

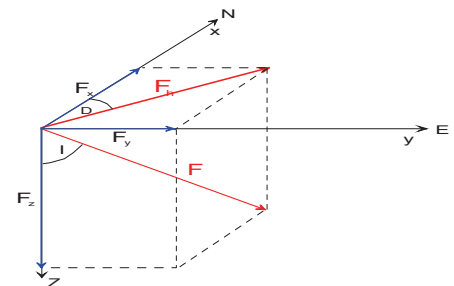
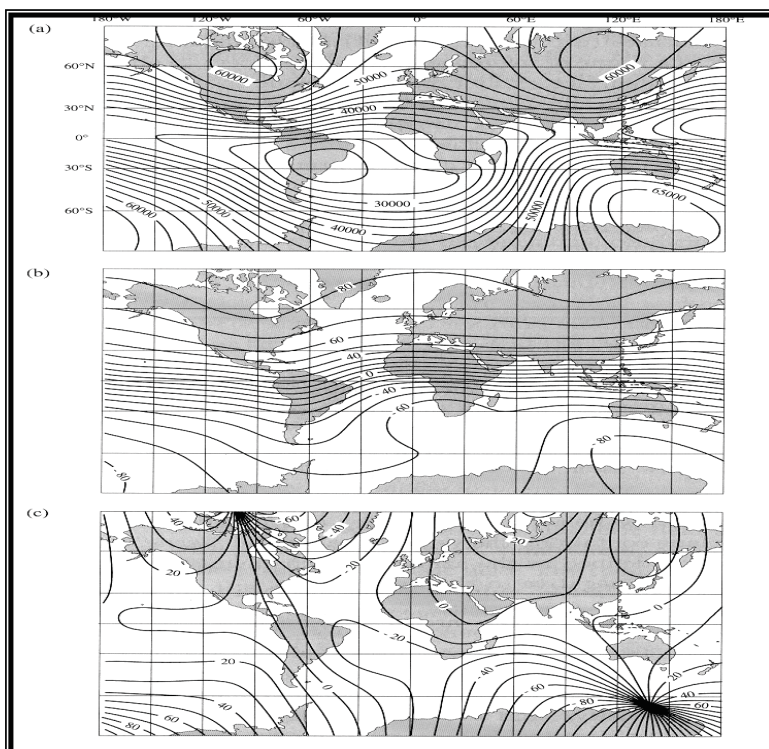
METODOS DE EXPLORACIÓN GEOFISICA MODULO MAGNETISMO

Semestre PRIMAVERA/2008

Gonzalo Yañez

MÓDULO I.- Introducción

MAGNETISMO: Conceptos Básicos El Campo Magnético Terrestre



F = Intensidad de campo total

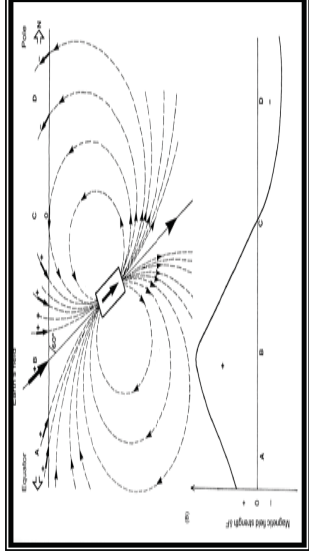
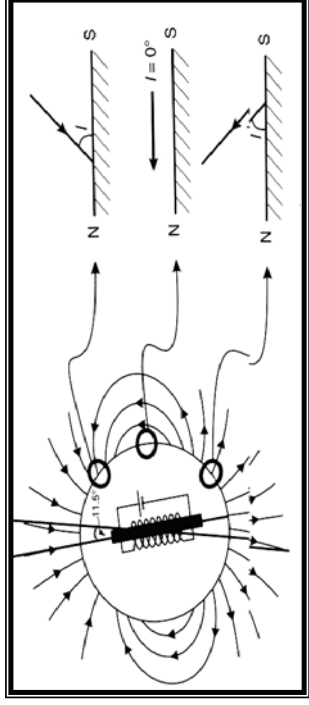
I = Inclutación

D = Declinación

MÓDULO I.- Introducción

MAGNETISMO: Conceptos Básicos

El Campo Magnético Terrestre



Inducción Magnética $\Rightarrow$ Rocas magnetizadas en dirección del campo actual

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

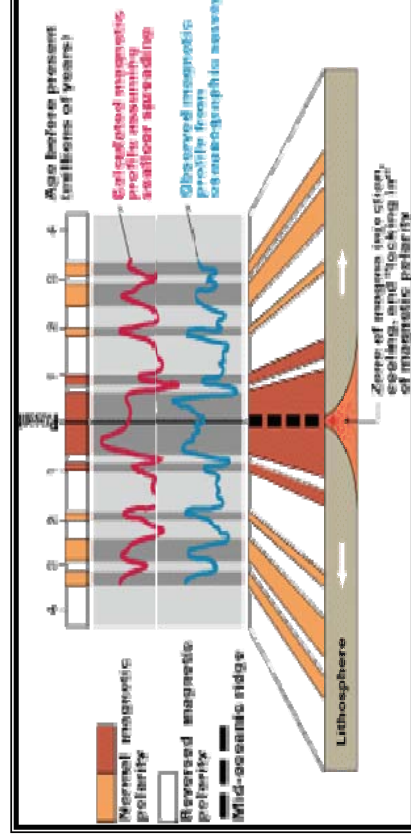
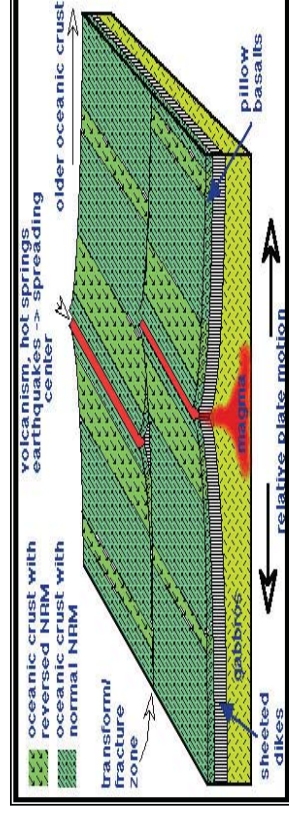
Ej.- Termoremanencia en basaltos oceánicos.

Temperatura de Curie (T_c)

