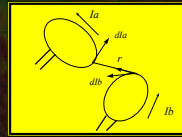


METODO MAGNETICO

METODO MAGNETICO: PRINCIPIOS

Inducción Magnética



Análogo a la atracción entre dos masas puntuales, consideremos la atracción entre dos "loops" de corriente continua, con corrientes I_a e I_b , respectivamente.

$$d\vec{f}_a = C_m I_a I_b \frac{d\vec{l}_a \times (d\vec{l}_b \times \hat{r})}{r^3}$$

"Fuerza de Lorentz"

La fuerza actuando sobre un pequeño elemento $d\vec{l}_a$ del loop a, causada por la corriente en el elemento $d\vec{l}_b$ del loop b, estará dada por la "Fuerza de Lorentz".

C_m es una constante de proporcionalidad, análoga a G = constante gravitacional

METODO MAGNETICO: PRINCIPIOS

Inducción Magnética

Si definimos un vector B tal que:

$$dB_b = C_m I_b \frac{d\vec{l}_a \times \hat{r}}{r^2} \quad \text{Y} \quad d\vec{f}_a = I_a d\vec{l}_a \times dB_b$$

e integramos sobre el loop b, obtenemos:

$$\vec{B} = C_m I_b \oint \frac{d\vec{l}_b \times \hat{r}}{r^2} \quad \text{"Ley de Biot-Savart"}$$

El vector B se conoce como "Inducción Magnética", "Densidad de Flujo Magnético", o simplemente "Campo Magnético" de un loop de corriente continua.

"Una corriente eléctrica induce una fuerza sobre una carga en movimiento, igual al producto vectorial del campo magnético y la velocidad de la carga".

METODO MAGNETICO: PRINCIPIOS

Potencial Magnético

El campo magnético (F) es una fuerza conservativa \Rightarrow deriva de un potencial escalar (A).

$$\Rightarrow F(r) = -\text{Grad. } A(r)$$

Para un dipolo:

$$A = p \left[\frac{1}{\sqrt{r^2 + l^2 - 2rl \cos \theta}} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + l^2 + 2rl \cos \theta}} \right]$$

$$\text{Si } r \gg l \text{ (campo lejano)} \Rightarrow A \sim \frac{2lp \cos \theta}{r^2} = \frac{lm \cos \theta}{r^2}$$

$$\text{En este caso:} \quad F \sim \frac{lm}{r^3} [2\cos \theta \hat{r} + \sin \theta \hat{\theta}]$$

En primera aproximación, el campo terrestre puede ser considerado dipolar.

METODO MAGNETICO: PRINCIPIOS

Susceptibilidad Magnética

En presencia de un campo externo H , un cuerpo magnetizable se magnetiza por inducción magnética. El alineamiento de los dipolos magnéticos al interior del cuerpo, produce un campo magnético M que se suma al campo externo.

En campos magnéticos débiles (como el terrestre), el campo M es proporcional a H y alineado en la misma dirección.

El grado de magnetización alcanzado por este cuerpo corresponde a la constante de proporcionalidad, que se define como "susceptibilidad magnética (k)", tal que:

$$M = k \cdot H$$

METODO MAGNETICO: PRINCIPIOS

Unidades

Más complejo que en el caso de gravedad, básicamente por el enorme rango de magnitudes que presentan los campos magnéticos dependiendo de la aplicación y también por la derivación matemática, que en algunos casos es dependiente del sistema de unidades usado !!! (Blakely 1995, p.67).

Básicamente se usan dos sistemas: *CGS* (también conocido como *emu* = Electromagnetic Units) y el *Sistema Internacional (SI)*.

$C_m = 1$ en *emu* (adimensional); $C_m = \mu_0/4\pi [10^{-7} \text{ henry/m}]$ en *SI*
 μ_0 = permeabilidad mag. del vacío.

