestra en la (figura VI.1).

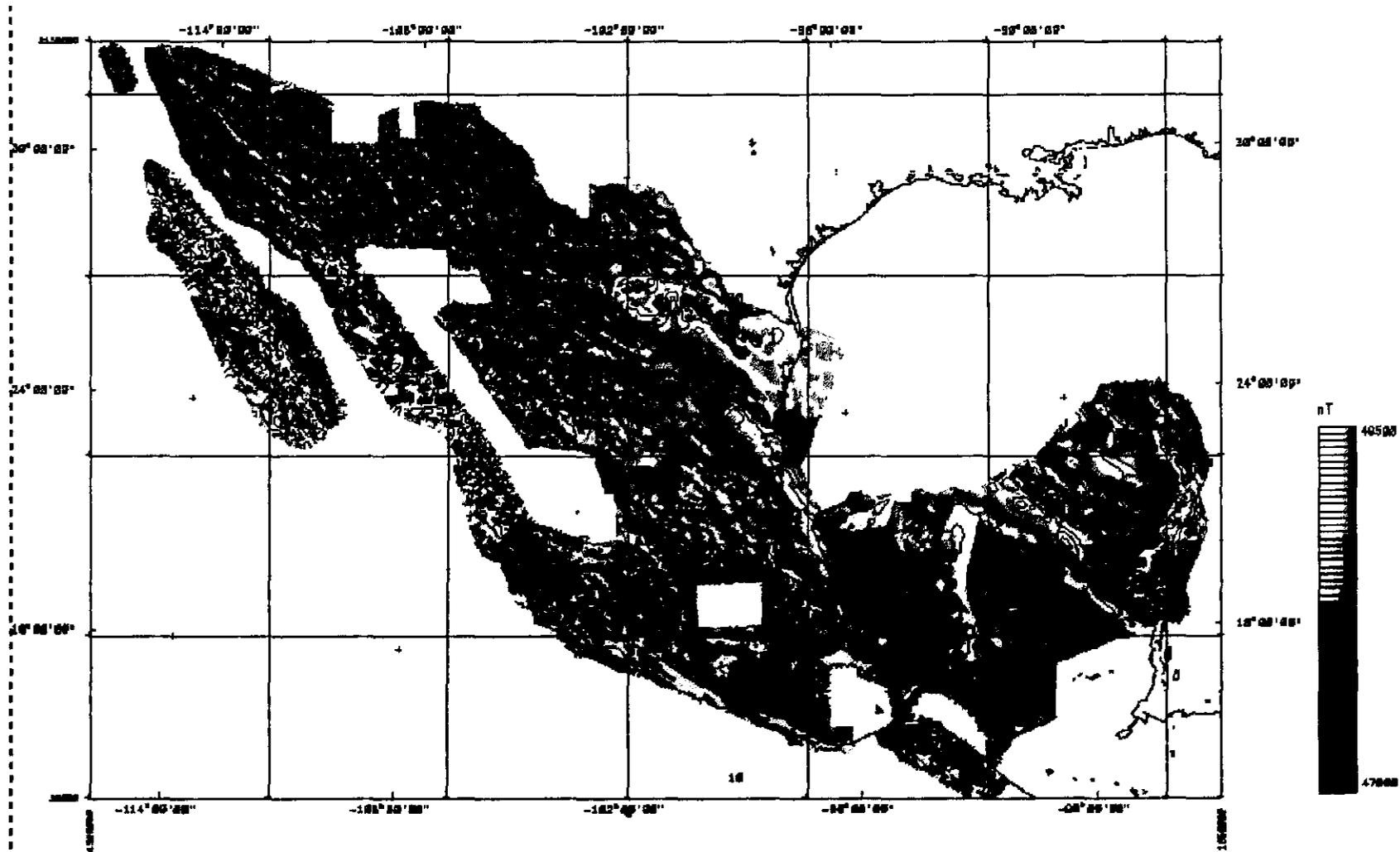