MÓDULO I.- Introducción

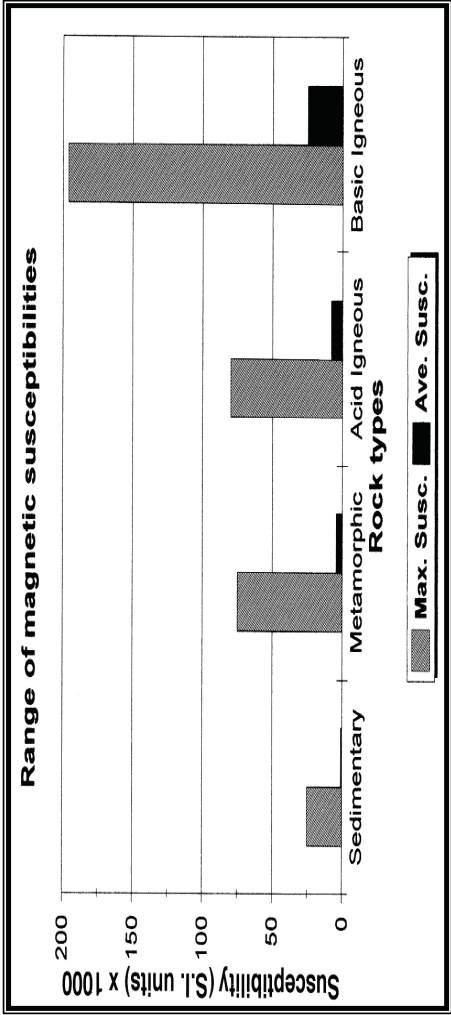
MAGNETISMO: Conceptos Básicos

El Campo Magnético Terrestre



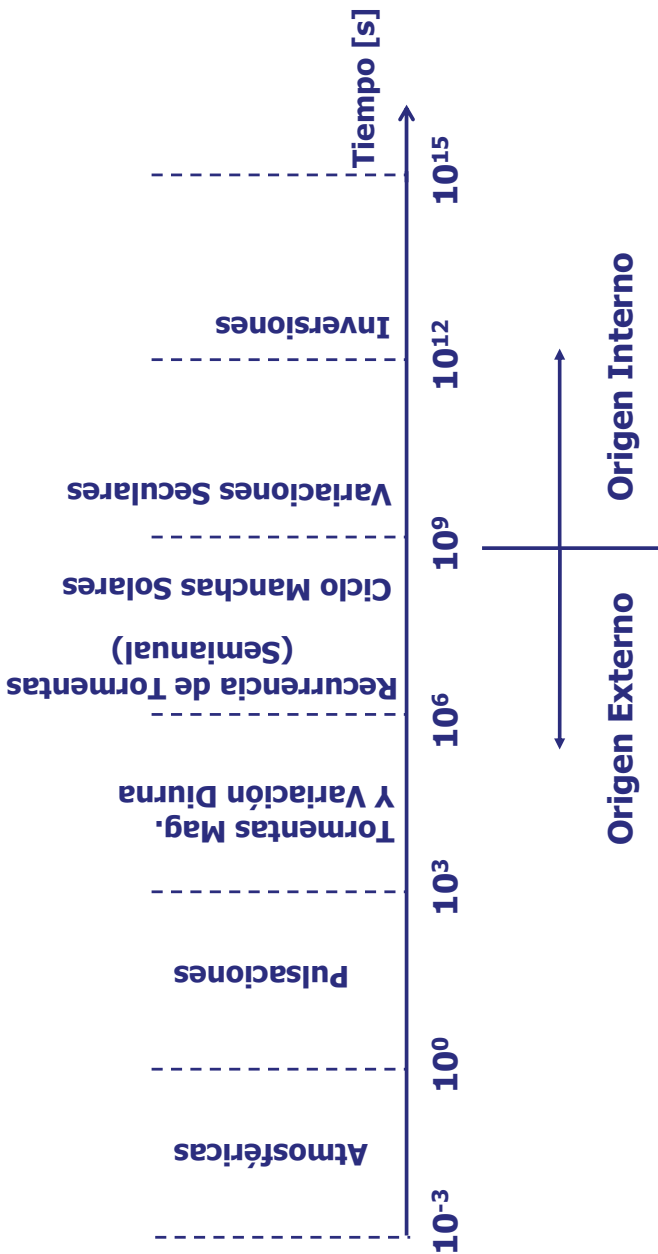
MAGNETISMO: Conceptos Básicos

Magnetización de las Rocas



MAGNETISMO: Conceptos Básicos

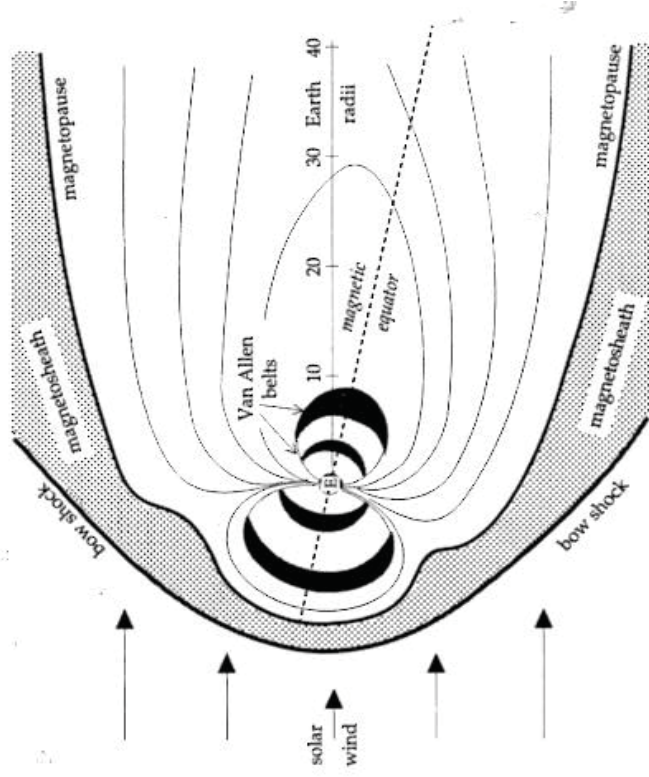
CMT. Sus Variaciones Temporales



VARIACIONES CAMPO MAGNETICO TERRESTRE

Externas:

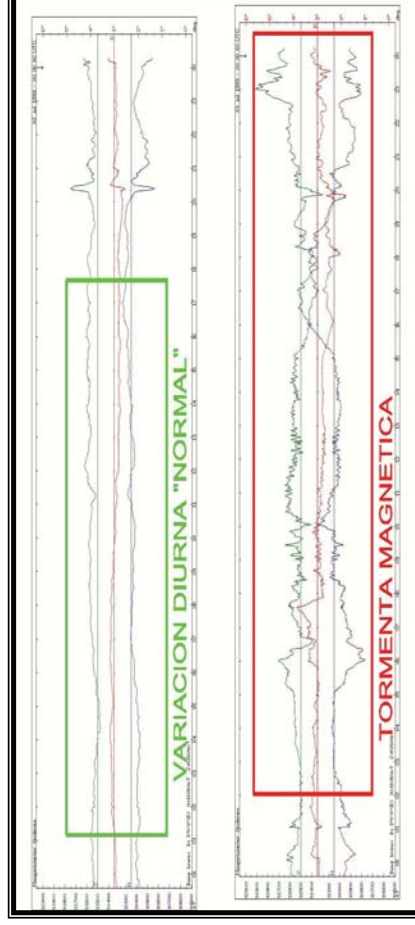
- periodicidad de 11 años
- variación diurna ~ 30 nT
- variación lunar ~ 2 nT
- tormentas solares



MAGNETISMO: Reducción de Datos

CORRECCIONES:

- ESTACION BASE (REGISTRO DE VARIACIONES TEMPORALES)



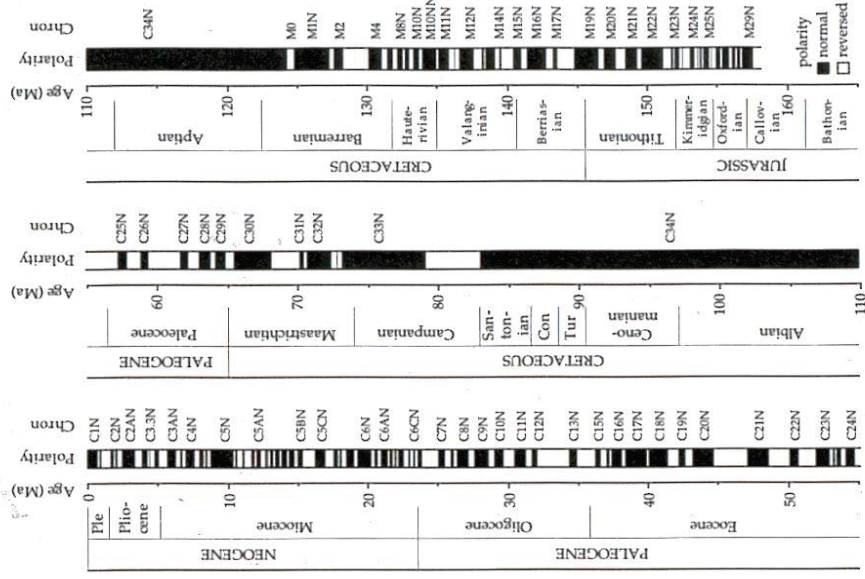
- ANOMALÍA REGIONAL (IGRF)

VARIACIONES CAMPO MAGNETICO TERRESTRE

Internas:

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

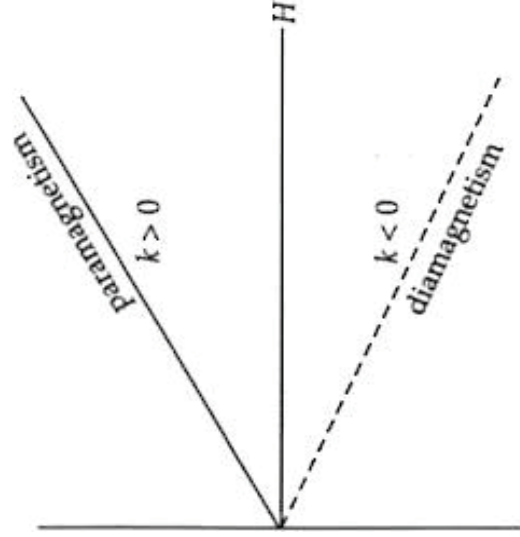
- Inversión de campo magnético
[comportamiento caótico del proceso magneto-hidrodinámico que genera el campo magnético terrestre en el núcleo líquido de la tierra y el desarrollo de la capa D'' en la interfase manto-núcleo]



MAGNETIZACION DE LAS ROCAS

En presencia de un campo externo (H) las rocas presentan dos comportamientos:

- **PARAMAGNETISMO:** Momento magnético neto positivo (susceptibilidad magnética, $k > 0$)
- **DIAMAGNETISMO:** Se opone al campo externo (susceptibilidad magnética negativa), característico de materiales que completan todos los orbitales. En ausencia de un campo externo tienen momento magnético nulo (ej. , grafito, mármol, cuarzo)

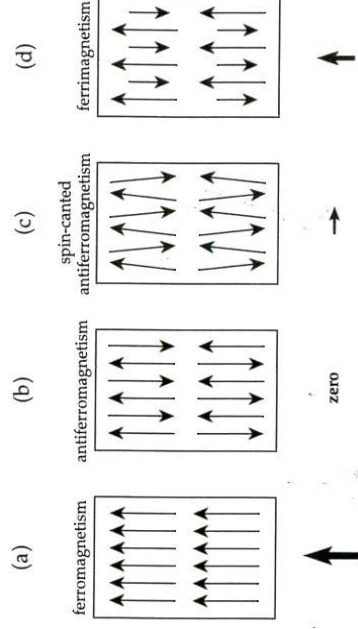


En general el efecto paramagnético y diamagnético es muy débil, con la excepción de los elementos FERROMAGNESIANOS (fierro, cobalto, níquel), con una interacción magnética varios ordenes de magnitud superior.

MAGNETIZACION DE LAS ROCAS

FERROMAGNESIANOS: El tipo de interacción magnética define los **DOMINIOS MAGNETICOS**:

- a) Ferromagnetismo: dominios en fase momento magnético máximo (fierro)
- b) Anti-Ferromagnetismo: dominios en oposición de fase, momento magnetico nulo (hematita), si los dominios están levemente rotados se genera un anti-ferromagnetismo con momento magnético débil en sentido perpendicular al campo c)
- d) Ferrimagnetismo: momento neto mayor que cero (la mayoría de las rocas magnetizadas en la naturaleza (magnetita, titanomagnetita, ox. fierro)

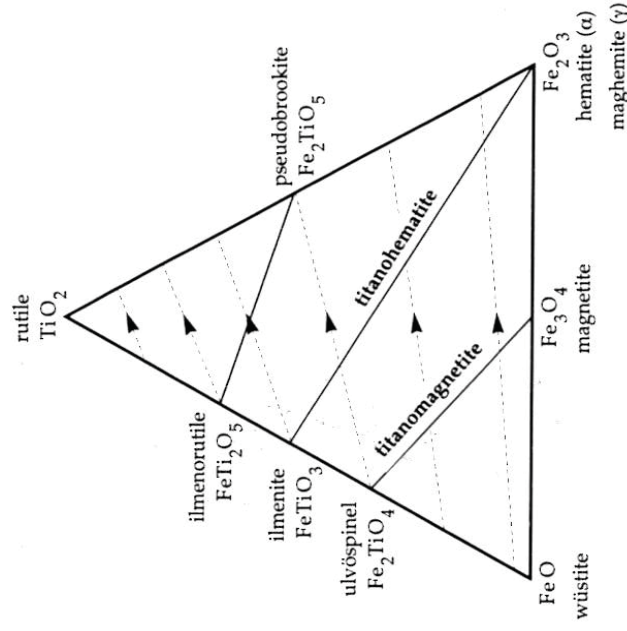


MAGNETIZACION DE LAS ROCAS

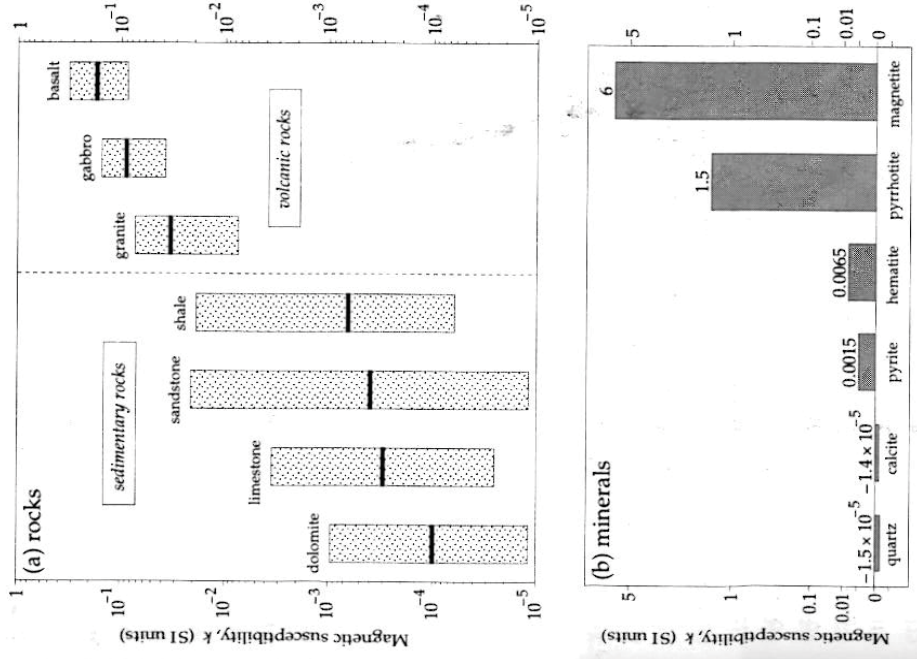
FERROMAGNESIANOS: El grado de magnetización en las rocas se puede expresar en un diagrama triangular Fe-Ti-O,

La solución sólida titanomagnetita es la familia de óxidos de fierro mas importante en términos de la magnetización de las rocas, a mayor contenido de titanio se incrementa el tamaño de grano y disminuye la T. Curie => ulvöspinel no magnético a temperatura ambiente, la magnetización superior la alcanza la magnetita.

La solución sólida titanohematita tiene el mismo comportamiento: al aumentar el contenido de titanio, su valor extremo, hematita, presenta una magnetización débil pero alta T. Curie por lo cual es muy utilizada en estudios paleomagneticos.