En *emu* B se mide en *Gauss (G)*, mientras que en *SI*, B se mide en Weber/m² = Tesla (T). En aplicaciones geofísicas la unidad más común para B es *gamma* en *emu* (γ) o *nanotesla* en *SI* (nT).

$$1 \text{ Tesla} = 10^4 \text{ Gauss} \quad (1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T} = 1 \text{ gamma} = 10^{-5} \text{ Gauss})$$

METODO MAGNETICO: TEORIA BASICA

El Campo Magnético Terrestre

Asumimos en primera aproximación que la tierra es una esfera de radio "a" y consideramos un potencial escalar V, el cual debe satisfacer la ecuación de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0$$

La solución de esta ecuación en coordenadas esféricas, estará dada por los polinomios asociados de Legendre

$$V = a \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi) P_n^m(\theta),$$

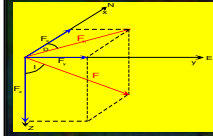
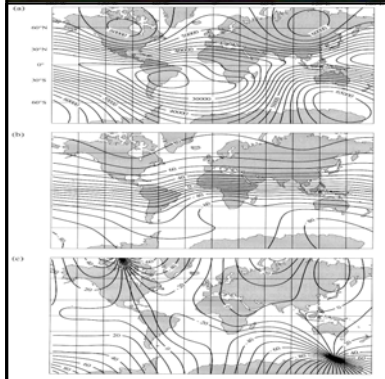
θ = Colatitud ; ϕ Longitud

A partir de valores medidos por los observatorios magnéticos, se determinan los coeficientes g y h que "ajustan" una superficie matemática al campo observado.

Esto se conoce como el IGRF (International Geomagnetic Reference Field)

METODO MAGNETICO: TEORIA BASICA

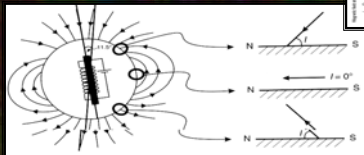
El Campo Magnético Terrestre



F = Intensidad de campo total
I = Inclínación
D = Declinación

METODO MAGNETICO: TEORIA BASICA

INDUCCION Y REMANENCIA MAGNETICA



Inducción Magnética \Rightarrow Rocas magnetizadas en dirección del campo actual

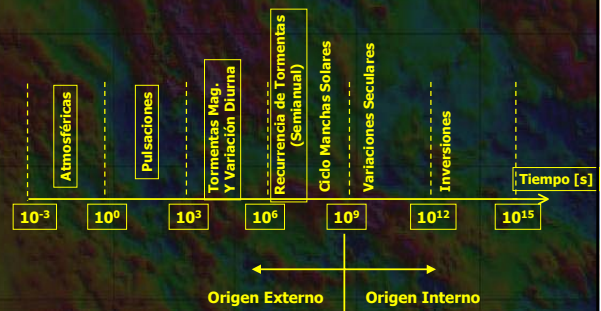
Remanencia Magnética \Rightarrow Rocas magnetizadas en dirección de un campo magnético del pasado.

Ej.- Termoremanencia en basaltos oceánicos.

Temperatura de Curie (T_c)

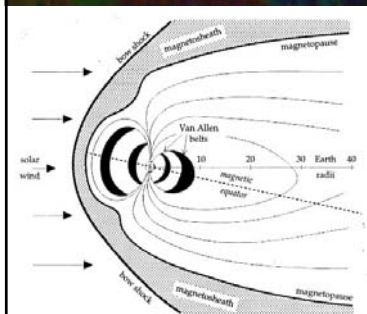
METODO MAGNETICO: TEORIA BASICA

CMT. Sus Variaciones Temporales



METODO MAGNETICO: TEORIA BASICA

VARIACIONES CAMPO MAGNETICO TERRESTRE



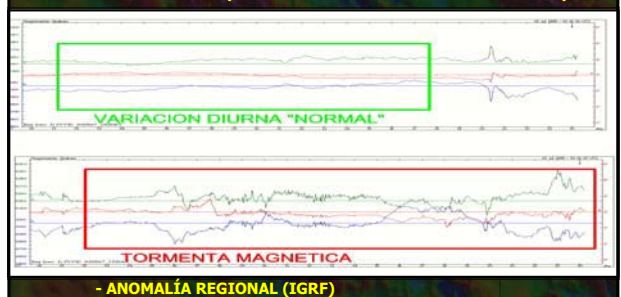
Externas:

- periodicidad de 11 años
- variación diurna ~ 30 nT
- variación lunar ~ 2 nT
- tormentas solares

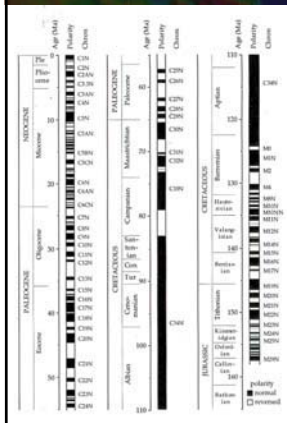
METODO MAGNETICO: REDUCCION DE DATOS

CORRECCIONES:

- ESTACION BASE (REGISTRO DE VARIACIONES TEMPORALES)



