

01179



**DIVISION DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO**

**Facultad de Ingeniería**

**TRANSFORMACION LINEAL EN FRECUENCIAS DE  
MAPAS GRAVIMETRICOS Y MAGNETICOS**

**ILDEFONSO CORREA PEREZ**

**T E S I S**

**PRESENTADA A LA DIVISION DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO DE LA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**DE LA**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERIA**

**(EXPLORACION DEL SUBSUELO)**

**CIUDAD UNIVERSITARIA**

**MEXICO, D. F.**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**1990**



## **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 está 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.

## CONTENIDO

| Capítulo  | Página |
|---|--------|
| Agradecimientos.....  | IV     |
| Resumen.....  | V      |
| I. _ INTRODUCCION.....  | 1      |
| II. _ CONCEPTOS FUNDAMENTALES.....  | 6      |
| Transformada de Fourier bidimensional.....  | 7      |
| Par transformado de Fourier bidimensional finito.....   | 10     |
| Convolución bidimensional discreto.....   | 14     |
| III. _ ESPECTROS DE FRECUENCIA DE LOS CAMPOS GRAVIMETRICOS<br>Y MAGNETICOS.....                           | 20     |
| Campo gravimétrico.....   | 21     |
| Campo magnético.....  | 23     |
| Espectros de frecuencia de los campos gravimétrico<br>y magnético en términos de la capa equivalente..... | 24     |
| Espectro del campo gravimétrico.....  | 24     |
| Espectro del campo magnético.....   | 27     |
| IV. _ TRANSFORMACION DE LOS MAPAS MAGNETICOS.....   | 36     |
| Transformación de una anomalía en otra.....   | 37     |
| Transformación de la componente medida.....   | 37     |
| Transformación de la dirección de la magnetización.....   | 38     |
| Transformación de la componente medida y de la<br>dirección de la magnetización.....                      | 39     |
| Reducción al polo.....  | 42     |
| Transformación pseudogravimétrica.....  | 47     |
| Reducción al ecuador.....   | 50     |
| Transformación de una anomalía de campo total en<br>sus tres componentes perpendiculares.....             | 54     |
| Reducción ortogonal.....  | 57     |
| Eliminación de la magnetización remanente.....  | 60     |
| Eliminación de la magnetización inducida.....   | 62     |
| V. _ OTRAS TRANSFORMACIONES.....  | 64     |
| Relación entre los gradientes vertical y horizontal.....  | 65     |
| Relación entre los gradientes y el campo total.....   | 68     |
| Continuación analítica.....   | 70     |
| Derivadas verticales.....   | 71     |
| Separación regional-residual.....   | 71     |
| VI. _ INESTABILIDAD DE LOS FILTROS.....   | 76     |
| Reducción al polo.....  | 80     |
| Reducción al ecuador.....   | 85     |
| El valor base de los mapas transformados.....   | 87     |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| VII._ EJEMPLOS GRAFICOS.....       | 93  |
| VIII._ EJEMPLOS NUMERICOS.....     | 107 |
| IX._ PROGRAMAS DE COMPUTADORA..... | 118 |
| X._ CONCLUSIONES.....              | 132 |
| BIBLIOGRAFIA.....                  | 136 |

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a las autoridades de la Subdirección de Tecnología de Exploración del Instituto Mexicano del Petróleo todas las facilidades otorgadas para realizar esta tesis.

## Resumen

La representación en el dominio de la frecuencia del campo magnético es una expresión matemática que muestra el campo como el producto de varios factores que dependen de la intensidad de magnetización de la fuente anómala, de la geometría, de la profundidad, de la dirección de magnetización y de la componente medida. Al modificar los factores que dependen de estos dos últimos parámetros se encuentra la expresión del filtro generalizada para convertir una anomalía en otra.

De esta expresión se derivan los filtros para obtener: la reducción al polo, la reducción al ecuador, la reducción ortogonal, la transformación pseudogravimétrica, las tres componentes perpendiculares y el filtro para convertir una componente medida en otra. También se deducen de tal expresión y se presentan aquí dos nuevos filtros de transformación: a) el filtro para separar la componente remanente de una anomalía observada y b) el filtro para separar la componente inducida.

Se analiza la inestabilidad de los filtros y se concluye que la mayoría de ellos contiene tal problema.

Se muestran ejemplos numéricos y gráficos de anomalías transformadas con estos filtros y se comparan con anomalías teóricas calculadas. Se incluyen también las subrutinas de los filtros y el programa principal para hacer el filtrado, todo ello en fortran básico.

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

La transformación de un mapa gravimétrico o magnético para obtener otro mapa con anomalías atenuadas, realizadas o desfasadas son comúnmente aplicados en los trabajos de interpretación esencialmente para delimitar con precisión en el mapa, las estructuras geológicas del subsuelo. Los operadores o filtros para realizar tal proceso han sido publicados por diversos autores en la literatura geofísica. Algunas de las transformaciones más comunes son: las derivadas, la continuación analítica, la reducción al polo y la separación de anomalías.

Estas transformaciones se aplican a los mapas por convolución tanto en el dominio del espacio como en el dominio de la frecuencia espacial o número de onda. En el dominio del espacio la convolución consiste en la multiplicación de un conjunto de coeficientes por los valores del mapa original, tal que el tiempo de procesamiento es mínimo en las computadoras actuales. En el dominio de la frecuencia, si se aprovecha la ventaja que da el algoritmo de la transformada de Fourier rápida para realizar la conversión espacio-frecuencia-espacio, el tiempo de procesamiento es comparable al tiempo de procesamiento en el espacio.

Los filtros de transformación en el espacio u operadores, deben ser de dimensión pequeña comparada con la dimensión del mapa, para evitar perder información real en las orillas del mapa en el proceso de filtrado, lo que trae como consecuencia una pobre precisión en dicho proceso. Cabe mencionar aquí, que



el filtrado se considera preciso si la anomalía transformada se parece en forma y amplitud a la anomalía esperada.

La convolución en el dominio de la frecuencia requiere que el filtro tenga una dimensión igual que la dimensión del mapa, por lo que el filtrado en este dominio tiene un grado de precisión mayor que el filtrado en el espacio. Sin embargo, el mapa filtrado no está exento de la distorsión en las orillas, aunque solamente sean la primera y la segunda muestra de la orilla del mapa las afectadas (Bhattacharyya, 1965, p. 357).

La reducción al polo es una de las transformaciones que, por precisión, debe aplicarse en el dominio de la frecuencia. Su aplicación en el espacio implica el diseño de un operador que debe tener muchos coeficientes para representar el filtro ideal (Baranov y Naudy, 1964).

Aunque algunos autores Dean (1958), Bhattacharyya (1965, op. cit.) han publicado algunos filtros para transformar los mapas gravimétricos y magnéticos en el dominio de la frecuencia, Gunn (1975) fue el primero en obtenerlos de una descripción unificada de los campos gravimétrico y magnético en el dominio de la frecuencia; él expresa los campos como el producto de varios factores, tal que al modificar o suprimir alguno de ellos modifica el campo original y obtiene un mapa transformado. Así deduce las expresiones exactas de los filtros de la reducción al polo, la transformación pseudogravimétrica, la conversión de una componente medida en otra, de las derivadas y de la continuación analítica. También demuestra que tales transformaciones son

lineales tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del espacio tal que todas las transformaciones pueden ser vistas como una operación de filtrado.

Posteriormente, Roy y Aina(1986) presentan dos nuevos filtros para transformar los campos que son el de reducción al ecuador y el de la transformación ortogonal. Aunque no usa la metodología de Gunn(op.cit.) también pueden derivarse de ella.

En este trabajo se deducen todos los filtros de transformación mencionados anteriormente de una expresión simple que modifica los factores de campo total y de magnetización en la ecuación del campo magnético en el dominio de la frecuencia. Esta expresión simple convierte una componente medida en otra y modifica la dirección del vector de magnetización del cuerpo anómalo.

También se deducen de la misma expresión, y se presentan aquí dos nuevos filtros: el filtro para eliminar el efecto de la magnetización remanente de una anomalía magnética observada y el filtro para eliminar la magnetización inducida y tener la anomalía producida solamente por la magnetización remanente del cuerpo anómalo. Esta separación de las componentes se realiza sin necesidad de suponer la geometría del cuerpo anómalo como comúnmente se hace.

Así se logró conseguir una deducción generalizada de las transformaciones. Para completar la síntesis se incluye la deducción de las expresiones de los filtros que relacionan los

gradientes vertical, horizontal y los campos, dados por Nabighian(1984).

Es notable que este trabajo tiene gran importancia académica, ya que deduce las ecuaciones de los filtros de manera simple, sin embargo, su importancia práctica queda patente en el capítulo 9, donde se incluyen las subrutinas en Fortran básico para llevar a cabo las transformaciones por computadora. En los capítulos 7 y 8 se incluyen ejemplos gráficos y numéricos respectivamente para reproducir las subrutinas mencionadas.

A cerca de la inestabilidad de los filtros de transformación, Silva(1986) demuestra que el filtro de la reducción al polo es inestable en bajas latitudes. En este trabajo se plantea que la mayoría de los filtros tienen tal problema de inestabilidad, puesto que tienen expresiones analíticas semejantes. En forma particular se demuestra teórica y gráficamente la inestabilidad del filtro de la reducción al ecuador que Leu(1986) consideró estable.

Por último, aunque los filtros fueron deducidos de la expresión del campo magnético y fueron aplicados a las anomalías magnéticas, también son aplicables a las anomalías gravimétricas para calcular sus componentes X y Y y en la transformación pseudomagnética.

## CAPITULO II

### CONCEPTOS FUNDAMENTALES

TRANSFORMADA DE FOURIER BIDIMENSIONAL

La transformada de Fourier de una función  $f(x)$  puede ser calculada si tal función obedece las condiciones de Dirichlet, o sea, debe ser continua y debe ser integrable. Estas condiciones se cumplen si  $f(x)$  es físicamente medible. La extensión de la teoría de la transformada de Fourier a los datos bidimensionales nos permite estudiar las características espectrales de las funciones con dos variables espaciales  $X$  y  $Y$ . La transformada de Fourier de la función  $f(x,y)$  está definida como

$$F(u,v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \text{EXPI}[-i2\pi(ux + vy)] dx dy \quad \dots\dots \text{II.1}$$

y la transformada inversa como

$$f(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(u,v) \text{EXPI}[+i2\pi(ux + vy)] du dv \quad \dots\dots \text{II.2}$$

donde  $u$  y  $v$  son las frecuencias espaciales en las direcciones  $X$  y  $Y$  respectivamente, medidas en ciclos/kilómetros si  $X$  y  $Y$  están en kilómetros.

Los espectros de amplitud y fase están definidos como

$$|F(u,v)| = [ \text{Re}^2(u,v) + \text{Im}^2(u,v) ]^{1/2}$$

y 
$$\theta(u,v) = \text{ang} \text{ tang}[-\text{Im}(u,v) / \text{Re}(u,v)]$$

donde  $\text{Re}(u,v)$  e  $\text{Im}(u,v)$  son las componentes real e imaginaria de  $F(u,v)$ , o sea,

$$F(u,v) = \text{Re}(u,v) + i\text{Im}(u,v)$$

donde

$$\text{Re}(u,v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \cos[2\pi(ux + vy)] dx dy$$

e

$$\text{Im}(u,v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \sin[2\pi(ux + vy)] dx dy \quad \dots \text{II.3}$$

donde  $f(x,y)$  es real.

El espectro de energía de la función  $f(x,y)$  derivado de la ecuación II.1 está dado por

$$E(u,v) = F(u,v) \cdot F^*(u,v)$$

donde  $(*)$  denota complejo conjugado, o sea

$$E(u,v) = \text{Re}^2(u,v) + \text{Im}^2(u,v) \quad \dots \text{II.4}$$

Si se sustituye la expresión II.3 en la II.4 se puede verificar que  $E(u,v)$  posee la siguiente simetría

$$\begin{aligned} E(u,v) &= E(-u,-v) \\ E(u,-v) &= E(-u,v) \end{aligned} \quad \dots \text{II.5}$$

tal que el espectro de energía está plenamente definido en los cuadrantes 1 y 2 del plano  $(u,v)$ . Esta propiedad también la también la posee el espectro de amplitud.

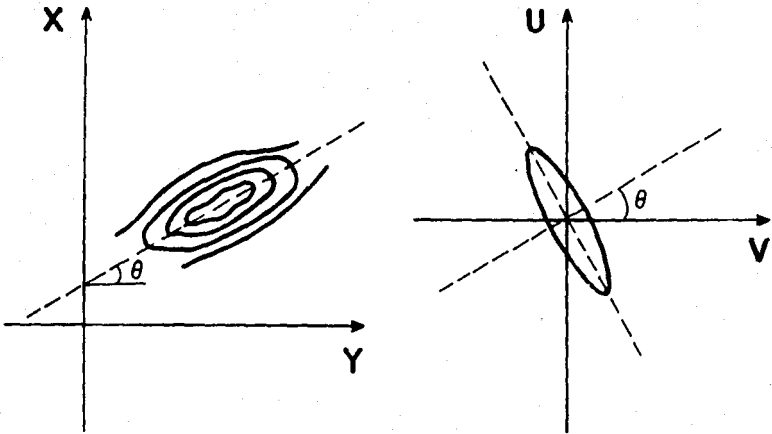


Figura II.1 Rasgo lineal en el espacio y su representación en el plano (u, v) de las frecuencias.

Otra propiedad importante en la transformación bidimensional de Fourier fue demostrada por Fuller (1967) y dice así: Un rasgo lineal en el plano  $(x,y)$  con un rumbo  $\theta$  estará evidenciado también por un rasgo lineal en el plano  $(u,v)$  de la frecuencia pero con un rumbo  $\theta \pm 90^\circ$ , fig.II.1. Esto lo dedujo de la ecuación

$$- (v/u) = X/Y = S = \tan \theta$$

donde  $X/Y=S$  es la pendiente del rasgo lineal en el plano  $(x,y)$  y  $S=-v/u$  es la pendiente del rasgo lineal representado en el dominio de la frecuencia.

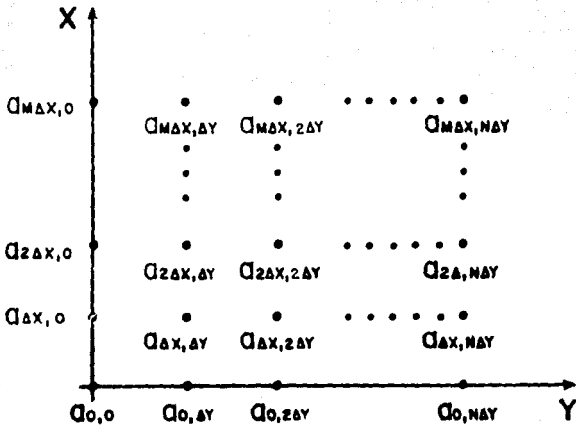
#### PAR TRANSFORMADO DE FOURIER BIDIMENSIONAL FINITO

Sea  $A_{m\Delta x, n\Delta y}$ , donde  $m=0,1,2 \dots M-1$  y  $n=0,1,2 \dots N-1$  un arreglo bidimensional discreto de  $M$  renglones y  $N$  columnas sobre un plano, especificado en un sistema de coordenadas Cartesiano con ejes  $X$  y  $Y$ , figura II.2a.

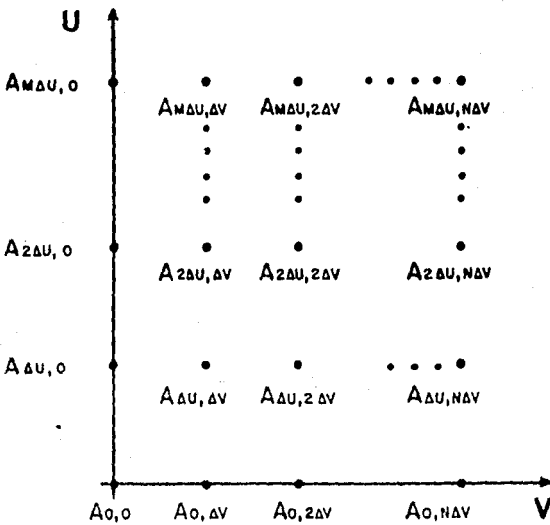
Se ha asumido que  $A_{m\Delta x, n\Delta y}$  se obtuvo al muestrear una función bidimensional continua a intervalos de  $\Delta x$  unidades en la dirección  $X$  y a  $\Delta y$  unidades en la dirección  $Y$ . En general no es necesario que  $\Delta x$  sea igual a  $\Delta y$ .

Se define la transformada de Fourier bidimensional finita de un arreglo  $A_{m\Delta x, n\Delta y}$  de dimensión  $M \times N$  como:





(a)



(b)

Figura II.2 a) Arreglo  $A_{m\Delta x, n\Delta y}$  b) Arreglo  $A_{k\Delta u, l\Delta v}$ ,  
 en ambos,  $m=k=0, 1, 2, \dots, M$  ,  $n=l=0, 1, 2, \dots, N$  .

$$A_{k\Delta u, l\Delta v} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} A_{m\Delta x, n\Delta y} \text{EXP}[-i2\pi(m\Delta x k\Delta u + n\Delta y l\Delta v)] \Delta x \Delta y$$

.....II.6

donde  $k=0, 1, 2, \dots, M-1$

y  $l=0, 1, 2, \dots, N-1$

$A_{k\Delta u, l\Delta v}$  es una representación discreta de  $A_{m\Delta x, n\Delta y}$  en el dominio de la frecuencia bidimensional y es llamado el espectro de frecuencia complejo bidimensional de  $A_{m\Delta x, n\Delta y}$ .

La transformada  $A_{k\Delta u, l\Delta v}$  está especificada por  $M \times N$  valores discretos en un sistema Cartesiano con ejes  $u$  y  $v$ , figura II.2b. Con respecto a las dimensiones, si  $\Delta x$  y  $\Delta y$  están dadas en unidades de distancia, como en este trabajo,  $\Delta u$  y  $\Delta v$  tendrán las dimensiones de ciclos/unidad de distancia.

La expresión de  $A_{m\Delta x, n\Delta y}$  como la transformada de Fourier inversa de  $A_{k\Delta u, l\Delta v}$  está dada como:

$$A_{m\Delta x, n\Delta y} = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} A_{k\Delta u, l\Delta v} \cdot \text{EXP}[+i2\pi(m\Delta x k\Delta u + n\Delta y l\Delta v)] \Delta u \Delta v$$

..... II.7

donde  $m=0, 1, 2, \dots, M-1$

y  $n=0, 1, 2, \dots, N-1$

Esta ecuación dará los valores originales de  $A_{m\Delta x, n\Delta y}$  solamente si las frecuencias fundamentales  $\Delta u$  y  $\Delta v$  están especificadas

como

$$\Delta u = \frac{1}{M \Delta x} \quad \text{y} \quad \Delta v = \frac{1}{N \Delta y} \quad \dots\dots (II.8)$$

y si los coeficientes  $A_k \Delta u, \Delta v$  son finitos.  $\Delta u$  y  $\Delta v$  son llamadas las frecuencias fundamentales puesto que todos los valores discretos de  $A_k \Delta u, \Delta v$  ocurren en las frecuencias que son múltiplos de  $\Delta u$  y  $\Delta v$ .

Si se sustituyen las expresiones II.8 en II.6 y II.7, y  $\Delta x$  y  $\Delta y$  se hacen unitarios, el par transformado puede ser escrito en una forma mas concisa, o sea:

$$A_{k,l} = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} A_{m,n} \text{EXPI}[-i2\pi(km/M + ln/N)] \quad \dots\dots II.9$$

donde  $k=0,1,2,\dots\dots M-1$   
 y  $l=0,1,2,\dots\dots N-1$

y

$$A_{m,n} = \frac{1}{MN} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} A_{k,l} \text{EXPI}[+i2\pi(km/M + ln/N)] \quad \dots\dots II.10$$

donde  $m=0,1,2,\dots\dots M-1$   
 y  $n=0,1,2,\dots\dots N-1$

En general, ambas pueden ser complejas. En este caso, en que trabajamos con datos gravimétricos y magnéticos,  $A_{m,n}$  es real y  $A_{k,l}$  es complejo.

Los espectros de amplitud y fase están dados en forma respectiva por

$$|A_{k,l}| = [A_{k,l} A^*_{k,l}] = [ \text{Re}^2 A_{k,l} + \text{Im}^2 A_{k,l} ]^{1/2}$$

$$\text{y } \theta_{k,l} = \text{ang } \text{tang} \left[ \frac{-\text{Im}(A_{k,l})}{\text{Re}(A_{k,l})} \right].$$

donde  $A^*_{k,l}$  es el complejo conjugado de  $A_{k,l}$ .

Es importante notar que el par transformado de Fourier  $A_{m,n}$  y  $A_{k,l}$  son periódicos en zonas rectangulares con respecto a las líneas paralelas a los ejes coordenados.

#### CONVOLUCION BIDIMENSIONAL DISCRETA

La convolución es la operación matemática a que nos referimos comúnmente como filtrado. La convolución se puede realizar como una operación en el dominio del espacio, por medio de la transformada-Z y por medio de la transformada de Fourier. Aquí nos referimos a la última forma de aplicación, la cual es empleada en este trabajo.

Sean  $A_{m',n'}$  y  $B_{m',n'}$  dos funciones discretas bidimensionales representadas por los arreglos matriciales de dimensiones  $M \times N$  y  $K \times L$  respectivamente, donde  $M$  y  $K$  indican el número de renglones y  $N$  y  $L$  el número de columnas. La convolución de  $A_{m',n'}$  con  $B_{m',n'}$  da el arreglo matricial  $C_{m,n}$  de  $M+K-1$  por  $N+L-1$  que puede ser escrito como:

$$C_{m,n} = \sum_{m'=0}^{M-1} \sum_{n'=0}^{N-1} A_{m',n'} B_{m-m',n-n'} \quad \dots \text{II.11}$$

donde  $m=0, 1, 2, \dots, M+K-2$

y  $n=0, 1, 2, \dots, N+L-2$

y  $C_{m,n} = 0$

cuando  $m=0, 1, 2, \dots, M+K-2$

y/o  $n=0, 1, 2, \dots, N+L-2$

Si con la ecuación II.9 se calcula la transformada de Fourier de II.11 se obtiene

$$C_{k,l} = A_{k,l} \cdot B_{k,l}$$

donde  $A_{k,l}$  es la transformada de Fourier de  $A_{m',n'}$

$B_{k,l}$  es la transformada de Fourier de  $B_{m',n'}$

y  $C_{k,l}$  es la transformada de Fourier de la

convolución en el espacio  $A \times B$ .

de donde se deduce la importante propiedad que dice que la convolución de dos funciones discretas es equivalente a la multiplicación término a término de sus transformadas de Fourier. Explícitamente esta propiedad puede ser escrita como.

$$A_{m,n} * B_{m,n} \Leftrightarrow A_{k,l} \bullet B_{k,l}$$

y

$$A_{m,n} \bullet B_{m,n} \Leftrightarrow A_{k,l} * B_{k,l}$$

donde  $\Leftrightarrow$  indica par transformado de Fourier y  $*$  indica convolución.

Usando esta propiedad, la convolución de dos funciones en el dominio del espacio se puede realizar transformado cada función al dominio de la frecuencia, multiplicado término a término estas transformaciones y transformado al dominio del espacio el producto.

Para llevar a cabo así la convolución,  $A_{k,l}$  y  $B_{k,l}$  deben satisfacer ciertas condiciones que a continuación se comentan.

Puesto que la convolución en frecuencia involucra la multiplicación término a término de  $A_{k,l}$  y  $B_{k,l}$ , ellos deben tener el mismo número de términos y los correspondientes términos deben representar las mismas componentes de frecuencia. Sea cual sea el tamaño de  $A_{m,n}$  y  $B_{m,n}$ ;  $A_{0,0}$  y  $B_{0,0}$  representan la misma componente de frecuencia, la frecuencia cero.

Si se puede hacer que los intervalos de muestreo en el dominio de la frecuencia  $\Delta u$  y  $\Delta v$  sean los mismos para  $A_{k,l}$  y  $B_{k,l}$ , entonces los términos de  $A_{k,l}$  y  $B_{k,l}$ ,  $k=0,1,2,\dots,M-1$ ,  $l=0,1,2,\dots,N-1$  representarán las mismas componentes de frecuencia.

Ya se ha especificado en II.8 que los intervalos de muestreo en frecuencia  $\Delta u$  y  $\Delta v$  dependen del tamaño del arreglo y del intervalo de muestreo en el dominio del espacio. Entonces, las condiciones para que se lleve a cabo la convolución  $A_{k,l} B_{k,l}$ , esto es

$$\Delta u = 1/M \Delta x \quad \text{y} \quad \Delta v = 1/N \Delta y$$

se satisfacen si  $A_{x',y'}$  y  $B_{x',y'}$  tienen el mismo intervalo de muestreo  $\Delta x$  y  $\Delta y$  y son arreglos del mismo tamaño.

En general  $A_{x',y'}$  y  $B_{x',y'}$  no tienen el mismo tamaño: comúnmente el filtro tiene un tamaño más pequeño que el arreglo de datos. Por lo que al arreglo del filtro se le pueden agregar ceros hasta tener el mismo tamaño que el arreglo de datos. Esto equivale en frecuencia a interpolar el espectro de frecuencia del filtro, figura II.3. También podemos especificar para ambos,  $A_{x',y'}$  y  $B_{x',y'}$  los mismos intervalos de muestreo  $\Delta x$  y  $\Delta y$ .

Así de acuerdo con II.8,  $A_{k,l} \Delta u, \Delta v$  y  $B_{k,l} \Delta u, \Delta v$  tendrán los mismos intervalos de muestreo  $\Delta u$  y  $\Delta v$  y serán ambos de dimensión  $M \times N$ .

En este trabajo se maneja un caso particular: se tiene el arreglo

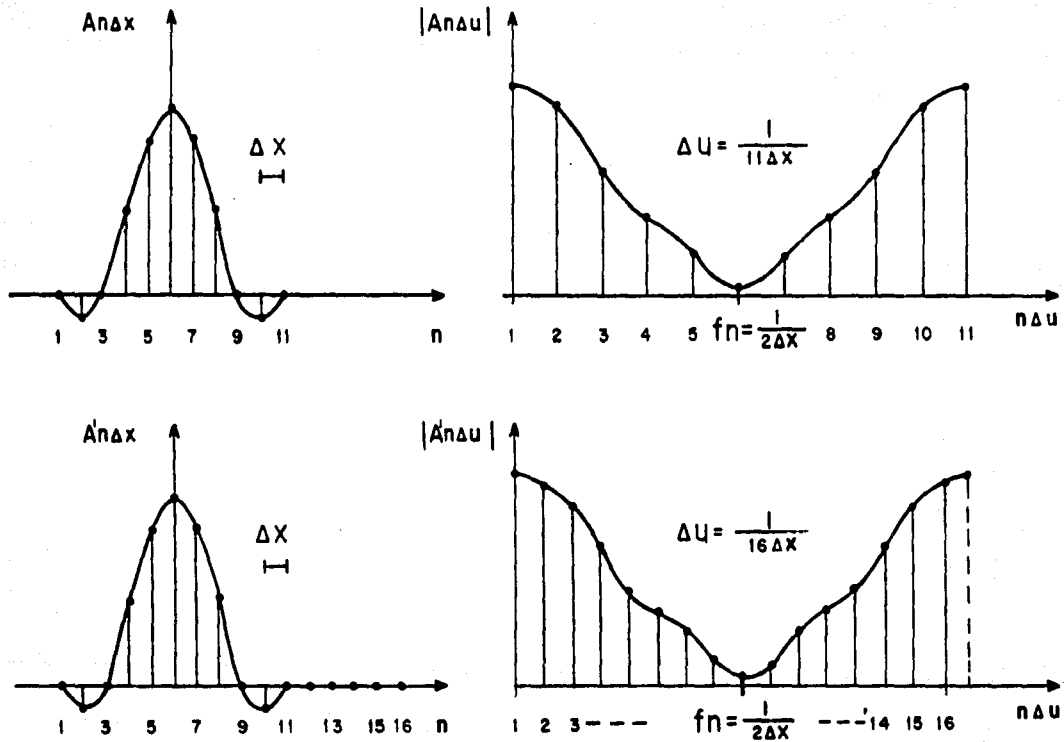


Figura II.3 Arriba) Señal discreta  $A_n \Delta x$  y su espectro de amplitud.

Abajo ) Señal  $A_n \Delta x$  aumentada con ceros y su espectro de amplitud.



de datos  $Ax',y'$  en el dominio del espacio y la expresión exacta del filtro en el dominio de las frecuencias  $Bu,v$ . El proceso de convolución entonces se realiza transformando el arreglo  $Ax',y'$  al dominio de las frecuencias para obtener el arreglo  $Ak,l$ , multiplicando término a término  $Ak,l$  con  $Bk,l$  y transformando el producto al dominio del espacio. El arreglo  $Ak,l$  tiene dimensión  $M \times N$  e intervalos de muestreo  $\Delta u$  y  $\Delta v$ . Entonces, el arreglo discreto  $Bk,l$  se genera muestreando la expresión exacta  $Bu,v$  con los mismos intervalos de muestreo  $\Delta u$  y  $\Delta v$  de  $Ak,l$ , hasta obtener un arreglo también de  $M \times N$  elementos.

## C A P I T U L O    I I I

### ESPECTROS DE FRECUENCIA DE LOS CAMPOS GRAVIMETRICO Y MAGNETICO

## CAMPO GRAVIMETRICO:

El potencial gravitacional debido a una distribución de densidad  $d(x',y',z)$  en un punto  $p(x,y,h)$  arriba de la distribución es

$$U_g(x,y,h) = G \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} \frac{d(x',y',z)}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-h)^2]^{1/2}} dx' dy' dz \quad \dots \text{III.1}$$

donde

$(x',y',z)$  son las coordenadas de una unidad de masa elemental.

$G$  es la constante de Gravitación Universal.

$z$  es positiva hacia abajo, figura III.1.

Gunn (1975) demostró que el espectro de una anomalía gravimétrica tridimensional en forma generalizada es

$$g(u,v,h) = 2\pi G \int_0^{\infty} d(u,v,z) \text{EXP}[-(h-z)(u^2 + v^2)^{1/2}] dz \quad \dots \text{III.2}$$

donde

$u,v$  son las coordenadas de la frecuencia angular y

$d(u,v,z)$  es la transformada de Fourier de  $d(x,y,z)$ .

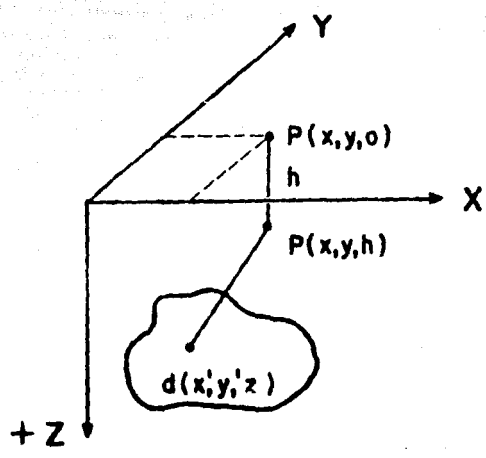


Figura III.1 Distribución de densidad.