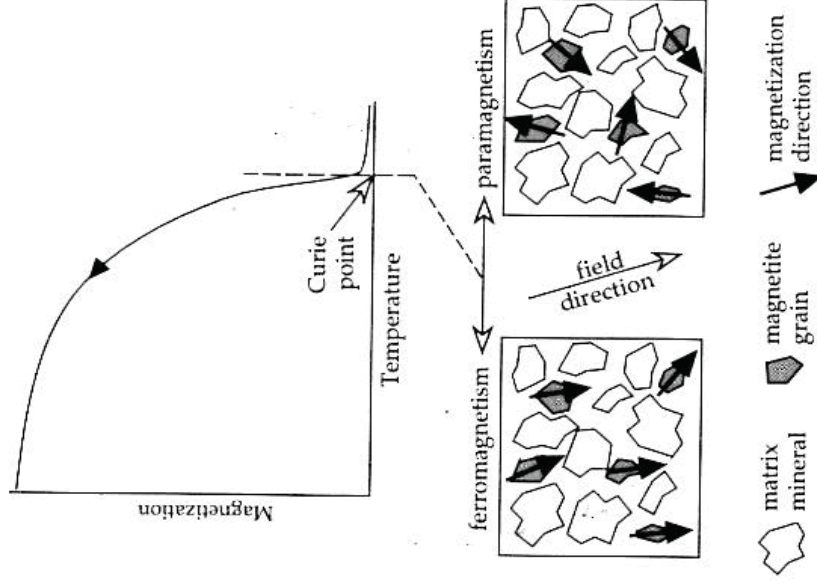


SUSCEPTIBILIDAD AD MAGNETICA ROCAS Y MINERALES



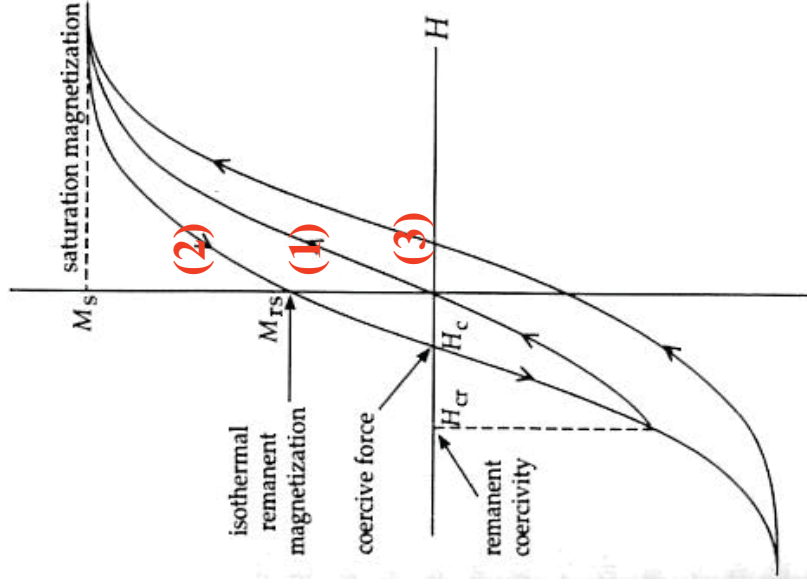
MAGNETIZACION DE LAS ROCAS: PUNTO CURIE

A medida que aumenta la temperatura el ordenamiento mostrado por la magnetización de los dominios magnéticos se mantiene estable hasta alcanzar la Temperatura de Curie, propia para cada mineral (580 °C para la magnetita). Sobre esta temperatura los granos magnéticos muestran una orientación aleatoria con un momento magnético neto = 0



MAGNETIZACION DE LAS ROCAS: CICLO DE HISTERESIS Y REMANENCIA

Al variar la intensidad del campo externo varia la magnetización adquirida por la roca: (1) aumenta hasta un nivel de saturación (M_s); al decrecer el campo no necesariamente sigue la misma trayectoria (2), manteniendo una magnetización remanente incluso en ausencia de un campo externo (M_r), si el campo H no decrece bajo el valor H_{cr} al aumentar el campo retoma la trayectoria original (1), si alcanza el nivel de saturación su recuperación la efectúa según la trayectoria (3)



MAGNETIZACION DE LAS

ROCAS: REMANENCIA

En presencia de un campo externo variable, la magnetización de las rocas puede contener una magnetización remanente (M_r) que es función de la historia de magnetización a la cual ha estado sometida la muestra. Esta magnetización remanente puede tener diversos orígenes pero en términos simples puede expresarse como una componente vectorial neta que presenta una angularidad relativa con respecto a la magnetización inducida por el campo actual (M_t). La importancia relativa de cada componente se expresa en el **RADIO DE KONIGSBERG : $Q = M_r/M_t$** .

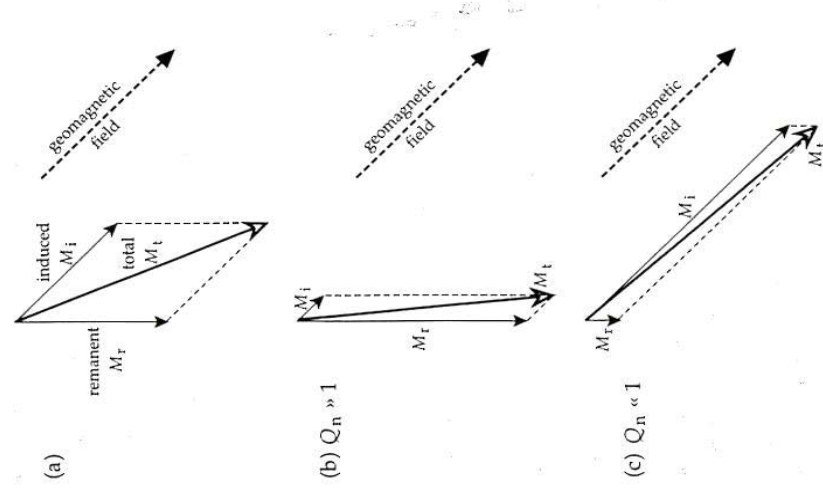
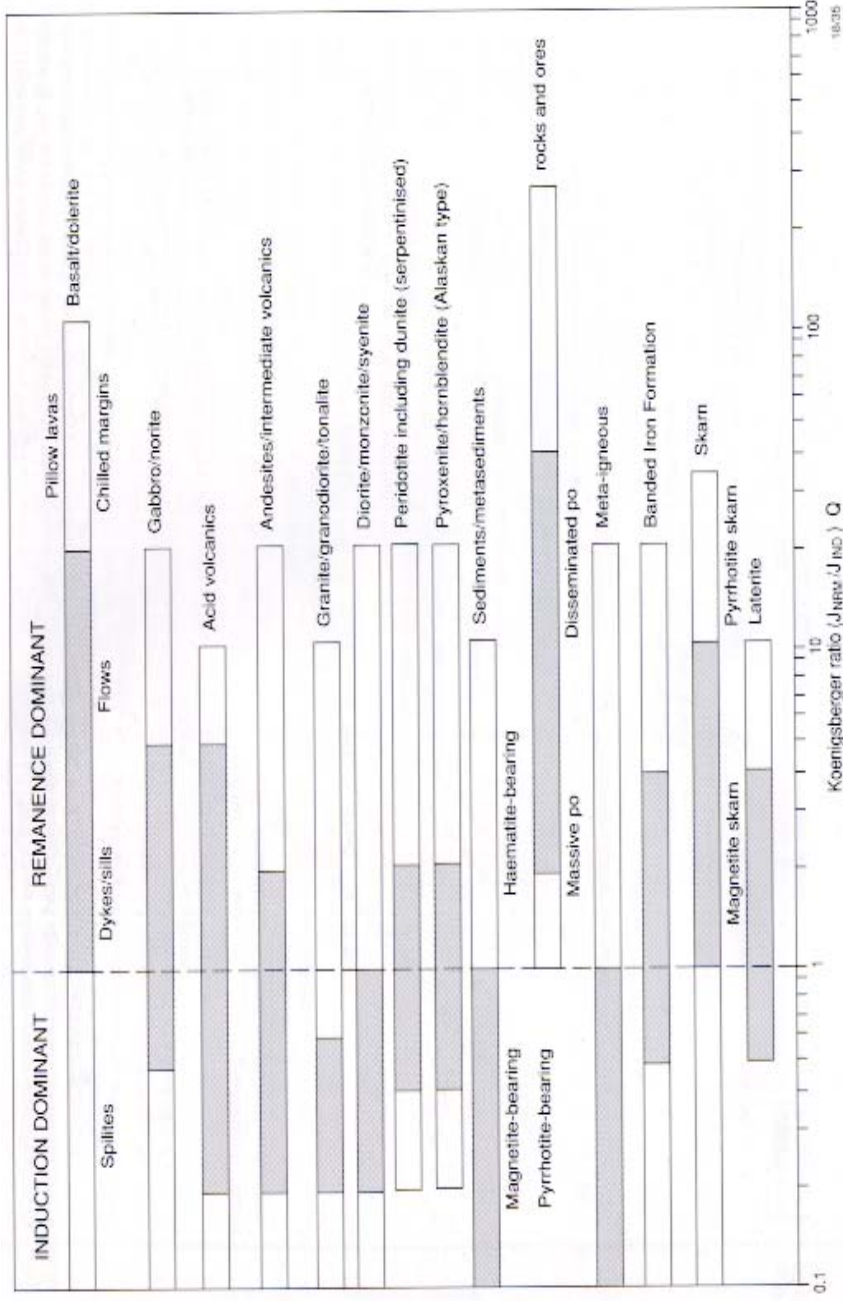