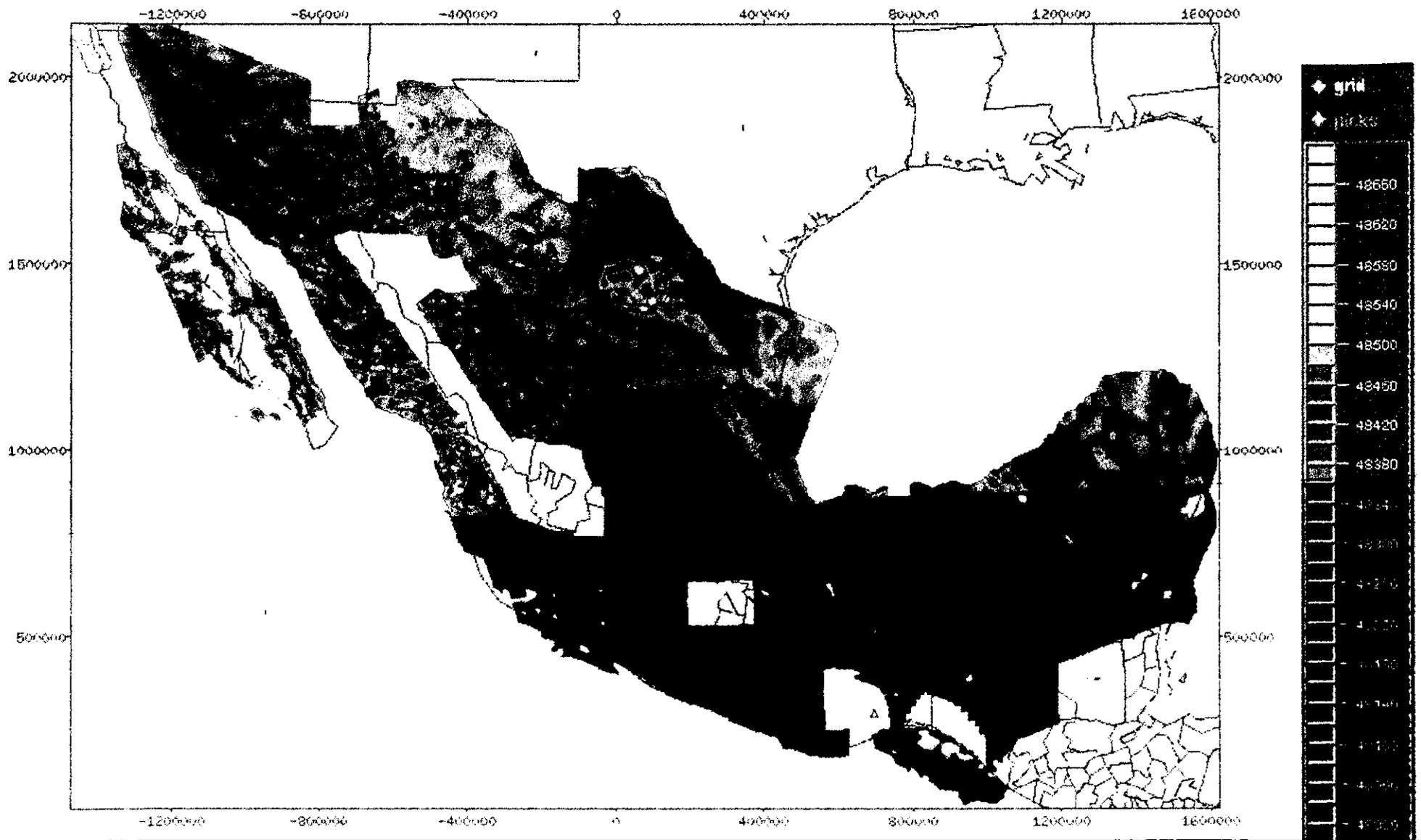