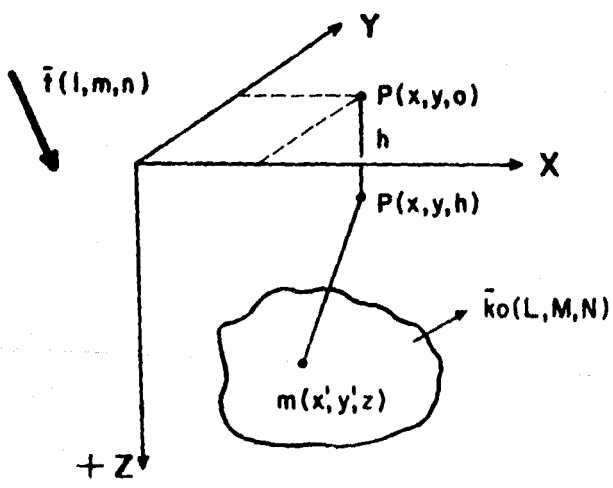


Figura III.2 Distribución de magnetización y vectores de campo inductor y de magnetización.

CAMPO MAGNETICO

El potencial magnético debido a una distribución de magnetización  $m(x',y',z)$  en un punto  $p(x,y,h)$ , (figura III.2), es

$$U_m(x,y,h) = \frac{d}{d\kappa} \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{m(x',y',z)}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-h)^2]^{1/2}} dx'dy'dz \quad \dots\dots III.3$$

donde

$d/d\kappa$  es la derivada direccional en la dirección de magnetización y se expresa como  $d/d\kappa = L d/dx + M d/dy + N d/dz$  donde (L,M,N) son los cosenos directores de la dirección del vector de magnetización (considerada constante).

Gunn (op.cit.) también demostró que el espectro de una anomalía magnética tridimensional en forma generalizada es

$$T(u,v,h) = 2\pi i [iLu + iMv + (u+v)^2]^{1/2} \int_0^{\infty} m(u,v,z) \cdot \text{EXP}[-(z-h)(u+v)^2]^{1/2} dz \quad \dots\dots III.4$$

donde  $i = \sqrt{-1}$

(L,m,n) son los cosenos directores de la componente

del campo magnético medido, y

$m(u,v,z)$  es la transformada de Fourier de  $m(x,y,z)$

### ESPECTROS DE FRECUENCIA DE LOS CAMPOS GRAVIMETRICO Y MAGNETICO EN TERMINOS DE LA CAPA EQUIVALENTE

Se ha establecido bien en la literatura geofísica (p.e.Roy(1962)) que una distribución de densidad  $d(x,y,z)$  tiene una distribución de densidad superficial equivalente  $ds(x,y,d)$  sobre una superficie a una profundidad  $d$ , la cual produce la misma anomalía gravimétrica. Esta distribución de densidad superficial es llamada la "capa equivalente", figura III.3.

Similarmente, una distribución de magnetización  $ma(x,y,z)$  puede ser reemplazada por una distribución de magnetización superficial equivalente  $ms(x,y,d)$ .

Espectro del campo gravimétrico.

La expresión del potencial gravimétrico debido a la distribución de densidad superficial es (Gunn, op.cit.)

$$Ug(x,y,h) = G \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{ds(x',y',d)}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (d-h)^2]^{3/2}} dx'dy' \quad \dots III.5$$

donde:  $G$  es la constante de Gravitación Universal, y  
 $ds$  es la distribución de densidad superficial.

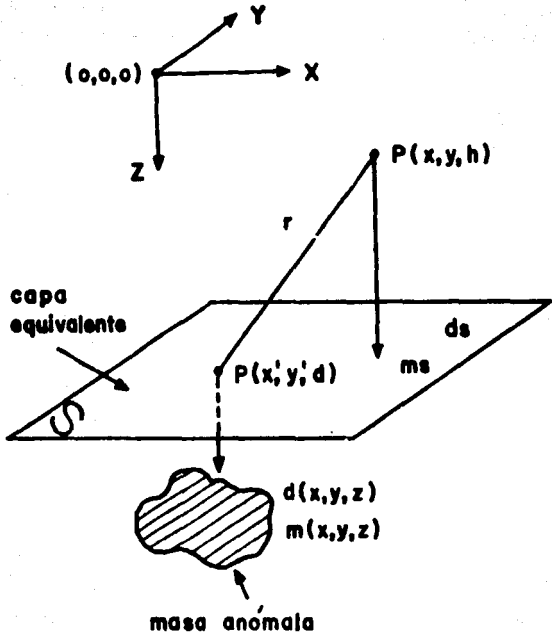


Figura III.3 Concepto de capa equivalente

La integral que multiplica a  $G$  tiene la forma de una integral de convolución (Hsu, 1970), o sea,

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{ds(x', y', d)}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (d-h)^2]^{1/2}} dx' dy' = ds(x, y, d) * R(x, y, d-h)$$

donde (\*) denota convolución, y

$$R(x, y, d-h) = \frac{1}{[x^2 + y^2 + (d-h)^2]^{1/2}}$$

El teorema de convolución establece que si dos términos son convolucionados en el dominio del espacio entonces, ellos se multiplican en el dominio de la frecuencia (y viceversa). Entonces, si se aplica la Transformada de Fourier en ambos lados de (III.5), se obtiene:

$$Ug(u, v, h) = G ds(u, v, d) \bullet R(u, v, d-h)$$

donde:

$$ds(u, v, d) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} ds(x, y, d) \bullet \text{EXPI}[-i(ux+vy)] dx dy$$

$$R(u, v, d-h) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{[x^2 + y^2 + (d-h)^2]^{1/2}} \text{EXP}[-i(ux+vy)] dx dy$$

y  $Ug(u, v, h)$  es la transformada de Fourier de  $Ug(x, y, h)$ .



Bhattacharyya (1966), mediante una expresión integral dada por Erdelyi (1954) demostró que

$$\int_{-a}^a \int_{-a}^a \frac{1}{[x^2 + y^2 + (d-h)^2]^{3/2}} \text{EXP}[-i(ux+vy)] dx dy = \frac{2\pi \text{EXP}[-(d-h)(u+v)]}{(u^2 + v^2)^{3/2}}$$

la cual es la transformada de Fourier de  $R(x,y,d-h)$ .

Por lo tanto

$$U_g(u,v,h) = 2\pi G \cdot ds(u,v,d) \frac{\text{EXP}[-(d-h)(u+v)]}{(u^2 + v^2)^{3/2}} \quad \dots \text{III.6}$$

Normalmente, se mide la componente vertical de la gravedad. Su transformada de Fourier se obtiene al diferenciar la expresión del potencial dada en (III.6) con respecto a  $h$ .

$$\frac{dU_g}{dh} = g(u,v,h) = 2\pi G \cdot ds(u,v,d) \cdot \text{EXP}[-(d-h)(u+v)] \quad \dots \text{III.7}$$

Esta es la expresión dada por Gunn (1975) sin desarrollar.

Espectro del campo magnético.

La expresión del potencial magnético debido a la distribución

de magnetización superficial equivalente es (Gunn op.cit.)

$$U_m(x, y, h) = \frac{d}{d k_0} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{m_s(x', y', d)}{[(x-x')^2 + (y-y')^2 + (d-h)^2]^{3/2}} dx' dy' \quad \dots \text{III.8}$$

donde:  $m_s$  es la distribución de magnetización superficial equivalente

$\frac{d}{d k_0}$  es la derivada direccional en la dirección de magnetización  $k_0$ , la cual se expresa como  $d/d k_0 = L \cdot d/dx + M \cdot d/dy + N \cdot d/dh$  donde, a su vez,  $L, M$  y  $N$  son los cosenos directores de la dirección de magnetización (considerada constante).

La forma de la ecuación (III.8) es idéntica a la ecuación III.5 (excepto por la derivada direccional), tal que haciendo el mismo desarrollo que se usó para el potencial gravimétrico se obtiene

$$U_m(u, v, h) = 2\pi \frac{d}{d k_0} m_s(u, v, d) \frac{\text{EXPL}[-(d-h)(u^2 + v^2)^{1/2}]}{(u^2 + v^2)^{3/2}}$$

donde:  $m_s(u, v, d)$  es la transformada de Fourier de  $m_s(x, y, d)$  y  $d/d k_0$  indica la derivada direccional en el dominio de la frecuencia.

Si se sustituye la expresión de  $d/d k_0$ , se tiene

$$U_m(u, v, d) = 2\pi \left[ L \frac{d}{dx} + M \frac{d}{dy} + N \frac{d}{dh} \right] [ms(u, v, d) \cdot \frac{\exp(-\sqrt{(d-h)(u+v)})}{\sqrt{(u+v)}}] \quad \dots \text{III.9}$$

Se puede demostrar que (Hsu, 1970) si  $f$  y  $F$  son un par transformado de Fourier

$$\frac{df}{dx} \langle \Rightarrow \rangle iu F \quad \text{y} \quad \frac{df}{dy} \langle \Rightarrow \rangle iv F$$

donde  $\langle \Rightarrow \rangle$  denota par transformada de Fourier.

La derivada con respecto a  $h$  en (III.9) es

$$\begin{aligned} \frac{d}{dh} [ms(u, v, d) \cdot \frac{\exp(-\sqrt{(d-h)(u+v)})}{\sqrt{(u+v)}}] &= \\ &= \frac{2}{\sqrt{(u+v)}} \cdot [ms(u, v, d) \cdot \frac{\exp(-\sqrt{(d-h)(u+v)})}{\sqrt{(u+v)}}] \end{aligned}$$

Por lo tanto, sustituyendo las derivadas se obtiene

$$U_m(u, v, h) = 2\pi [iuL + ivM + (u+v)N] \cdot [ms(u, v, d) \cdot \frac{\exp(-\sqrt{(d-h)(u+v)})}{\sqrt{(u+v)}}] \quad \dots \text{III.10}$$

Para obtener la expresión de la intensidad magnética total, es necesario diferenciar la ecuación del potencial magnético en la dirección de la componente del campo medida, o sea

$$T(u,v,h) = \frac{d}{dt} U_m(u,v,h)$$

donde  $d/dt$  es la derivada direccional en la dirección en la componente mencionada, o sea,  $d/dt = l \cdot d/dx + m \cdot d/dy + n \cdot d/dh$  donde  $l, m$  y  $n$  son los cosenos directores en la dirección de la componente medida. Por lo que

$$T(u,v,h) = \frac{d}{dt} \left( 2\pi [i_u l + i_v m + (u^2 + v^2)^{1/2} n] \cdot m_s(u,v,d) \cdot \frac{\exp[-(d-h)(u^2 + v^2)^{1/2}]}{(u^2 + v^2)^{1/2}} \right)$$

donde también  $d/dt$  indica la derivada direccional en el dominio de la frecuencia

Por el mismo argumento anterior se llega a

$$T(u,v,h) = 2\pi [i_u l + i_v m + (u^2 + v^2)^{1/2} n] \cdot [i_u L + i_v M + (u^2 + v^2)^{1/2} N] \cdot \left[ m_s(u,v,d) \cdot \frac{\exp[-(d-h)(u^2 + v^2)^{1/2}]}{(u^2 + v^2)^{1/2}} \right] \dots \text{III.11}$$

Esta expresi3n fue tambi3n dada por Gunn (1975) sin desarrollar.

Consideremos que la superficie de observaci3n sea el plano XY, entonces, la variable h toma el valor de cero y por lo tanto, las ecuaciones anteriores (III.7) y (III.11) quedan como

$$g(u,v,0) = 2\pi G \cdot ds(u,v,d) \cdot \exp[-d(u^2+v^2)^{1/2}] \dots\dots\dots III.12$$

$$T(u,v,0) = 2\pi \cdot ms(u,v,d) \cdot [iuL+ivM+(u^2+v^2)^{1/2} \cdot n] \cdot [iuL+ivM+(u^2+v^2)^{1/2} \cdot N] \cdot \left[ \frac{\exp(-d(u^2+v^2)^{1/2})}{(u^2+v^2)^{1/2}} \right] \dots\dots\dots III.13$$

Estas ecuaciones se pueden expresar como el producto de varios factores, lo que facilita la manipulaci3n, o sea,

$$g(u,v) = 2\pi G \cdot ds(u,v,d) \cdot H(u,v,d) \dots\dots\dots III.14$$

$$T(u,v) = 2\pi ms(u,v,d) \cdot R^{-1}(u,v) \cdot Mo(u,v) \cdot Mm(u,v) \cdot H(u,v,d) \dots\dots\dots III.15$$

donde:

G es la constante de Gravitaci3n Universal,  
 ds y ms son los factores que dependen respectivamente de la distribuci3n densidad y magnetizaci3n superficial equivalente sobre una superficie a una profundidad d.

$M(u,v) = [iuL + ivM + (u + v)^2]^{1/2} N$  es el factor que depende del vector de campo geomagnético medido en la región de observación,

$Mm(u,v) = [iuL + ivM + (u + v)^2]^{1/2} N$  depende de la orientación del vector de magnetización,

$H(u,v,d) = \text{EXP}\{-d(u + v)^2\}^{1/2}$  depende de la profundidad de la capa equivalente y

$R(u,v) = \text{sqrt}(uu + vv)$  es el del radio vector de posición en coordenadas frecuenciales.

Considerando el teorema de convolución, se deduce que las ecuaciones de los campos gravimétricos y magnéticos están expresados por la convolución de los factores que los conforman.

Hsu (1967, pag.176) demuestra que la convolución de dos funciones  $h(t)$  y  $fe(t)$  para obtener  $fs(t)$ , o sea,  $fs(t) = h(t)*fe(t)$  es un sistema lineal, donde  $h(t)$  es la respuesta al impulso unitario del sistema.

Entonces, la convolución de dos funciones es una transformación lineal, y todas las transformaciones realizadas por medio de la convolución son transformaciones lineales.

Estos hechos, justifican que cualquier transformación realizada con las ecuaciones (III.14) y (III.15) son transformaciones lineales.

Por otra parte, la distribución de densidad superficial  $ds(u,v,d)$  de la ecuación III.14 se puede expresar como

$$ds(u,v,d) = ds \cdot Fg(u,v,d)$$

donde  $ds$  es la densidad de la fuente, considerada uniforme y constante a través del cuerpo y  $Fg(u,v,d)$  es la transformada de Fourier de una función que define a la distribución espacial de la densidad en el subsuelo. En el dominio del espacio esta distribución es

$$ds(x,y,d) = ds * Fg(x,y,d)$$

donde  $F(x,y,d)$  es la distribución espacial de la densidad.

Por lo tanto, la anomalía gravimétrica (III.14) se puede expresar como

$$G(u,v) = 2\pi G \cdot ds \cdot Fg(u,v,d) \cdot H(u,v,d) \quad \dots \dots \dots \text{III.16}$$

y en el espacio

$$g(x,y) = 2\pi G ds * Fg(x,y,d) * H(x,y,d)$$

donde (\*) denota convolución.

Entonces, una anomalía gravimétrica depende de los parámetros, profundidad, distribución y magnitud de la densidad.

De la misma manera, si se asume que la magnitud y la dirección de la magnetización es constante sobre la capa equivalente,

$T(u,v)$  se puede expresar como:

$$T(u,v) = 2\pi m_s \cdot F_m(u,v,d) \cdot M_o(u,v) \cdot M_m(u,v) \cdot H(u,v,d) \cdot R^{-1}(u,v) \quad \dots \text{III.17}$$

donde  $F_m(u,v,d)$  es la transformada de Fourier de la función de distribución de la magnetización  $F(x,y,d)$ .

En el espacio

$$T(x,y) = 2\pi m_s \cdot F_m(x,y,d) * M_o(x,y) * M_m(x,y) * H(x,y) * R^{-1}(x,y)$$

Por lo que la anomalía magnética depende de los parámetros, magnitud y dirección de magnetización, de la componente del campo medido y de la distribución espacial de la magnetización.

Hsu (1967, p.107) también demuestra que si  $F(w)$  es una función real, entonces  $f(x)$  es una función simétrica y que si  $F(w)$  es una función compleja,  $f(x)$  es una función no-simétrica, donde  $F(w)$  y  $f(x)$  forman un par transformado de Fourier. Entonces, se pueden explicar las características de una anomalía (forma y amplitud) en función de sus factores.

Así, para el caso gravimétrico se tiene que  $H(u,v) = \text{EXP}((-d) \sqrt{uu + vv})$  es una función real y simétrica para toda  $d$  y en el espacio su equivalente  $H(x,y)$  también es una función simétrica con respecto a un eje vertical. Por lo tanto, este factor aporta simetría a la anomalía y afecta su amplitud.

El factor  $F_g(x,y,d)$  en general es una función asimétrica puesto que depende de la distribución de la densidad en el subsuelo.



Por último el factor  $ds$  es una constante que afecta la amplitud. En resumen, la amplitud de la anomalía depende de la profundidad de la masa anómala y de la densidad, y la forma depende de la distribución espacial de dicha masa.

En el caso magnético los factores  $H(u,v)$ ,  $F_m(u,v,d)$  y  $m_s$  (equivalente a  $ds$ ) tienen las mismas funciones que en el caso gravimétrico. Los factores  $M_o(u,v)$  y  $M_m(u,v)$  en general, son complejos, por lo que las funciones equivalentes en el espacio  $M_o(x,y)$  y  $M_m(x,y)$  son asimétricas y causan asimetría a las anomalías magnéticas.

Como un caso particular, si  $F_m(x,y,d)$  es simétrica con respecto a un eje vertical, la asimetría en la anomalía será causada solamente por los factores  $M_o$  y  $M_m$ .

Puesto que, a su vez, estos factores dependen de la dirección del campo total medido y de la dirección de la magnetización de la fuente anómala, estos son finalmente los causantes de la asimetría y del desplazamiento lateral de la anomalía con respecto la fuente anómala, tal que, no hay correlación directa como en gravimetría.

## CAPITULO IV

### TRANSFORMACION DE LAS ANOMALIAS MAGNETICAS

## TRANSFORMACION DE UNA ANOMALIA EN OTRA

La distorsión de las anomalías magnéticas causada por los vectores de campo magnético total y de magnetización, comúnmente inclinados, no permite la asociación directa entre la distribución de magnetización en el subsuelo y la forma de la anomalía, de manera análoga como en gravimetría, lo que dificulta la lectura e interpretación de los mapas magnéticos.

Por lo tanto, una de las aplicaciones de las transformaciones magnéticas será eliminar la mencionada distorsión. Las otras aplicaciones son atenuar, realzar y separar las anomalías y obtener otras componentes que ayuden en la interpretación. Todas las transformaciones que a continuación se estudian involucran a los factores  $M_0(u,v)$  y  $M_m(u,v)$  del espectro de frecuencia magnético  $T(u,v)$ .

### Transformación de la componente medida.

Para convertir una anomalía magnética  $T(u,v)$  dada por la ecuación III.17, en otra, denominada  $T'(u,v)$  con una nueva componente de campo medida definida por la expresión

$$T'(u,v) = 2\pi \mu_0 F_m(u,v,d) \cdot M'_0(u,v) \cdot M_m(u,v) \cdot R^{-1}(u,v) \cdot H(u,v,d)$$

donde:  $M'_0(u,v)$  es el nuevo factor de campo medido

simplemente se multiplica a  $T(u,v)$  por el filtro

$$\frac{M'o(u,v)}{M o(u,v)} \dots\dots\dots IV.1$$

donde:

$$M_o(u,v) = iu_l + iv_m + Ru_v n$$

$$M'o(u,v) = iu_l' + iv_m' + Ru_v n' \quad \text{y} \quad Ru_v = R(u,v) = \sqrt{uu+vv}$$

y a su vez

(l,m,n) son los cosenos directores del vector de campo medido.

(l',m',n') son los cosenos directores del nuevo vector de campo "medido".

De tal manera que la nueva anomalía se puede escribir como:

$$T'(u,v) = \frac{M'o(u,v)}{M o(u,v)} T(u,v) \dots\dots\dots IV.2$$

Transformación de la dirección de magnetización.

De manera semejante, para convertir una anomalía magnética T(u,v) en otra anomalía, denominada T'(u,v) con una nueva dirección de magnetización, definida por la expresión

$$T'(u,v) = 2\pi ms F_m(u,v,d) \cdot M_o(u,v) \cdot M'^m(u,v) \cdot R^{-1}(u,v) \cdot H(u,v,d)$$

donde: M'm(u,v) es el nuevo factor de magnetización

simplemente se multiplica a  $T(u,v)$  por el filtro

$$\frac{M'm(u,v)}{M m(u,v)} \dots\dots\dots IV.3$$

donde:

$$Mm(u,v) = iuL + ivM + Ruv N$$

$$M'm(u,v) = iuL' + ivM' + Ruv N'$$

y a su vez

$(L,M,N)$  son los cosenos directores del vector de magnetización del cuerpo anómalo y

$(L',M',N')$  son los cosenos directores del nuevo vector de magnetización del mismo cuerpo.

Así también, la nueva anomalía se puede escribir como:

$$T'(u,v) = \frac{M'm(u,v)}{M m(u,v)} T(u,v) \dots\dots\dots IV.4$$

Transformación de la componente medida y de la dirección de magnetización.

En el caso general, para convertir una anomalía magnética  $T(u,v)$

dada por la ecuación III.17, en otra anomalía, llamada  $T'(u,v)$  con una nueva componente de campo medida y una nueva dirección de magnetización (fig.IV.1), definida por la expresión

$$T'(u,v) = 2\pi m_s F_m(u,v,d) \cdot M'_o(u,v) \cdot M'_m(u,v) \cdot R^{-1}(u,v) \cdot H(u,v,d) \dots IV.5$$

donde:  $M'_o(u,v)$  es el nuevo factor de campo medido  
y  $M'_m(u,v)$  es el nuevo factor de magnetización

solo se multiplica a  $T(u,v)$  por el filtro

$$\frac{M'_o(u,v)}{M_o(u,v)} \frac{M'_m(u,v)}{M_m(u,v)} \dots IV.6$$

Así que, también de manera similar que en los casos anteriores, la nueva anomalía se puede escribir como:

$$T'(u,v) = \frac{M'_o(u,v)}{M_o(u,v)} \frac{M'_m(u,v)}{M_m(u,v)} T(u,v) \dots IV.7$$

Se puede observar que el filtro (IV.6) está expresado por el producto del filtro  $M'_o / M_o$  que transforma la componente del campo medido por el filtro  $M'_m / M_m$  que transforma la dirección

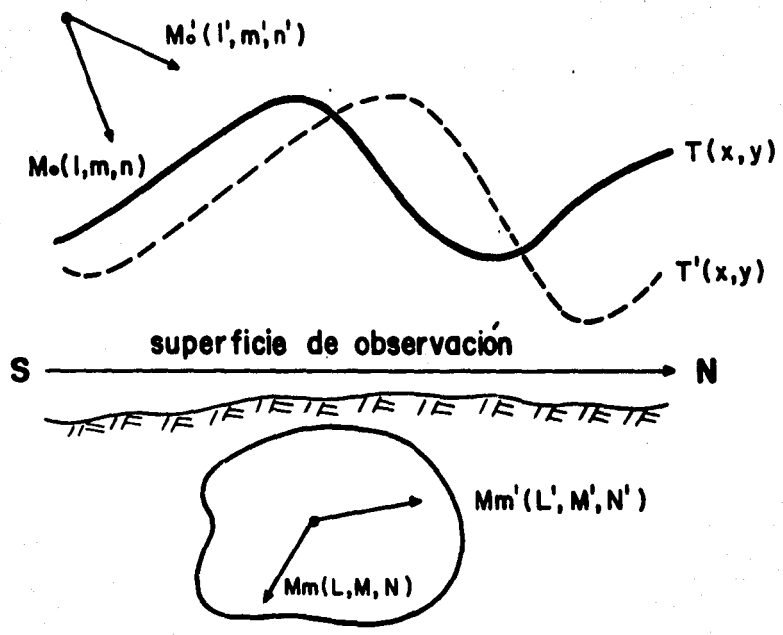


Figura IV.1 Vectores de campo total y de magnetización y anomalías magnéticas.

de magnetización del cuerpo anómalo.

Visto de esta manera, el proceso de filtrado en el dominio de la frecuencia se convierte sencillamente en la sustitución de un factor por otro.

En la ecuación (IV.5) la dirección de la magnetización en la latitud correspondiente a la anomalía transformada  $T'(u,v)$  (p.e. en el polo), se considera paralela a la dirección del campo geomagnético en esa región, así también la magnitud de dicha magnetización  $m's$  ha sido considerada igual que la magnitud de la magnetización  $m_s$  en la región donde se observó la anomalía  $T(u,v)$ , o sea,  $m's = m_s$ .

En un sentido estricto, la magnitud de la magnetización para el mismo cuerpo debe ser diferente en ambas regiones, puesto que ella depende de la intensidad del campo magnético terrestre que también es diferente de una región a otra.

En la práctica, comúnmente, se usa la ecuación (IV.7) para modificar la forma de la anomalía magnética, sin importar su amplitud, tal que facilite la localización de la fuente anómala en forma más precisa y rápida. Por lo que la última consideración es válida.

#### REDUCCION AL POLO

La reducción al polo es un concepto ingenioso creado por Baranov



(1957) para minimizar o eliminar la asimetría y el desplazamiento lateral, con respecto al cuerpo anómalo, de la anomalía magnética de intensidad total causada por la desviación de la vertical del vector de la componente medida y del vector de magnetización, figura IV.2.

En la región del polo magnético el vector de campo es vertical y la dirección de magnetización también es, a menudo, vertical. Entonces, una anomalía de intensidad total reducida al polo es equivalente a aquella anomalía que fuese producida por el mismo cuerpo anómalo, pero situado en el polo y magnetizado solamente por inducción.

El filtro de la reducción al polo en el dominio de la frecuencia, es un caso particular del filtro dado por la ecuación IV.6 donde  $M'_o$  y  $M'_m$ , son los factores que dependen de las direcciones de campo medido y de magnetización en el polo, respectivamente.

Así, para obtener la expresión del filtro en cuestión, como primer paso, encontremos la expresión del filtro que transforma la componente del campo medida a una componente vertical. Entonces en la ecuación IV.1  $M_o$  es el factor de campo medido y  $M'_o$  es el factor de la componente vertical.

Esta nueva componente tiene una inclinación de  $I=90^\circ$ . Sus cosenos directores son:

$$l'=\cos I \cos D=0 \quad m'=\cos I \sin D=0 \quad \text{y} \quad n'=\sin I=1$$

y  $M'_o$  queda como

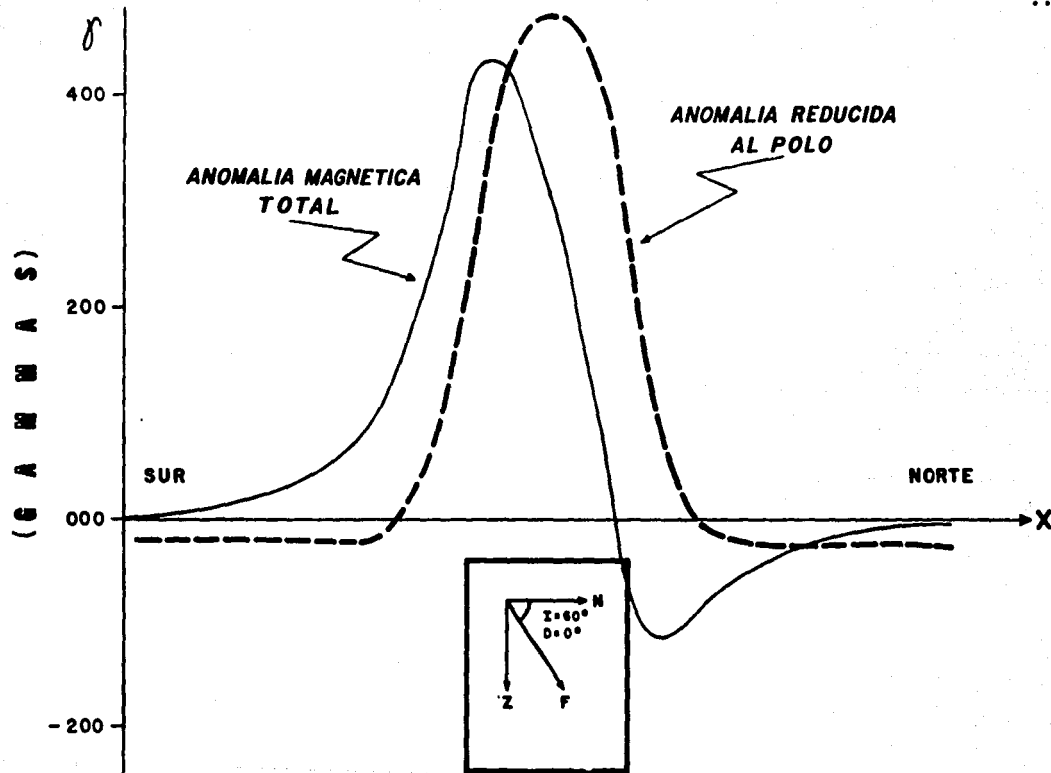


Figura IV.2 Anomalia magnética de intensidad total y reducida al polo.

$$M^0(u,v) = Ruv$$

Por lo tanto, de acuerdo con la ec. (IV.f), el filtro para convertir la anomalía de componente total a una anomalía de componente vertical es

$$RZ(u,v) = \frac{Ruv}{i_{ul} + i_{vm} + Ruv.n} \quad \dots\dots\dots IV.8$$

donde (l,m,n) son los cosenos directores del vector de campo medido.

Entonces, de acuerdo con la ec. IV.2, la expresión de la anomalía de componente vertical es

$$T^1(u,v) = 2\pi m_s \cdot F_m(u,v,d) \cdot M_m(u,v) \cdot H(u,v,d) \quad \dots\dots\dots IV.9$$

la cual ya no depende de la dirección del campo medido, pero aún tiene la influencia de la dirección de magnetización del cuerpo anómalo.

Como segundo paso, obtengamos la expresión del filtro que transforma la anomalía de componente vertical (IV.9), a una anomalía reducida al polo, que por definición debe ser causada por una masa magnetizada por un vector vertical. Entonces, de acuerdo con la ec. IV.3  $M^1_m$  es el factor de magnetización en el polo y  $M_m$  es el factor de la magnetización real. Por lo tanto, la inclinación de este nuevo vector de magnetización vertical es  $i_m = 90^\circ$ .

Sus cosenos directores son también  $L^1 = M^1 = 0$  y  $N^1 = 1$ . Por lo que

$$M'm(u,v) = Ruv$$

Entonces, el filtro que convierte la anomalía de componente vertical a una anomalía reducida al polo, (o de manera general, el filtro que convierte una anomalía con dirección de magnetización arbitraria a otra con magnetización vertical) es, según (IV.3)

$$RM(u,v) = \frac{Ruv}{iuL + ivM + Ruv N} \dots\dots\dots IV.10$$

donde (L,M,N) son los cosenos directores del vector de magnetización total del cuerpo anómalo. Cabe mencionar aquí que la magnetización total es la suma vectorial de la magnetización inducida mas la magnetización remanente.

De acuerdo con (IV.6) el filtro para obtener la reducción al polo de una anomalía de intensidad total es el producto de (IV.8) por (IV.10), el cual es

$$RP(u,v) = \frac{Ruv^2}{[iuL+ivM+Ruv n] [iuL+ivM+Ruv N]} \dots\dots\dots IV.11$$

Esta misma expresión fue dada primeramente por Gunn (1975).