METODO MAGNETICO: TEORIA BASICA



VARIACIONES CAMPO MAGNETICO TERRESTRE

Internas:

- variaciones seculares (precesión) [I=10°/400 años; D=35°/400 años] [IGRF actualización cada 5 años]

- Inversión de campo magnético [comportamiento caótico del proceso magneto-hidrodinámico que genera el campo magnético terrestre en el núcleo líquido de la tierra y el desarrollo de la capa D'' en la interfase manto-núcleo]

METODO MAGNETICO: MODELACION DIRECTA

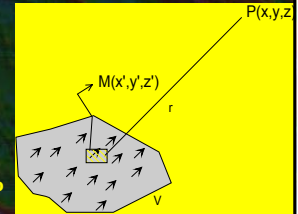
Potencial Magnético en cuerpo magnetizado de forma arbitraria

Un cuerpo magnetizado de volumen V puede ser discretizado en dipolos magnéticos cuya distancia dipolar sea considerablemente superior a la distancia entre el punto de observación y la fuente. El potencial magnético diferencial de cada dipolo al interior del volumen V corresponde a:

$$A = M(r') \frac{\cos \theta}{r^2} = -M(r') \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right)$$

En consecuencia el potencial magnético de todo el volumen V se expresa como:

$$A(r) = - \int_V M(r') \cdot \nabla \left(\frac{1}{|r-r'|} \right) dv'$$



METODO MAGNETICO: MODELACION DIRECTA

Si la magnetización es uniforme no depende del volumen de integración y puede ser ubicada fuera de la integral en conjunto con el operador gradiente:

$$A(r_o) = -M(r_o) \cdot \nabla \int_V \left(\frac{1}{|r-r_o|} \right) dv$$

La expresión anterior permite establecer una importante relación entre el potencial magnético y gravitatorio para el caso de distribuciones homogéneas de densidad y magnetización:

$$A(r_o) = - \frac{M(r_o)}{G\rho(r_o)} \cdot \nabla U \quad (\text{Relación de Poisson}).$$

$$\text{Fuerza gravitacional } F = \frac{Gm}{r^2} = -\nabla U \Rightarrow U(r) = \frac{Gm}{r}$$

o bien para una distribución en un volumen dado:

$$U(r_o) = G \int_V \frac{dm}{|r-r_o|} = G \int_V \frac{\rho dv}{|r-r_o|} = G\rho \int_V \frac{dv}{|r-r_o|} \quad (\text{densidad constante})$$

METODO MAGNETICO: MODELACION DIRECTA

Relación de Poisson:

$$A(r_o) = - \frac{M(r_o)}{G\rho(r_o)} \cdot \nabla U$$

Si pensamos en una carga magnética distribuida en un volumen de integración:

$$A(r) = - \int_V M(r) \cdot \nabla \left[\frac{1}{|r-r_o|} \right] dv$$

$$\Rightarrow H = -\nabla A = \nabla \int_V M(r) \cdot \nabla \left[\frac{1}{|r-r_o|} \right] dv$$

METODO MAGNETICO: MODELACION DIRECTA

Si la dirección de magnetización es la misma en todo el volumen de integración entonces:

$$M \cdot \nabla = M \frac{\partial}{\partial \alpha} \Rightarrow H = \nabla \frac{\partial}{\partial \alpha} \int_V M(r) \frac{dv}{|r-r_o|}$$

Al igual que en gravimetría, es posible derivar una expresión similar del potencial magnético para cuerpos infinitamente extendidos en la dirección del rumbo. Utilizando la relación de Poisson se obtiene:

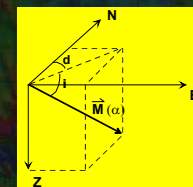
$$A(r) = -2M(r') \cdot \nabla \int_s \log \left(\frac{1}{|r-r'|} \right) ds'$$

METODO MAGNETICO: MODELACION DIRECTA

Si la magnetización es constante, entonces podemos expresar el efecto magnético de un cuerpo de forma arbitraria como:

$$H(r_o) = M(r_o) \nabla \frac{\partial}{\partial \alpha} \int_V \frac{dv}{|r-r_o|}$$

Donde α es la dirección de magnetización del cuerpo magnetizado:



La derivada direccional en dirección α se expresa en un sistema cartesiano como:

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} = \cos(i) \cdot \cos(d) \cdot \frac{\partial}{\partial x} + \cos(i) \cdot \sin(d) \cdot \frac{\partial}{\partial y} + \sin(i) \cdot \frac{\partial}{\partial z}$$

METODO MAGNETICO: MODELACION DIRECTA

En la práctica sin embargo el magnetómetro registra el campo magnético del cuerpo anómalo superpuesto al campo magnético terrestre, y por razones del principio físico utilizado para efectuar la medición del campo (ver recuadro), solo se registra la componente paralela al campo ambiente en el lugar de medición.