FIG. VI.1 CARTA AEROMAGNETICA DE LA REPUBLICA MEXICANA



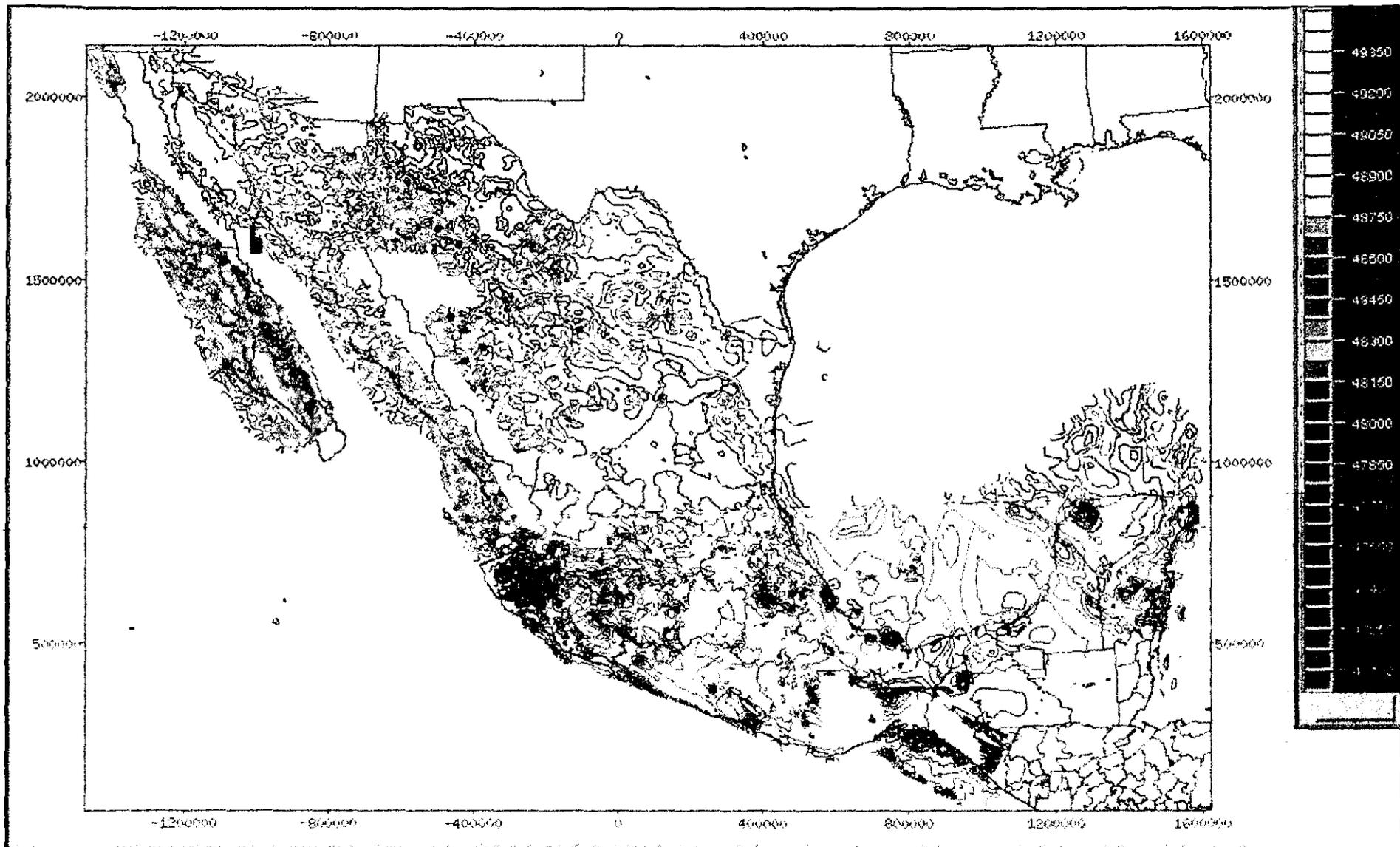


FIG. VI.1 CARTA AEROMAGNETICA DE LA REPUBLICA MEXICANA

VI MAPA AEROMAGNETICO RESULTANTE DE LA UNIFICACION DE PROSPECTOS

Con la metodología explicada anteriormente y la aplicación de los operadores de continuación analítica, los datos de campo de la información aeromagnética fueron uniformizados a un nivel dado, la figura VI.1 muestra el mapa aeromagnético de la República Mexicana.

El mapa aeromagnético de la República Mexicana se presenta a escalas 1:2,000,000 y 1:4,000,000 para ver la correspondencia con otras cartas de la República Mexicana, como son la Geológica y la de Terrenos y Conjuntos Estratotectónicos.

Sin embargo el mapa se puede reproducir a cualquier escala solicitada, o graficar un área específica con información original o continuada. En caso de que sobrepasen las dimensiones del graficador, el mapa o algún sector se pueden obtener en varias partes.

Como la información se encuentra en forma de malla con espaciamiento de 2 km., se pueden obtener procesos especiales como son: Filtrados Regionales, Filtrados Residuales, Filtrados direccionales, Reducción al Polo etc.

Los datos aeromagnéticos se encuentran grabados en cinta magnética y en diskette para usarse en la computadora I.B.M.-9121 o estaciones de trabajo que cuentan con paquetes de proceso e interpretación muy actualizados.

El plano aeromagnético de la República Mexicana nos muestra rasgos muy interesantes. Partiendo de la Península de Yucatán, se pudo descubrir gracias a los levantamientos aeromagnéticos la existencia de un gran cráter al norte de Mérida que se manifiesta por una serie de anomalías de muy alta frecuencia cuya descripción se da más adelante. En la misma península se aprecia una serie de anomalías magnéticas formando una enorme **N** ; el estudio de estas anomalías magnéticas a llevado a Pemex a grandes descubrimientos de zonas productoras (Sonda de Campeche) asociadas a ellas.

En el Golfo de México se aprecia igualmente un tren de anomalías magnéticas de aproximadamente 600 km., de longitud. El estudio de este tren de anomalías ha facilitado la programación de líneas sísmicas que ya interpretadas han dado como resultado el descubrimiento de grandes campos productores (Arenque, Constituciones, La Faja de Oro, Campo Franco Española etc.) actualmente se están realizando estudios en la parte Marina de este tren, inmediatamente frente a Tampico, Tams. donde a partir de estudios geológicos se ha encontrado que las rocas productoras están asociadas con los altos magnéticos.

En la parte Norte del Golfo se aprecia otro tren de anomalías con dirección Este-Oeste de igual o mayor interés petrolero que el anterior. Esta serie de anomalías entran del Golfo de México y se internan hasta el Estado de Coahuila. Se puede decir que el estudio en esta área no ha sido muy exhaustivo como en las otras zonas pero esta porción es considerada como una gran reserva a futuro.

En la parte norte de la línea central E-W de la República se nota una serie de dipolos perfectamente definidos y alineados a lo largo de unos 400 km. El estudio es exclusivamente de interés minero. Cerca de esta línea algunos de los yacimientos ferríferos más importantes de la República Mexicana (Cerro del Mercado, Dgo. Hércules, Coh., La Perla Chih., etc.).

En la porción del Pacífico, estados de Jalisco, Colima y Nayarit se aprecia un círculo con bastantes anomalías con valores bajos de intensidad magnética, que dentro del contexto regional que venimos manejando, se infiere como una gran zona depresiva; la que posiblemente tenga relación con el desprendimiento de la Península de Baja California, pues al efectuar la restitución morfológica con la parte continental, se observa que enbana con dicha zona.