Como un caso particular, si la anomalía que se desea reducir al

polo se considera que es causada por un cuerpo magnetizado solo por inducción, las ecuaciones (IV.8) y (IV.10) son iguales y por lo tanto el filtro de la reducción al polo es

$$R_P(u,v) = \frac{R_{uv}^2}{[i_{ul} + i_{vm} + R_{uv} n]^2} \dots\dots\dots IV.12$$

donde:  $(l,m,n)$  son los cosenos directores del vector de campo geomagnético en la región donde se hizo la medición.

De una u otra manera la anomalía en el polo es:

$$T_o(u,v) = 2\pi \cdot m_s \cdot F_m(u,v,d) \cdot R(u,v) \cdot H(u,v,d) \dots\dots\dots IV.13$$

la cual es independiente de los vectores de campo medido y de magnetización. Se puede observar que esta última expresión es equivalente a la anomalía gravimétrica  $G(u,v)$  (ec. III.10), excepto por el factor  $R(u,v)$ .

#### TRANSFORMACION SEUDOGRAVIMETRICA

Si la anomalía reducida al polo (ec. IV.13) se divide entre el factor  $R(u,v)$ , se tiene:

$$T_o(u,v)/R(u,v) = 2\pi \cdot m_s \cdot F_m(u,v,d) \cdot H(u,v,d)$$

y si se define

$$Tg(u,v) = 2\pi ms \cdot Fm(u,v,d) \cdot H(u,v,d) \dots\dots\dots IV.14$$

entonces se tiene que

$$Tg(u,v) = To(u,v)/R(u,v) \dots\dots\dots IV.15$$

De la expresi3n de la anomalía gravimétrica (ec.III.16) y la ec. (IV.14) se puede obtener

$$Tg(u,v) = \frac{ms}{G \cdot ds} \frac{Fm(u,v,d)}{Fg(u,v,d)} g(u,v)$$

Si la funci3n de distribuci3n de densidad  $Fg(u,v,d)$  es la misma que la funci3n de distribuci3n de magnetizaci3n  $Fm(u,v,d)$ , o en otras palabras, si el cuerpo que produce la anomalía gravimétrica y magnética es el mismo, la ecuaci3n anterior queda como:

$$Tg(u,v) = \frac{ms}{G \cdot ds} g(u,v) \dots\dots\dots IV.16$$

donde  $Tg(u,v)$  es llamada la anomalía pseudogravimétrica, puesto que equivale a la anomalía gravimétrica multiplicada por un factor constante igual a  $ms/G \cdot ds$ .

Si en la ecuaci3n IV.15 se sustituye la expresi3n de  $To(u,v)$  dada

por  $T_0(u,v) = RP(u,v) \cdot T(u,v)$  donde  $RP(u,v)$  es la ecuación IV.11, se tiene que :

$$Tg(u,v) = \frac{Ruv T(u,v)}{[iul+ivm+Ruv n] \cdot [iuL+ivM+Ruv N]} \quad \dots\dots\dots IV.17$$

Así, para convertir una anomalía magnética de intensidad total a una anomalía pseudo-gravimétrica  $Tg(u,v)$ , es necesario convolucionarla con un filtro cuya expresión en frecuencia es

$$SG(u,v) = \frac{Ruv}{[iul+ivm+Ruv n] \cdot [iuL+ivM+Ruv N]} \quad \dots\dots IV.18$$

donde  $(l,m,n)$  y  $(L,M,N)$  son los cosenos directores del campo medido y de magnetización, respectivamente. Es obvio que, para realizar esta transformación es necesario conocer la dirección de magnetización y debe ser considerada constante através del cuerpo.

Note que este filtro y el de la reducción al polo (ec.IV.11) difieren solamente por el factor  $R(u,v)$ .

Una anomalía pseudo-gravimétrica  $Tg(u,v)$  y una anomalía gravimétrica  $g(u,v)$  diferirán por el factor con magnitud  $m_s/G/d_s$ , donde  $m_s$  es la magnitud de magnetización,  $d_s$  es la densidad y

$G$  es la constante de Gravitación Universal.

#### REDUCCION AL ECUADOR

En el ecuador magnético donde la componente del campo total medido es horizontal y la magnetización es también, a menudo, horizontal, una anomalía magnética de intensidad total causada por un prisma simétrico con respecto a los ejes  $X$  y  $Y$ , presenta simetría respecto a los mismos ejes y un mínimo centrado justo arriba del prisma, figura 7.5b. Por lo que la reducción al ecuador se convierte en una herramienta útil en la interpretación, puesto que elimina la asimetría y el desplazamiento lateral de la anomalía con respecto al cuerpo, de forma semejante como lo hace la reducción al polo.

Leu(1982) fue el primero en mencionar este proceso como útil en la interpretación.

Operando de la misma manera como en la deducción del filtro de la reducción al polo, podemos obtener el filtro en frecuencia para llevar al ecuador magnético las anomalías observadas en cualquier latitud.

Así, primero obtengamos el filtro que transforma la componente total del campo medido a una componente horizontal total en el mismo lugar.

Esta nueva componente, tiene una inclinación  $I=0^\circ$  y una declinación  $D$ , que es la del lugar donde fue observado el campo total. Sus cosenos directores son



$$l' = \cos I \cos D = \cos D, \quad m' = \cos I \sin D = \sin D, \quad n' = \sin I = 0$$

y de acuerdo con la ec.(IV.1),  $M_o'$  es

$$M_o'(u,v) = iu \cos D + iv \sin D$$

Por lo tanto el filtro en cuestión es

$$RH(u,v) = \frac{i(u \cos D + v \sin D)}{iu l + iv m + Ru v n} \quad \dots\dots\dots IV.19$$

Recordemos aquí que la declinación  $D$  en el ecuador, así como en cualquier otra latitud (excepto en el polo), varía de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  según la longitud geográfica. Así que, también se pueden deducir las fórmulas de los filtros que transforman la componente medida, en las componentes horizontales en las direcciones Norte y Este, o sea, cuando  $D = 0^\circ$  y  $D = 90^\circ$ , respectivamente.

Para el primer caso, cuando la declinación es  $D = 0^\circ$ , de IV.19 se tiene que el filtro es:

$$RHX(u,v) = \frac{iu}{iu l + iv m + Ru v n} \quad \dots\dots\dots IV.20$$

el cual transforma la componente total medida a una componente horizontal en la dirección del Norte geográfico, o sea, la componente en  $X$ .

Para el segundo caso, cuando  $D = 90^\circ$  el filtro queda como

$$RHY(u,v) = \frac{iv}{iul + ivM + Ruv n} \dots\dots\dots IV.21$$

el cual transforma la componente total medida a una componente horizontal en la dirección del Este geográfico, o sea, en la dirección Y.

Cuando  $D = 180^\circ$  y  $D = 270^\circ$  los filtros anteriores solo cambian de signo, lo que afecta también el signo de la amplitud de las componentes transformadas, mas no su forma.

En el concepto de la reducción al ecuador se ha considerado que se "lleva" la fuente anómala a la región del ecuador donde el campo magnético observado tiene una inclinación I y una declinación D, ambas, de cero grados, y la magnetización es inducida. Entonces el filtro de transformación  $M_0'/M_0$  en (IV.1) será la ecuación (IV.20), o sea,  $RHX(u,v)$ .

Así también, el filtro  $M_m'/M_m$  para transformar la dirección de la magnetización de la fuente anómala a la otra dirección de magnetización en la región del ecuador donde la inclinación  $I_m$  y la declinación  $D_m$  son nulas, es similar a la ecuación (IV.20), o sea

$$RHX(u,v) = \frac{iu}{iuL + ivM + Ruv N} \dots\dots\dots IV.22$$

donde:  $(L, M, N)$  son los cosenos directores del vector de magnetización real del cuerpo anómalo.

Por lo tanto, el filtro en el dominio de la frecuencia para transformar una anomalía de componente total a una anomalía reducida al ecuador de acuerdo con (IV.6) es el producto de (IV.20) por (IV.22), o sea,

$$RE(u, v) = \frac{i u}{[i u + i v m + R u v n]} \cdot \frac{i u}{[i u L + i v M + R u v N]}$$

$$RE(u, v) = \frac{-u^2}{[i u + i v m + R u v n] \cdot [i u L + i v M + R u v N]} \quad \dots\dots IV.23$$

La cual es igual a la expresión dada por Roy y Aina (1986).

También, como un caso particular, el filtro para reducir al ecuador una anomalía causada por un cuerpo magnetizado solo por inducción es:

$$RE(u, v) = \frac{-u^2}{[i u + i v m + R u v n]^2} \quad \dots\dots IV.24$$

donde:  $(l,m,n)$  son los cosenos directores del vector de campo en la región donde se hizo la exploración.

#### TRANSFORMACION DE UNA ANOMALIA DE CAMPO TOTAL EN SUS TRES COMPONENTES PERPENDICULARES

Los filtros en frecuencia para obtener las tres componentes en las direcciones X, Y y Z del campo observado, a partir de la componente de la intensidad magnética total medida en un cierto lugar ya han sido deducidas en las secciones anteriores. Así, el filtro para obtener la componente vertical está dada por la ecuación (IV.8), el filtro para obtener la componente horizontal en la dirección X, por la ecuación (IV.20) y para derivar la componente horizontal en la dirección Y, por la ecuación (IV.21).

Se considera que todas las componentes calculadas son causadas por el mismo cuerpo que produce la anomalía observada, y por lo tanto conservan la misma amplitud y dirección de magnetización.

Para generalizar la formulación aquí presentada, se incluye la transformación de una componente vertical medida, en las componentes horizontales X y Y, así como la conversión de una componente X medida a una componente Y.

Para obtener los filtros correspondientes, se aprovecharon los

filtros de las transformaciones ya deducidas y el concepto de filtrado como un proceso de sustitución de un factor por otro.

Así, el filtro que convierte la componente vertical medida a una componente horizontal en X, se obtiene de la multiplicación (convolución) del filtro que convierte la componente vertical a una componente total, dado por el inverso de la ecuación IV.8, con el filtro que convierte la componente total a la componente horizontal en X, dada por la ecuación IV.20, o sea

$$ZX(u,v) = RZ(u,v)^{-1} \cdot RHX(u,v)$$

sustituyendo, se tiene

$$ZX(u,v) = \frac{[iu + ivm + Ruv n]}{Ruv} \cdot \frac{iu}{[iu + ivm + Ruv n]}$$

$$\delta \quad ZX(u,v) = \frac{iu}{Ruv} \quad \dots\dots\dots IV.25$$

De la misma manera, el filtro que convierte la componente vertical medida a una componente horizontal en la dirección Y, se obtiene de la multiplicación del inverso de (IV.8) con el filtro que convierte la componente total a la componente horizontal en Y dada por la ecuación (IV.21), o sea

$$ZY(u,v) = R_z^{-1}(u,v) \cdot RHY(u,v)$$

sustituyendo se obtiene

$$ZY(u,v) = \frac{[iu + ivm + Ruv n]}{Ruv} \frac{iv}{[iu + ivm + Ruv n]}$$

$$d \quad ZY(u,v) = \frac{iv}{Ruv} \dots \dots \dots IV.26$$

Por último, el filtro  $XY(u,v)$  para transformar una componente medida en la dirección X a una componente en la dirección Y se consigue multiplicando el inverso del filtro para convertir una componente total a una componente horizontal en X, dada por la ecuación (IV.20), con el filtro que convierte la componente total a una componente horizontal en Y, dado por la ecuación IV.21, o sea

$$XY(u,v) = RHX^{-1}(u,v) \cdot RHY(u,v)$$

sustituyendo se obtiene

$$XY(u,v) = \frac{[iu + ivm + Ruv n]}{iu} \frac{iv}{[iu + ivm + Ruv n]}$$

$$\delta \quad XY(u,v) = \frac{v}{u} \quad \dots\dots\dots IV.27$$

Excepto esta última ecuación, todas estas expresiones fueron dadas por Laurencio y Morrison (1973), las cuales fueron obtenidas por otro camino más complicado.

#### REDUCCION ORTOGONAL

La reducción ortogonal es otro concepto de transformación introducido por Roy y Aina (1986) para tratar de encontrar la localización correcta de los cuerpos magnetizados en los mapas magnéticos observados.

Este proceso convierte una anomalía de intensidad magnética total producida por un cuerpo magnetizado homogéneamente, en cualquier latitud, a una anomalía de componente vertical producida por el mismo cuerpo pero magnetizado horizontalmente, o a una anomalía de componente horizontal cuando la magnetización es vertical.

Los mismos autores demuestran que para un cuerpo homogéneo de cualquier forma, las dos componentes obtenidas son teóricamente iguales. También mencionan que, para cuerpos simétricos tal como un prisma simple, el perfil norte-sur a través de los puntos máximo y mínimo de la anomalía, tiene un valor cero justo arriba del centro del cuerpo y es perfectamente simétrico con respecto a

ese punto; mientras que un perfil Este-Oeste presenta simetría con respecto al cuerpo, figura 7.6b. Por lo que consideran que esta transformación tiene características comparables e incluso superiores a la reducción al polo y al ecuador.

De acuerdo con la definición de la transformación ortogonal y con la ecuación IV.6, el filtro debe estar dado por la convolución del filtro que convierte una de anomalía de componente total a una anomalía de componente vertical (ec.IV.8), con el filtro que convierte la dirección de la magnetización del cuerpo anómalo, en la región observada, a una dirección de magnetización inducida en el ecuador, dada por la ecuación IV.22, o sea

$$RO(u,v) = RZ(u,v) \cdot RMX(u,v)$$

sustituyendo se obtiene

$$RO(u,v) = \frac{Ruv}{[iuL+ivM+Ruv n]} \cdot \frac{iu}{[iuL+ivM+Ruv N]} \quad \dots \dots \text{IV.28}$$

donde  $RO(u,v)$  es el filtro de la transformación ortogonal.

Si se define la reducción ortogonal de la otra manera, o sea, como la conversión de la componente de campo total observada, a una componente horizontal en X producida por una magnetización vertical; el filtro estará expresado por el producto de la ecuación



IV.20, la cual transforma la componente total medida a una componente horizontal en la dirección del norte geográfico, por la ecuación (IV.10), la cual transforma la dirección de magnetización total a una dirección de magnetización vertical, o sea

$$RO(u,v) = \frac{i u \quad Ruv}{[iu + ivm + Ruv n] [iu + ivM + Ruv N]}$$

Esta expresión es igual a la ecuación (IV.28), por lo que se demuestra que las dos componentes que definen a la reducción ortogonal son iguales.

Si se considera que la magnetización del cuerpo anómalo es solamente inducida, el filtro es

$$RO(u,v) = \frac{i u \quad Ruv}{[iu + ivm + Ruv n]^2} \quad \dots \text{IV.29}$$

donde  $(l, m, n)$  son los cosenos directores del campo geomagnético en la zona explorada.

## ELIMINACION DE LA MAGNETIZACION REMANENTE

Otra transformación interesante en el campo magnético es aquella que elimina la magnetización remanente de una anomalía magnética observada. Consiste en convertir la componente magnética medida  $T(x,y)$ , producida por un cuerpo que está bajo el efecto de la magnetización inducida más una magnetización remanente, en la componente  $T'(x,y)$  que es el efecto del mismo cuerpo, pero solo magnetizado por inducción, sin considerar forma alguna del cuerpo anómalo. Roy y Aina (1986) mencionan esta transformación y plantean la solución pero no obtienen la expresión de filtro.

Para lograrlo, regresemos a la ecuación IV.7 donde  $T(u,v)$  es la anomalía observada causada por un cuerpo con una magnetización real inducida más remanente y  $T'(u,v)$  es la anomalía causada por el mismo cuerpo pero solo magnetizado por inducción. Puesto que las componentes medida y transformada son las mismas, el factor  $M'o/Mo$  es la unidad y el filtro es entonces

$$EMR(u,v) = \frac{M'm(u,v)}{M m(u,v)}$$

donde:  $M'm$  es el factor de magnetización inducida =  $M_o$

y  $Mm$  es el factor de magnetización total del cuerpo.

entonces 
$$EMR(u,v) = \frac{i u l + i v m + R u v n}{i u L + i v M + R u v N} \dots \dots \dots IV.30$$

donde  $(l, m, n)$  son los cosenos directos de la magnetización inducida o del vector de campo magnético terrestre en la región, y

$(L, M, N)$  son los cosenos directores del vector de magnetización real del cuerpo.

Es obvio, que es necesario conocer la dirección de magnetización real (inducido + remanente) del cuerpo, medido de alguna manera.

Así, de III.17 y IV.7 la nueva anomalía queda:

$$T'(u, v) = 2\pi ms \cdot F(u, v, d) \cdot R(u, v) \cdot Mo(u, v) \cdot H(u, v, d)$$

la cual es dependiente solamente del factor de magnetización inducida  $Mo(u, v)$ .

Si la transformación se usa para realizar un análisis de tipo cualitativo, que nos lleva a determinar la posición y rumbo del cuerpo, no es necesario modificar la intensidad de magnetización total  $ms$ . En cambio, si se desea conocer la contribución relativa de la magnetización inducida a la amplitud de la anomalía magnética observada,  $ms$  debe ser la intensidad de magnetización inducida, que es el producto de la susceptibilidad magnética  $(K)$  del cuerpo anómalo por la intensidad del campo total  $(H)$  en la región donde se hizo la prospección, o sea  $ms = KH$ . Es obvio que  $(K)$  debe ser medido.

Por lo tanto, el filtro para eliminar el efecto remanente, en su forma general es:

$$EMR(u,v) = \frac{m's}{mS} \frac{iul + ivm + Ruv n}{iul + ivM + Ruv N} \quad \dots IV.31$$

donde  $m's$  es la intensidad de la magnetización inducida (KH)  
y  $mS$  es la intensidad de la magnetización real medida.

#### ELIMINACION DE LA MAGNETIZACION INDUCIDA

También es posible, para generalizar, obtener de la misma manera que en el párrafo anterior, un filtro para separar la contribución del magnetismo remanente natural de la anomalía observada, sin necesidad de conocer la forma del cuerpo anómalo. Para ello, es necesario determinar por métodos paleomagnéticos (Urrutia, 1977) la intensidad y la dirección de la magnetización total del cuerpo y la intensidad y la dirección del vector de magnetización remanente.

Así también de la ecuación (IV.7) se obtiene que

$$T'(u,v) = EMI(u,v) \cdot T(u,v)$$

donde

$T(u,v)$  es la componente medida

$T'(u,v)$  es la componente producida por el cuerpo con magnetización remanente solamente, y

$EMI(u,v)$  es el filtro para eliminar la magnetización inducida de la anomalía observada, dado por :

$$EMI(u,v) = \frac{m's [iu(lr) + iv(mr) + Ruv(nr)]}{ms [iuL + ivM + Ruv N]} \quad \dots\dots IV.32$$

y  $m's$  es la intensidad de magnetización remanente

$ms$  es la intensidad de magnetización total,

$(lr, mr, nr)$  son los cosenos directores de la magnetización remanente, y

$(L, M, N)$  son los cosenos directores del vector de magnetización total medido.

Y la nueva anomalía es

$$T'(u,v) = 2\pi m's \cdot F(u,v,d) \cdot Mo(u,v) \cdot Mr(u,v) \cdot H(u,v,d)$$

la cual depende del vector de magnetización remanente y de la componente medida.

## CAPITULO V

### OTRAS TRANSFORMACIONES

Además de las transformaciones anteriores cuyos filtros en el dominio de la frecuencia fueron derivados de la expresión general de transformación dada por la ecuación (IV.6), existen otras transformaciones dadas por expresiones analíticas exactas en el dominio de la frecuencia, derivadas de diferente manera que las anteriores. Tales son, las que relacionan entre sí, a los gradientes horizontales en las direcciones X y Y, y las que relacionan estos gradientes con el campo total.

Para completar la generalización y el resumen de las transformaciones de los campos gravimétricos y magnéticos, se mencionan los filtros en el dominio de la frecuencia de la continuación analítica, de las derivadas verticales y de la separación regional-residual, comúnmente usadas en el procesamiento de los campos potenciales.

#### RELACION ENTRE LOS GRADIENTES VERTICAL Y HORIZONTAL

Nabighian (1984) fue el primero en obtener las relaciones en el dominio del espacio y de la frecuencia entre los mapas de gradiente horizontal y de gradiente vertical de los campos magnéticos o gravimétricos, lo que significa que, si uno ha observado datos de uno de los gradientes se puede calcular el otro.

La deducción esta basada en la identidad en el dominio de la frecuencia dada por

$$R_{uv} = \frac{-iu}{R_{uv}} iu + \frac{-iv}{R_{uv}} iv \dots\dots\dots (V.1)$$

donde  $R_{uv}$  es el radio vector en coordenadas frecuenciales e  $i = \sqrt{-1}$ .

Si se aplica esta expresi3n a la transformada de Fourier de una funci3n bidimensional  $F(u,v)$ , se tiene

$$R_{uv} \cdot F(u,v) = \frac{-iu}{R_{uv}} iu \cdot F(u,v) + \frac{-iv}{R_{uv}} iv \cdot F(u,v)$$

donde como se sabe (cap3tulo III)

- $iu$  es el filtro de gradiente horizontal en la direcci3n X.
- $iv$  es el filtro de gradiente horizontal en la direcci3n Y.
- y  $R_{uv}$  es el filtro de gradiente vertical.

entonces

$iuF(u,v) = [tF][df(x,y)/dx]$  es la transformada de Fourier del gradiente horizontal en la direcci3n X

$ivF(u,v) = [tF][df(x,y)/dy]$  es la transformada de Fourier del gradiente horizontal en la direcci3n Y, y

$R_{uv} F(u,v) = [tF][df(x,y)/dz]$  es la transformada de Fourier del gradiente vertical.

Por lo tanto



$$[tF]\left\{\frac{df(x,y)}{dz}\right\} = \frac{-iu}{Ruv} [tF]\left\{\frac{df(x,y)}{dx}\right\} + \frac{-iv}{Ruv} [tF]\left\{\frac{df(x,y)}{dy}\right\}$$

.....V.2

Entonces, se tiene que la transformada de Fourier del gradiente vertical de un mapa magnético, se puede obtener de la suma de la transformada de Fourier del gradiente horizontal del mapa en la dirección X, modificada por el factor  $-iu/Ruv$ , con la transformada de Fourier del gradiente horizontal del mismo mapa en la dirección Y, modificada por el factor  $-iv/Ruv$ .

Para obtener la expresión (V.2) en el dominio del espacio Nabighian también demostró que

$$[tF]^{-1}\left\{\frac{-iu}{Ruv}\right\} = \frac{1}{2\pi} [x/Rxy]^3$$

$$[tF]^{-1}\left\{\frac{-iv}{Ruv}\right\} = \frac{1}{2\pi} [y/Rxy]^3$$

donde  $[tF]^{-1}$  indica transformada de Fourier inversa, y  $Rxy = \sqrt{x^2 + y^2}$  es el radio vector en el espacio.

Por lo tanto, aplicando el teorema de convolución a la ec. V.2, se tiene que

$$\frac{df(x,y)}{dz} = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{x}{R_{xy}} * \frac{df(x,y)}{dx} + \frac{y}{R_{xy}} * \frac{df(x,y)}{dy} \right]$$

donde (\*) denota convolución.

Si se considera en esta expresión las igualdades

$$\frac{d}{dx} \left[ \frac{1}{R_{xy}} \right] = \left[ \frac{x}{R_{xy}} \right]^3$$

$$y \quad \frac{d}{dy} \left[ \frac{1}{R_{xy}} \right] = \left[ \frac{y}{R_{xy}} \right]^3$$

se obtiene

$$\frac{df(x,y)}{dz} = - \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{d}{dx} \left( \frac{1}{r} \right) * \frac{df(x,y)}{dy} + \frac{d}{dy} \left( \frac{1}{r} \right) * \frac{df(x,y)}{dx} \right]$$

.....V.3

donde  $r = R_{xy}$

que es la expresión dada por Pendersen (1989)

## RELACION ENTRE LOS GRADIENTES Y EL CAMPO MAGNETICO TOTAL

Si la transformada de Fourier del gradiente vertical del campo total, dado por  $[fF][df(x,y)/dz]$ , se multiplica por el filtro inverso de la primera derivada vertical en el dominio de la

frecuencia dada por  $1/R_{uv}$ , se obtiene el campo total en el dominio de la frecuencia  $F(u,v)$ , o sea

$$F(u,v) = (1/R_{uv}) [tF] \left[ \frac{df(x,y)}{dz} \right] \dots\dots\dots V.4$$

lo que significa que si se observa el gradiente vertical del campo magnético, se puede calcular la intensidad magnética total.

Si se sustituye (V.2) en la ecuación anterior, se obtiene

$$F(u,v) = \frac{-iu}{R_{uv}} [tF] \left[ \frac{df(x,y)}{dx} \right] + \frac{-iv}{R_{uv}} [tF] \left[ \frac{df(x,y)}{dy} \right] \dots\dots\dots V.5$$

la cual relaciona los gradientes horizontales en las direcciones X y Y con la componente total del mismo campo magnético.

Entonces, el campo magnético total se puede calcular si se observan los gradientes horizontales en las direcciones X y Y.

Para deducir la expresión equivalente a (V.4) en el dominio del espacio, se tiene que

$$[tF] \left[ \frac{1}{R_{uv}} \right] = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1}{R_{xy}} \right]$$

Lo cual se demostró en un capítulo anterior.

Por lo tanto (V.4) en el espacio es

$$f(x,y) = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{1}{R_{xy}} * \frac{df(x,y)}{dz} \right] \dots\dots\dots V.6$$

donde (\*) indica convolución.

Por último, la ecuación (V.5) en el espacio se puede obtener sustituyendo (V.3) en la ecuación (V.6).

### CONTINUACION ANALITICA

El filtro en el dominio de la frecuencia para continuar hacia arriba o hacia abajo los mapas gravimétricos o magnéticos, fue obtenido primeramente por Dean(1958). Su expresión es

$$C(u,v) = \text{EXP} [ h \cdot R_{uv} ] \dots\dots\dots V.7$$

donde h es positivo para continuar hacia abajo y negativo para continuar hacia arriba. Así, un mapa gravimétrico o magnético (G(u,v) o T(u,v)) convolucionado con este filtro genera otro mapa como si estuviese observado a un nivel h arriba o abajo de la superficie de observación original.

## DERIVADAS VERTICALES

Batthacharyya(1965) fue el primero en obtener la fórmula del filtro en el dominio de la frecuencia para calcular la  $n$ -ésima derivada vertical de un mapa gravimétrico o magnético, la cual es:

$$D(u,v) = [ Ruv ]^n \quad \dots\dots\dots V.8$$

donde  $n$  es el orden de la derivada vertical.

Así, por ejemplo, si se desea obtener la primera derivada de un mapa, su transformada de Fourier se convoluciona con el filtro  $F(u,v)=Ruv$  y el resultado se transforma al espacio.

El filtro (V.8) se puede obtener fácilmente al derivar  $n$  veces con respecto a "d" la ecuación (III.7) o la (III.11).

## SEPARACION REGIONAL-RESIDUAL

El concepto de separación regional-residual en el dominio de la frecuencia ha sido llamado filtrado; y consiste en separar del espectro de frecuencia de un mapa, las frecuencias bajas ( que corresponden a anomalías de longitud de onda grandes ) de las frecuencias altas ( que corresponden a anomalías de longitud de onda pequeñas ). Para lograrlo, es necesario aplicar por convolución funciones o filtros previamente diseñados al

espectro de frecuencia del mapa. O sea, si  $T(u,v)$  es el espectro del mapa de datos potenciales, entonces

$$T'(u,v) = F(u,v) \cdot T(u,v)$$

donde  $T'(u,v)$  es el mapa transformado y  $F(u,v)$  es el filtro que conserva las anomalías deseadas y elimina las no deseadas.

Cabe recordar aquí, que la frecuencia es justamente el inverso de la longitud de onda, por lo que, si se trata de separar anomalías con una longitud de onda mayor que  $L_c$ , nos referimos a separar anomalías con una frecuencia menor que  $1/L_c$ .

Por ejemplo, si se desea eliminar de un mapa  $T(x,y)$  las anomalías con una longitud de onda menor que " $L_c$ ", se debe diseñar un filtro  $F(u,v)$ , tal que, para el caso más simple

$$F(u,v) \begin{cases} = 0 & \text{si } Ruv > 1/L_c \\ = 1 & \text{en las otras frecuencias} \end{cases}$$

Este filtro es llamado un filtro pasa bajas porque conserva las anomalías, sin modificarlas, con una frecuencia menor que  $1/L_c$  (o con longitudes mayores que  $L_c$ ), figura V.1.

Por otra parte, los filtros pasa altas conservan solamente las anomalías con frecuencia mayor que  $1/L_c$  (o con longitudes de onda menor que  $L_c$ ), por ejemplo, también para el caso más simple

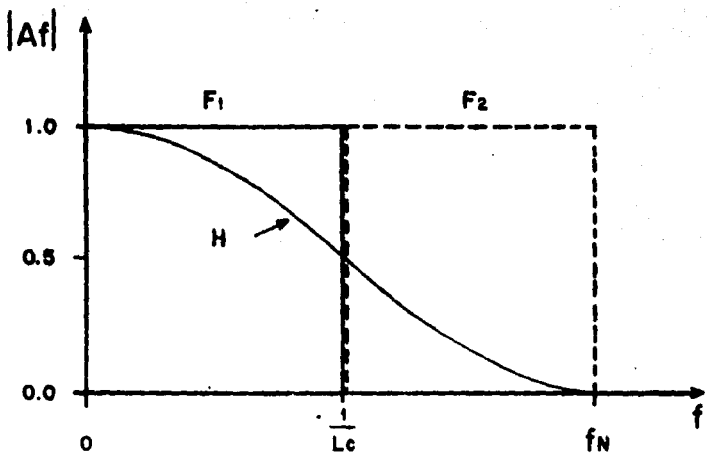


Figura V.1 Espectros de los filtros pasa bajas rectangular (F1), pasa altas rectangular (F2), y de Hanning (H).

$$F(u,v) \begin{cases} = 0 & \text{si } Ruv < 1/Lc \\ = 1 & \text{en las otras frecuencias} \end{cases}$$

Estos filtros provocan un cambio discontinuo y abrupto en la frecuencia  $1/Lc$  y puede causar efectos indeseables en el proceso de la transformación inversa al espacio. En la práctica la mayoría de los filtros tienen una transición suave através de dicha discontinuidad .

Existe una gran variedad de funciones o ventanas que se usan en el proceso de filtrado (Harris,1978), aquí solo se comentará la ventana de Hanning en el dominio de la frecuencia,generalizada al caso bidimensional,figura V.1, la cual se puede usar para eliminar el ruido o las altas frecuencias que se generan con otros procesos de transformación tales como las derivadas verticales.