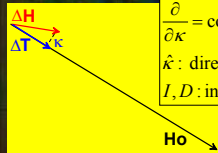
$$H = H_o + \Delta H, \quad \text{pero } \Delta H \ll H_o$$

$$\Rightarrow \Delta T \approx \Delta H \cdot \hat{k} = -\nabla A \cdot \hat{k} = -\frac{\partial A}{\partial \kappa}$$

$$\frac{\partial}{\partial \kappa} = \cos(I) \cdot \cos(D) \cdot \frac{\partial}{\partial x} + \cos(I) \cdot \sin(D) \cdot \frac{\partial}{\partial y} + \sin(I) \cdot \frac{\partial}{\partial z}$$

\hat{k} : dirección del campo magnético terrestre,

I, D : inclinación y declinación del campo magnético



METODO MAGNETICO: MODELACION DIRECTA

En caso de cuerpos magnetizados por inducción ($\alpha = \kappa'$ => $M = \kappa' F_o$):

$$\Delta T(r_o) = \kappa' F_o \frac{\partial^2}{\partial \alpha^2} \int \frac{1}{|r - r_o|} dv$$

Para el caso de vectores no coincidentes (remanencia pura):

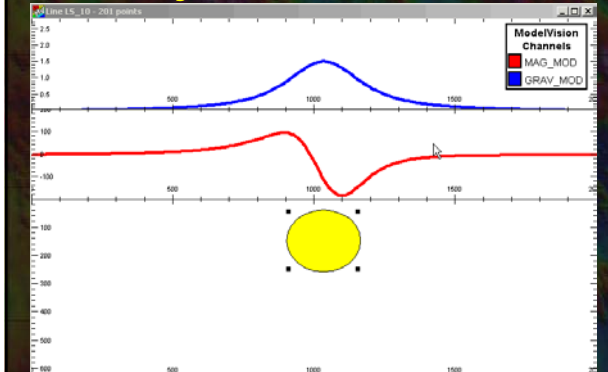
$$\Delta T(r_o) = M \frac{\partial^2}{\partial \alpha \partial \kappa} \int \frac{1}{|r - r_o|} dv$$

En el caso mas general:

$$M = M_o + \kappa' F_o$$

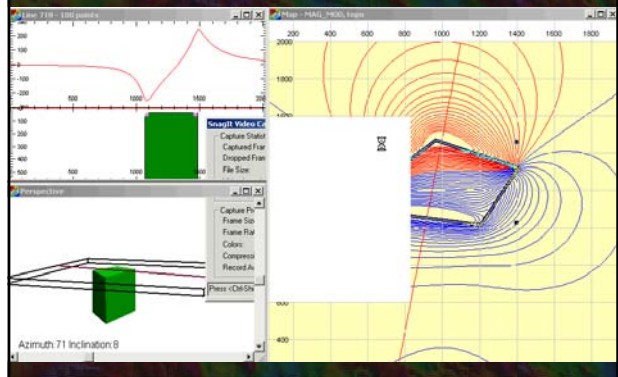
METODO MAGNETICO: MODELACION DIRECTA

Modelación 2-d: Variación de profundidad inclinación magnética



METODO MAGNETICO: MODELACION DIRECTA

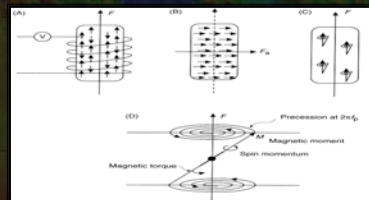
Modelación 3-d:



METODO MAGNETICO: INSTRUMENTAL

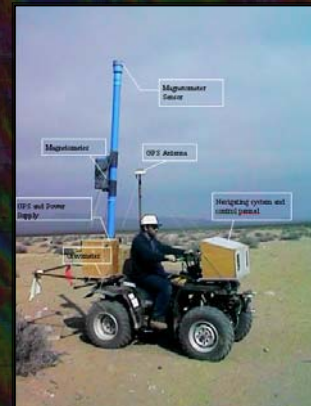
MAGNETOMETRO GEOMETRICS G-858 PRECISION (VAPORES DE CESIO)