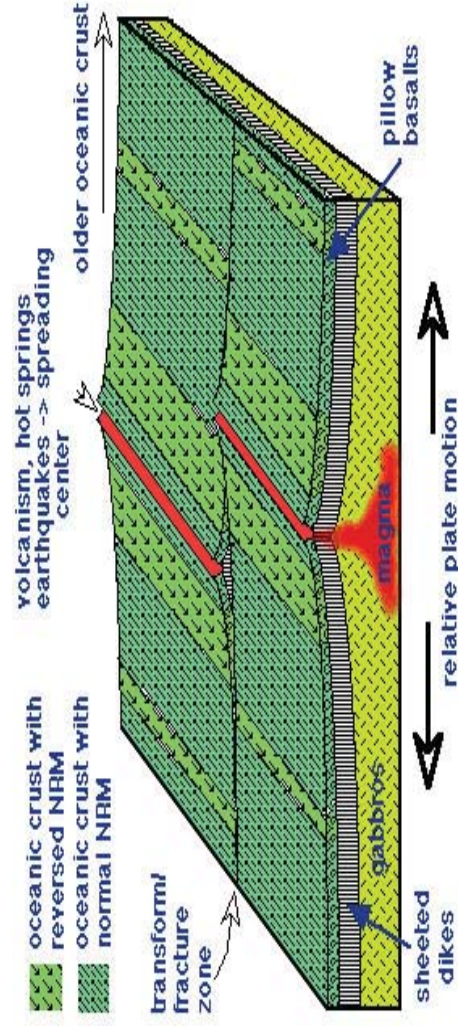
Fig 5.40 The remanent (M_r) induced (M_i) and total (M_t)

MAGNETIZACION DE LAS ROCAS: REMANENCIA



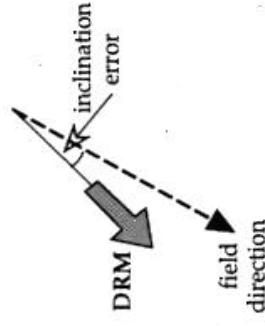
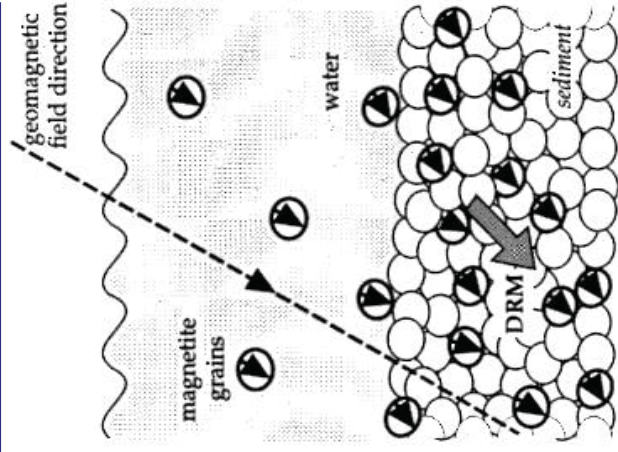
MAGNETIZACION DE LAS ROCAS: TIPOS DE REMANENCIA

TRM: Magnetización Termoremanente. Magnetización adquirida al momento de enfriarse bajo el punto de Curie correspondiente. Esta magnetización es característica de rocas efusivas tipo basaltos oceánicos que se magnetizan en la dirección del campo ambiente al momento de cristalizar en dorsales oceánicas.



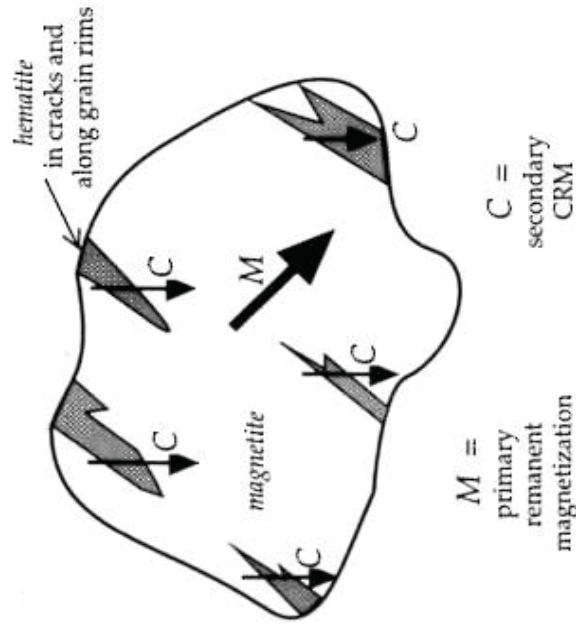
MAGNETIZACION DE LAS ROCAS: TIPOS DE REMANENCIA

DRM: Magnetización Detrítica.
Magnetización adquirida durante los procesos de sedimentación lenta, por ejemplo en arcillas. Los granos de magnetita se orientan según la dirección del campo ambiente al momento de la depositación.



MAGNETIZACION DE LAS ROCAS: TIPOS DE REMANENCIA

CRM: Magnetización Química-remanente. Magnetización adquirida mediante un proceso químico en la diagénesis de rocas sedimentarias y también en ambientes ígneos sometidos a circulación hidrotermal (ej. dorsales oceánicas). También en ambientes metamórficos (ej. Depósitos tipo skarn)



Otros tipos, **VRM:** magnetización viscoremanente en sometimiento a campos externos por un periodo prolongado de tiempo.

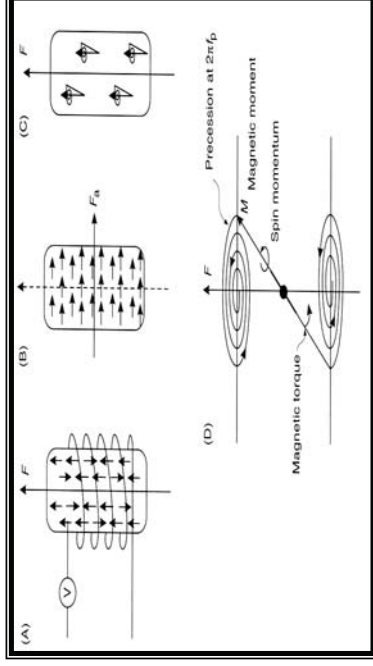
IRM: magnetización remanente al eliminar el campo externo

MAGNETISMO: Instrumental

MAGNETOMETRO GEOMETRICS G-858 PRECESION (VAPORES DE CESIO)