En la parte S-E contigua, se nota otra zona circular un poco mayor que la anterior pero con valores altos de intensidad magnética. A partir de esta información fue posible detectar los yacimientos ferríferos del área de "Las Truchas, Mich". (Sta. Clara, El Campamento, El Leopardo, El Tubo, Las Truchas, El Volcán, La Bandera y La Mira). Estos Yacimientos tuvieron su origen en contacto entre las rocas sedimentarias (principalmente calizas) y las rocas plútonicas que intrusieron durante los movimientos orógenos terciarios, (predominando su asistencia en el contacto con los intrusivos del tipo diorítico).

En la península de Baja California de la República Mexicana y zona del Pacífico el plano aeromagnético muestra anomalías de muy alta frecuencia que guardan cierto paralelismo con la actual línea de costa y se han utilizado para estudios mineros, geotérmicos etc. Todas estas áreas son de alto interés minero y poco interés petrolero.

En la provincia de la Sierra Madre y Eje Neovolcánico, se infiere un complejo basal, sumamente alterado por eventos magmáticos diversos, produciendo, los cinturones batolíticos, un conjunto de altos y bajos magnetométricos alternados que siguen tendencias en dirección NW-SE, y cuyo margen a borde oriental presenta características de un gran lineamiento de extensión regional en forma de arco.

VII ALGUNAS APLICACIONES DE LA CARTA MAGNETICA Y EL USO DE TRANSFORMACIONES PARA FACILITAR LA INTERPRETACION

El mapa de anomalías aeromagnéticas (Fig. VI.1) representa una fuente de información para estudios de muchas áreas. Puede ser de interés para estudios regionales de tectónica, estructuras, investigaciones mineras y petroleras entre otras.

La interpretación magnetométrica, es más compleja que la interpretación gravimétrica. En gravimetría existe una relación directa entre la causa y el efecto, es decir entre la geología y la anomalía residual, la cual se encuentra verticalmente sobre cuerpos de roca anómalos.

En magnetometría, el panorama es más complicado, debido a que tanto el vector de magnetización como el campo geomagnético total son inclinados a diferencia de la atracción gravimétrica que es siempre vertical. Estas dificultades pueden resolverse realizando una transformación conocida como reducción al polo magnético, donde el campo magnético es vertical; por lo tanto el proceso de reducción al polo consiste en el cálculo de pseudoanomalías, las cuales podrían ser causadas por el mismo cuerpo magnético, bajo la suposición que la polarización y el campo inductor son ambos verticales.

Baranov & Nandy, 1964 desarrollaron un método para transformar la intensidad del campo geomagnético total en un campo vertical equivalente. En esencia, es un proceso de simulación que hace que la fuente geológica este localizada en el polo magnético.

Bhattacharyya (1965) propuso una formulación alternativa en la que muchas de las restricciones del método de Baranov se eliminan. Ervin (1976) desarrolla un algoritmo que reduce substancialmente el tiempo de proceso del método de Bhattacharyya. Díaz Navarro (1988) modifica las ecuaciones de la doble serie de Fourier a la Transformada de Fourier para hacer uso del algoritmo de Cooley-Tukey bidimensional para disminuir aun más el tiempo de proceso.

Utilizando el programa anterior se obtuvo el plano de Anomalía Magnética de la República Mexicana reducido al polo (Fig. VII.1)

Filtrado de Mapas

En métodos potenciales, las estructuras profundas provocan anomalías de longitud de onda grandes, que corresponden a las anomalías regionales. El filtro pasabandas digital permite seleccionar la banda de paso para filtrar diferentes anomalías . El filtro pasaaltas deja pasar únicamente longitudes de onda grandes, o números de onda pequeños.

Gradiente Horizontal

Dentro de los variados métodos de procesos que se aplican a los datos magnéticos con el fin de facilitar su interpretación, está el método de gradiente horizontal LCT, 1995. Es de gran utilidad para delimitar cuerpos geológicos y descubrir lineamientos a través de las áreas de exploración. Estos rasgos se refieren a aquellas estructuras geológicas que presentan cierta continuidad. Para ser detectada con este método necesitan tener una naturaleza tal que su presencia marque un cambio en la susceptibilidad lateral . Estos rasgos pueden ser fallas de cualquier tipo, contactos, zonas de fracturas, límites de cuerpos volcánicos y cambios de facies en el basamento.

Estudios Geofísicos Integrales

En este tipo de estudios se procesan e interpretan los datos magnéticos, gravimétricos y sismológicos, que se integran junto con otro tipo de información, sea geológica o proveniente de la perforación de pozos, y que son empleados para apoyar a la Exploración Petrolera en la localización de yacimientos de hidrocarburos. Este tipo de estudios también se efectúa para la localización de mantos acuíferos, así como en la Exploración Minera.

Interpretación de Datos Magnéticos.

El método de Prospección Magnética es el más antiguo en exploración geofísica y es usado para la localización de petróleo y minerales. En Prospección Petrolera se usa generalmente para determinar la potencia o espesor de la columna sedimentaria o la configuración de la superficie que representa el basamento

magnético. Las rocas sedimentarias poseen una respuesta magnética insignificante comparadas con las rocas basamentales.