PRINCIPIO FISICO
MAGNETOMETROS DE PRECISION



METODO MAGNETICO: INSTRUMENTAL

SISTEMA MOTO TRANSPORTADO



METODO MAGNETICO: INSTRUMENTAL

SISTEMA UAV



METODO MAGNETICO: ANALISIS EN FRECUENCIA

Continuaciones Analíticas

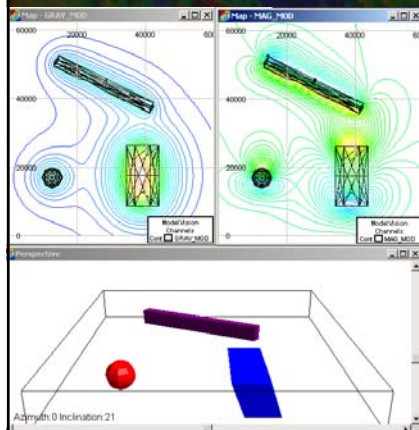
$$F_z(K_x, K_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Delta g(x', y', z') e^{-i(k_x x' + k_y y')} dx' dy' \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\Delta z}{2\pi R^3} e^{-i(k_x x_1 + k_y y_1)} dx_1 dy_1$$

$$F_z(K_x, K_y) = F_z(K_x, K_y) e^{-i|\Delta z| (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}} \quad \text{Continuación Hacia Arriba}$$

$$F_z(K_x, K_y) = F_z(K_x, K_y) e^{i|\Delta z| (k_x^2 + k_y^2)^{1/2}} \quad \text{Continuación Hacia Abajo}$$

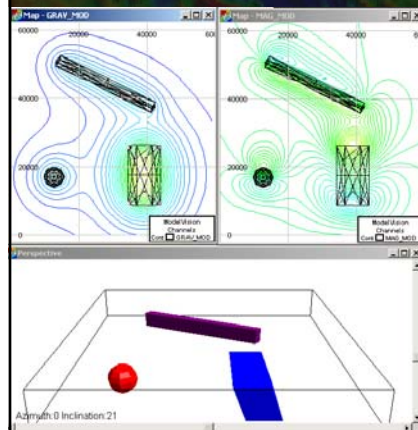
- Procedimiento en tres pasos: Transformada/Filtro/Antitransformada
- Forma del Filtro (Pasa Bajo/Pasa Alto)

METODO MAGNETICO: ANALISIS EN FRECUENCIA



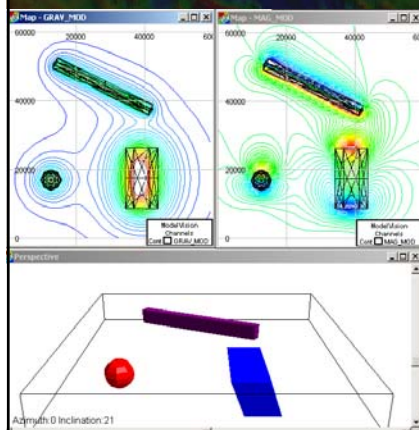
EJEMPLO DE CONTINUACION SOBRE CUERPOS TEORICOS

METODO MAGNETICO: ANALISIS EN FRECUENCIA



CONTINUACION SOBRE CUERPOS TEORICOS: CONTINUADO 1000M ARRIBA

METODO MAGNETICO: ANALISIS EN FRECUENCIA



CONTINUACION SOBRE CUERPOS TEORICOS: CONTINUADO 1000M ABAJO

METODO MAGNETICO: ANALISIS EN FRECUENCIA

Reducción al Polo

La relación de Poisson establece:

$$A(r) = \frac{M}{G_p} g_\alpha = \frac{M}{G_p} \frac{\partial}{\partial \alpha} U(r)$$

Donde A = Pot. Magnético; U = Pot. Gravitatorio; α = Dir. Mag. Fuente

Si tomamos la derivada en la dirección del c.m.t. (\hat{t}), obtenemos:

$$(1) \quad T(r) = \frac{M}{G_p} \frac{\partial^2}{\partial t \partial \alpha} U(r) \quad \text{con } T = \text{Campo mag. cuerpo anómalo}$$

Analogamente, la anomalía teórica que producirá el mismo cuerpo en el polo magnético será:

$$(2) \quad T_{\text{polo}}(r) = \frac{M}{G_p} \frac{\partial^2}{\partial z^2} U(r) \quad \begin{aligned} \hat{t} &= a\hat{i} + b\hat{j} + c\hat{k} \\ \alpha &= a\hat{i} + b\hat{j} + \gamma\hat{k} \end{aligned}$$