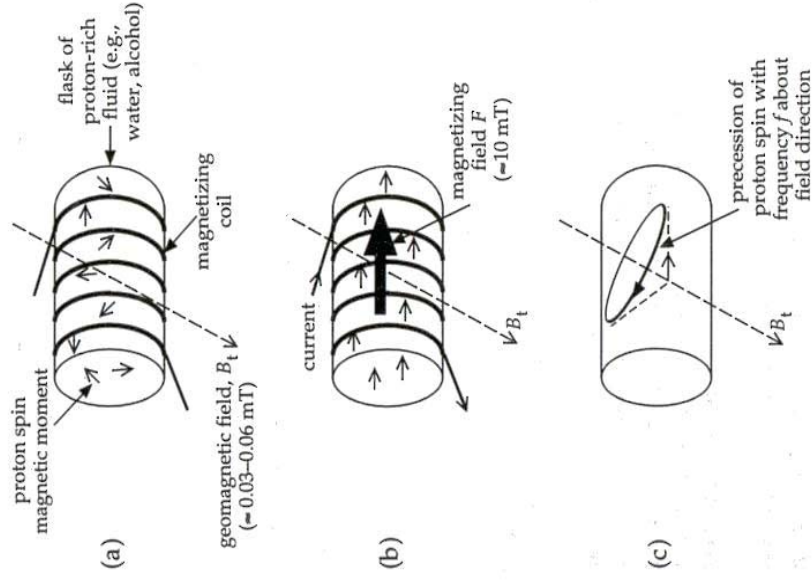


PRINCIPIO FISICO MAGNETOMETROS DE PRECESION



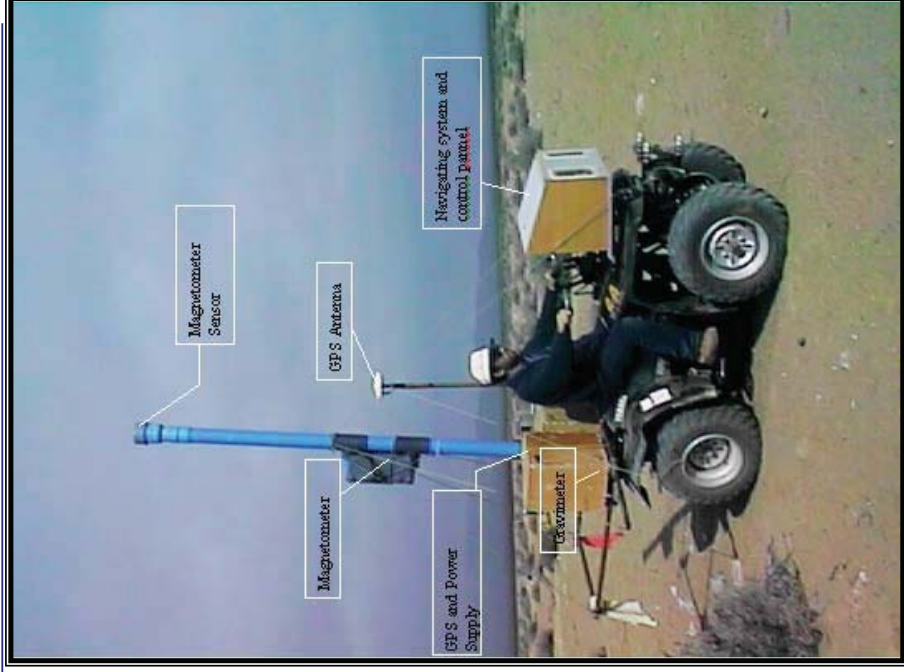
Principio del magnetometro de precesión magnética:

- a) En una bobina con agua destilada se dispone un volumen de protones con una bobina envolvente.
- b) Se energiza la bobina generando un campo magnético intenso en una dirección distinta del campo terrestre.
- c) Al cortar el flujo de corriente por la bobina los protones adquieren un movimiento de precesión en torno a la dirección del campo terrestre con una frecuencia que es proporcional a la intensidad del campo (50 a 100 veces la amplitud de las anomalías observadas)