Interpretación de Datos Magnéticos en Chicxulub, Yucatán.

Los estudios geofísicos como parte del programa de exploración de Petróleos Mexicanos en la zona noroeste de la península de Yucatán permitieron la identificación en el subsuelo de una estructura de cráter cuya geometría y características internas han sido investigadas a partir del modelado de las anomalías gravimétricas y aeromagnéticas, en la (fig. V.5) se muestra el plano de anomalía magnética del área.

Las principales unidades que conforman el cráter en el modelo reportado por Sharpton y colaboradores (1993) corresponden a: (1) unidad fundida de impacto y brecha de impacto, (2) unidad de brecha interna alógena (3) basamento cristalino levantado y fracturado por el impacto, (4) brecha externa alógena. (5) sedimentos cretácicos de plataforma, (6) basamento cristalino, (7) basamento de profundidad intermedia (corteza intermedia), (8) levantamiento central de basamento profundo y (9) secuencia carbonatada del Cenozoico. La unidad fundida presenta una composición y textura similares a una roca volcánica andesítica. En la unidad fundida se ha documentado la presencia de iridio y de otros elementos compatibles con un origen asociado al impacto (Sharpton et al., 1992; Koeberl et al., 1994). Las brechas presentan un rango amplio de texturas, composiciones y tamaños de los fragmentos. En las brechas de impacto se observan abundantes fragmentos de material del basamento. En las brechas externas se tiene abundancia de clastos de rocas carbonatadas. En el modelo, la información obtenida de las perforaciones realizadas en la zona por Petróleos Mexicanos fueron incorporadas en la estratigrafía asumida para los sectores someros del cráter

Las anomalías aeromagnéticas presentan un patrón más complejo que las anomalías gravimétricas. La zona de anomalías de alta frecuencia y magnitud

está limitada a la zona interna al primer anillo en la distribución de anomalías gravimétricas. Esta zona corresponde al levantamiento central de cráter y a la localización de las unidades de material fundido de composición ígnea intermedia (andesítica) y a las brechas de impacto (suevitas). En esta zona interna, se tiene una anomalía central de alta amplitud y relativamente baja frecuencia, que se extiende hasta unos 20 km de distancia radial. La anomalía esta caracterizada por un mínimo y un máximo aproximadamente orientados este-oeste. Pilkington y colaboradores (1994) han estimado una dirección promedio de magnetización remanente para la unidad fuente con declinación de 90 grados e inclinación entre 0 y 30 grados. Esta posible fuente para la anomalía central parece corresponder con el levantamiento central del basamento en el cráter. Alrededor de la anomalía central se tiene una distribución relativamente compleja de anomalías dipolares invertidas (los mínimos presentan una orientación predominante hacia el sur). Este patrón de anomalías sugiere que los efectos dominantes en los cuerpos fuente son asociados a magnetizaciones remanentes de polaridad reversa. El modelado preliminar reportado por Penfield y Camargo (1981) empleando el método de deconvolución de Werner sugiere que la profundidad a la fuente está a aproximadamente unos 1100 m, la cual correlaciona con la posición de las unidades de roca fundida y brecha de impacto. Urrutia y colaboradores (1994) proporcionaron datos paleomagnéticos para estas dos unidades con base en un estudio de material de núcleos recuperados en el pozo Yucatán-6, los cuales indican que la magnetización remanente presenta una polaridad reversa (es decir, la inclinación del vector de magnetización es hacia arriba de la horizontal en el hemisferio norte). Ello corresponde a un campo geomagnético con polaridad opuesta al campo actual (donde la inclinación de los vectores de magnetización están hacia debajo de la horizontal en el hemisferio norte). La inclinación media estimada para la unidad de roca fundida es de -43 grados (hacia arriba de la horizontal) la cual es cercana a la inclinación esperada para la zona calculada a partir de los datos paleomagnéticos promedio para la zona cratónica de América del Norte durante el Cretácico Tardío.

Lo anterior sugiere que la magnetización remanente en las dos unidades pudo haber sido adquirida al tiempo de impacto y en ese caso correspondería a una magnetización asociada con la formación y el enfriamiento de estas unidades. Pilkington y colaboradores (1994) emplearon la inclinación media determinada del estudio paleomagnético para el modelado de las anomalías entre la zona de 20 y 45 km radiales. Los datos, después de la reducción al polo usando una inclinación de -43 grados, muestran un patrón simple de mínimos aislados los cuales reemplazan a las anomalías dipolares. La distribución alargada de las anomalías con una tendencia NNW-SSE es reducida y se tiene un patrón circular, en el cual la anomalía central es rodeada por una banda de anomalías positivas. Estas anomalías son consideradas por Pilkington y colaboradores (1994) como producto de cuerpos con magnetizaciones reversas y que corresponden a las unidades de brecha y roca fundida. La polaridad reversa determinada para las unidades de roca fundida y brecha correlaciona con la polaridad esperada para el tiempo de la frontera Cretácico-Terciario, la cual se ha documentado en el Cron 29 R. Estos datos apoyan las determinaciones radiométricas obtenidas en muestras de la unidad de impacto de alrededor de 65 Ma (Sharpton et al., 1992; Swisher et al., 1992) y forman parte de las evidencias que permiten asociar al cráter Chicxulub con los eventos de la frontera Cretácico-Terciario.