METODO MAGNETICO: ANALISIS EN FRECUENCIA

Reducción al Polo

Tomando FT a las ecuaciones (1) y (2) e igualando $FT[U(r)]$, obtenemos:

$$FT[T_{\text{polo}}(r)] = FP(k_x, k_y) FT[T(r)]$$

Con $FP(k_x, k_y) = \frac{k_x^2 + k_y^2}{[i\alpha k_x + i\beta k_y + c(k_x^2 + k_y^2)^{1/2}] [i\alpha k_x + i\beta k_y + \gamma(k_x^2 + k_y^2)^{1/2}]}$

- Procedimiento en tres pasos: Transformada/Filtro/Antitransformada
- Aplicaciones
- Que pasa en bajas latitudes geomagnéticas ($I < 20^\circ$) ?



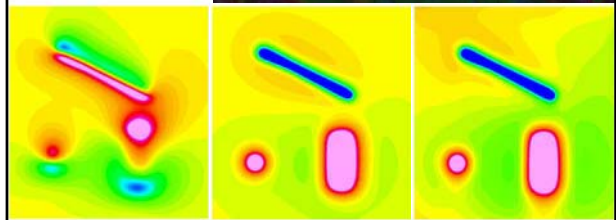
METODO MAGNETICO: ANALISIS EN FRECUENCIA

REDUCCION AL POLO

OBSERVACION

OBSERVACION
I=90

REDUCCION AL
POLO



METODO MAGNETICO: ANALISIS EN FRECUENCIA

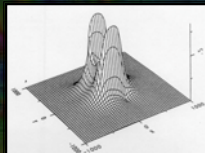
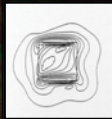
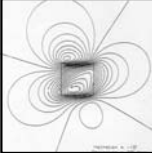
Señal Analítica

Corresponde a la envolvente de energía de las anomalías magnéticas y no depende de la dirección de magnetización de las fuentes.

La amplitud de la "Señal Analítica" tendrá directa relación con la intensidad de la magnetización, y presentará valores máximos sobre los bordes de las fuentes magnéticas. Se define como:

$$AS(x, y, z) = (T_x^2 + T_y^2 + T_z^2)^{1/2}$$

Donde T_x , T_y , T_z corresponden a los gradientes (derivadas) en las direcciones x , y , z respectivamente.



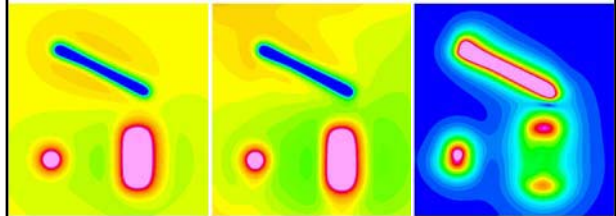
METODO MAGNETICO: ANALISIS EN FRECUENCIA

REDUCCION AL POLO VS SEÑAL ANALITICA

OBSERVACION
I=90

REDUCCION
AL POLO

SEÑAL
ANALITICA



METODO MAGNETICO: ANALISIS EN FRECUENCIA

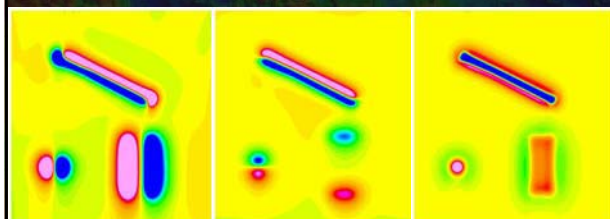
Planos de derivadas: Utilizados para discriminar tendencias y contactos en los datos. En el dominio de las frecuencias una derivada de orden n se expresa como:

$$\frac{d^n T}{dz^n} = TF^{-1} \left[\left(\sqrt{k_x^2 + k_y^2} \right)^n \cdot TF[T] \right]$$

POLO 1a DER.X

POLO 1a DER.Y

POLO 2a DER.Z



METODO MAGNETICO: CONCLUSIONES

- Detección de propiedades magnéticas
- Pérdida de resolución con la profundidad
- Interpretación no única (exige control geológico)
- Mapeo de tipo regional y detalle
- Utilización de plataformas aéreas, marinas y terrestres
- Bajos costos para la adquisición de datos en función de cobertura alcanzada (US \$ 5-20/km)