La ventana de Hanning está dada por

$$F(u,v) \begin{cases} = \cos ( u/2U) \cos ( v/2V) & \text{en } R(u,v) \\ = 0 & \text{fuera de } R(u,v) \end{cases}$$

d

$$F(u,v) \begin{cases} = 0.25[1.0+\cos( u/U)] [1.0+ \cos( v/V)] & \text{en } R(u,v) \\ = 0 & \text{fuera de } R(u,v) \end{cases}$$

donde



$R(u,v)$  es la región donde está definido el espectro de frecuencia del mapa procesado

$|U|$  es el límite de la región en la dirección  $u$

y  $|V|$  es el límite de la región en la dirección  $v$ .

## C A P I T U L O   V I

### LA INESTABILIDAD DE LOS FILTROS

La mayoría de los filtros en cuestión no están definidos en la frecuencia  $u=v=0$ . La excepción son los filtros dados por las ecuaciones IV.25 y IV.26 que transforman la componente vertical del campo medida, a componentes horizontales en las direcciones X y Y, respectivamente. Se puede notar también que el filtro que relaciona a los gradientes horizontales con el gradiente vertical contiene los mismos términos.

La presencia del polo numérico en los filtros de transformación en el origen de las coordenadas frecuenciales provoca la inestabilidad de los mismos y a su vez, provoca una salida inestable en el sistema lineal.

Aunque los filtros de continuación analítica hacia abajo y de derivadas están definidos en  $u=v=0$ , la inestabilidad se presenta por el hecho de que sus componentes tienden a incrementarse al incrementarse la frecuencia, lo cual no asegura una salida limitada a una entrada limitada, lo que es una condición para que un sistema no sea estable. Sin embargo, en casos prácticos la entrada (o mapa) tiene dimensiones finitas, por lo que el filtro necesariamente tendrá que ser finito, puesto que toma las dimensiones del mapa, y la inestabilidad disminuye, tal que, es posible eliminarla con un filtro pasa bajas.

La inestabilidad de los filtros se puede ver mejor en coordenadas polares. Así, si se usan las transformaciones  $u=r\cos\theta$ ,  $v=r\sin\theta$ , y  $r=Ruv$  se deben obtener las expresiones de los filtros dadas en la tabla VI.1. El término común en el denominador de la mayoría

Tabla VI.1. Filtros de transformación en coordenadas  
frecuenciales y polares.

| Transformación                     | $F(u,v)$                  | $F(r,\theta)$                               |
|------------------------------------|---------------------------|---|
| al polo                            | $Ruv^2/(D1(u,v) D2(u,v))$ | $1/(D1(r,\theta) D2(r,\theta))$             |
| seudogravimétrica                  | $Ruv/(D1(u,v) D2(u,v))$   | $1/(r D1(r,\theta) D2(r,\theta))$           |
| al ecuador                         | $-u^2/(D1(u,v) D2(u,v))$  | $-\cos^2\theta/(D1(r,\theta) D2(r,\theta))$ |
| T --- Z                            | $Ruv/D1(u,v)$             | $1/D1(r,\theta)$                            |
| T --- X                            | $iu/D1(u,v)$              | $i\cos\theta/D1(r,\theta)$                  |
| T --- Y                            | $iv/D1(u,v)$              | $i\sen\theta/D1(r,\theta)$                  |
| Z --- X                            | $iu/Ruv$                  | $i\cos\theta$                               |
| Z --- Y                            | $iv/Ruv$                  | $i\sen\theta$                               |
| X --- Y                            | $v/u$                     | $\tanh\theta$                               |
| ortogonal                          | $iuRuv/(D1(u,v) D2(u,v))$ | $i\cos\theta/(D1(r,\theta) D2(r,\theta))$   |
| Eliminación de la remanencia       | $D1(u,v)/D2(u,v)$         | $D1(r,\theta)/D2(r,\theta)$                 |
| Eliminación de la inducción        | $Dr(u,v)/D2(u,v)$         | $Dr(r,\theta)/D2(r,\theta)$                 |
| entre gradientes (GX,GY) --- GZ    | $[-iu/Ruv, -iv/Ruv]$      | $[-i\cos\theta, -i\sen\theta]$              |
| de gradientes horizontales a campo | $[-iu/Ruv, -iv/Ruv]$      | $[-i\cos\theta/r, -i\sen\theta/r]$          |
| de gradiente vertical a campo      | $-1/Ruv$                  | $-1/r$                                      |
| Continuación analítica             | $EXP( d  Ruv)$            | $EXP( d r)$                                 |
| Derivadas verticales               | $\frac{n}{[(-1)Ruv]}$     | $\frac{n}{[-r]}$                            |

T - componente total.

Z - componente vertical.

Y - componente al Este.

X - componente al Norte.

GX- gradiente horizontal en X.

GY- gradiente horizontal en Y.

GZ- gradiente vertical.

 $l=\cos I \cos D$ ,  $m=\cos I \sen D$ ,  $n=\sen I$ . $L=\cos \langle Im \rangle \cos \langle Dm \rangle$ ,  $M=\cos \langle Im \rangle \sen \langle Dm \rangle$ ,  $(I, D)$ -incl. y decl. de la magn. total. $N=\sen \langle Im \rangle$ ,  $l_r=\cos \langle Ir \rangle \cos \langle Dr \rangle$ ,  $m_r=\cos \langle Ir \rangle \sen \langle Dr \rangle$ ,  $n_r=\sen \langle Ir \rangle$ . $D1(u,v)=iu+ivm+Ruv(n)$ ,  $Ruv=\sqrt{(uu+vv)}$  $D2(u,v)=iuL+ivM+Ruv(N)$ . $Dr(u,v)=iu \langle Ir \rangle + iv \langle m_r \rangle + Ruv \langle n_r \rangle$ ,  $i=\sqrt{-1}$  $D1(r,\theta)=i\cos \langle I \rangle \cos \langle D-\theta \rangle + \sen \langle I \rangle$ . $D2(r,\theta)=i\cos \langle Im \rangle \cos \langle Dm-\theta \rangle + \sen \langle Im \rangle$ . $Dr(r,\theta)=i\cos \langle Ir \rangle \cos \langle Dr-\theta \rangle + \sen \langle Ir \rangle$ . $(I, D)$ -incl. y decl. de la magn. medido. $(Im, Dm)$ -incl. y decl. de la magn. total. $(Ir, Dr)$ -incl. y decl. de la magn. reman.

de los filtros está dado por :

ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA

$$D(u,v) = iul + ivm + Ruv n$$

donde  $(l,m,n)$  son los cosenos directores del vector medido o de magnetización.

Sea cual sea el vector, la triada  $(l,m,n)$  está dada por:

$$l = \cos I \cos D, \quad m = \cos I \sin D \quad \text{y} \quad n = \sin I$$

donde  $I$  y  $D$  indican la inclinación y la declinación.

Por lo que

$$D(r,\theta) = i r \cos \theta \cos I \cos D + r \sin \theta \cos I \sin D + r \sin I$$

$$\delta \quad D(r,\theta) = i r \cos I \cos \theta \cos D + r \sin \theta \sin D + r \sin I$$

y finalmente

$$D(r,\theta) = i r \cos I \cos(\theta - D) + r \sin I$$

Las ecuaciones de los filtros que tienen como denominador la expresión anterior, tienen un polo numérico cuando ésta tome el valor de cero, o sea, cuando  $I=0$  y para valores de  $\theta = D \pm 90^\circ$ . Así, los filtros de transformación cuando sean aplicados a las anomalías magnéticas observadas cerca del ecuador magnético y/o cuando esas anomalías sean producidas por rocas con magnetización cercana a la horizontal, tomarán valores muy altos en sus componentes real e imaginaria.

En la práctica, estos filtros operan en el espectro de frecuencia discreto de los mapas o anomalías observadas, el cual contiene imperfecciones causadas por los fenómenos Alias y de Gibbs. Por lo tanto, se espera que su efectividad sea pobre en las bajas latitudes (o cuando la inclinación de la magnetización sea cercana a cero) porque dichas imperfecciones en el espectro del mapa serán realizadas por los valores altos de los pesos del filtro a lo largo de la dirección  $\theta = D \pm 90^\circ$ .

Recordemos que la dirección  $D \pm 90^\circ$  en el dominio de la frecuencia corresponde a la dirección  $D$  en el dominio del espacio. Entonces, al aplicar un filtro a un mapa observado en una latitud baja, el mapa transformado contendrá contornos con un rumbo ficticio a lo largo de la dirección  $D$  debido al realce de las imperfecciones del espectro del mapa observado en esa dirección.

Por lo tanto, la inestabilidad en las transformaciones para latitudes y/o magnetizaciones bajas siempre ocurrirá, porque siempre habrá unos cuantos puntos  $(u, v)$  en el espectro de frecuencia discreto tal que  $\theta = \text{ang } \tan(v/u)$  sea muy cercano a la dirección  $D \pm 90^\circ$ .

#### REDUCCION AL POLO

Para mostrar la inestabilidad del filtro de la reducción al polo (ec. IV.11), Silva (1986) lo aplicó al campo magnético debido a un prisma vertical uniformemente magnetizado en la dirección del

campo geomagnético en una latitud baja. En términos del intervalo de la rejilla, el prisma mide  $2 \times 2$ , tiene un espesor de 4 y está enterrado a 2 unidades. Para reproducir el ejemplo, se consideró que la magnetización es de 100 gammas y el intervalo mencionado está en kilómetros.

La figura VI.1 muestra los límites del prisma y la anomalía de campo total teórico en el polo. Los mapas de campo total producidos por el mismo prisma con  $I=I_m=10^\circ$  y  $D=D_m=20$ , y con  $I=I_m=5^\circ$  y  $D=D_m=0$  calculados ambos sobre una rejilla de  $16 \times 16$  km, se presentan en las figuras VI.2 y VI.3 respectivamente. Los mapas transformados al polo se presentan en las figuras VI.4 y VI.5. Se observa en tales mapas que en la latitud donde  $I=I_m=10^\circ$  el filtro empieza a obtener pobres resultados comparado con el campo hipotético en el polo. Cuando la inclinación es de  $I=I_m=5^\circ$  se nota una severa distorsión muy clara de la anomalía a lo largo del rumbo  $20^\circ$  NE, como se esperaba.

Cuando la inclinación tiende a cero, la anomalía circular se distorsiona y los contornos tienden a formar rectas paralelas con un rumbo  $20^\circ$  NE.

Puesto que los datos originales están libre de ruido la única manera de reducir esta inestabilidad es obtener una representación mejor del espectro de frecuencia de los datos. Para demostrar esto, el campo magnético debido al mismo prisma fue calculado en una rejilla de  $128 \times 128$  y el tamaño del área fue duplicada en ambas direcciones X y Y, y se conservó el prisma en el centro del área. Las dimensiones absolutas del prisma se mantuvieron.

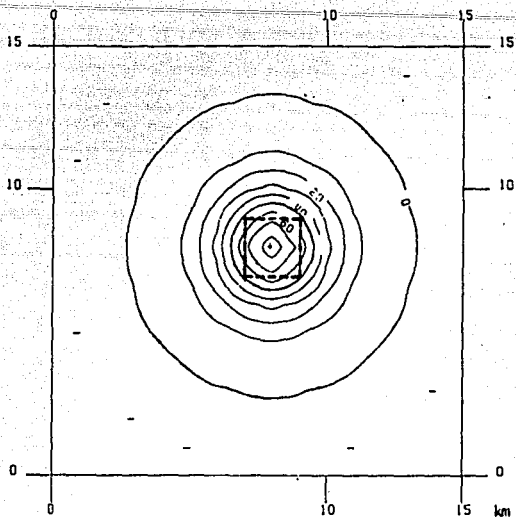


Figura VI.1 Campo magnético total teórico en el polo causado por el prisma enterrado a 2 km y de espesor 4 km.  $M = 100$  gamas. Intervalo 10 gamas.

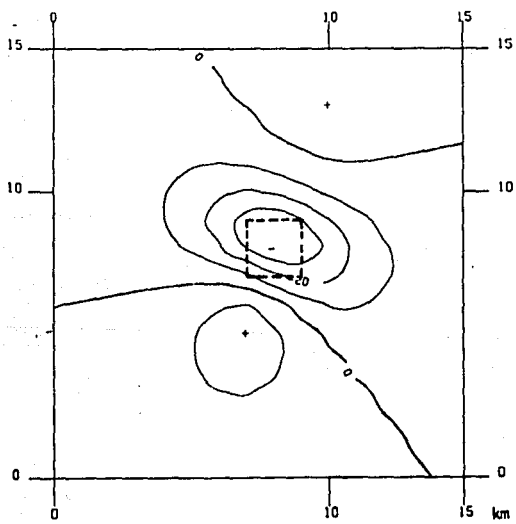


Figura VI.2 Campo total causado por el prisma de la figura VI.1 con  $I = 10^\circ$  y  $D = 20^\circ$ . Intervalo = 10 gamas.



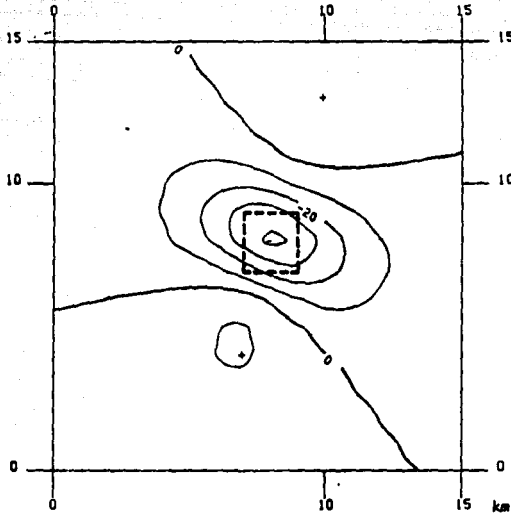


Figura VI.3 Campo total causado por el prisma de la figura VI.1 con  $l=5^\circ$  y  $D=20^\circ$ . Intervalo 10 gamas.

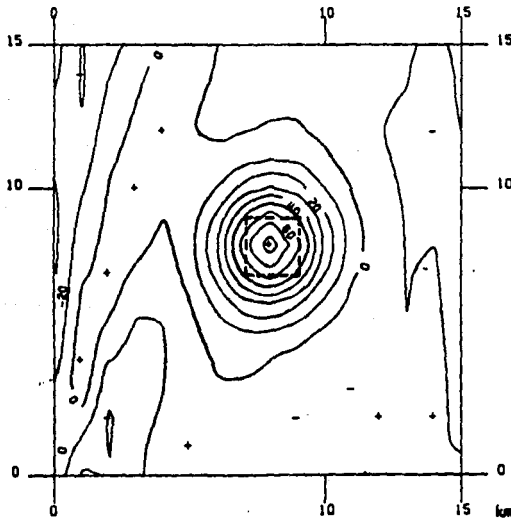


Figura VI.4 Campo total reducido al polo con  $l=10^\circ$ ,  $D=20^\circ$ . Intervalo= 10 gamas.

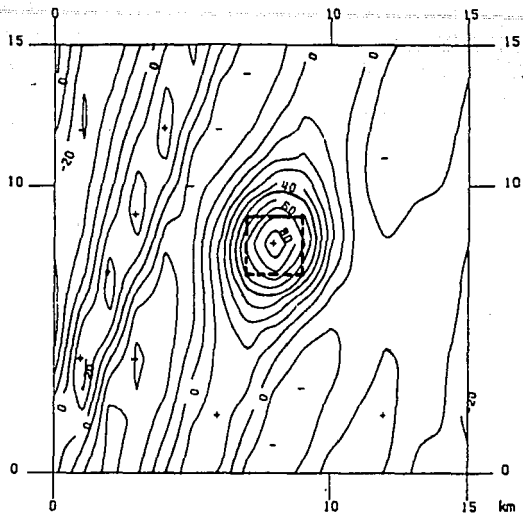


Figura VI.5 Campo total reducido al polo con  $i=10=5^\circ$ ,  $D=D_0=20^\circ$ . Intervalo = 10 gamas.

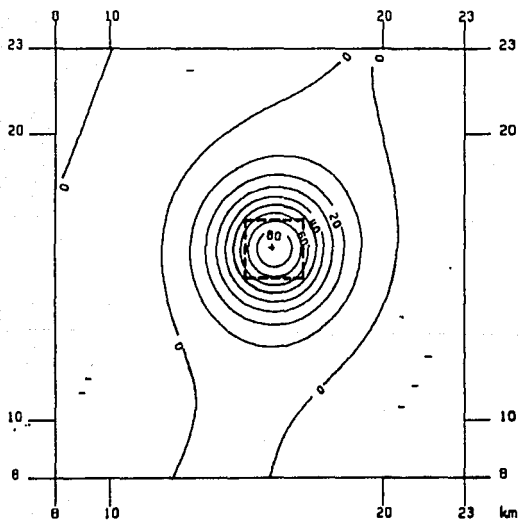


Figura VI.6 Campo total reducido al polo en una rejilla de 128X128.  $i=10=5^\circ$ ,  $D=D_0=20^\circ$ . Intervalo = 10 gamas.

El filtro fue aplicado a estos datos y el resultado se muestra en la figura VI.6. Al comparar este mapa con el de la figura VI.1 se nota que ocurre una mejoría definitiva cuando el área se hace mas grande y cuando el muestreo es menor.

Sin embargo, en la práctica los datos se obtienen en forma discreta y el hecho de interpolar para obtener una malla mas cerrada introduce ruido. Una anomalía aislada rara vez ocurre, tal que casi nunca es posible extender el área como se desea sin entrar en el dominio de otras anomalías adyacentes.

En conclusión, la inestabilidad del filtro de la reducción al polo ocurre en o cerca del ecuador magnético por causa del polo numérico en  $I=I_m=0$ .

En las latitudes en que se ubica México, donde la inclinación del campo geomagnético es mayor que  $40^\circ$  y se considera una magnetización inducida el filtro es estable, sin embargo, si la inclinación del vector de magnetización de la roca que produce la anomalía es menor que  $15^\circ$  y se considera en la transformación, el filtro se hace inestable.

La solución al problema de la inestabilidad de este filtro ha sido dada por Silva(1986) usando el concepto de capa equivalente y por Hansen y Pawlosky(1989) por medio del filtro de Wiener.

#### REDUCCION AL ECUADOR

Leu(1982) comenta sin dar mucho detalle que el filtro de la

reducción al ecuador es estable (well behaved) en las altas y bajas latitudes. Sin embargo, aquí se demuestra teóricamente y gráficamente que este filtro presenta la inestabilidad también en las bajas latitudes de manera semejante como lo presenta el filtro de la reducción al polo.

El filtro de la reducción al ecuador en coordenadas polares está dado en la tabla VI.1 como:

$$F(r, \theta) = \frac{\cos(\theta)}{\cos(I)\cos(\theta-D) + \sin(I)} \quad \frac{\cos(\theta)}{\cos(I_m)\cos(\theta-D_m) + \sin(I_m)}$$

donde  $I$  y  $D$  son la inclinación y declinación del vector de campo medido e  $I_m$  y  $D_m$  son la inclinación y declinación del vector de magnetización. Para latitudes altas el filtro es estable (en el caso límite, cuando  $I=I_m=90^\circ$ ,  $F(r, \theta) = -\cos\theta\cos\theta$  oscila entre los valores  $-1$  y  $0$ , y por lo tanto es estable). Cuando  $I=I_m=0^\circ$  el filtro es :

$$F(r, \theta) = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta-D)} \quad \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta-D_m)}$$

Si la declinación  $D=D_m=0^\circ$ , el filtro toma el valor de la unidad. Por lo tanto no existe un polo numérico en  $I=I_m=D=D_m=0^\circ$ , como en el caso de la reducción al polo. Sin embargo, si la declinación es diferente de cero grados, el filtro no está definido cuando  $\theta=D\pm 90^\circ$  d/y  $\theta=D_m\pm 90^\circ$ . Entonces, así como el filtro de la reduc-

ción al polo, éste es también inestable en bajas latitudes (excepto cuando la declinación  $D=D_m=0^\circ$ ) y su aplicación también causará los mismos inconvenientes.

Para demostrar lo anterior, se llevó al ecuador la anomalía causada por el prisma con  $I=I_m=5^\circ$  y  $D=D_m=20^\circ$  y se observa también la distorsión pronunciada a lo largo del rumbo  $20^\circ$  NE como fue predicho (figura VI.7). Para comparar, la figura VI.8 presenta la anomalía de campo total en el ecuador. Un caso drástico se muestra en las figuras VI.9 y VI.10 cuando la declinación toma el valor de  $45^\circ$ .

Por otra parte, se calculó la anomalía que produce el mismo prisma pero con  $I=I_m=5^\circ$  y  $D=D_m=0^\circ$  (fig.VI.11) y se transformó al ecuador (fig.VI.12); se nota que no existe alguna distorsión en los contornos como también fue predicho.

Por lo tanto, se concluye que el filtro de la reducción al ecuador es inestable en bajas latitudes, excepto cuando se trabaja en lugares con declinación cercanas o igual a cero grados o cuando la declinación de la magnetización total (si se considera no-inducida) también es cercana o igual a cero grados.

#### EL VALOR BASE DE LOS MAPAS TRANSFORMADOS

Si el filtro  $F(u,v)$  no está definido en  $u=v=0$ , el sistema lineal

$$B(u,v) = F(u,v) \cdot A(u,v)$$

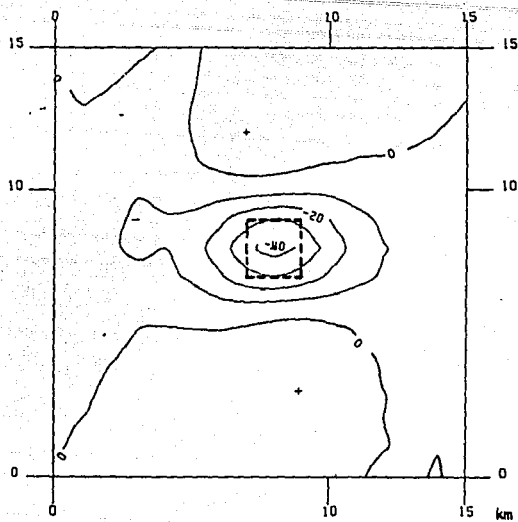


Figura VI.7 Campo total reducido al ecuador  
con  $l=10=5^\circ$  y  $D=0=20^\circ$ . Intervalo = 10 gamas.

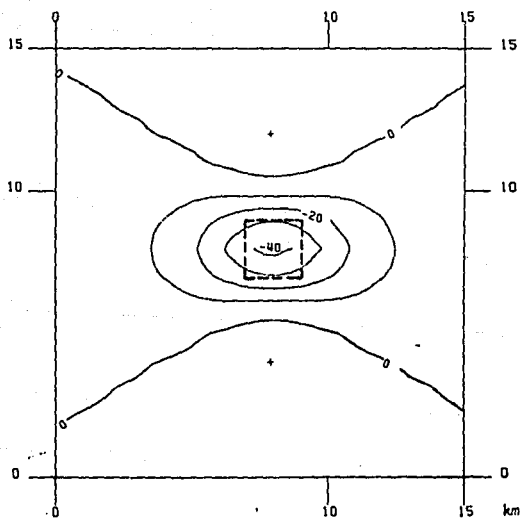


Figura VI.8 Campo total teórico en el ecuador  
causado por el prisma de la figura VI.1.  
 $l=10=D=0=0^\circ$ .  $M=100$  gamas. Intervalo=10 gamas.

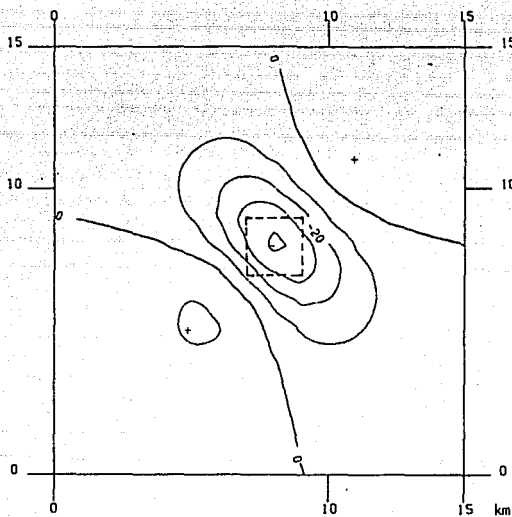


Figura VI.9 Campo total causado por el prisma de la figura vi.1 con  $l=10=5^\circ$  y  $D=45^\circ$ . Intervalo = 10 gamas.

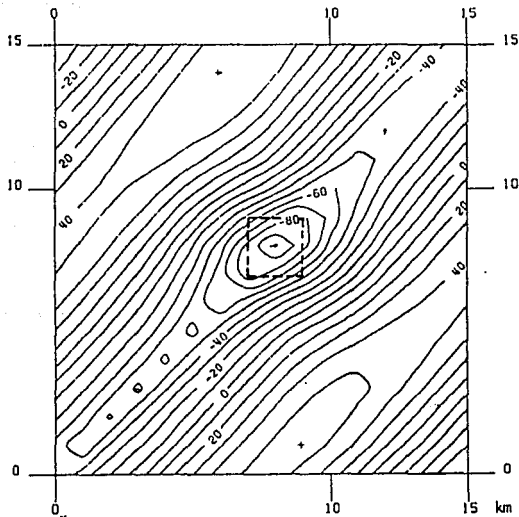


Figura VI.10 Campo total reducido al ecuador con  $l=10=5^\circ$  y  $D=45^\circ$ . Intervalo = 10 gamas.

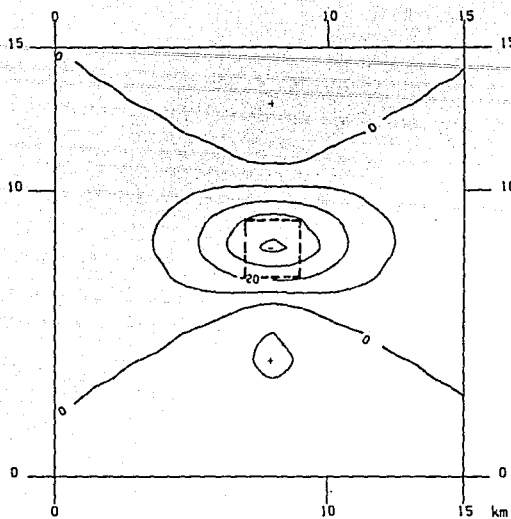


Figura VI.11 Campo total del prisma de la figura VI.1 con  $l=10=5^\circ$  y  $D=D_0=0^\circ$ , intervalo = 10 gamas.

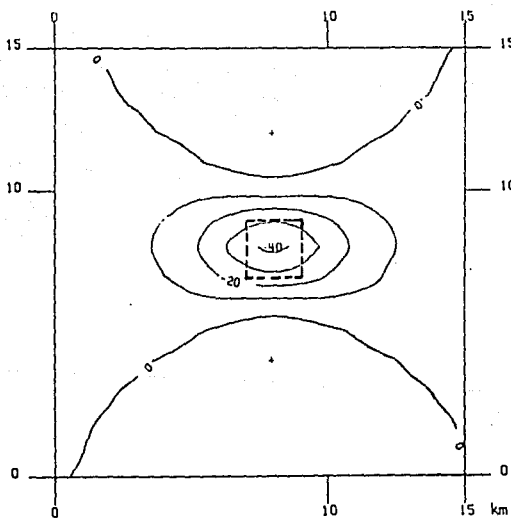


Figura VI.12 Campo total reducido al ecuador con  $l=10=5^\circ$  y  $D=D_0=0^\circ$ , intervalo = 10 gamas.



donde  $A(u,v)$  es el mapa original y  $B(u,v)$  es el mapa transformado, es inestable y por lo tanto  $B(u,v)$  tampoco estará definido en  $u=v=0$ .

Para evitar esta inconveniencia en el filtrado pueden usarse dos artificios. Uno de ellos consiste en hacer ceros las partes real e imaginaria del filtro en  $u=v=0$ , o sea  $F(0,0) = (0,0)$ , lo cual trae como consecuencia que el mapa filtrado  $B(u,v)$  en  $u=v=0$  sea también cero, o sea

$$B(0,0) = A(0,0) \cdot F(0,0) = (0,0)$$

Cabe recordar aquí que si  $B(m,n)$  es un mapa magnético o gravimétrico con datos localizados en una rejilla equiespaciada con  $M$  renglones y  $N$  columnas, entonces la transformada bidimensional de Fourier en  $u=v=0$  está dado por

$$B(0,0) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} B(m,n)$$

que es el valor promedio de los datos del mapa o también llamado valor del nivel base (o valor base) del mapa.

Entonces, el hecho de que  $B(0,0) = (0,0)$ , implica que el valor base del mapa transformado sea cero.

Es muy común que a los mapas aeromagnéticos se les sume un valor constante positivo para evitar trabajar con números negativos, tal que, si calculamos su reducción al polo por ejemplo, este mapa tendrá valores positivos y negativos, puesto

que el valor base es cero.

El segundo artificio consiste en hacer unitaria la parte real del filtro y conservar nula su parte imaginaria cuando  $u=v=0$ , o sea  $F(0,0) = (1,0)$ . De aquí que

$$B(0,0) = F(0,0) \quad A(0,0) = A(0,0)$$

lo cual significa que el valor base del mapa transformado es el valor base del mapa original.

En conclusión, ninguno de los artificios afecta el resultado de las transformaciones, solo evitan el polo numérico.

## CAPITULO VII

### EJEMPLOS GRAFICOS

## NOMENCLATURA

$I_o$  = inclinación del vector de magnetización inducida.

$D_o$  = declinación del vector de magnetización inducida.

$M_o$  = intensidad de la magnetización inducida.

$I_m$  = inclinación del vector de magnetización total.

$D_m$  = declinación del vector de magnetización total.

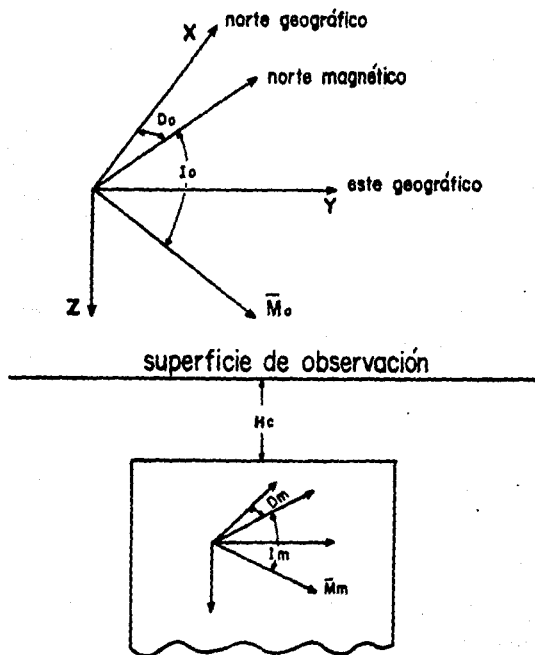
$M_m$  = intensidad de la magnetización total.

$I_r$  = inclinación del vector de magnetización remanente.

$D_r$  = declinación del vector de magnetización remanente.

$M_r$  = intensidad de la magnetización remanente.

$H_c$  = Profundidad a la cima del prisma.