A pesar de que el reporte sobre el cráter ocurrió al poco tiempo de la propuesta de Alvarez y colaboradores (1980) transcurrieron unos diez años más para que se estableciera la conexión entre estos estudios (Hildebrand et al., 1991). Esta conexión se dio, como en ocasiones ocurre la investigación, de una forma casual. Un reportero dedicado a temas de divulgación científica, quien había escrito un reportaje sobre el estudio inicial de Penfield y Camargo en 1981 (Byars, 1981), atendió también (casi 10 años después) la conferencia sobre la búsqueda del cráter y la posibilidad de que éste se encontrara en la región del Caribe y golfo de México. En las reseñas iniciales escritas sobre el estudio del cráter Chicxulub se mencionó la posibilidad de relación con la teoría recientemente propuesta para la

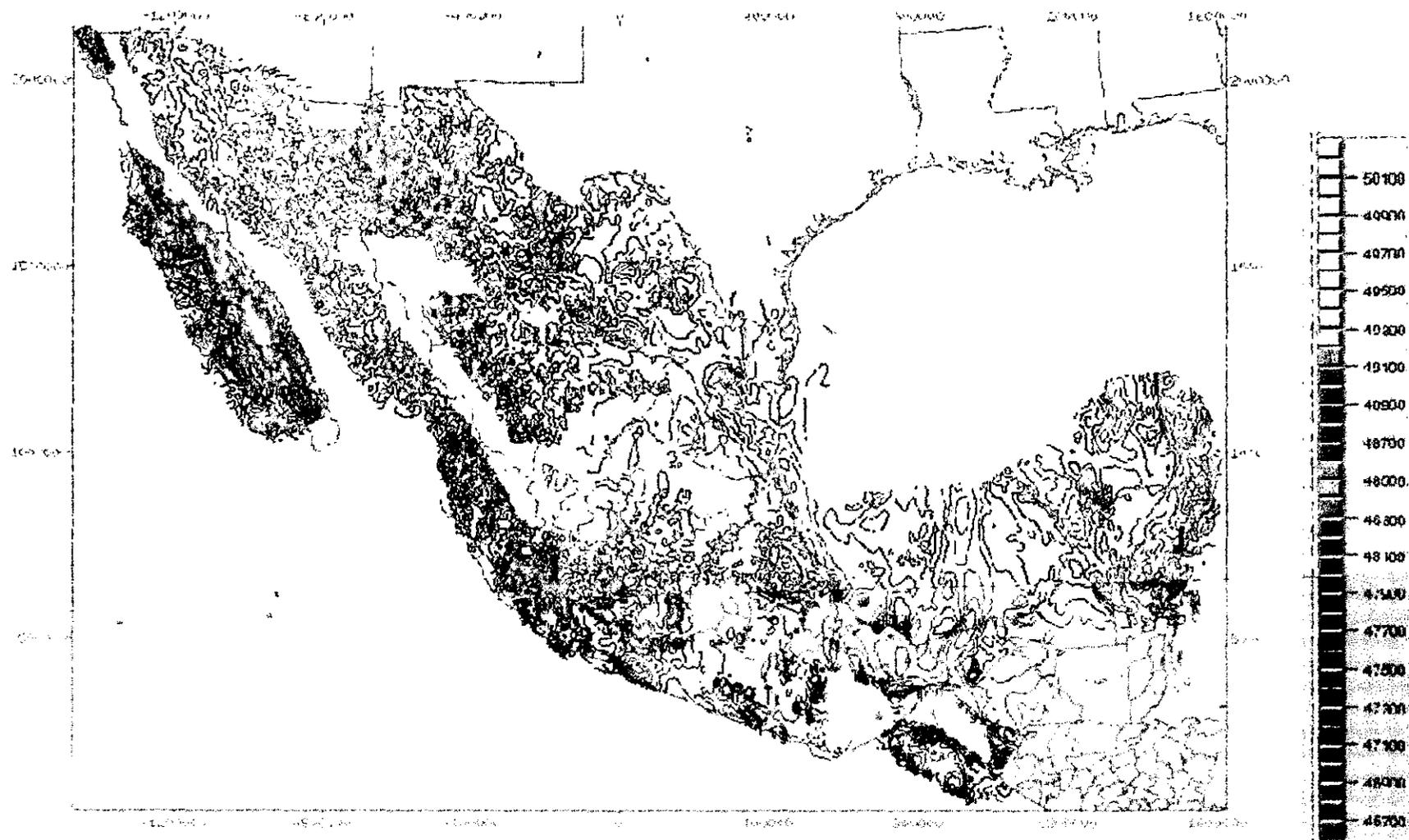
extinción de los dinosaurios (Byars, 1981; Sly y Telescope, 1982), sin embargo, esta opción no fue seguida en ese tiempo.