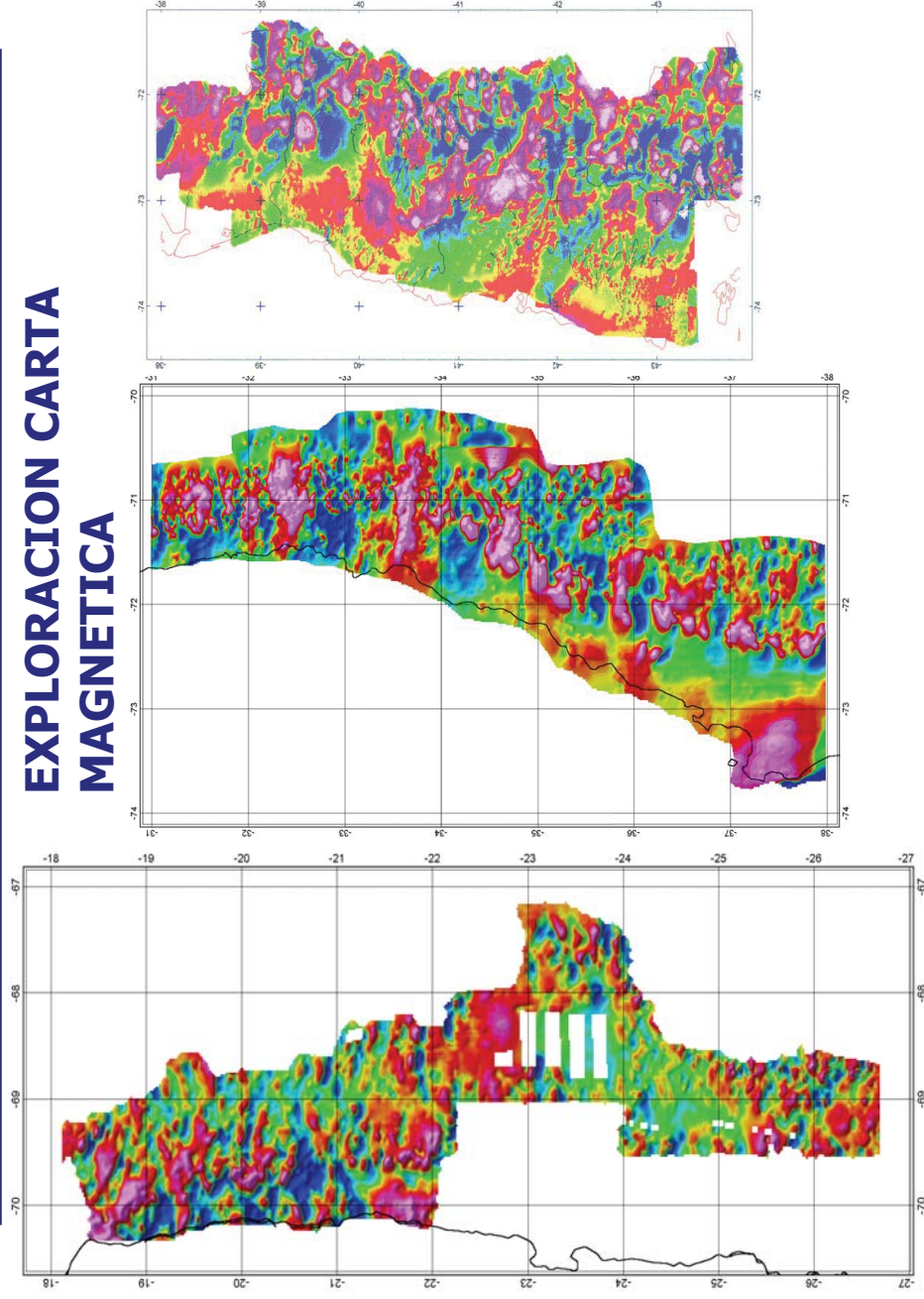
MÓDULO I.- Introducción

MAGNETISMO: Instrumental

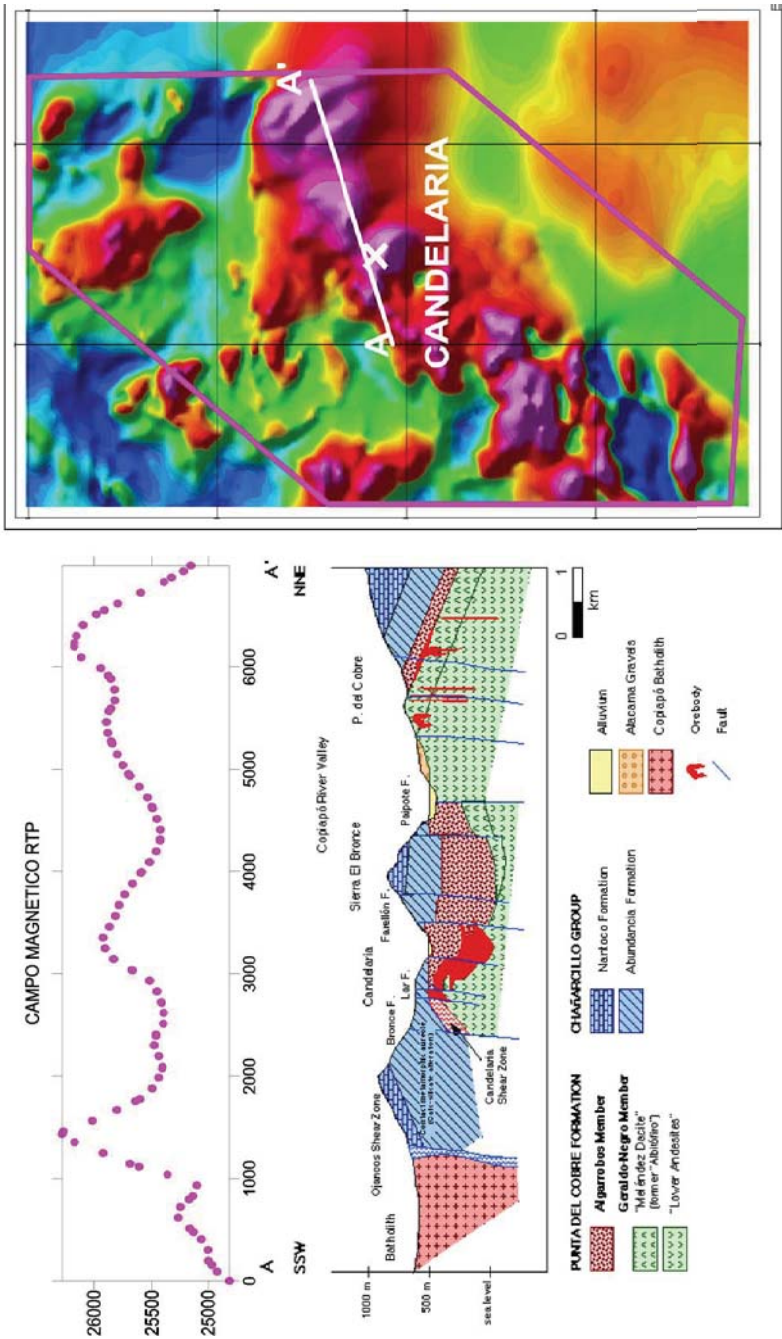


MÓDULO II.- GEOFISICA DE POTENCIAL DESCRIPTIVA

EXPLORACION CARTA MAGNETICA



SECCION GEOLOGICA V/S RTP



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 :

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

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:

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

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

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

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:

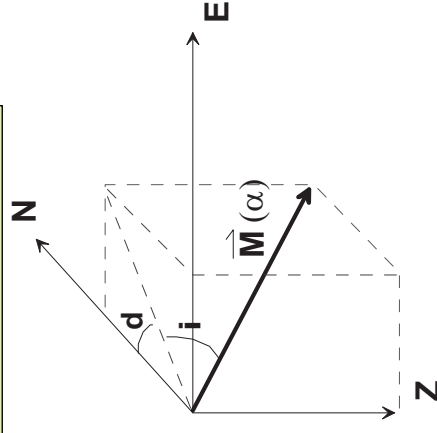
$$A(r) = -2M(r') \cdot \nabla \int_s \log\left(\frac{1}{|r - r'|}\right) ds'$$

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

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

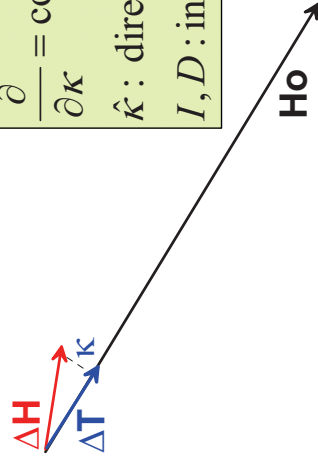
Donde α es la dirección de magnetización del cuerpo magnetizado:

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



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

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.



$$H = H_0 + \Delta H, \quad \text{pero } \Delta H \ll H_0$$

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

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

$\hat{\kappa}$: dirección del campo magnético terrestre,

I, D : inclinación y declinación del campo magnético

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

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

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:

$$M = M_0 + \kappa' F_0$$

EJEMPLO: MODELACION MAGNETICA DE DIQUE VERTICAL

En el capítulo de gravedad se demostró que la integral de volumen:

$$\int_V \frac{1}{|r - r_o|} dv$$

Puede expresarse como una integral de superficie bajo el supuesto que el cuerpo presenta simetría cilíndrica (se extiende infinitamente en dirección del rumbo):

$$\int_V \frac{1}{|r - r_o|} dv = 2 \int_S \log\left(\frac{1}{|r - r_o|}\right) ds$$

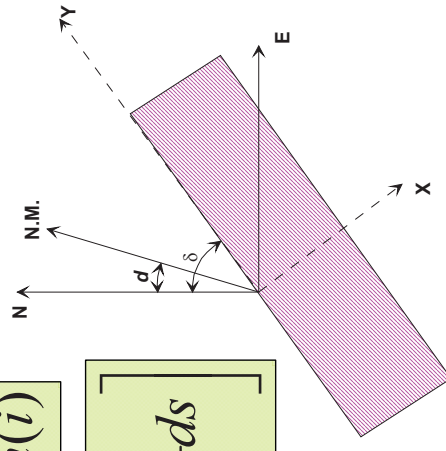
En consecuencia el potencial magnético en dos dimensiones se expresa como:

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

$$A(r_o) = -2M \left[\alpha_x \frac{\partial}{\partial x} \int_S \log\left(\frac{1}{|r - r_o|}\right) ds + \alpha_z \frac{\partial}{\partial z} \int_S \log\left(\frac{1}{|r - r_o|}\right) ds \right]$$

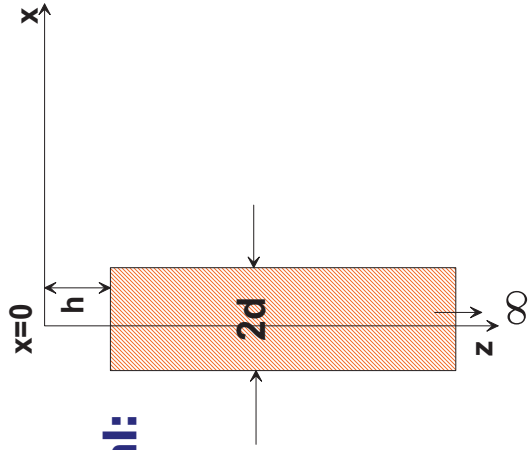
$$\alpha_x : \cos(i) \cdot \cos(d - \delta); \quad \alpha_z : \sin(i)$$

$$A(r_o) = -2M \left[\alpha_x \int_S \frac{x}{|r - r_o|^2} ds + \alpha_z \int_S \frac{z}{|r - r_o|^2} ds \right]$$



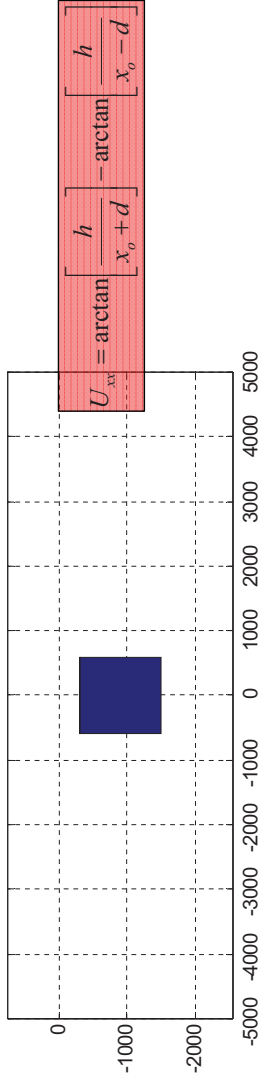
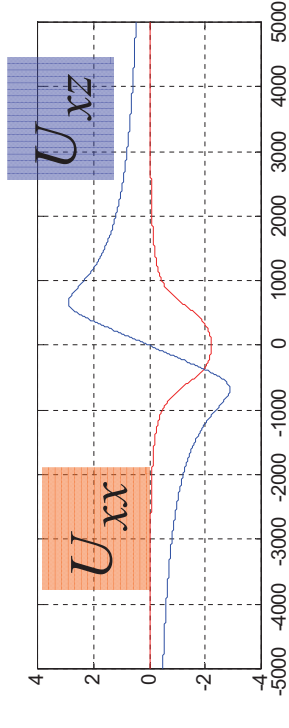
Evaluando estas integrales para un punto x distinto del origen:

$$U_{xx} = \int_s \frac{z^2 - (x - x_o)^2}{[(x - x_o)^2 + z^2]^2} ds; \quad U_{xz} = \int_s \frac{-2 \cdot (x - x_o) \cdot z}{[(x - x_o)^2 + z^2]^2} ds$$