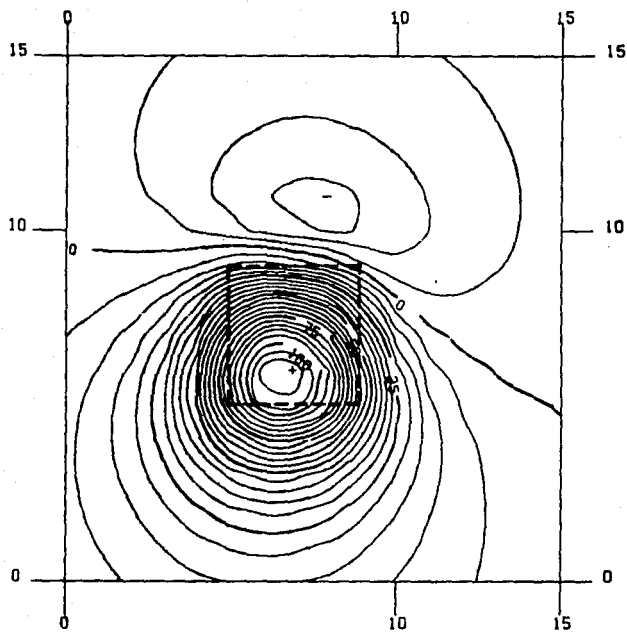


FIGURA 7.1 Anomalia de campo total causado por el prisma delimitado por la línea discontinua con  $H_c=1.5$  km. Magnetización total  $I_m=75^\circ$ ,  $D_m=45^\circ$  y  $M_m=50$  gamas. Magnetización remanente  $I_r=-7.5^\circ$ ,  $D_r=168^\circ$  y  $M_r=23.5$  gamas. Magnetización inducida  $I_o=50^\circ$ ,  $D_o=8^\circ$  y  $M_o=50$  gamas. Intervalo de config. =10 gamas. Distancia en km. Entrada en los ejemplos gráficos 7.2 a 7.11.

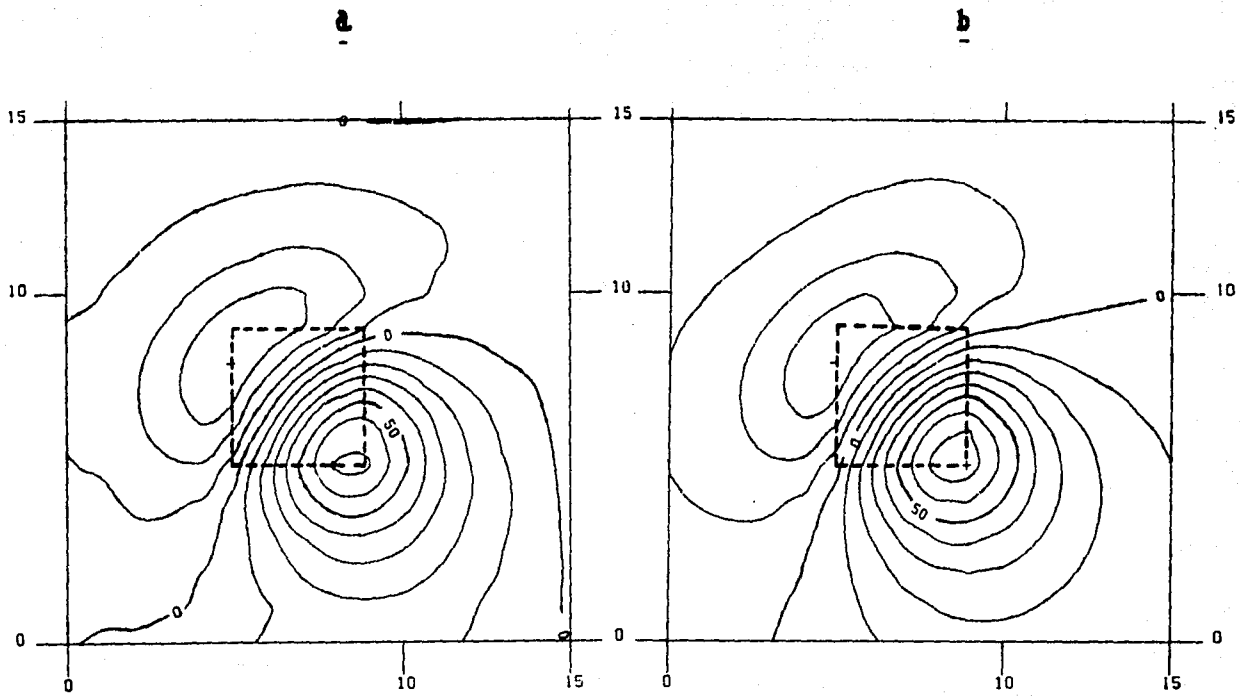


FIGURA 7.2 a) Anomalia de campo total transformada con el filtro 1V.6.

b) Anomalia de campo total teórico para la comparación. En ambas  $I_0=45^\circ$ ,  $D_0=-15^\circ$ ,  $I_m=30^\circ$  y  $D_m=-60^\circ$ . Intervalo 10 gammas. Distancia en km.

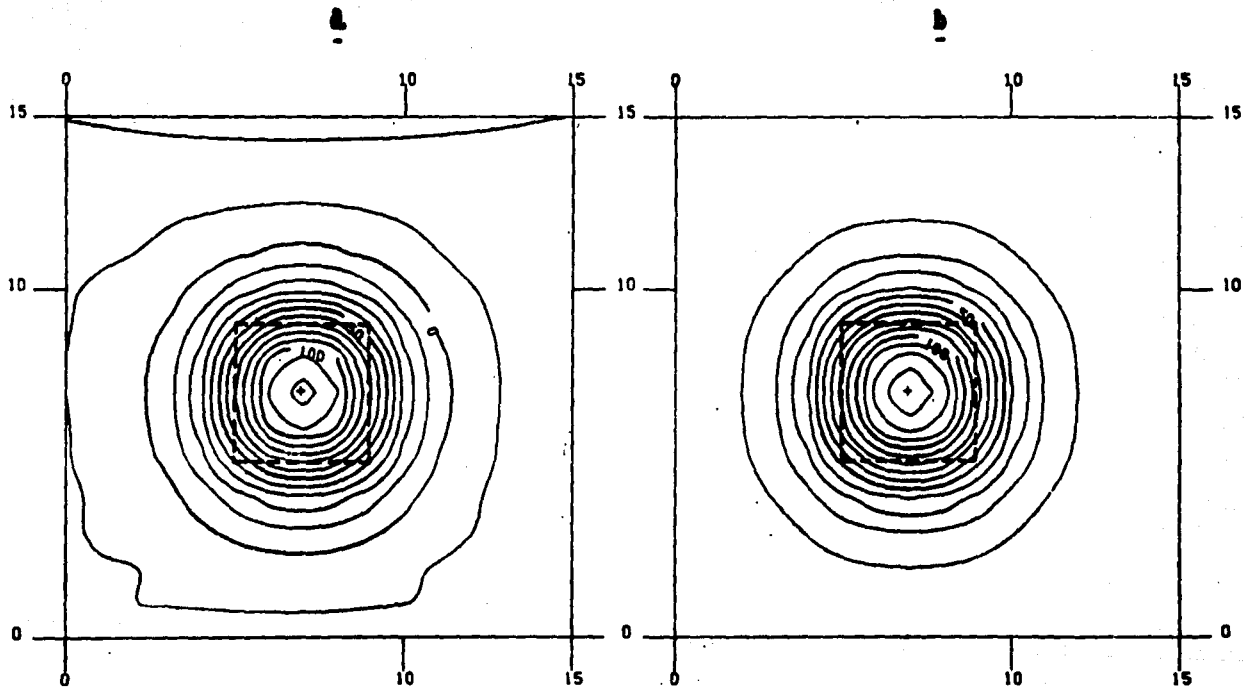


FIGURA 7.3 a) Anomalia de campo total reducido al polo con el filtro IV.11.  
 b) Anomalia de campo total teórico en el polo.  $I_0=I_m=90^\circ$ ,  $M_m=50$  gamas.  
 ... Intervalo 10 gamas. Distancia en km.

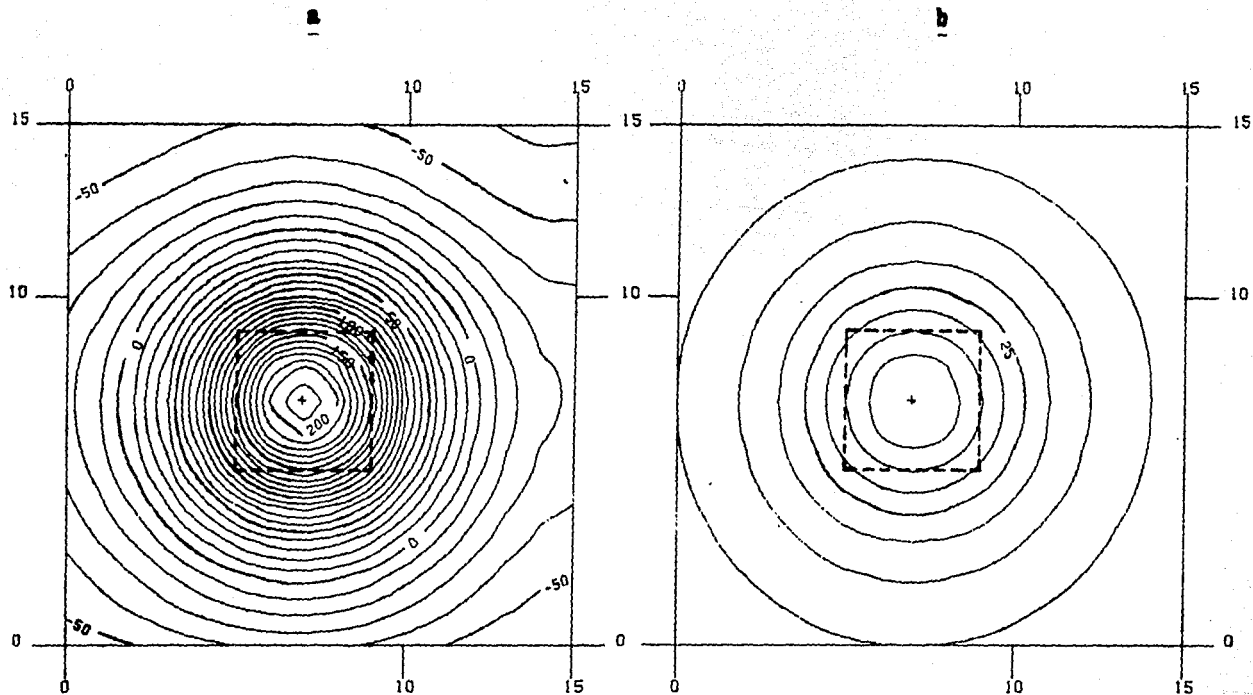


FIGURA 7.4 a) Anomalia pseudogravimétrica obtenida con el filtro  $v_18$ , Intervalo 10 gama.Km.  
 b) Anomalia gravimétrica, causada por el prisma con un contraste de densidad de  $0.1 \text{ gr/cm}^3$ . Intervalo 5 u.g.. El factor teórico en la ecuación 4.16 es  $M_s/ds/a = 7.49 \text{ gama. Km/u.g.}$ . Distancia en - km.



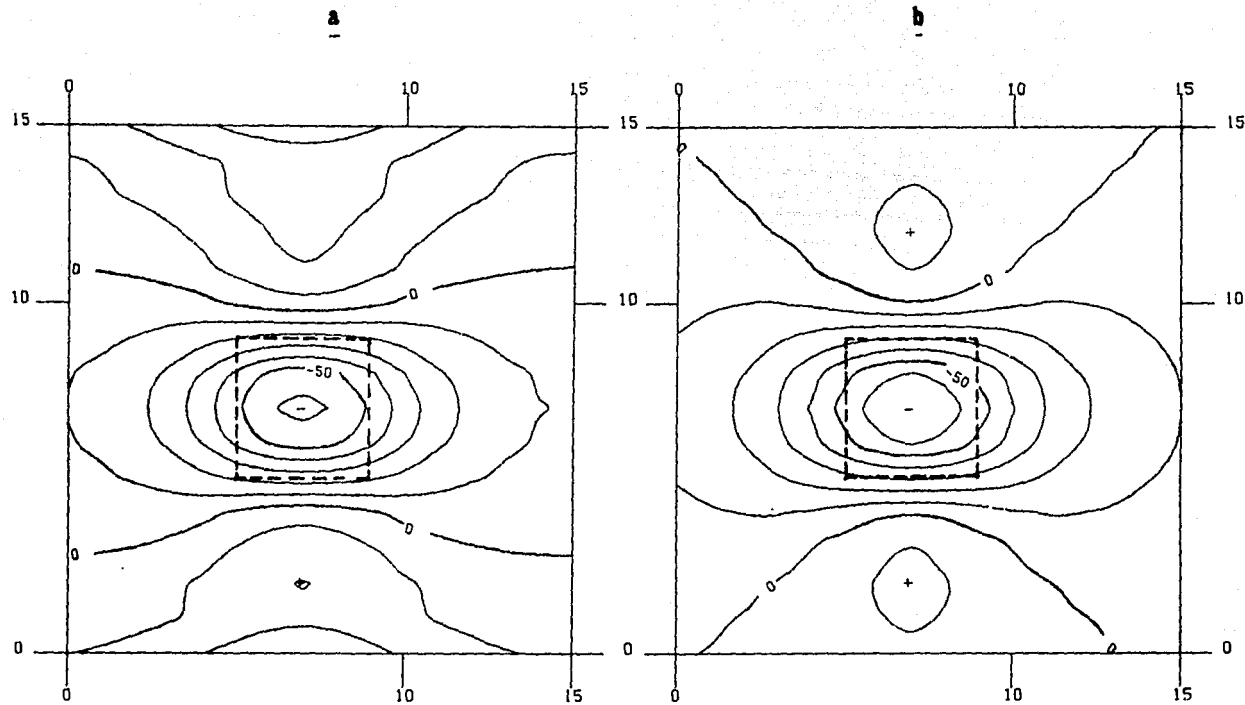


FIGURA 7.5 a) Anomalia de campo total reducido al ecuador con filtro iv.23.  
 b) Anomalia de campo total teórico en el ecuador,  $M_m=50$  gamas.  $I_o=I_m=D_o=D_m=0^\circ$ . Intervalo 10 gamas. Distancia en km.

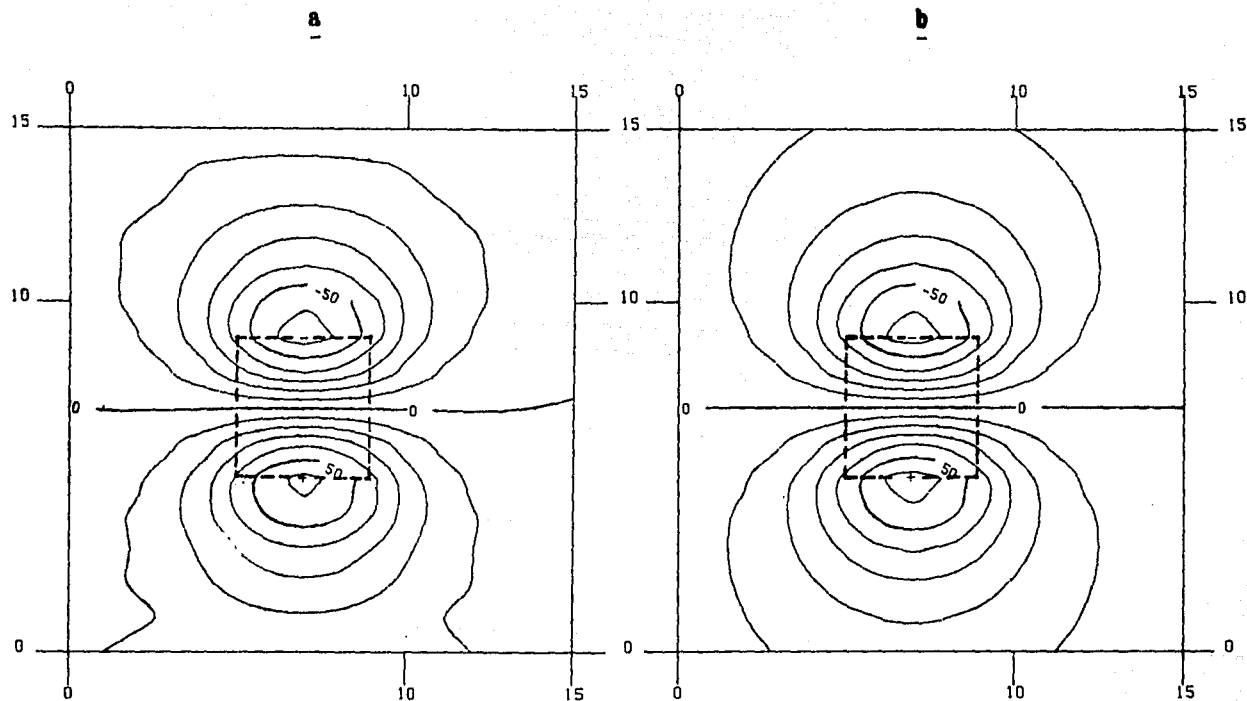


FIGURA 7.6 a) Anomalia de campo total ortogonal obtenida con el filtro IV.28.  
 b) Anomalia teórica de componente horizontal en X causado por el prisma polarizado verticalmente. Intervalo 10 gamas. Distancia en km.

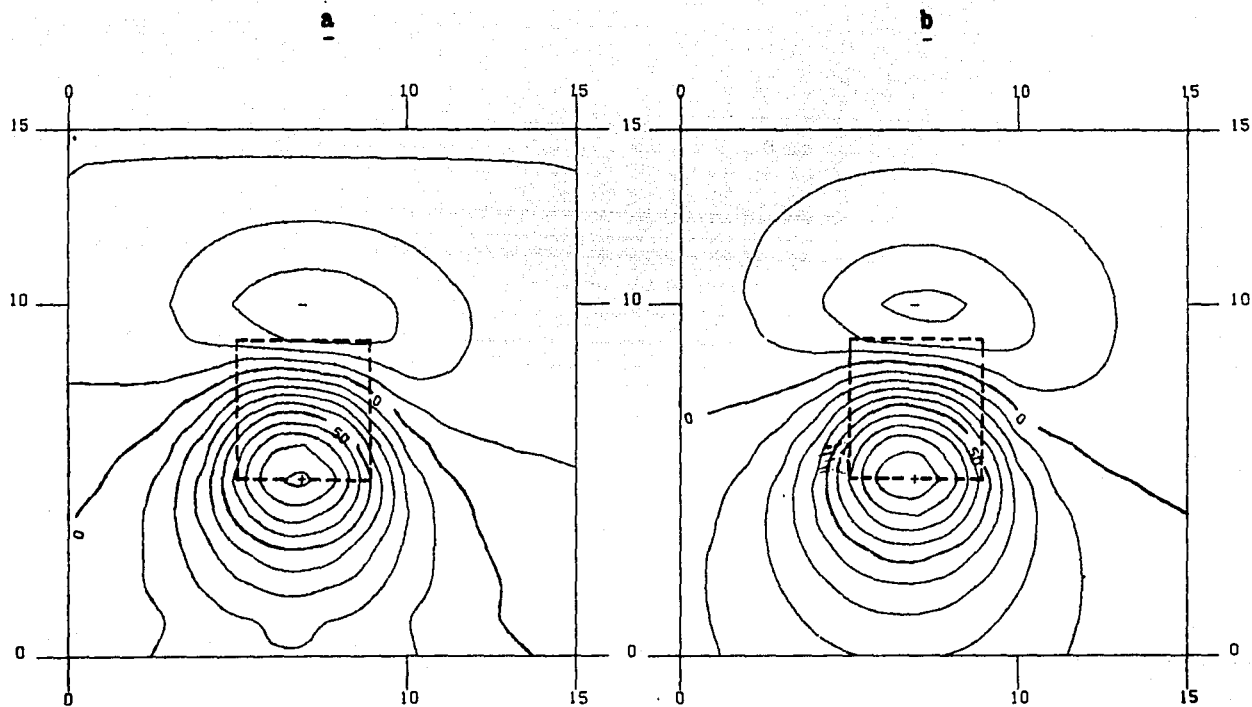


FIGURA 7.7 a) Anomalia de campo total con magnetización solamente inducida obtenida al eliminar de la anomalía de la figura 7.1, la magnetización remanente, con el filtro iv.31.

b) Anomalia de campo total teórico con magnetización solamente inducida.  $I_0=50^\circ$ ,  $D_0=8'$  y  $M_0=50$  gamas. Intervalo 10 gamas. Distancia en km

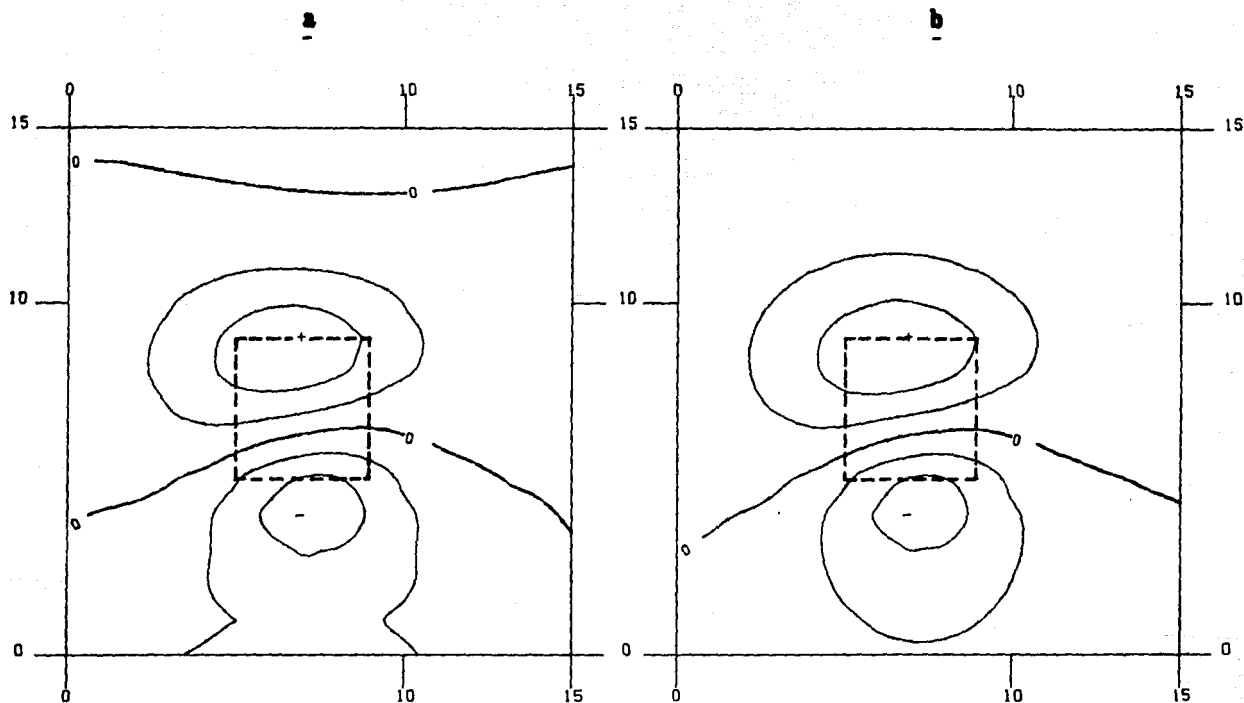


FIGURA 7.8 a) Anomalia de campo total con magnetización solamente remanente obtenida al eliminar de la anomalia en la figura 7.1, la magnetización inducida, con el filtro iv.32.  
 b) Anomalia de campo total teórico con magnetización solamente remanente  $I_r = -7.5^\circ$ ,  $D_r = 168$  y  $M_r = 23.5$  gamas. Intervalo 10 gamas. Distancia en km.

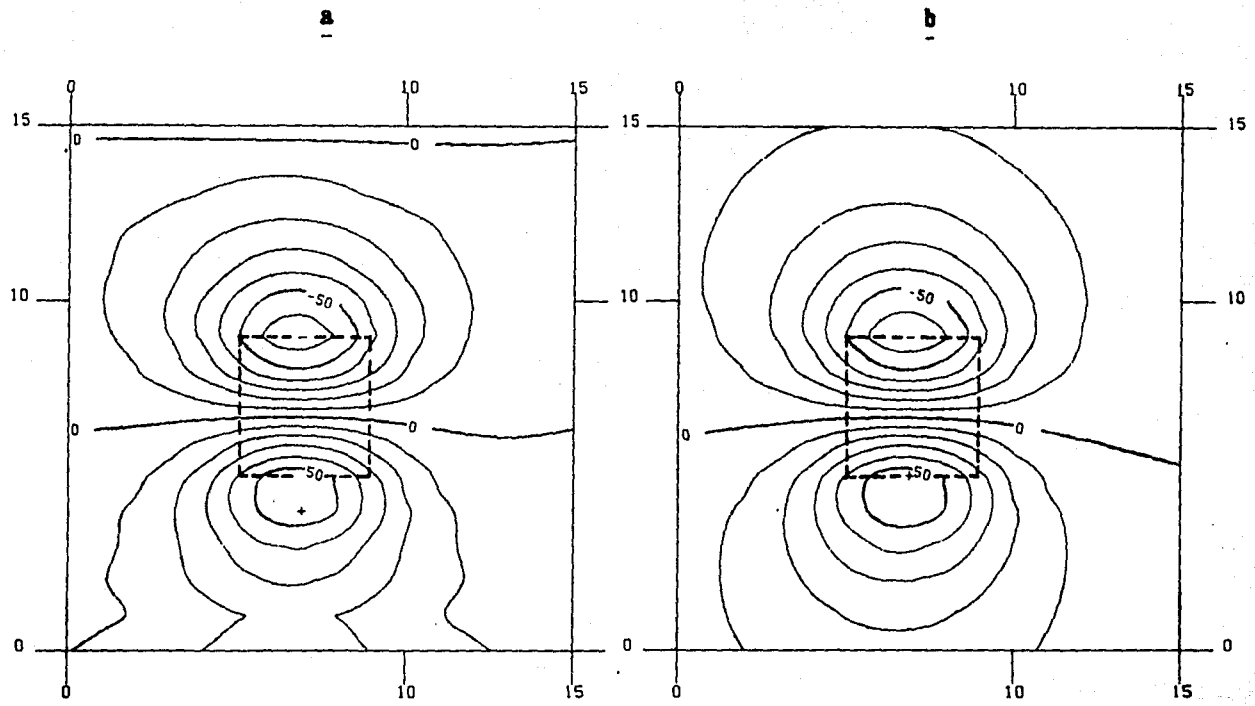


FIGURA 7.9 a) Anomalia de componente horizontal en x obtenida con el filtro iv.20.  
b) Anomalia teórica de componente horizontal en X. En ambas,  $I_0=D_0=0^\circ$  y  $I_m=75^\circ$ ,  $D_m=45^\circ$ . Intervalo 10 gamas. Distancia en km.

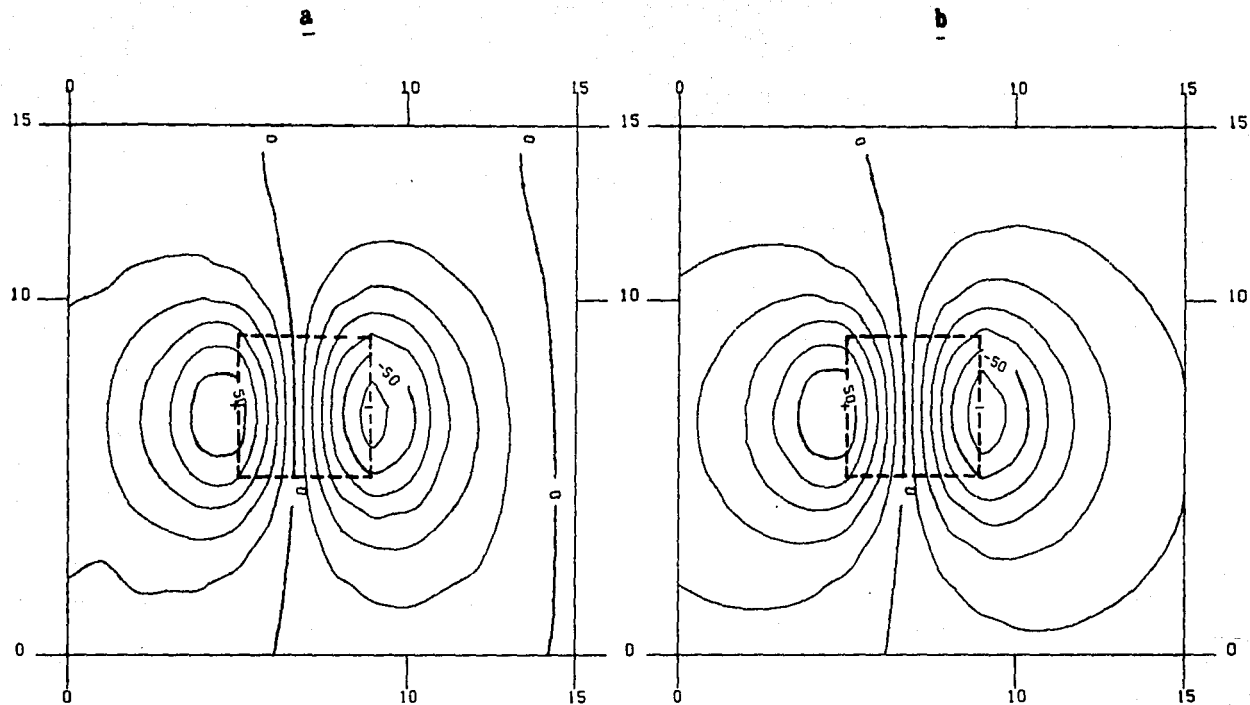


FIGURA 7.10 a) Anomalia de componente horizontal en Y obtenida con el filtro iv.21.  
 b) Anomalia teórica de componente horizontal en Y. En ambas,  $I_0=D_0=0^\circ$  y  $I_m=75^\circ$ ,  $D_m=45^\circ$ . Intervalo 10 gamas. Distancia en km.