Con la intervención de Carlos Byars, se iniciaron en poco tiempo los estudios detallados del cráter y aprovechando el material recolectado en perforaciones profundas realizadas para exploración de hidrocarburos por Petróleos Mexicanos se logró documentar que la edad del cráter correspondía al límite Cretácico-Terciario y que las diferentes unidades, como la unidad ígnea y las brechas, habían sido formadas como resultado de un impacto (Hilderband et al., 1991; Sharpton et al., 1992; Koeberl et al., 1994; Urrutia et al., 1994).

Estudios subsecuentes pudieron documentar las conexiones entre el material del cráter y los depósitos de material relacionados al impacto como tectitas provenientes de secuencias sedimentarias del K/T en otros lugares del Caribe y América del Norte (Swisher et al., 1992). En algunas de las secuencias K/T estudiadas en la región noreste de México y en Texas se había documentado que el límite se caracterizaba por depósitos clásticos de tipo turbidítico. Estos depósitos han sido interpretados en términos de un tsunami que afectó las márgenes del antiguo Golfo de México y Caribe (Bourgeois et al., 1988; Smit et al., 1992; Urrutia, 1993)

Alvarez y colaboradores (1980), en el trabajo inicial, sugirieron que el impacto produjo efectos severos en los sistemas que soportan la vida en la tierra y que éstos fueron los causantes directos de las extinciones. Los fenómenos asociados a impactos han sido posteriormente analizados en numerosas investigaciones. Entre los efectos sugeridos se tiene el impacto y la onda de choque que deben haber provocado efectos severos regionales. En las etapas subsecuentes, se tienen efectos adicionales que se propagaron en los diferentes subsistemas de atmósfera e hidrósfera; Alvarez y colaboradores (1980) propusieron que una capa de polvo derivada del impacto fue inyectada en la parte alta de la atmósfera lo que ocasionó el bloque de la radiación solar durante un período prolongado de hasta

varios meses y que ello ocasionó la interrupción de los procesos fotosintéticos en el mar y tierra, lo que a su vez provocó el colapso de las cadenas alimentarias. Rusell (1982) ha indicado que la extinción de vertebrados terrestres fue particularmente severa y que el proceso afectó a todos los organismos de gran tamaño, en general, a todos con pesos corporales mayores a unos 25 kilogramos.



**FIG.VII. 1 ANOMALIA MAGNETICA REDUCIDA AL POLO DE LA
REPUBLICA MEXICANA**

VIII CONCLUSIONES

Fairhead & Somerton (1998) han recientemente resaltado la utilidad potencial de datos magnéticos y gravimétricos de archivo para la exploración de yacimientos e incluso en la evaluación de prospectos. En general, hay varias razones por las cuales estos datos no son aprovechados: (1) desconocimiento de la disponibilidad de estos registros, (2) formatos analógicos, escalas diferentes, información sobre la adquisición y procesado inadecuada e incompleta, (3) limitaciones en tiempo y recursos en los proyectos de exploración actuales y (4) falta de hardware/software para el adecuado re-procesado de la información y su integración con la nueva información.

Sin embargo, un proyecto de salvamento de estas fuentes de información sistemático y bien realizado constituye una excelente inversión de tiempo y recursos económicos y humanos. Sobre todo, si se consideran los costos de la adquisición de esa información actualmente. El método más adecuado para el registro de esta información reprocesada es indudablemente uno que permita la incorporación de nueva información en forma sencilla. Este es el caso de la metodología adoptada en el presente estudio de la elaboración del Mapa de Anomalías Magnéticas del país.

El plano final (Fig. VI -1) cubre el 90% del territorio Nacional , la diferencia se presenta en zonas en blanco que no se han prospectado como son:

- 1) La Sierra Madre Occidental
- 2) Distrito Federal y Área Metropolitana
- 3) El sector norte de la Península de Baja California
- 4) El sector Sur del Golfo de California.

Permite en forma regional observar los lineamientos estructurales importantes en la parte de la Península de Baja California, donde existen anomalías de alta frecuencia y de valores muy altos correspondientes a actividad ígnea. En Yucatán

se tienen valores muy grandes y en la parte central del país, valores intermedios y bajas frecuencias.

Dada la diversidad de terrenos geológicos, la carta permite observar variaciones de patrones y tipos de anomalías magnéticas.

La disposición de los datos de intensidad magnética total en forma digital va a permitir la reproducción de mapas de contornos a cualquier escala, intervalo de configuración para poder aplicar diversos procesos de filtrado que ayuden a la interpretación de los mismos. La información se podrá usar en estudios geofísicos y geológicos de exploración regional o local.

Las aplicaciones de la Carta Magnética son muy variadas:

- Investigación de la estructura de la corteza
- Tectónica de placas
- Exploración petrolera
- Exploración minera preliminar
- Geotérmica mapeo geológicos
- Estudio de la distribución y el carácter de los rasgos geológicos regionales,
- Delinear regionalmente las diferentes provincias geológicas,
- Seleccionar áreas para mas investigaciones geológicas detalladas
- Proveer un marco regional en la interpretación de estudios magnéticos de áreas limitadas.

Las comparaciones de las estructuras geológicas específicas presentadas en los mapas geológicos y tectónicos, con las anomalías correspondientes, dan información esencial con respecto a la distribución y configuración de las rocas.