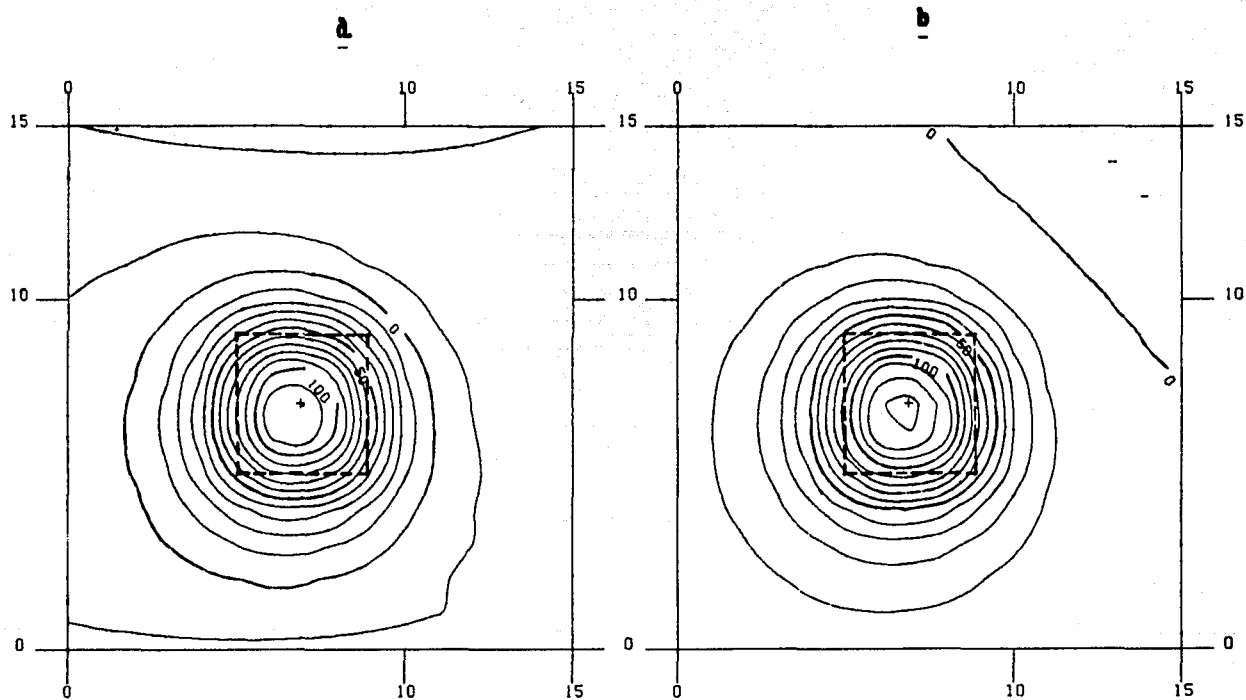


FIGURA 7.11 a) Anomalia de componente vertical obtenida con el filtro 1v.8.  
 b) Anomalia teórica de componente vertical. En ambas,  $I_0=90^\circ$ , y  $I_m=75^\circ$ ,  $D_m=45^\circ$ . Intervalo 10 gamas. Distancia en km.

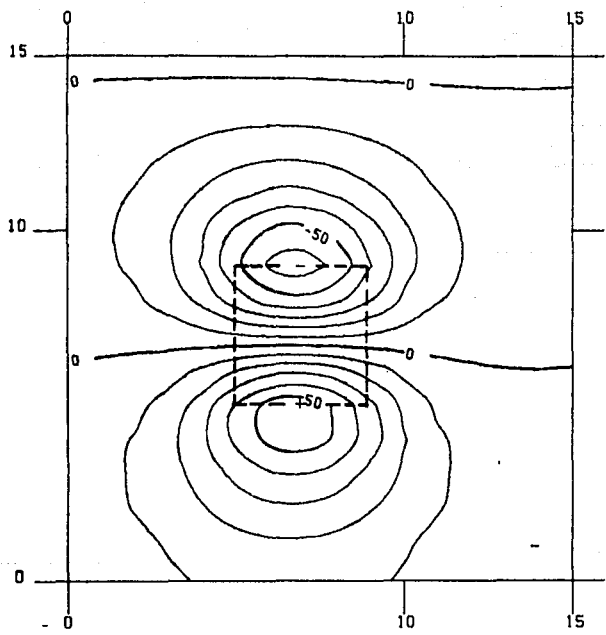


FIGURA 7.12. Anomalia de componente horizontal en X obtenida de la figura 7.11b con el filtro iv.25. Comparar con la figura 7.9 b. Intervalo 10 gamas. Distancia en km.

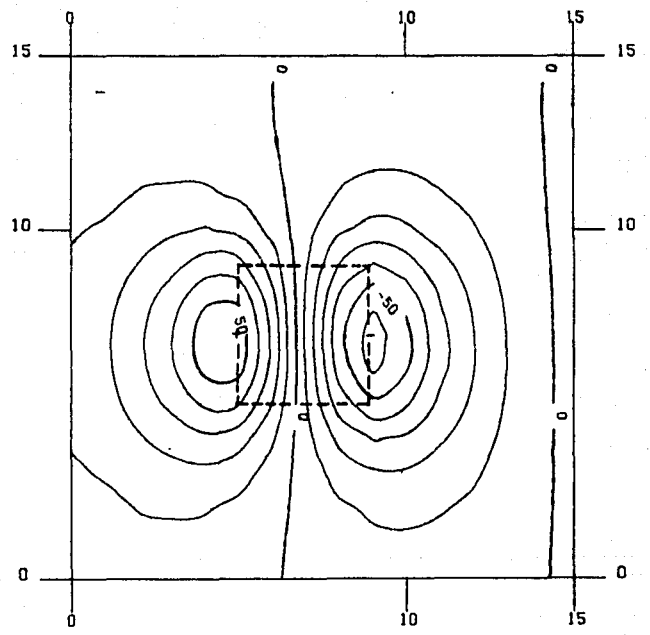


FIGURA 7.13. Anomalia de componente horizontal en Y obtenida de la figura 7.11b con el filtro iv.26. Comparar con la figura 7.10b. Intervalo 10 gamas. Distancia en km.



## CAPITULO VIII

### EJEMPLOS NUMERICOS

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* DATO \*\*\*

|    | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1  | -3.401  | -2.948  | -2.003  | -0.378  | 2.060   | 5.262   | 8.896   | 12.381  |
| 2  | -4.573  | -4.332  | -3.492  | -1.696  | 1.407   | 5.893   | 11.270  | 16.406  |
| 3  | -5.969  | -6.125  | -5.634  | -3.881  | -0.051  | 6.359   | 14.651  | 22.798  |
| 4  | -7.514  | -8.295  | -8.549  | -7.361  | -3.037  | 6.208   | 19.522  | 32.675  |
| 5  | -9.040  | -10.649 | -12.127 | -12.445 | -9.732  | 4.091   | 25.657  | 46.563  |
| 6  | -10.291 | -12.771 | -15.771 | -18.600 | -17.887 | -3.745  | 26.409  | 55.307  |
| 7  | -10.993 | -14.133 | -18.452 | -23.887 | -27.718 | -18.064 | 11.894  | 42.928  |
| 8  | -10.979 | -14.351 | -19.285 | -26.286 | -33.731 | -30.431 | -7.458  | 19.036  |
| 9  | -10.265 | -13.393 | -18.061 | -25.075 | -34.140 | -37.194 | -25.035 | -7.724  |
| 10 | -9.051  | -11.599 | -15.329 | -20.924 | -28.823 | -35.816 | -35.214 | -28.381 |
| 11 | -7.625  | -9.495  | -12.101 | -15.797 | -20.857 | -26.434 | -29.709 | -28.871 |
| 12 | -6.240  | -7.527  | -9.227  | -11.481 | -14.383 | -17.645 | -20.256 | -21.042 |
| 13 | -5.042  | -5.915  | -7.018  | -8.418  | -10.149 | -12.084 | -13.808 | -14.739 |
| 14 | -4.076  | -4.679  | -5.423  | -6.345  | -7.457  | -8.692  | -9.846  | -10.620 |
| 15 | -3.324  | -3.757  | -4.285  | -4.930  | -5.694  | -6.534  | -7.377  | -7.937  |
| 16 | -2.746  | -3.071  | -3.465  | -3.939  | -4.491  | -5.091  | -5.669  | -6.129  |

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* DATO \*\*\*

|    | 9       | 10      | 11      | 12     | 13     | 14     | 15     | 16     |
|----|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1  | 15.086  | 16.581  | 16.794  | 15.977 | 14.531 | 12.825 | 11.116 | 9.540  |
| 2  | 20.364  | 22.150  | 21.824  | 20.004 | 17.482 | 14.858 | 12.454 | 10.388 |
| 3  | 28.534  | 30.478  | 28.826  | 25.083 | 20.815 | 16.904 | 13.645 | 11.041 |
| 4  | 41.362  | 42.995  | 38.288  | 31.005 | 24.121 | 18.604 | 14.434 | 11.333 |
| 5  | 59.730  | 60.295  | 49.457  | 36.555 | 26.470 | 19.387 | 14.497 | 11.087 |
| 6  | 74.082  | 74.860  | 57.124  | 38.857 | 26.479 | 18.613 | 13.544 | 10.174 |
| 7  | 65.541  | 70.406  | 53.346  | 35.002 | 23.129 | 15.944 | 11.481 | 8.586  |
| 8  | 41.172  | 49.917  | 38.691  | 25.286 | 16.754 | 11.673 | 8.528  | 6.478  |
| 9  | 10.049  | 21.372  | 18.448  | 12.693 | 8.972  | 6.680  | 5.179  | 4.140  |
| 10 | -17.445 | -5.999  | -0.447  | 1.274  | 1.878  | 2.049  | 2.019  | 1.899  |
| 11 | -24.112 | -16.866 | -10.164 | -5.681 | -2.995 | -1.424 | -0.509 | 0.021  |
| 12 | -19.537 | -16.118 | -11.941 | -8.226 | -5.447 | -3.522 | -2.228 | -1.366 |
| 13 | -14.474 | -13.009 | -10.762 | -8.345 | -6.201 | -4.493 | -3.207 | -2.264 |
| 14 | -10.756 | -10.170 | -9.003  | -7.538 | -6.055 | -4.730 | -3.630 | -2.755 |
| 15 | -8.177  | -7.979  | -7.381  | -6.511 | -5.529 | -4.564 | -3.695 | -2.951 |
| 16 | -6.374  | -6.346  | -6.047  | -5.534 | -4.894 | -4.213 | -3.554 | -2.954 |

Tabla VIII.1 Anomalía magnética de intensidad total con  $I_0=45^\circ$ ,

$D_0=-15^\circ$ ,  $I_m=30^\circ$  y  $D_m=-60^\circ$ . Intensidad en gammas.

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* RFIL \*\*\*

|    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1  | 1.168 | 1.591 | 1.915 | 2.094 | 2.164 | 2.077 | 1.846 | 1.542 |
| 2  | 1.240 | 1.468 | 1.724 | 1.974 | 2.141 | 2.134 | 1.923 | 1.587 |
| 3  | 0.996 | 1.196 | 1.468 | 1.768 | 2.043 | 2.164 | 2.013 | 1.646 |
| 4  | 0.751 | 0.925 | 1.160 | 1.468 | 1.828 | 2.119 | 2.107 | 1.728 |
| 5  | 0.523 | 0.659 | 0.831 | 1.095 | 1.468 | 1.915 | 2.164 | 1.846 |
| 6  | 0.329 | 0.407 | 0.523 | 0.703 | 0.996 | 1.468 | 2.043 | 2.013 |
| 7  | 0.181 | 0.218 | 0.274 | 0.364 | 0.523 | 0.831 | 1.468 | 2.164 |
| 8  | 0.085 | 0.085 | 0.111 | 0.136 | 0.181 | 0.274 | 0.523 | 1.468 |
| 9  | 0.036 | 0.036 | 0.036 | 0.036 | 0.036 | 0.036 | 0.036 | 0.036 |
| 10 | 0.025 | 0.026 | 0.028 | 0.031 | 0.039 | 0.057 | 0.104 | 0.262 |
| 11 | 0.039 | 0.046 | 0.057 | 0.075 | 0.104 | 0.157 | 0.262 | 0.515 |
| 12 | 0.068 | 0.083 | 0.104 | 0.136 | 0.184 | 0.262 | 0.402 | 0.677 |
| 13 | 0.104 | 0.126 | 0.157 | 0.200 | 0.262 | 0.358 | 0.515 | 0.784 |
| 14 | 0.144 | 0.172 | 0.210 | 0.262 | 0.335 | 0.442 | 0.605 | 0.859 |
| 15 | 0.184 | 0.218 | 0.262 | 0.321 | 0.402 | 0.515 | 0.677 | 0.913 |
| 16 | 0.224 | 0.262 | 0.312 | 0.376 | 0.462 | 0.577 | 0.736 | 0.954 |

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* RFIL \*\*\*

|    | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1  | 1.242 | 0.986 | 0.784 | 0.631 | 0.515 | 0.427 | 0.358 | 0.305 |
| 2  | 1.242 | 0.954 | 0.736 | 0.577 | 0.462 | 0.376 | 0.312 | 0.262 |
| 3  | 1.242 | 0.913 | 0.677 | 0.515 | 0.402 | 0.321 | 0.262 | 0.218 |
| 4  | 1.242 | 0.859 | 0.605 | 0.442 | 0.335 | 0.262 | 0.210 | 0.172 |
| 5  | 1.242 | 0.784 | 0.515 | 0.358 | 0.262 | 0.200 | 0.157 | 0.126 |
| 6  | 1.242 | 0.677 | 0.402 | 0.262 | 0.184 | 0.136 | 0.104 | 0.083 |
| 7  | 1.242 | 0.515 | 0.262 | 0.157 | 0.104 | 0.075 | 0.057 | 0.046 |
| 8  | 1.242 | 0.262 | 0.104 | 0.057 | 0.039 | 0.031 | 0.028 | 0.026 |
| 9  | 1.000 | 0.036 | 0.036 | 0.036 | 0.036 | 0.036 | 0.036 | 0.036 |
| 10 | 1.242 | 1.468 | 0.523 | 0.274 | 0.181 | 0.136 | 0.111 | 0.095 |
| 11 | 1.242 | 2.164 | 1.468 | 0.831 | 0.523 | 0.364 | 0.274 | 0.218 |
| 12 | 1.242 | 2.013 | 2.043 | 1.468 | 0.996 | 0.703 | 0.523 | 0.407 |
| 13 | 1.242 | 1.846 | 2.164 | 1.915 | 1.468 | 1.095 | 0.831 | 0.650 |
| 14 | 1.242 | 1.728 | 2.107 | 2.119 | 1.828 | 1.468 | 1.160 | 0.925 |
| 15 | 1.242 | 1.646 | 2.013 | 2.164 | 2.043 | 1.768 | 1.468 | 1.206 |
| 16 | 1.242 | 1.587 | 1.923 | 2.134 | 2.141 | 1.974 | 1.724 | 1.468 |

Tabla VIII.2 Parte real del filtro para transformar una anomalía magnética con  $I_0=45^\circ$ ,  $D_0=-15^\circ$ ,  $I_m=30^\circ$  y  $D_m=-60^\circ$ , a otra nueva anomalía con  $I_0=50^\circ$ ,  $D_0=8^\circ$ ,  $I_m=75^\circ$  y  $D_m=45^\circ$ .

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* IFIL \*\*\*

|    | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1  | -1.542 | -1.395 | -1.159 | -0.816 | -0.383 | 0.071  | 0.455  | 0.713  |
| 2  | -1.632 | -1.542 | -1.368 | -1.072 | -0.638 | -0.120 | 0.357  | 0.684  |
| 3  | -1.676 | -1.641 | -1.542 | -1.328 | -0.942 | -0.383 | 0.211  | 0.642  |
| 4  | -1.669 | -1.679 | -1.652 | -1.542 | -1.266 | -0.735 | -0.017 | 0.574  |
| 5  | -1.614 | -1.651 | -1.677 | -1.664 | -1.542 | -1.159 | -0.383 | 0.455  |
| 6  | -1.518 | -1.563 | -1.614 | -1.662 | -1.676 | -1.542 | -0.942 | 0.211  |
| 7  | -1.398 | -1.434 | -1.480 | -1.540 | -1.614 | -1.677 | -1.542 | -0.383 |
| 8  | -1.270 | -1.288 | -1.312 | -1.346 | -1.398 | -1.480 | -1.614 | -1.542 |
| 9  | -1.151 | -1.151 | -1.151 | -1.151 | -1.151 | -1.151 | -1.151 | -1.151 |
| 10 | -1.054 | -1.042 | -1.027 | -1.007 | -0.981 | -0.946 | -0.901 | -0.871 |
| 11 | -0.981 | -0.965 | -0.946 | -0.925 | -0.901 | -0.879 | -0.871 | -0.901 |
| 12 | -0.932 | -0.917 | -0.901 | -0.886 | -0.874 | -0.871 | -0.885 | -0.917 |
| 13 | -0.901 | -0.887 | -0.879 | -0.872 | -0.871 | -0.879 | -0.901 | -0.920 |
| 14 | -0.883 | -0.876 | -0.871 | -0.871 | -0.877 | -0.891 | -0.911 | -0.919 |
| 15 | -0.874 | -0.871 | -0.871 | -0.875 | -0.885 | -0.901 | -0.917 | -0.916 |
| 16 | -0.870 | -0.871 | -0.874 | -0.882 | -0.894 | -0.908 | -0.920 | -0.912 |

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* IFIL \*\*\*

|    | 9      | 10     | 11     | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
|----|--------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1  | 0.852  | 0.908  | 0.920  | 0.913 | 0.901 | 0.889 | 0.879 | 0.874 |
| 2  | 0.852  | 0.912  | 0.920  | 0.908 | 0.894 | 0.882 | 0.874 | 0.871 |
| 3  | 0.852  | 0.916  | 0.917  | 0.901 | 0.885 | 0.875 | 0.871 | 0.871 |
| 4  | 0.852  | 0.919  | 0.911  | 0.891 | 0.877 | 0.871 | 0.871 | 0.876 |
| 5  | 0.852  | 0.920  | 0.901  | 0.879 | 0.871 | 0.872 | 0.879 | 0.889 |
| 6  | 0.852  | 0.917  | 0.885  | 0.871 | 0.874 | 0.886 | 0.901 | 0.917 |
| 7  | 0.852  | 0.901  | 0.871  | 0.879 | 0.901 | 0.925 | 0.946 | 0.965 |
| 8  | 0.852  | 0.871  | 0.901  | 0.946 | 0.981 | 1.007 | 1.027 | 1.042 |
| 9  | 0.908  | 1.151  | 1.151  | 1.151 | 1.151 | 1.151 | 1.151 | 1.151 |
| 10 | -0.852 | 1.542  | 1.614  | 1.480 | 1.398 | 1.346 | 1.312 | 1.288 |
| 11 | -0.852 | 0.383  | 1.542  | 1.677 | 1.614 | 1.540 | 1.480 | 1.434 |
| 12 | -0.852 | -0.211 | 0.942  | 1.542 | 1.676 | 1.662 | 1.614 | 1.563 |
| 13 | -0.852 | -0.455 | 0.383  | 1.159 | 1.542 | 1.664 | 1.677 | 1.651 |
| 14 | -0.852 | -0.574 | 0.017  | 0.735 | 1.266 | 1.542 | 1.652 | 1.679 |
| 15 | -0.852 | -0.642 | -0.211 | 0.383 | 0.942 | 1.328 | 1.542 | 1.641 |
| 16 | -0.852 | -0.684 | -0.357 | 0.120 | 0.638 | 1.072 | 1.368 | 1.542 |

Tabla VIII.3 Parte imaginaria del filtro para transformar una anomalía magnética con  $I_0=45^\circ$ ,  $D_0=-15^\circ$ ,  $I_m=30^\circ$  y  $D_m=-60^\circ$ , a otra nueva anomalía con  $I_0=50^\circ$ ,  $D_0=8^\circ$ ,  $I_m=75^\circ$  y  $D_m=45^\circ$ .

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* MAPA \*\*\*

|    | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1  | -14.511 | -7.736  | -8.200  | -5.647  | -5.170  | -3.292  | -2.443  | -1.385  |
| 2  | -14.855 | -4.236  | -2.868  | 2.746   | 5.969   | 10.710  | 13.319  | 14.905  |
| 3  | -14.440 | -1.834  | 0.867   | 8.267   | 13.328  | 19.828  | 23.191  | 24.151  |
| 4  | -14.260 | 0.586   | 4.717   | 14.906  | 23.762  | 35.034  | 41.696  | 42.869  |
| 5  | -14.102 | 1.873   | 7.135   | 20.035  | 34.414  | 54.514  | 67.936  | 69.713  |
| 6  | -14.292 | 2.135   | 8.015   | 23.109  | 43.815  | 76.950  | 100.976 | 103.593 |
| 7  | -14.633 | 0.885   | 6.303   | 21.178  | 43.453  | 81.319  | 108.748 | 110.680 |
| 8  | -15.024 | -1.507  | 2.580   | 14.643  | 33.072  | 65.842  | 89.100  | 89.547  |
| 9  | -15.289 | -4.499  | -2.310  | 5.401   | 16.521  | 38.258  | 52.752  | 51.456  |
| 10 | -15.206 | -7.424  | -6.883  | -3.628  | -0.924  | 5.214   | 7.521   | 4.791   |
| 11 | -14.866 | -9.603  | -10.079 | -9.554  | -11.318 | -13.114 | -16.303 | -18.713 |
| 12 | -14.197 | -11.076 | -11.907 | -12.569 | -15.000 | -17.632 | -20.521 | -22.143 |
| 13 | -13.560 | -11.668 | -12.463 | -13.174 | -15.054 | -16.829 | -18.589 | -19.397 |
| 14 | -12.767 | -12.100 | -12.808 | -13.845 | -15.452 | -17.066 | -18.503 | -19.341 |
| 15 | -12.371 | -11.836 | -12.412 | -13.170 | -14.415 | -15.575 | -16.677 | -17.207 |
| 16 | -11.499 | -11.844 | -12.723 | -14.853 | -17.394 | -20.419 | -23.209 | -25.482 |

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* MAPA \*\*\*

|    | 9       | 10      | 11      | 12      | 13      | 14      | 15      | 16      |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1  | -0.938  | -1.078  | -1.016  | -2.004  | -1.534  | -3.096  | -1.293  | -8.504  |
| 2  | 14.491  | 12.403  | 10.283  | 6.938   | 5.580   | 1.550   | 0.465   | -12.583 |
| 3  | 21.637  | 16.761  | 11.920  | 6.544   | 3.797   | -1.320  | -2.716  | -14.027 |
| 4  | 37.391  | 27.341  | 17.706  | 9.038   | 4.808   | -1.205  | -2.146  | -14.608 |
| 5  | 59.005  | 39.279  | 21.039  | 8.460   | 3.120   | -2.868  | -3.308  | -15.146 |
| 6  | 86.957  | 53.451  | 23.735  | 7.721   | 1.952   | -3.665  | -3.622  | -15.591 |
| 7  | 91.367  | 52.306  | 19.001  | 3.458   | -1.283  | -5.709  | -5.201  | -16.046 |
| 8  | 72.242  | 37.711  | 9.529   | -2.131  | -4.663  | -7.657  | -6.671  | -16.404 |
| 9  | 39.314  | 15.625  | -2.312  | -8.122  | -8.213  | -9.668  | -8.441  | -16.448 |
| 10 | -0.490  | -8.485  | -12.709 | -12.981 | -11.132 | -11.492 | -10.111 | -16.258 |
| 11 | -19.821 | -19.332 | -16.981 | -14.849 | -12.458 | -12.254 | -11.024 | -15.596 |
| 12 | -22.163 | -20.688 | -18.108 | -15.988 | -13.855 | -13.319 | -12.229 | -14.887 |
| 13 | -19.203 | -18.088 | -16.377 | -14.887 | -13.360 | -12.827 | -11.985 | -13.865 |
| 14 | -19.412 | -18.830 | -17.675 | -16.453 | -15.122 | -14.246 | -13.301 | -13.359 |
| 15 | -17.312 | -16.919 | -16.146 | -15.235 | -14.140 | -13.263 | -12.238 | -12.554 |
| 16 | -26.763 | -26.956 | -26.174 | -24.556 | -22.634 | -20.274 | -18.099 | -14.304 |

Tabla VIII.4 Anomalía magnética de intensidad total transformada.

$I_0=50^\circ$ ,  $D_0=0^\circ$ ,  $I_m=75^\circ$  y  $D_m=45^\circ$ . Intensidad en gammas.

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* IMAG \*\*\*

|    | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1  | 0.389  | -0.365 | 0.497  | -0.261 | 0.653  | -0.090 | 0.837  | 0.067  |
| 2  | 0.562  | -0.586 | 0.453  | -0.690 | 0.297  | -0.861 | 0.113  | -1.017 |
| 3  | 0.514  | -0.499 | 0.623  | -0.386 | 0.779  | -0.215 | 0.963  | -0.059 |
| 4  | 0.654  | -0.679 | 0.546  | -0.783 | 0.390  | -0.954 | 0.206  | -1.110 |
| 5  | 0.607  | -0.583 | 0.715  | -0.479 | 0.871  | -0.307 | 1.055  | -0.151 |
| 6  | 0.688  | -0.712 | 0.579  | -0.816 | 0.423  | -0.987 | 0.239  | -1.143 |
| 7  | 0.586  | -0.561 | 0.694  | -0.457 | 0.850  | -0.286 | 1.034  | -0.130 |
| 8  | 0.589  | -0.614 | 0.481  | -0.718 | 0.325  | -0.889 | 0.141  | -1.045 |
| 9  | 0.432  | -0.400 | 0.540  | -0.304 | 0.696  | -0.132 | 0.880  | 0.024  |
| 10 | 0.391  | -0.415 | 0.283  | -0.519 | 0.127  | -0.691 | -0.057 | -0.847 |
| 11 | 0.230  | -0.205 | 0.338  | -0.101 | 0.494  | 0.070  | 0.678  | 0.226  |
| 12 | 0.199  | -0.223 | 0.091  | -0.327 | -0.065 | -0.498 | -0.250 | -0.654 |
| 13 | 0.078  | -0.053 | 0.186  | 0.051  | 0.342  | 0.222  | 0.526  | 0.378  |
| 14 | 0.074  | -0.098 | -0.034 | -0.202 | -0.190 | -0.374 | -0.374 | -0.530 |
| 15 | 0.006  | 0.019  | 0.114  | 0.123  | 0.270  | 0.294  | 0.454  | 0.450  |
| 16 | -0.014 | -0.010 | -0.122 | -0.114 | -0.279 | -0.285 | -0.463 | -0.441 |

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* IMAG \*\*\*

|    | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     | 15     | 16     |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1  | 0.952  | 0.115  | 0.945  | 0.052  | 0.861  | -0.053 | 0.766  | -0.373 |
| 2  | -0.002 | -1.065 | 0.005  | -1.003 | 0.009  | -0.897 | 0.184  | -0.577 |
| 3  | 1.078  | -0.011 | 1.071  | -0.073 | 0.787  | -0.179 | 0.892  | -0.499 |
| 4  | 0.091  | -1.158 | 0.098  | -1.096 | 0.182  | -0.990 | 0.277  | -0.670 |
| 5  | 1.170  | -0.103 | 1.163  | -0.165 | 1.079  | -0.271 | 0.984  | -0.591 |
| 6  | 0.124  | -1.191 | 0.131  | -1.129 | 0.215  | -1.023 | 0.310  | -0.703 |
| 7  | 1.149  | -0.082 | 1.142  | -0.144 | 1.058  | -0.250 | 0.963  | -0.570 |
| 8  | 0.026  | -1.093 | 0.033  | -1.031 | 0.117  | -0.925 | 0.212  | -0.605 |
| 9  | 0.995  | 0.072  | 0.988  | 0.010  | 0.904  | -0.094 | 0.809  | -0.416 |
| 10 | -0.172 | -0.895 | -0.165 | -0.833 | -0.081 | -0.727 | 0.014  | -0.407 |
| 11 | 0.793  | 0.274  | 0.786  | 0.212  | 0.702  | 0.106  | 0.607  | -0.214 |
| 12 | -0.364 | -0.703 | -0.357 | -0.640 | -0.273 | -0.534 | -0.178 | -0.215 |
| 13 | 0.641  | 0.426  | 0.633  | 0.364  | 0.550  | 0.258  | 0.455  | -0.062 |
| 14 | -0.489 | -0.578 | -0.482 | -0.516 | -0.398 | -0.410 | -0.303 | -0.090 |
| 15 | 0.569  | 0.498  | 0.562  | 0.436  | 0.478  | 0.330  | 0.383  | 0.010  |
| 16 | -0.578 | -0.489 | -0.570 | -0.427 | -0.487 | -0.321 | -0.392 | -0.001 |

Tabla VIII.5 Parte imaginaria de la anomalía magnética transformada.

$I_0=50^\circ$ ,  $D_0=8^\circ$ ,  $I_m=75^\circ$  y  $D_m=45^\circ$ . Teóricamente = [0.0].

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* DATO \*\*\*

|    | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6       | 7       | 8       |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 1  | 7.274  | 8.771  | 10.477 | 12.287 | 13.989 | 15.270  | 15.802  | 15.381  |
| 2  | 8.021  | 10.007 | 12.429 | 15.207 | 18.047 | 20.392  | 21.555  | 21.065  |
| 3  | 8.649  | 11.218 | 14.610 | 18.890 | 23.760 | 28.242  | 30.819  | 30.344  |
| 4  | 9.009  | 12.191 | 16.756 | 23.234 | 31.714 | 40.679  | 46.526  | 46.369  |
| 5  | 8.913  | 12.547 | 18.270 | 27.460 | 41.775 | 59.948  | 72.986  | 73.809  |
| 6  | 8.198  | 11.929 | 18.249 | 29.553 | 50.201 | 81.527  | 104.987 | 106.977 |
| 7  | 6.819  | 10.123 | 16.000 | 27.252 | 49.604 | 85.866  | 112.785 | 114.431 |
| 8  | 4.915  | 7.309  | 11.687 | 20.467 | 39.015 | 70.487  | 93.298  | 93.550  |
| 9  | 2.781  | 4.030  | 6.342  | 11.185 | 22.322 | 42.777  | 56.831  | 55.384  |
| 10 | 0.770  | 0.965  | 1.356  | 2.333  | 5.032  | 10.225  | 12.362  | 9.418   |
| 11 | -0.853 | -1.377 | -2.202 | -3.479 | -5.378 | -8.057  | -11.352 | -14.127 |
| 12 | -1.975 | -2.840 | -4.118 | -5.977 | -8.542 | -11.640 | -14.528 | -16.250 |
| 13 | -2.630 | -3.559 | -4.822 | -6.483 | -8.512 | -10.668 | -12.470 | -13.414 |
| 14 | -2.927 | -3.774 | -4.842 | -6.127 | -7.554 | -8.939  | -10.015 | -10.533 |
| 15 | -2.985 | -3.698 | -4.542 | -5.488 | -6.466 | -7.354  | -8.078  | -8.304  |
| 16 | -2.900 | -3.477 | -4.124 | -4.811 | -5.463 | -6.065  | -6.476  | -6.653  |

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* DATO \*\*\*

|    | 9       | 10      | 11      | 12     | 13     | 14     | 15     | 16     |
|----|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1  | 14.038  | 12.037  | 9.767   | 7.580  | 5.694  | 4.182  | 3.025  | 2.163  |
| 2  | 18.940  | 15.707  | 12.142  | 8.899  | 6.296  | 4.358  | 2.975  | 2.007  |
| 3  | 26.777  | 21.203  | 15.298  | 10.354 | 6.763  | 4.336  | 2.745  | 1.709  |
| 4  | 40.043  | 29.738  | 19.373  | 11.708 | 6.870  | 3.979  | 2.265  | 1.240  |
| 5  | 62.560  | 42.726  | 23.890  | 12.321 | 6.266  | 3.137  | 1.483  | 0.588  |
| 6  | 89.704  | 56.293  | 26.125  | 11.080 | 4.603  | 1.732  | 0.404  | -0.223 |
| 7  | 94.533  | 55.716  | 22.054  | 7.269  | 1.864  | -0.138 | -0.879 | -1.123 |
| 8  | 75.577  | 41.207  | 12.623  | 1.673  | -1.446 | -2.175 | -2.194 | -2.011 |
| 9  | 42.749  | 19.344  | 1.168   | -4.055 | -4.526 | -3.984 | -3.338 | -2.778 |
| 10 | 3.796   | -4.051  | -8.568  | -8.220 | -6.665 | -5.248 | -4.157 | -3.343 |
| 11 | -15.382 | -14.803 | -12.594 | -9.884 | -7.582 | -5.854 | -4.594 | -3.672 |
| 12 | -16.266 | -14.660 | -12.150 | -9.617 | -7.514 | -5.900 | -4.690 | -3.784 |
| 13 | -13.245 | -12.081 | -10.350 | -8.530 | -6.911 | -5.587 | -4.541 | -3.726 |
| 14 | -10.383 | -9.640  | -8.526  | -7.293 | -6.122 | -5.100 | -4.248 | -3.554 |
| 15 | -8.193  | -7.720  | -6.999  | -6.166 | -5.331 | -4.563 | -3.891 | -3.318 |
| 16 | -6.573  | -6.263  | -5.785  | -5.213 | -4.616 | -4.042 | -3.519 | -3.056 |

Tabla VIII.6 Anomalía magnética de intensidad total con  $I_0=50^\circ$ ,

$D_0=8^\circ$ ,  $I_m=75^\circ$  y  $D_m=45^\circ$ . Intensidad en gammas.