Este trabajo fue obtenido después de más de diez años de estar recopilando, digitizando y anexando la información más reciente.

Se puede decir que la integración de la República Mexicana todavía no esta concluida pues actualmente se están realizando levantamientos marinos y aéreos para cubrir totalmente el Golfo de México y reforzar áreas donde se considera que

la información existente se puede mejorar añadiendo algunas líneas de observación.

La información del Golfo de México que se presenta en esta integración fue tomada de levantamientos muy regionales proporcionados por el Instituto de Geofísica de la U.N.A.M.

Esta integración es la primera en su género que se presenta de la República Mexicana.

BIBLIOGRAFIA

- ◆ Gunn, P.J. (Ed), 1997. Airbone Magnetic and Radiometric Surveys. Journal of Australian Geology and Geophysics, v. 17, 216 pp.
- ◆ Alva, L, Urrutia, J., Bohnel, H & Moran, D, 1991 Aeromagnetic anomalies and paleomagnetism in Jalisco and Michoacan, southern Mexico continental margin, and their implications for iron-ore deposits. Tectonophysics, 192, 169-190.
- ◆ Urrutia, J., 1977. Importancia del magnetismo remanente natural en la interpretación de anomalías magnéticas, Boletín AMGE, 18, 83-116.
- ◆ Urrutia, J. A. Campos, J. O., 1993. Geomagnetic secular variation in central Mexico since 1923 AD and comparison with 1945-1990 IGRF models. Journal of Geomagnetismo and Geoelectricity, 45, 243-249.
- ◆ Campos, J., Hernández, E. Nolasco, H, Orozco, A., Alvarez, G. & Urrutia, J. 1994. A preliminary assessment of the IGRF-1990 for Mexico Physics of the Earth and Planetary Interiors, 82, 103-109.
- ◆ Biegert, Ek & Millogan, P.S. 1998. Beyard recon: The new world of gravity and magnetics. The Leading Edge, 17, 41-42.
- ◆ Fairhead, JDA Somerton, IW., 1998. New insights into old data. The Leading Edge. 17,71-72.
- ◆ Gunn, P.J., 1998, Aeromagnetics locates prospective areas and prospects. The Leading Edge, 17, 67-69
- ◆ Alvarez, L. W., Alvarez, W., Asaro, F. And Michel, H., 1980, Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction: Science, v. 208, p. 1095-1108.
- ◆ Campos, J.O., Arzate J., Urrutia, J. A Delgado, D., 1997. The subsurface structure of the Chicxulub crater (Yucatán, México): Preliminary results of a magnetotelluric study. The leadinge Edge, V. Ib, p. 1774-1777.

- ◆ Baranov & Nandy., 1964. Numerical Calculations of the Formula of Reduction to the Magnetic Pole. Geophysics V. 29, pp 67-79
- ◆ Leo J. Peters., 1949. The Direct Approach to Magnetic Interpretation and its Practical Applications. Geophysics V.14, No. 3
- ◆ Frans De Meyer., Filter Techniques in Gravity Interpretation., Royal Belgian Meteorological Institute, Uccle, Belgium. 1978.
- ◆ LCT., User's Guide., Version 3.8., June 1996.

- ◆ Penfield G.T. and Camargo, A., 1981, Definition of a major igneous zone in the central Yucatan platform with aeromagnetism and gravity: Society of Exploration in Geophysicists, 51^o Annual International Meeting, Los Angeles, California, Abstracts and Biographies, v. 51, p. 37.
- ◆ Pilkington, M., Hildebrand, A. and Ortíz, C., 1994, Gravity and magnetic modeling and structure of the Chicxulub crater, Mexico: Journal of Geophysical Research, v. 99, p. 13,147-13,162,
- ◆ Sharpton, V., Dalrymple, G., Marin, L., Ryder, G., Shruaytz, B. And Urrutia, J., 1992, New links between the Chicxulub impact structure and the Cretaceous-Tertiary boundary: Nature, v. 359, p.819-821.
- ◆ Urrutia, J., Marin, L. And Sharpton, V.L., 1994, Reverse polarity magnetized melt rocks from the Cretaceous-Tertiary Chicxulub structure, Yucatán península, México: Tectonophysics, v. 237, p. 105-112.
- ◆ William J. Hinze, Peter J. Hood and the Committee for the Magnetic Anomaly map of North America, 1988. Magnetic Anomaly Map of north America: The Leading edge, v. 7, No 11.
- ◆ Grant, F.S., West, G.F., Interpretation Theory in Applied Geophysics. Mc Graw-Hill. 1992.
- ◆ Roland G. Henderson-Zietz. The upward continuation of anomalies in total magnetic intensity fields., Geophysics. V. pp 517-534.
- ◆ Briggs, Ian C., 1974. Machine Contouring Using Minimum Curvature. Geophysics V.39, No. 1.
- ◆ Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., Applied Geophysics., Cambridge 1992.
- ◆ Dobrin, M.B., Introducción a la Prospección Geofísica.,Omega. 1980.
- ◆ Bhattacharyya, B.K., Two Dimensional Harmonic Analysis as a Tool for Magnetic Interpretación. Geophysics V.30, No. 5