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* RFIL \*\*\*

|    | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1  | 0.714 | 0.686 | 0.660 | 0.637 | 0.620 | 0.611 | 0.612 | 0.624 |
| 2  | 0.746 | 0.714 | 0.682 | 0.653 | 0.629 | 0.614 | 0.610 | 0.622 |
| 3  | 0.788 | 0.752 | 0.714 | 0.677 | 0.645 | 0.620 | 0.610 | 0.619 |
| 4  | 0.842 | 0.802 | 0.759 | 0.714 | 0.670 | 0.634 | 0.612 | 0.615 |
| 5  | 0.910 | 0.869 | 0.823 | 0.770 | 0.714 | 0.660 | 0.620 | 0.612 |
| 6  | 0.991 | 0.955 | 0.910 | 0.854 | 0.788 | 0.714 | 0.645 | 0.610 |
| 7  | 1.083 | 1.056 | 1.021 | 0.974 | 0.910 | 0.823 | 0.714 | 0.620 |
| 8  | 1.177 | 1.164 | 1.147 | 1.121 | 1.083 | 1.021 | 0.910 | 0.714 |
| 9  | 1.259 | 1.259 | 1.259 | 1.259 | 1.259 | 1.259 | 1.259 | 1.259 |
| 10 | 1.313 | 1.318 | 1.323 | 1.329 | 1.332 | 1.326 | 1.281 | 1.077 |
| 11 | 1.332 | 1.331 | 1.326 | 1.312 | 1.281 | 1.213 | 1.077 | 0.855 |
| 12 | 1.318 | 1.304 | 1.281 | 1.241 | 1.177 | 1.077 | 0.936 | 0.775 |
| 13 | 1.281 | 1.253 | 1.213 | 1.156 | 1.077 | 0.974 | 0.855 | 0.738 |
| 14 | 1.231 | 1.192 | 1.142 | 1.077 | 0.997 | 0.904 | 0.806 | 0.717 |
| 15 | 1.177 | 1.132 | 1.077 | 1.011 | 0.936 | 0.855 | 0.775 | 0.704 |
| 16 | 1.125 | 1.077 | 1.021 | 0.958 | 0.890 | 0.820 | 0.753 | 0.695 |

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* RFIL \*\*\*

|    | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1  | 0.650 | 0.689 | 0.738 | 0.794 | 0.855 | 0.916 | 0.974 | 1.028 |
| 2  | 0.650 | 0.695 | 0.753 | 0.820 | 0.890 | 0.958 | 1.021 | 1.077 |
| 3  | 0.650 | 0.704 | 0.775 | 0.855 | 0.936 | 1.011 | 1.077 | 1.132 |
| 4  | 0.650 | 0.717 | 0.806 | 0.904 | 0.997 | 1.077 | 1.142 | 1.192 |
| 5  | 0.650 | 0.738 | 0.855 | 0.974 | 1.077 | 1.156 | 1.213 | 1.253 |
| 6  | 0.650 | 0.775 | 0.936 | 1.077 | 1.177 | 1.241 | 1.281 | 1.304 |
| 7  | 0.650 | 0.855 | 1.077 | 1.213 | 1.281 | 1.312 | 1.326 | 1.331 |
| 8  | 0.650 | 1.077 | 1.281 | 1.326 | 1.332 | 1.329 | 1.323 | 1.318 |
| 9  | 1.000 | 1.259 | 1.259 | 1.259 | 1.259 | 1.259 | 1.259 | 1.259 |
| 10 | 0.650 | 0.714 | 0.910 | 1.021 | 1.083 | 1.121 | 1.147 | 1.164 |
| 11 | 0.650 | 0.620 | 0.714 | 0.823 | 0.910 | 0.974 | 1.021 | 1.056 |
| 12 | 0.650 | 0.610 | 0.645 | 0.714 | 0.788 | 0.854 | 0.910 | 0.955 |
| 13 | 0.650 | 0.612 | 0.620 | 0.660 | 0.714 | 0.770 | 0.823 | 0.869 |
| 14 | 0.650 | 0.615 | 0.612 | 0.634 | 0.670 | 0.714 | 0.759 | 0.802 |
| 15 | 0.650 | 0.619 | 0.610 | 0.620 | 0.645 | 0.677 | 0.714 | 0.752 |
| 16 | 0.650 | 0.622 | 0.610 | 0.614 | 0.629 | 0.653 | 0.682 | 0.714 |

Tabla VIII.7 Parte real del filtro para reducir al polo una anomalía magnética con  $I_0=50^\circ$ ,  $D_0=8^\circ$ ,  $I_m=75^\circ$  y  $D_m=45^\circ$ .



## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* IFIL \*\*\*

|    | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1  | 0.816  | 0.819  | 0.820  | 0.819  | 0.816  | 0.812  | 0.805  | 0.798  |
| 2  | 0.811  | 0.816  | 0.819  | 0.820  | 0.818  | 0.814  | 0.807  | 0.799  |
| 3  | 0.801  | 0.810  | 0.816  | 0.820  | 0.820  | 0.816  | 0.810  | 0.800  |
| 4  | 0.785  | 0.798  | 0.809  | 0.816  | 0.820  | 0.819  | 0.813  | 0.802  |
| 5  | 0.756  | 0.774  | 0.791  | 0.806  | 0.816  | 0.820  | 0.816  | 0.805  |
| 6  | 0.709  | 0.732  | 0.756  | 0.780  | 0.801  | 0.816  | 0.820  | 0.810  |
| 7  | 0.636  | 0.660  | 0.688  | 0.720  | 0.756  | 0.791  | 0.816  | 0.816  |
| 8  | 0.531  | 0.548  | 0.570  | 0.598  | 0.636  | 0.688  | 0.756  | 0.816  |
| 9  | 0.394  | 0.394  | 0.394  | 0.394  | 0.394  | 0.394  | 0.394  | 0.394  |
| 10 | 0.233  | 0.209  | 0.177  | 0.132  | 0.065  | -0.042 | -0.228 | -0.544 |
| 11 | 0.065  | 0.019  | -0.042 | -0.122 | -0.228 | -0.370 | -0.544 | -0.705 |
| 12 | -0.092 | -0.154 | -0.228 | -0.319 | -0.426 | -0.544 | -0.657 | -0.742 |
| 13 | -0.228 | -0.295 | -0.370 | -0.455 | -0.544 | -0.631 | -0.705 | -0.757 |
| 14 | -0.339 | -0.403 | -0.472 | -0.544 | -0.614 | -0.677 | -0.728 | -0.764 |
| 15 | -0.426 | -0.484 | -0.544 | -0.603 | -0.657 | -0.705 | -0.742 | -0.769 |
| 16 | -0.493 | -0.544 | -0.594 | -0.642 | -0.685 | -0.722 | -0.751 | -0.772 |

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* IFIL \*\*\*

|    | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     | 15     | 16     |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1  | 0.788  | 0.774  | 0.757  | 0.734  | 0.705  | 0.670  | 0.631  | 0.588  |
| 2  | 0.788  | 0.772  | 0.751  | 0.722  | 0.685  | 0.642  | 0.594  | 0.544  |
| 3  | 0.788  | 0.769  | 0.742  | 0.705  | 0.657  | 0.603  | 0.544  | 0.484  |
| 4  | 0.788  | 0.764  | 0.728  | 0.677  | 0.614  | 0.544  | 0.472  | 0.403  |
| 5  | 0.788  | 0.757  | 0.705  | 0.631  | 0.544  | 0.455  | 0.370  | 0.295  |
| 6  | 0.788  | 0.742  | 0.657  | 0.544  | 0.426  | 0.319  | 0.228  | 0.154  |
| 7  | 0.788  | 0.705  | 0.544  | 0.370  | 0.228  | 0.122  | 0.042  | -0.019 |
| 8  | 0.788  | 0.544  | 0.328  | 0.042  | -0.065 | -0.132 | -0.177 | -0.209 |
| 9  | 0.000  | -0.394 | -0.394 | -0.394 | -0.394 | -0.394 | -0.394 | -0.394 |
| 10 | -0.788 | -0.816 | -0.756 | -0.688 | -0.636 | -0.598 | -0.570 | -0.548 |
| 11 | -0.788 | -0.816 | -0.816 | -0.791 | -0.756 | -0.720 | -0.688 | -0.660 |
| 12 | -0.788 | -0.810 | -0.820 | -0.816 | -0.801 | -0.780 | -0.756 | -0.732 |
| 13 | -0.788 | -0.805 | -0.816 | -0.820 | -0.816 | -0.806 | -0.791 | -0.774 |
| 14 | -0.788 | -0.802 | -0.813 | -0.819 | -0.820 | -0.816 | -0.809 | -0.798 |
| 15 | -0.788 | -0.800 | -0.810 | -0.816 | -0.820 | -0.820 | -0.816 | -0.810 |
| 16 | -0.788 | -0.799 | -0.807 | -0.814 | -0.818 | -0.820 | -0.819 | -0.816 |

Tabla VIII.B Parte imaginaria del filtro para reducir al polo una anomalía magnética con  $I_0=50^\circ$ ,  $D_0=8^\circ$ ,  $I_m=75^\circ$  y  $D_m=45^\circ$ .

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* MAPA \*\*\*

|    | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1  | -4.855  | -5.035  | -5.574  | -5.848  | -6.218  | -6.415  | -6.585  | -6.621  |
| 2  | -1.233  | -0.021  | 0.303   | 1.207   | 1.879   | 2.718   | 3.176   | 3.246   |
| 3  | -1.830  | -0.305  | 0.256   | 1.605   | 2.906   | 4.500   | 5.588   | 5.959   |
| 4  | -0.771  | 1.392   | 2.665   | 5.254   | 8.453   | 12.633  | 15.948  | 17.121  |
| 5  | -0.825  | 1.670   | 3.639   | 7.894   | 14.767  | 25.306  | 34.547  | 37.853  |
| 6  | -0.105  | 2.870   | 5.730   | 12.429  | 25.828  | 51.056  | 74.342  | 81.895  |
| 7  | 0.079   | 3.228   | 6.732   | 15.453  | 34.831  | 74.010  | 110.697 | 122.333 |
| 8  | 0.412   | 3.514   | 7.269   | 16.729  | 38.222  | 81.553  | 122.195 | 135.177 |
| 9  | 0.439   | 3.190   | 6.606   | 15.165  | 34.508  | 73.698  | 110.420 | 122.051 |
| 10 | 0.119   | 2.270   | 4.895   | 11.207  | 24.446  | 49.385  | 72.447  | 79.972  |
| 11 | -0.194  | 1.357   | 3.094   | 6.953   | 13.729  | 24.190  | 33.455  | 36.723  |
| 12 | -1.266  | -0.379  | 0.496   | 2.432   | 5.330   | 9.115   | 12.256  | 13.368  |
| 13 | -1.849  | -1.324  | -0.949  | -0.032  | 1.161   | 2.580   | 3.637   | 3.943   |
| 14 | -3.891  | -3.915  | -4.098  | -4.032  | -3.848  | -3.523  | -3.275  | -3.235  |
| 15 | -4.646  | -4.779  | -5.143  | -5.350  | -5.521  | -5.594  | -5.671  | -5.745  |
| 16 | -10.097 | -11.448 | -12.927 | -14.415 | -15.749 | -16.759 | -17.299 | -17.304 |

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* MAPA \*\*\*

|    | 9       | 10      | 11      | 12      | 13      | 14      | 15      | 16     |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| 1  | -6.593  | -6.536  | -6.412  | -6.410  | -6.313  | -6.508  | -6.539  | -7.958 |
| 2  | 2.789   | 1.843   | 0.737   | -0.571  | -1.605  | -2.973  | -3.943  | -6.824 |
| 3  | 5.299   | 3.791   | 1.985   | 0.028   | -1.472  | -3.214  | -4.509  | -7.841 |
| 4  | 15.561  | 11.717  | 7.264   | 3.301   | 0.552   | -2.055  | -3.904  | -7.870 |
| 5  | 34.199  | 24.440  | 13.656  | 5.984   | 1.547   | -1.844  | -4.074  | -8.308 |
| 6  | 73.976  | 50.036  | 24.615  | 10.291  | 3.422   | -0.972  | -3.631  | -8.024 |
| 7  | 110.383 | 72.942  | 33.677  | 13.289  | 4.399   | -0.656  | -3.509  | -7.650 |
| 8  | 121.861 | 80.416  | 37.008  | 14.504  | 4.843   | -0.394  | -3.217  | -6.836 |
| 9  | 110.085 | 72.581  | 33.275  | 12.962  | 4.156   | -0.595  | -3.095  | -5.919 |
| 10 | 72.084  | 48.348  | 23.197  | 9.133   | 2.507   | -1.242  | -3.183  | -5.103 |
| 11 | 33.036  | 23.223  | 12.402  | 4.948   | 0.726   | -1.907  | -3.258  | -4.360 |
| 12 | 11.891  | 8.320   | 4.168   | 0.712   | -1.589  | -3.153  | -3.879  | -4.253 |
| 13 | 3.251   | 1.769   | -0.021  | -1.704  | -2.959  | -3.859  | -4.199  | -4.164 |
| 14 | -3.487  | -3.989  | -4.582  | -5.135  | -5.509  | -5.723  | -5.615  | -5.195 |
| 15 | -5.880  | -6.044  | -6.212  | -6.365  | -6.428  | -6.417  | -6.217  | -5.843 |
| 16 | -16.772 | -15.831 | -14.637 | -13.356 | -12.132 | -11.047 | -10.138 | -9.441 |

Tabla VIII.9 Anomalía magnética reducida al polo.  $I_0=50^\circ$ ,  $D_0=8^\circ$ ,  
 $I_m=75^\circ$  y  $D_m=45^\circ$ . Intensidad en gammas.

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* IMAG \*\*\*

|    | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | 8      |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1  | 0.263  | 0.245  | 0.361  | 0.341  | 0.457  | 0.422  | 0.512  | 0.436  |
| 2  | -0.162 | -0.346 | -0.260 | -0.442 | -0.356 | -0.523 | -0.410 | -0.537 |
| 3  | 0.298  | 0.210  | 0.396  | 0.306  | 0.493  | 0.387  | 0.547  | 0.401  |
| 4  | -0.145 | -0.363 | -0.243 | -0.459 | -0.339 | -0.540 | -0.393 | -0.554 |
| 5  | 0.313  | 0.195  | 0.411  | 0.291  | 0.508  | 0.372  | 0.562  | 0.386  |
| 6  | -0.138 | -0.371 | -0.236 | -0.466 | -0.332 | -0.547 | -0.386 | -0.562 |
| 7  | 0.313  | 0.195  | 0.411  | 0.291  | 0.507  | 0.372  | 0.561  | 0.387  |
| 8  | -0.149 | -0.359 | -0.247 | -0.455 | -0.343 | -0.536 | -0.398 | -0.550 |
| 9  | 0.293  | 0.215  | 0.391  | 0.311  | 0.487  | 0.392  | 0.541  | 0.406  |
| 10 | -0.175 | -0.333 | -0.273 | -0.429 | -0.370 | -0.510 | -0.424 | -0.524 |
| 11 | 0.266  | 0.243  | 0.364  | 0.338  | 0.460  | 0.419  | 0.514  | 0.434  |
| 12 | -0.201 | -0.307 | -0.299 | -0.403 | -0.395 | -0.484 | -0.450 | -0.498 |
| 13 | 0.245  | 0.263  | 0.343  | 0.359  | 0.440  | 0.440  | 0.494  | 0.454  |
| 14 | -0.217 | -0.291 | -0.315 | -0.387 | -0.412 | -0.468 | -0.466 | -0.482 |
| 15 | 0.236  | 0.273  | 0.333  | 0.369  | 0.430  | 0.450  | 0.494  | 0.464  |
| 16 | -0.228 | -0.281 | -0.326 | -0.376 | -0.422 | -0.457 | -0.476 | -0.472 |

## ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA \*\*\* IMAG \*\*\*

|    | 9      | 10     | 11     | 12     | 13     | 14     | 15     | 16     |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1  | 0.483  | 0.367  | 0.387  | 0.258  | 0.280  | 0.160  | 0.198  | 0.088  |
| 2  | -0.381 | -0.468 | -0.285 | -0.360 | -0.179 | -0.262 | -0.097 | -0.189 |
| 3  | 0.518  | 0.332  | 0.422  | 0.223  | 0.315  | 0.125  | 0.233  | 0.053  |
| 4  | -0.364 | -0.485 | -0.268 | -0.376 | -0.162 | -0.278 | -0.080 | -0.206 |
| 5  | 0.533  | 0.317  | 0.437  | 0.208  | 0.330  | 0.110  | 0.248  | 0.038  |
| 6  | -0.357 | -0.493 | -0.261 | -0.384 | -0.154 | -0.286 | -0.072 | -0.213 |
| 7  | 0.532  | 0.317  | 0.436  | 0.209  | 0.329  | 0.111  | 0.247  | 0.038  |
| 8  | -0.369 | -0.481 | -0.273 | -0.372 | -0.166 | -0.274 | -0.084 | -0.202 |
| 9  | 0.512  | 0.337  | 0.416  | 0.229  | 0.310  | 0.131  | 0.228  | 0.058  |
| 10 | -0.395 | -0.455 | -0.299 | -0.346 | -0.192 | -0.248 | -0.110 | -0.176 |
| 11 | 0.485  | 0.365  | 0.389  | 0.256  | 0.282  | 0.158  | 0.200  | 0.085  |
| 12 | -0.421 | -0.429 | -0.325 | -0.320 | -0.218 | -0.222 | -0.136 | -0.150 |
| 13 | 0.465  | 0.385  | 0.369  | 0.276  | 0.262  | 0.178  | 0.180  | 0.106  |
| 14 | -0.437 | -0.413 | -0.341 | -0.304 | -0.234 | -0.206 | -0.152 | -0.134 |
| 15 | 0.455  | 0.395  | 0.359  | 0.286  | 0.252  | 0.188  | 0.170  | 0.115  |
| 16 | -0.447 | -0.403 | -0.351 | -0.294 | -0.244 | -0.196 | -0.162 | -0.123 |

Tabla VIII.10 Parte imaginaria de la anomalía magnética reducida al polo.  $I_0=50^\circ$ ,  $D_0=8^\circ$ ,  $I_m=75^\circ$  y  $D_m=45^\circ$ . Teóricamente=10.01.

## CAPITULO IX

### PROGRAMAS DE COMPUTADORA

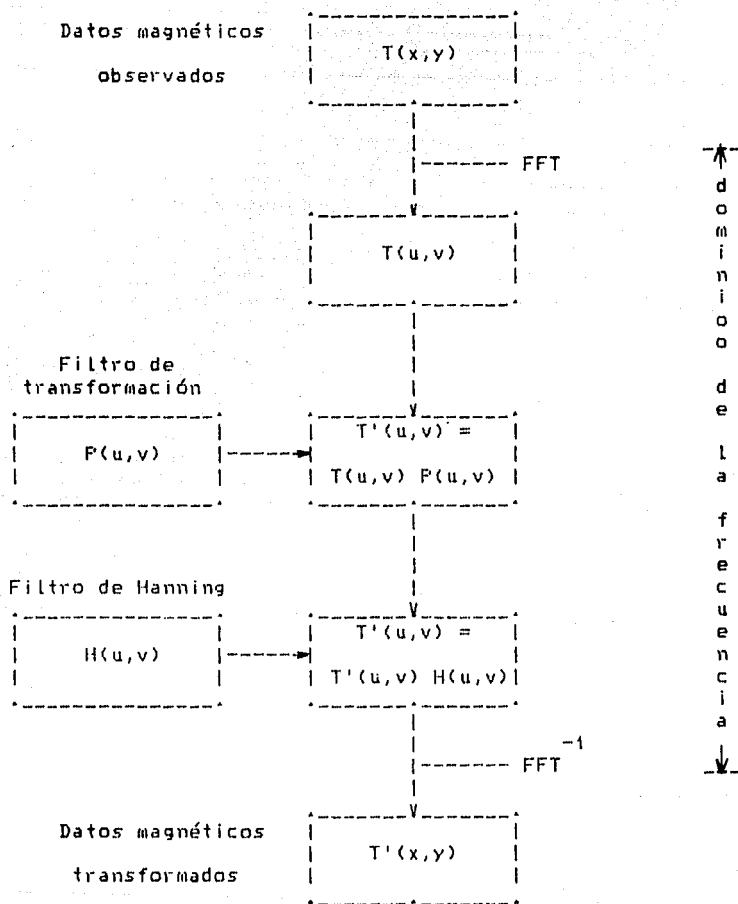


Diagrama de bloques para realizar el proceso de transformación de un mapa magnetométrico.

CC

C  
C REALIZA LA CONVOLUCION EN EL DOMINIO DE LAS FRECUENCIAS DE UN  
C MAFIA MAGNETICO O GRAVIMETRICO CON UN FILTRO AQUI GENERADO.  
C SI SE DESEA,AL RESULTADO SE LE APLICA EL FILTRO DE HANNING.

C  
C DATOS DE ENTRADA  
C

C ARGUMENTOS: DESCRIPCION  
C IHANN =1 SE APLICA EL FILTRO DE HANNING.  
C IHANN =0 NO SE APLICA.  
C N NUM. DE RENGLONES Y COLUMNAS DE LA MALLA MAGTT  
C N2 POTENCIA DEL NUMERO 2 TAL QUE N=2\*\*N2.  
C NQ FREC. DE NYQUIST NQ=N/2+1 (F.E. SI N=16,NQ=9)  
C DX LONGITUD DE MUESTREO DE LA MALLA MAGTT.  
C TINC INCLINACION MAGNETICA DE LA COMPONENTE MEDIDA.  
C TDEC DECLINACION MAGNETICA DE LA COMPONENTE MEDIDA.  
C PINC INCLINACION DEL VECTOR DE POLARIZACION.  
C PDEC DECLINACION DEL VECTOR DE POLARIZACION.  
C TINC1 INCLINACION MAGNETICA DE LA NUEVA COMPONENTE.  
C TDEC1 DECLINACION MAGNETICA DE LA NUEVA COMPONENTE.  
C PINC1 INCLINACION DEL NUEVO VECTOR DE POLARIZACION.  
C PDEC1 DECLINACION DEL NUEVO VECTOR DE POLARIZACION.  
C MAGTT(ENTRADA) MALLA DE DATOS MAGNETICOS OBSERVADOS.  
C MAGTT(SALIDA) MALLA DE DATOS MAGNETICOS TRANSFORMADOS.

C  
C UNIDADES

C DX KM O M  
C TINC GRADOS  
C PINC GRADOS  
C TDEC GRADOS  
C PDEC GRADOS  
C MAGTT GAMMAS

CC

C TARJETAS PARAMETROS FORMATO C  
C A LEER C  
C 1 IHANN,N,N2,NQ,DX LIBRE C  
C 2 TINC,TDEC,PINC,PDEC LIBRE C  
C 3 TINC1,TDEC1,PINC1,PDEC1 LIBRE C  
C 4 ((MAGTT(J,I),I=1,N),J=1,N) 8F10.4 C

C NOTA:LOS DATOS DE ENTRADA CAMBIAN DE ACUERDO CON LA C  
C SUBROUTINA DE TRANSFORMACION ESCOGIDA. C

CC

C \* AUTOR : ILDEFONSO CORREA PEREZ - MAYO 1990 C  
CC  
C REAL MAGTT(64,64)  
C DIMENSION PR(64,64),PI(64,64),PIMA(64,64)  
C DATA NX,NY/64,64/

C

```

C ** SE LEEN Y SE IMPRIMEN LOS DATOS DE ENTRADA **
  READ(1,*)IHANN,N,N2,NQ,DX
  READ(1,*)TINC,TDEC,PINC,PDEC
CC  READ(1,*)TINC1,TDEC1,PINC1,PDEC1
  WRITE(3,1)N,N2,NQ,DX
  1  FORMAT(////,9X,'N',3X,'N2',3X,'NQ',8X,'DX',
  *      /,5X,3I5,F10.2)
  WRITE(3,2)TINC,TDEC,PINC,PDEC
  2  FORMAT(//,6X,'TINC',6X,'TDEC',6X,'PINC',6X,'PDEC',
  *      /,4F10.2)
CC  WRITE(3,3)TINC1,TDEC1,PINC1,PDEC1
CC  3  FORMAT(//,5X,'TINC1',5X,'TDEC1',5X,'PINC1',5X,'PDEC1',
CC  *      /,4F10.2)
C
C ** SE GENERA EL FILTRO DE TRANSFORMACION **
C *****
C  CALL TRANSF(PR,PI,NX,NY,N,NQ,TINC,TDEC,PINC,PDEC,
C  *      TINC1,TDEC1,PINC1,PDEC1)
C  CALL REDPOL(PR,PI,NX,NY,N,NQ,TINC,TDEC,PINC,PDEC)
C  CALL REDECU(PR,PI,NX,NY,N,NQ,TINC,TDEC,PINC,PDEC)
C  CALL SEUDOG(PR,PI,NX,NY,N,NQ,DX,TINC,TDEC,PINC,PDEC)
C  CALL ELIMIN(PR,PI,NX,NY,N,NQ,TINC,TDEC,PINC,PDEC)
C  CALL ORTOGO(PR,PI,NX,NY,N,NQ,TINC,TDEC,PINC,PDEC)
C  CALL TX(PR,PI,NX,NY,N,NQ,TINC,TDEC)
C  CALL TY(PR,PI,NX,NY,N,NQ,TINC,TDEC)
C  CALL TZ(PR,PI,NX,NY,N,NQ,TINC,TDEC)
C  CALL ZX(PR,PI,NX,NY,N,NQ)
C  CALL ZY(PR,PI,NX,NY,N,NQ)
C *****
C ** SE IMPRIME
  CALL ESCRIB(PR,NX,NY,N,N,'REAL',1,1)
  CALL ESCRIB(PI,NX,NY,N,N,'IMAG',1,1)
C **SE DESDOBLA
  CALL COLOCA(PR,NX,NY,N)
  CALL COLOCA(PI,NX,NY,N)
C
C SE LEEN LOS DATOS MAGNETICOS Y SE IMPRIMEN
C*****
  READ(9,2000)((MAGTT(J,I),I=1,N),J=1,N)
  2000  FORMAT(8F10.4)
  CALL ESCRIB(MAGTT,NX,NY,N,N,'MAGT',1,1)
C*****
C
C ** SE TRANSFORMA EL MAPA A FRECUENCIAS **
  CALL FFT2(MAGTT,NX,NY,PIMA,NX,NY,N2,-1.0)
C
C ** SE APLICA EL FILTRO AL MAPA POR CONVOLUCION **
  CALL PROMTZ(MAGTT,PIMA,PR,PI,NX,NY,N)
C
  IF(IHANN.NE.1)GO TO 11
C ** SE GENERA Y SE APLICA EL FILTRO DE HANNING

```

```

CALL HANN(PR,NX,NY,N,NQ)
CALL COLOCA(PR,NX,NY,N)
DO 4 I=1,N
DO 4 J=1,N
MAGT(I,J)=MAGT(I,J)*PR(I,J)
PIMA(I,J) =PIMA(I,J) *PR(I,J)
4 CONTINUE
11 CONTINUE
C
C ** EL MAPA FILTRADO SE TRANSFORMA AL DOMINIO DEL ESPACIO
CALL FFT2(MAGT,NX,NY,PIMA,NX,NY,N2,+1.0)
DENO=N*N
DO 3 I=1,N
DO 3 J=1,N
MAGT(I,J)=MAGT(I,J)/DENO
PIMA(I,J) =PIMA(I,J)/DENO
3 CONTINUE
C ** SE IMPRIME
CALL ESCRIB(MAGT,NX,NY,N,N,'MAPA',1,1)
STOP
END
*
SUBROUTINE DIVMTZ(A1,B1,A2,B2,NX,NY,N,NQ)
C ESTA SUBROUTINA DIVIDE PUNTO A PUNTO LA MATRIZ COMPLEJA M(A1,B1)
C ENTRE LA MATRIZ T(A2,B2) PARA OBTENER LA MATRIZ Q(QR,QI)
C TAMBIEN COMPLEJA. LOS ARREGLOS A2 O B2 NO DEBEN SER NULOS.
C LA SALIDA ES LLAMADA TAMBIEN M(A1,B1)
-----
DIMENSION A1(NX,NY),B1(NX,NY),A2(NX,NY),B2(NX,NY)
DO 1 I=1,N
DO 1 J=1,N
D1=A2(I,J)*A2(I,J)
D2=B2(I,J)*B2(I,J)
DD=D1+D2
IF(DD.EQ.0.0) GO TO 2
AA=A1(I,J)*A2(I,J)
BB=B1(I,J)*B2(I,J)
QRN=AA+BB
AB=A1(I,J)*B2(I,J)
BA=B1(I,J)*A2(I,J)
QIN=BA-AB
QR=QRN/DD
QI=QIN/DD
A1(I,J)=QR
B1(I,J)=QI
GO TO 1
2 A1(I,J)=0.0
B1(I,J)=0.0
1 CONTINUE
A1(NQ,NQ)=0.0
B1(NQ,NQ)=0.0
RETURN
END

```



```

*
SUBROUTINE PROMTZ(A1,B1,A2,B2,NX,NY,N)
C ESTA SUBRUTINA CALCULA EL PRODUCTO PUNTO A PUNTO DE DOS
C MATRICES COMPLEJAS M(A1,B1) Y T(A2,B2) PARA OBTENER
C LA MATRIZ P(PR,PI) TAMBIEN COMPLEJA.
C LA SALIDA ES TAMBIEN M(A1,B1)

```

```

-----
DIMENSION A1(NX,NY),B1(NX,NY),A2(NX,NY),B2(NX,NY)
DO 1 I=1,N
  DO 1 J=1,N
    AA=A1(I,J)*A2(I,J)
    BB=B1(I,J)*B2(I,J)
    AB=A1(I,J)*B2(I,J)
    BA=B1(I,J)*A2(I,J)
    PR=AA-BB
    PI=AB+BA
    A1(I,J)=PR
    B1(I,J)=PI
1 CONTINUE
RETURN
END

```

```

*
SUBROUTINE ESCRIB(A,IFIL,ICOL,M,N,ANOM,INFIL,INCOL)
DIMENSION A(IFIL,ICOL)
N1=INFIL
PRINT 5
10 N2=N1+7
IF(N2.GT.N)N2=N
K=0
DO 40 I=INFIL,M
IF(I.EQ.INFIL.OR.K.EQ.50) PRINT 20,ANOM,(L,L=N1,N2)
IF(K.EQ.50) K=0
20 FORMAT(///20X,'ARREGLO MATRICIAL DE LA MALLA *** ',
*A4,' ***'///8X,B(I5,3X)/)
PRINT 30,I,(A(I,J),J=N1,N2)
K=K+1
30 FORMAT(I8,B(F8.3))
40 CONTINUE
N1=N2+1
IF(N2.LT.N) GO TO 10
RETURN
END

```

```

*
SUBROUTINE COLOCA(R,IFIL,ICOL,N)
C ESTA SUBRUTINA DESDOBLA LOS CUADRANTES DE LA MATRIZ
C DE SALIDA DE LA TRANSFORMADA RAPIDA BIDIMENSIONAL DE
C FOURIER.

```

```

-----
DIMENSION R(IFIL,ICOL)
N2=N/2
DO 4 K=1,N2
DO 4 I=1,N2

```

```

TEM=R(I,K)
R(I,K)=R(N2+I,N2+K)
R(N2+I,N2+K)=TEM
TEM=R(I,N2+K)
R(I,N2+K)=R(N2+I,K)
R(N2+I,K)=TEM
4 CONTINUE
RETURN
END

*
SUBROUTINE HANN(F,NX,NY,N,NQ)
C ** ESTA SUBROUTINA GENERA EL FILTRO DE HANNING
C ** EN FRECUENCIAS F(U,V)=0.5(1.0 + COS(U,V)).
C-----
DIMENSION F(NX,NY)
DATA PI/3.141592654/
FACT=2.0*PI/FLOAT(N)
DO 1 I=1,N
AI=I-NQ
DO 1 J=1,N
AJ=J-NQ
ALFA = FACT*AI
BETA = FACT*AJ
HANNU=1.0 + COS(ALFA)
HANNV=1.0 + COS(BETA)
F(I,J)=0.25*HANNU*HANNV
1 CONTINUE
RETURN
END

*****
*
*
SUBROUTINE TRANSF(PRI,PI1,NX,NY,N,NQ,TINC,TDEC,PINC,PDEC,
* TINC1,TDEC1,PINC1,PDEC1)
C ESTA SUBROUTINA GENERA EL FILTRO PARA TRANSFORMAR UNA ANOMALIA
C DE COMPONENTE TOTAL (TINC,TDEC) PRODUCIDA POR UN CUERPO
C MAGNETIZADO EN CUALQUIER DIRECCION (PINC,PDEC), A OTRA ANOMALIA
C DE COMPONENTE TOTAL (TINC1,TDEC1) CON UNA NUEVA MAGNETIZACION
C (PINC1,PDEC1). LAS VARIABLES ENTRE PARENTESIS (I,D) INDICAN
C LA INCLINACION Y LA DECLINACION RESPECTIVAMENTE DEL VECTOR
C CORRESPONDIENTE.EL FILTRO ES:
C
C
C

$$F(U,V) = \frac{MO'(U,V)}{MO(U,V)} \frac{MM'(U,V)}{MM(U,V)} = (PRI,PI1)$$

C-----
DIMENSION TR1(64,64),TI1(64,64),PR(64,64),PI(64,64)
DIMENSION PR1(NX,NY),PI1(NX,NY)
C ** SE GENERA EL NUMERADOR
CALL RUV(TR1,TI1,NX,NY,N,NQ,TINC1,TDEC1)
CALL RUV(PRI,PI1,NX,NY,N,NQ,PINC1,PDEC1)
CALL PROMTZ(PRI,PI1,TR1,TI1,NX,NY,N)

```

```

C ** SE GENERA EL DENOMINADOR
  CALL RUV(TR1, TI1, NX, NY, N, NQ, TINC, TDEC)
  CALL RUV(PR, PI, NX, NY, N, NQ, PINC, PDEC)
  CALL PROMTZ(PR, PI, TR1, TI1, NX, NY, N)
C ** SE GENERA EL FILTRO
  CALL DIVMTZ(PR1, PI1, PR, PI, NX, NY, N, NQ)
  RETURN
  END

*
  SUBROUTINE REDPOL(RR, RI, NX, NY, N, NQ, TINC, TDEC, PINC, PDEC)
C ESTÁ SUBROUTINA GENERA EL FILTRO BIDIMENSIONAL DE LA REDUCCION
C AL POLO. LA COMPONENTE DEL VECTOR DE CAMPO MAGNETICO MEDIDA
C PUEDE SER VERTICAL O TOTAL.
C LA DIRECCION DEL VECTOR DE POLARIZACION PUEDE SER DIFERENTE
C DE LA DIRECCION DE LA COMPONENTE MEDIDA.
-----
  DIMENSION TR(64, 64), TI(64, 64), PR(64, 64), PI(64, 64)
  DIMENSION RR(NX, NY), RI(NX, NY)
C
C ** SE GENERA EL VECTOR DE CAMPO GEOMAGNETICO *T(TR, TI)*
  CALL REPO(TR, TI, RR, NX, NY, N, NQ, TINC, TDEC)
C
  IF(PINC.EQ.TINC.AND.PDEC.EQ.TDEC)GO TO 5
C
C ** SE GENERA EL VECTOR DE POLARIZACION *P(PR, PI)*
  CALL REPO(PR, PI, RR, NX, NY, N, NQ, PINC, PDEC)
C ** SE GENERA EL DENOMINADOR DEL FILTRO T(TR, TI)*P(PR, PI)
  CALL PROMTZ(TR, TI, PR, PI, NX, NY, N)
  GO TO 7
  5 CONTINUE
  CALL PROMTZ(TR, TI, TR, TI, NX, NY, N)
  7 CONTINUE
C ** SE GENERA EL VECTOR RR(U, V)=(U*U + V*V)
  DO 8 I=1, N
  DO 8 J=1, N
  RR(I, J)=RR(I, J)*RR(I, J)
  8 CONTINUE
C ** SE GENERA EL FILTRO DE LA REDUCCION AL POLO **
C ** (RR, RI) = (RR, RI)/(TR, TI)
  CALL DIVMTZ(RR, RI, TR, TI, NX, NY, N, NQ)
  RETURN
  END

*
  SUBROUTINE SEUDOG(RR, RI, NX, NY, N, NQ, DX, TINC, TDEC, PINC, PDEC)
C ESTÁ SUBROUTINA GENERA EL FILTRO BIDIMENSIONAL QUE TRANSFORMA
C UNA ANOMALIA MAGNETICA A LA FORMA DE UNA ANOMALIA GRAVIMETRICA
C (TRANSFORMACION SEUDOGRAVIMETRICA). ESTÁ ANOMALIA SEUDOGRAVI -
C METRICA DIFERIRA DE LA ANOMALIA GRAVIMETRICA OBSERVADA POR EL
C FACTOR M/GD DONDE M ES MAGNITUD DE LA MAGNETIZACION, D EL
C CONTRASTE DE DENSIDAD Y G ES LA CONSTANTE DE GRAVITACION
C UNIVERSAL.

```

C LA COMPONENTE DEL VECTOR DE CAMPO GEOMAGNETICO MEDIDA PUEDE SER  
 C VERTICAL O TOTAL. LA DIRECCION DEL VECTOR DE POLARIZACION PUEDE  
 C SER DIFERENTE DE LA DIRECCION DE LA COMPONENTE MEDIDA.

-----  
 DIMENSION TR(64,64),TI(64,64),PR(64,64),PI(64,64)  
 DIMENSION RR(NX,NY),RI(NX,NY)  
 C \*\* SE GENERA EL VECTOR DE CAMPO GEOMAGNETICO \*T(TR,TI)\*  
 CALL REPOI(TR,TI,RR,NX,NY,N,NQ,DX,TINC,TDEC)  
 C  
 IF(PINC.EQ.TINC.AND.PDEC.EQ.TDEC)GO TO 5  
 C  
 C \*\* SE GENERA EL VECTOR DE POLARIZACION \*P(PR,PI)\*  
 CALL REPOI(PR,PI,RR,NX,NY,N,NQ,DX,PINC,PDEC)  
 C \*\* SE GENERA EL DENOMINADOR DEL FILTRO T(TR,TI)\*P(PR,PI)  
 CALL PROMTZ(TR,TI,PR,PI,NX,NY,N)  
 GO TO 7  
 5 CONTINUE  
 CALL FROMTZ(TR,TI,TR,TI,NX,NY,N)  
 7 CONTINUE  
 C \* SE GENERA EL FILTRO DE LA TRANSFORMACION SEUDOGRAVIMETRICA \*  
 C \* (RR,RI)= (RR,RI)/(TR,TI) \*  
 CALL DIVMTZ(RR,RI,TR,TI,NX,NY,N,NQ)  
 RETURN  
 END

\*  
 SUBROUTINE REDECU(RR,RI,NX,NY,N,NQ,TINC,TDEC,PINC,PDEC)  
 C ESTA SUBROUTINA GENERA EL FILTRO BIDIMENSIONAL DE LA REDUCCION  
 C AL ECUADOR.LA COMPONENTE DEL VECTOR DE CAMPO MAGNETICO MEDIDA  
 C PUEDE SER HORIZONTAL O TOTAL.LA DIRECCION DEL VECTOR DE  
 C POLARIZACION PUEDE SER DIFERENTE DE LA DIRECCION DE LA  
 C COMPONENTE MEDIDA.

-----  
 DIMENSION TR(64,64),TI(64,64),PR(64,64),PI(64,64)  
 DIMENSION RR(NX,NY),RI(NX,NY)  
 C \*\* SE GENERA EL VECTOR DE CAMPO GEOMAGNETICO \*T(TR,TI)\*  
 CALL RECU(TR,TI,RR,NX,NY,N,NQ,TINC,TDEC)  
 C  
 IF(PINC.EQ.TINC.AND.PDEC.EQ.TDEC)GO TO 5  
 C \*\* SE GENERA EL VECTOR DE POLARIZACION \*P(PR,PI)\*  
 CALL RECU(PR,PI,RR,NX,NY,N,NQ,PINC,PDEC)  
 CALL PROMTZ(TR,TI,PR,PI,NX,NY,N)  
 GO TO 7  
 5 CONTINUE  
 CALL FROMTZ(TR,TI,TR,TI,NX,NY,N)  
 7 CONTINUE  
 C \*\* SE GENERA EL VECTOR RR(U,V)=-U\*U  
 DO 8 I=1,N  
 DO 8 J=1,N  
 RR(I,J)=-RR(I,J)\*RR(I,J)  
 8 CONTINUE  
 C \*\* SE GENERA EL FILTRO DE LA REDUCCION AL ECUADOR \*\*  
 C \*\* (RR,RI)= (RR,RI)/(TR,TI)  
 CALL DIVMTZ(RR,RI,TR,TI,NX,NY,N,NQ)  
 RETURN  
 END

```

*
SUBROUTINE ELIMIN( TR, TI, NX, NY, N, NQ, TINC, TDEC, PINC, PDEC)
C ESTA SUBRUTINA GENERA EL FILTRO PARA ELIMINAR DE UNA ANOMALIA
C DE COMPONENTE TOTAL EL EFECTO CAUSADO POR LA MAGNETIZACION
C REMANENTE (INDUCIDA).
C TINC Y TDEC SON LA INCLINACION Y DECLINACION DEL VECTOR DE
C CAMPO INDUCIDO (REMANENTE). PINC Y PDEC SON LA INCLINACION
C Y DECLINACION DEL VECTOR DE MAGNETIZACION "REAL" MEDIDO DEL
C CUERPO ANOMALO.

```

```

-----
DIMENSION TR(NX, NY), TI(NX, NY), PR(64, 64), PI(64, 64)
C ** SE GENERA EL NUMERADOR
CALL RUV( TR, TI, NX, NY, N, NQ, TINC, TDEC)
C ** SE GENERA EL DENOMINADOR
CALL RUV( PR, PI, NX, NY, N, NQ, PINC, PDEC)
C ** SE GENERA EL FILTRO
CALL DIVMTZ( TR, TI, PR, PI, NX, NY, N, NQ)
RETURN
END

```

```

*
SUBROUTINE ORTOGO( PR, PI, NX, NY, N, NQ, TINC, TDEC, PINC, PDEC)
C ESTA SUBRUTINA GENERA EL FILTRO QUE REALIZA LA TRANSFORMACION
C ORTOGONAL DE LAS ANOMALIAS MAGNETICAS.
C TINC Y TDEC SON LA INCLINACION Y LA DECLINACION DEL CAMPO
C GEOMAGNETICO. PINC Y PDEC SON LA INCLINACION Y LA DECLINACION
C DEL VECTOR DE MAGNETIZACION.

```

```

-----
DIMENSION PR(NX, NY), PI(NX, NY)
DIMENSION UR(64, 64), UI(64, 64), RR(64, 64), RI(64, 64)
CALL RU( UI, NX, NY, N, NQ)
CALL RADIO( PR, NX, NY, N, NQ)
CALL PROMTZ( PR, PI, UR, UI, NX, NY, N, NQ)
CALL RUV( UR, UI, NX, NY, N, NQ, TINC, TDEC)
CALL RUV( RR, RI, NX, NY, N, NQ, PINC, PDEC)
CALL PROMTZ( RR, RI, UR, UI, NX, NY, N, NQ)
C ** SE GENERA EL FILTRO
CALL DIVMTZ( PR, PI, RR, RI, NX, NY, N, NQ)
RETURN
END

```

```

*
SUBROUTINE TX( TXR, TXI, NX, NY, N, NQ, TINC, TDEC)
C ESTA SUBRUTINA GENERA EL FILTRO PARA TRANSFORMAR UNA ANOMALIA
C DE COMPONENTE TOTAL A OTRA ANOMALIA DE COMPONENTE HORIZONTAL
C EN X (NORTE GEOGRAFICO).
C TINC Y TDEC SON LA INCLINACION Y LA DECLINACION DEL CAMPO
C GEOMAGNETICO RESPECTIVAMENTE.

```

```

-----
DIMENSION TXR(NX, NY), TXI(NX, NY), PR(64, 64), PI(64, 64)
CALL RU( TXI, NX, NY, N, NQ)
CALL RUV( PR, PI, NX, NY, N, NQ, TINC, TDEC)
C ** SE GENERA EL FILTRO
CALL DIVMTZ( TXR, TXI, PR, PI, NX, NY, N, NQ)
RETURN
END

```

```

*
SUBROUTINE TY(TYR, TYI, NX, NY, N, NQ, TINC, TDEC)
C ESTA SUBROUTINA GENERA EL FILTRO PARA TRANSFORMAR UNA ANOMALIA
C DE COMPONENTE TOTAL A OTRA ANOMALIA DE COMPONENTE HORIZONTAL
C EN Y (ESTE GEOGRAFICO).
C TINC Y TDEC SON LA INCLINACION Y LA DECLINACION DEL CAMPO
C GEOMAGNETICO RESPECTIVAMENTE.
C-----

```

```

DIMENSION TYR(NX, NY), TYI(NX, NY), PR(64, 64), PI(64, 64)
CALL RV(TYI, NX, NY, N, NQ)
CALL RUV(PR, PI, NX, NY, N, NQ, TINC, TDEC)
C ** SE GENERA EL FILTRO
CALL DIVMTZ(TYR, TYI, PR, PI, NX, NY, N, NQ)
RETURN
END

```

```

*
SUBROUTINE TZ(TZR, TZI, NX, NY, N, NQ, TINC, TDEC)
C ESTA SUBROUTINA GENERA EL FILTRO PARA TRANSFORMAR UNA ANOMALIA
C DE COMPONENTE TOTAL A OTRA ANOMALIA DE COMPONENTE VERTICAL.
C TINC Y TDEC SON LA INCLINACION Y LA DECLINACION DEL CAMPO
C GEOMAGNETICO RESPECTIVAMENTE.
C-----

```

```

DIMENSION TZR(NX, NY), TZI(NX, NY), PR(64, 64), PI(64, 64)
CALL RADIO(TZR, NX, NY, N, NQ)
CALL RUV(PR, PI, NX, NY, N, NQ, TINC, TDEC)
C ** SE GENERA EL FILTRO
CALL DIVMTZ(TZR, TZI, PR, PI, NX, NY, N, NQ)
RETURN
END

```

```

*
SUBROUTINE ZX(ZXR, ZXI, NX, NY, N, NQ)
C ESTA SUBROUTINA GENERA EL FILTRO PARA TRANSFORMAR UNA ANOMALIA
C DE COMPONENTE VERTICAL A OTRA ANOMALIA DE COMPONENTE
C HORIZONTAL EN X (NORTE GEOGRAFICO).
C-----

```

```

DIMENSION ZXR(NX, NY), ZXI(NX, NY), PR(64, 64), PI(64, 64)
CALL RU(ZXI, NX, NY, N, NQ)
CALL RADIO(PR, NX, NY, N, NQ)
C ** SE GENERA EL FILTRO
CALL DIVMTZ(ZXR, ZXI, PR, PI, NX, NY, N, NQ)
RETURN
END

```

```

*
SUBROUTINE ZY(ZYR, ZYI, NX, NY, N, NQ)
C ESTA SUBROUTINA GENERA EL FILTRO PARA TRANSFORMAR UNA ANOMALIA
C DE COMPONENTE VERTICAL A OTRA ANOMALIA DE COMPONENTE
C HORIZONTAL EN Y (ESTE GEOGRAFICO).
C-----

```

```

DIMENSION ZYR(NX, NY), ZYI(NX, NY), PR(64, 64), PI(64, 64)
CALL RV(ZYI, NX, NY, N, NQ)
CALL RADIO(PR, NX, NY, N, NQ)
C ** SE GENERA EL FILTRO
CALL DIVMTZ(ZYR, ZYI, PR, PI, NX, NY, N, NQ)
RETURN
END

```

```

*****

```

```

*
SUBROUTINE RU(U,NX,NY,N,NQ)
C ** ESTA SUBROUTINA GENERA LA MATRIZ U(I,J)
C ** DEL RADIO VECTOR R=SQRT(U*U + V*V)

```

```

-----
DIMENSION U(NX,NY)
PI=3.141592654
DEN=FLOAT(N)
FACT=2.0*PI/DEN
DO 1 I=1,N
AI=FLOAT(I-NQ)
DO 1 J=1,N
U(I,J)=FACT*AI
1 CONTINUE
RETURN
END

```

```

*
SUBROUTINE RV(V,NX,NY,N,NQ)
C ** ESTA SUBROUTINA GENERA LA MATRIZ V(I,J)
C ** DEL RADIO VECTOR R=SQRT(U*U + V*V)

```

```

-----
DIMENSION V(NX,NY)
PI=3.141592654
DEN=FLOAT(N)
FACT=2.0*PI/DEN
DO 1 I=1,N
DO 1 J=1,N
AJ=FLOAT(J-NQ)
V(I,J)=FACT*AJ
1 CONTINUE
RETURN
END

```

```

*
SUBROUTINE RADIO(R,NX,NY,N,NQ)
C ** ESTA SUBROUTINA GENERA EL RADIO VECTOR
C R=SQRT(U*U+V*V)

```

```

-----
DIMENSION R(NX,NY)
PI=3.141592654
DEN=FLOAT(N)
FACT=2.0*PI/DEN
DO 1 I=1,N
AI=FLOAT(I-NQ)
U=FACT*AI
DO 1 J=1,N
AJ=FLOAT(J-NQ)
V=FACT*AJ
ARG=U*U + V*V
RUV=SQRT(ARG)
R(I,J)=RUV
1 CONTINUE
RETURN
END

```

\*  
SUBROUTINE RUV(RR,RI,NX,NY,N,NQ,AINC,ADEC)

C \*\* ESTA SUBROUTINA GENERA LA MATRIZ COMPLEJA  
C \*\*  $R(U,V) = (N * \text{SQRT}(U * U + V * V), LU + MV)$  \*\*

C-----

```

DIMENSION RR(NX,NY),RI(NX,NY)
PI=3.141592654
DEN=FLOAT(N)
FACT=2.0*PI/DEN
RAD=180./PI
AI=AINC/RAD
AD=ADEC/RAD
AL=COS(AI)*COS(AD)
AM=COS(AI)*SIN(AD)
AN=SIN(AI)
DO 1 I=1,N
AI=FLOAT(I-NQ)
DO 1 J=1,N
AJ=FLOAT(J-NQ)
U=FACT*AI
V=FACT*AJ
ARG=U*U+V*V
RUV1=SQRT(ARG)
RR(I,J)=AN*RUV1
RI(I,J)=AL*U + AM*V
1 CONTINUE
RETURN
END

```

\*  
SUBROUTINE REPO(RR,RI,R,NX,NY,N,NQ,AINC,ADEC)

C ESTA SUBROUTINA GENERA LA MATRIZ COMPLEJA \* IGUAL QUE REPO1 \*\*  
C \*  $RP(U,V) = (N * \text{SQRT}(U * U + V * V), LU + MV) * \sin DX$  \*\*

C-----

```

DIMENSION RR(NX,NY),RI(NX,NY),R(NX,NY)
PI=3.141592654
DEN=FLOAT(N)
FACT=2.0*PI/DEN
RAD=180./PI
AI=AINC/RAD
AD=ADEC/RAD
AL=COS(AI)*COS(AD)
AM=COS(AI)*SIN(AD)
AN=SIN(AI)
DO 1 I=1,N
AI=FLOAT(I-NQ)
DO 1 J=1,N
AJ=FLOAT(J-NQ)
U=FACT*AI
V=FACT*AJ
RUV=U*U+V*V
R(I,J)=SQRT(RUV)
RR(I,J)=AN*R(I,J)
RI(I,J)=AL*U + AM*V
1 CONTINUE
RETURN
END

```



```

*
SUBROUTINE REPO1(RR,RI,R,NX,NY,N,NQ,DX,AINC,ADEC)
C ESTA SUBRUTINA GENERA LA MATRIZ COMPLEJA ** IGUAL QUE REPO **
C RP(U,V)=(N*SQRT(U*U + V*V) , LU + MV) ** CON DX **
C-----

```

```

DIMENSION RR(NX,NY),RI(NX,NY),R(NX,NY)
PI=3.141592654
DEN=DX*FLOAT(N)
FACT=2.0*PI/DEN
RAD=180./PI
AI=AINC/RAD
AD=ADEC/RAD
AL=COS(AI)*COS(AD)
AM=COS(AI)*SIN(AD)
AN=SIN(AI)
DO 1 I=1,N
AI=FLOAT(I-NQ)
DO 1 J=1,N
AJ=FLOAT(J-NQ)
U=FACT*AI
V=FACT*AJ
RUV=U*U+V*V
R(I,J)=SQRT(RUV)
RR(I,J)=AN*R(I,J)
RI(I,J)=AL*U + AM*V
1 CONTINUE
RETURN
END

```

```

*
SUBROUTINE RECU(RR,RI,R,NX,NY,N,NQ,AINC,ADEC)
C ESTA SUBRUTINA GENERA LA MATRIZ COMPLEJA
C RP(U,V)=(N*SQRT(U*U + V*V) , LU + MV)
C-----

```

```

DIMENSION RR(NX,NY),RI(NX,NY),R(NX,NY)
PI=3.141592654
DEN=FLOAT(N)
FACT=2.0*PI/DEN
RAD=180./PI
AI=AINC/RAD
AD=ADEC/RAD
AL=COS(AI)*COS(AD)
AM=COS(AI)*SIN(AD)
AN=SIN(AI)
DO 1 I=1,N
AI=FLOAT(I-NQ)
DO 1 J=1,N
AJ=FLOAT(J-NQ)
U=FACT*AI
V=FACT*AJ
RUV=U*U+V*V
RUV1=SQRT(RUV)
R(I,J)=U
RR(I,J)=AN*RUV1
RI(I,J)=AL*U + AM*V
1 CONTINUE
RETURN
END

```

## CAPITULO X

### CONCLUSIONES

La representación en el dominio de la frecuencia del campo magnético es una expresión matemática que muestra el campo como el producto de varios factores que dependen de la intensidad de la magnetización de la fuente anómala, de la geometría, de la profundidad, de la dirección del vector de magnetización y de la componente medida.

La deducción de los filtros de transformación en el dominio de la frecuencia están gobernadas por una simple expresión que modifica los factores de campo medido y de magnetización en la ecuación del campo magnético. En general, esta expresión convierte una componente medida en otra y cambia la dirección del vector de magnetización del cuerpo anómalo, que por supuesto, es necesario conocerla de alguna manera o en el caso más trivial suponerla igual a la dirección del campo total.

Así, de una manera generalizada se deducen los filtros que realizan las siguientes transformaciones: conversión de una componente en otra, cálculo de las tres componentes perpendiculares, reducción al polo, reducción al ecuador, reducción ortogonal y la transformación pseudogravimétrica.

También de la misma expresión se dedujeron dos nuevos filtros de transformación: el filtro para eliminar la componente remanente de una anomalía magnética observada y el filtro para eliminar la magnetización inducida. En el primer caso se obtiene un mapa con anomalías causadas solamente por la magnetización

inducida y en el segundo caso se obtiene un mapa con anomalías causada solamente por la magnetización remanente. En el primer caso es necesario conocer la dirección de la magnetización total y en el segundo, además de éste es necesario conocer la dirección de magnetización remanente, ambos medidos con métodos paleomagnéticos. En ninguno de los casos es necesario suponer la forma del cuerpo anómalo como comúnmente se hace.

Los filtros han sido implementados como subrutinas en Fortran básico dentro de un programa principal que ejecuta el proceso de filtrado. La entrada en este programa es el mapa observado en forma de matriz equiespaciada y la salida es el mapa filtrado también en una matriz de la misma dimensión. El algoritmo usado para realizar la conversión espacio-frecuencia-espacio es el de la transformada de Fourier rápida, por lo que los mapas deben de ser de dimensión  $2*N$  donde  $N$  es un entero positivo.

Para probar la validez de los filtros y de las subrutinas, todos los filtros fueron aplicados a anomalías hipotéticas y los resultados (mostrados en el capítulo 7) fueron comparados también con anomalías hipotéticas. Solamente el filtro de la reducción al polo fue aplicado a datos reales. El proceso inverso, o sea, obtener un mapa de intensidad total dado el mapa reducción al polo también fue probado con datos reales. En ambos casos el resultado fue correcto.

El filtrado inverso en el dominio de la frecuencia se puede ejemplificar como sigue: si  $A/B$  es el filtro para convertir un

mapa de componente vertical a un mapa de componente total, entonces  $B/A$  será el filtro para obtener el mapa de componente vertical dado el mapa de componente total. Puesto que los filtros aquí mostrados tienen la forma de  $A/B$ , se puede realizar este proceso inverso modificando el filtro a la forma  $B/A$ .

En general, los filtros que tienen en su ecuación el denominador  $D(u,v) = iu_l + iv_m + Ruv.n$ , tales como la reducción al polo o la reducción ortogonal, por ejemplo, son inestables en el ecuador magnético o cerca de él, por causa de la presencia de un polo magnético en  $I=I_0=0$ . De tal manera que, el filtrado es impreciso cuando la inclinación del campo  $I$  ó la inclinación del vector de magnetización  $I_0$  es menor que 15 grados.

El filtro de la reducción al ecuador es inestable también cuando  $I$  ó  $I_0$  es cero o cercano a cero grados y cuando la declinación  $D$  ó  $D_0$  es diferente de cero grados; cuando la declinación es cero el filtro es estable. Leu(1986) mencionó que este filtro es estable en todas las latitudes.

## B I B L I O G R A F I A

- Baranov, V. 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies. *Geophys.*, v. 22, pp(359-383).
- Bhattacharyya, B.K. 1965. Two dimensional harmonic analysis as a tool for magnetic interpretation. *Geophysics.* v. 30, pp(829-857).
- Bhattacharyya, B.K. 1964. Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization. *Geophys.*, v. 29, pp(829-857).
- Bhattacharyya, B.K. 1966. Continuous spectrum of the total magnetic field anomaly due to a rectangular prismatic body. *Geophysics.* v. 31, n. 1, pp(97-121).
- Cordell, L. and Taylor, P. 1971. Investigation of magnetization and density of a North Atlantic seamount using Poisson's theorem. *Geophysics.* v. 36, n. 5, pp(919-937).
- Dean, W.C. 1958. Frequency analysis for gravity and magnetic interpretation. *Geophysics* v. 23, pp(97-127).
- Draz, N.R. 1988. Reducción al polo usando la transformada de Fourier rápida. *Revista del I.M.P.*, v. 20, n. 2, págs(21-29).
- Ervin, C.P. 1976. Reduction to the magnetic pole using a fast Fourier series algorithm. *Comp. and Geosc.*, v. 2, pp(211-217).
- Fuller, B.D. 1967. Two dimensional frequency analysis and design of grid operators. *Mining Geophysics.* V. 2, SEG, Tulsa. 658-708.
- Gunn, P.J. 1975. Linear transformations of gravity and magnetic fields. *Geoph. Prosp.* v. 23, pp(300-312).
- Hansen, R.O. 1984. Two approaches to total field reconstruction from gradiometer data. (abstract, SEG, 1984), pp(245-247).
- Hansen, R.O. and Pawlowski, R.S. 1989. Reduction to the pole at low latitudes by Wiener filtering. *Geophys.* v. 54, n. 12, (1607-1613).
- Harris, F.J. 1978. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform. *Proceedings of the IEEE*, v. 66, n. 1, pp(51-83)
- Hsu H.P. 1970. *Fourier analysis.* Simon and Schuster. New York.
- Kanasewich, E.R. and Agarwal, R.G. 1970. Analysis of combined gravity and magnetic fields in wavenumber domain. *J. Geophys. Res.* v. 75, pp(5702-5712).

- Leu, L. 1982. Use of reduction to the equator process for magnetic data interpretation. *Geophysics*, v. 47, p. 445, (abstract).
- Lourenco, J.S. and Morrison, H.F. 1973. Vector magnetic anomalies derived from measurements of a single component of the field. *Geophysics* vol. 38, n. 2, pp(359-368).
- Nabighian, M.N. 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transform fundamental relations. *Geophys.*, v. 49, n. 6, pp(780-786).
- Penderson, L.B. 1989. Relations between horizontal and vertical gradients of potential fields. Short Note. *Geophysics* v. 54, n. 5, pp(662-663).
- Ramsey, A.S. 1940. An Introduction to the theory of Newtonian attraction. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Roy, A. 1962. Ambiguity in geophysical interpretation. *Geophysics* v. 27, pp(90-99).
- Roy, A. and Aina, A.D. 1986. Some new magnetic transformation. *Geophysical Prospecting*, v. 34, pp(1219-1232).
- Silva, J.B.C. 1986. Reduction to the pole as an inverse problem and its application to low-latitude anomalies. *Geophysics*. v. 51, n. 2, pp(369-382).
- Urrutia, F.J. 1977. Importancia del magnetismo remanente en la interpretación de las anomalías magnéticas. *Boletín de la A.M.G.E.* V. 18, N. 4, pags(83-116).
- Wold, R.T. and Cooper, A.K. 1989. Marine magnetic gradiometer—a tool for the seismic interpreter. *Geophysics: The leading edge of exploration*. August, pp(22-27).