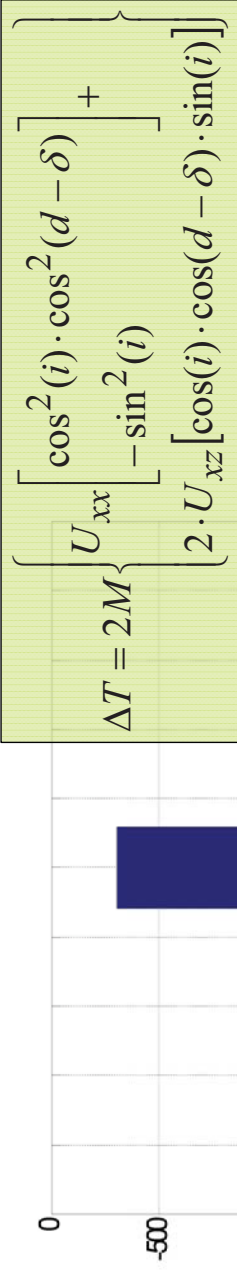
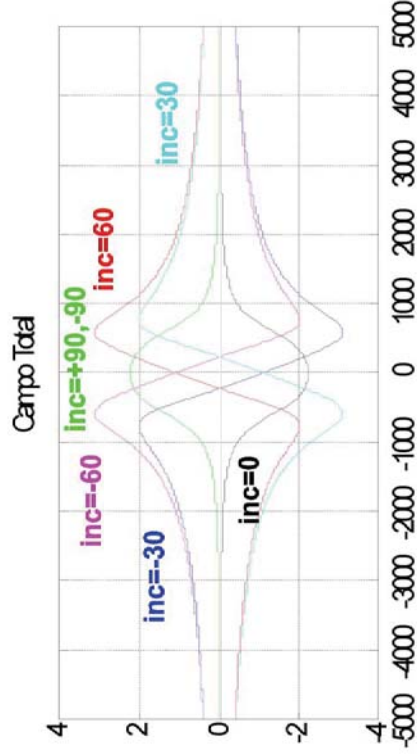


Para una geometría correspondiente a un dique vertical:

$$U_{xz}(x_o) = \frac{1}{2} \log \frac{(d + x_o)^2 + h^2}{(-d + x_o)^2 + h^2}$$

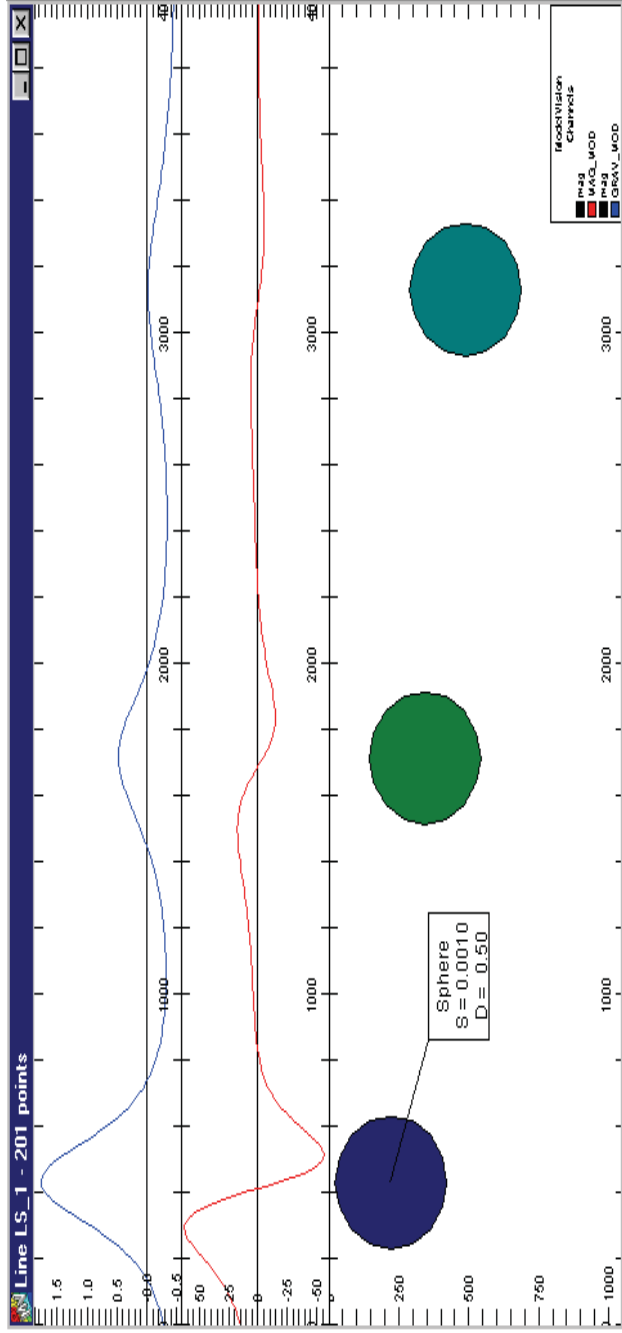


MÓDULO IV.- Modelación directa



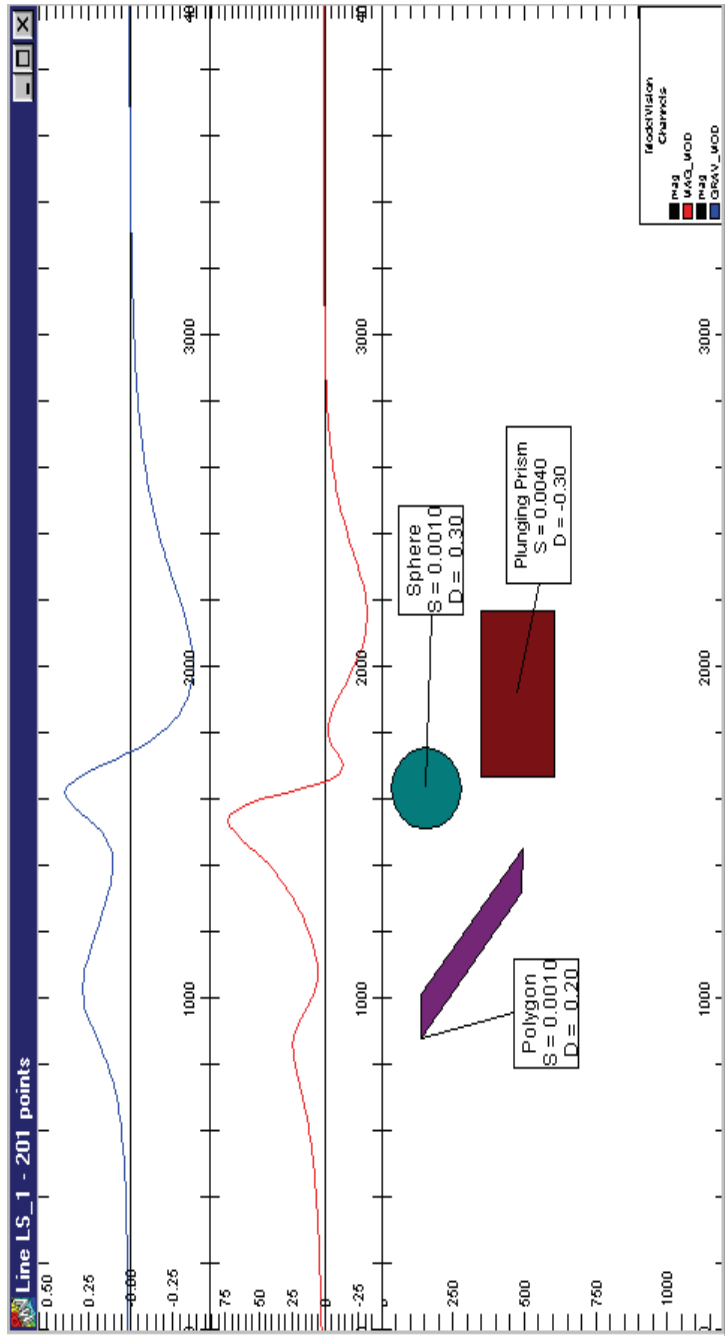
MÓDULO IV.- Modelación directa

- ANOMALIA MAGNÉTICA DIPOLAR
- ANOMALIA GRAVIMÉTRICA MONOPOLAR CENTRADA EN EL CUERPO
- DISMINUCIÓN DE AMPLITUD CON EL CUADRO DE LA DISTANCIA EN GRAVEDAD Y EL CUBO DE LA DISTANCIA EN MAGNETISMO
- AUMENTO DE LONGITUD DE ONDA A MAYOR PROFUNDIDAD



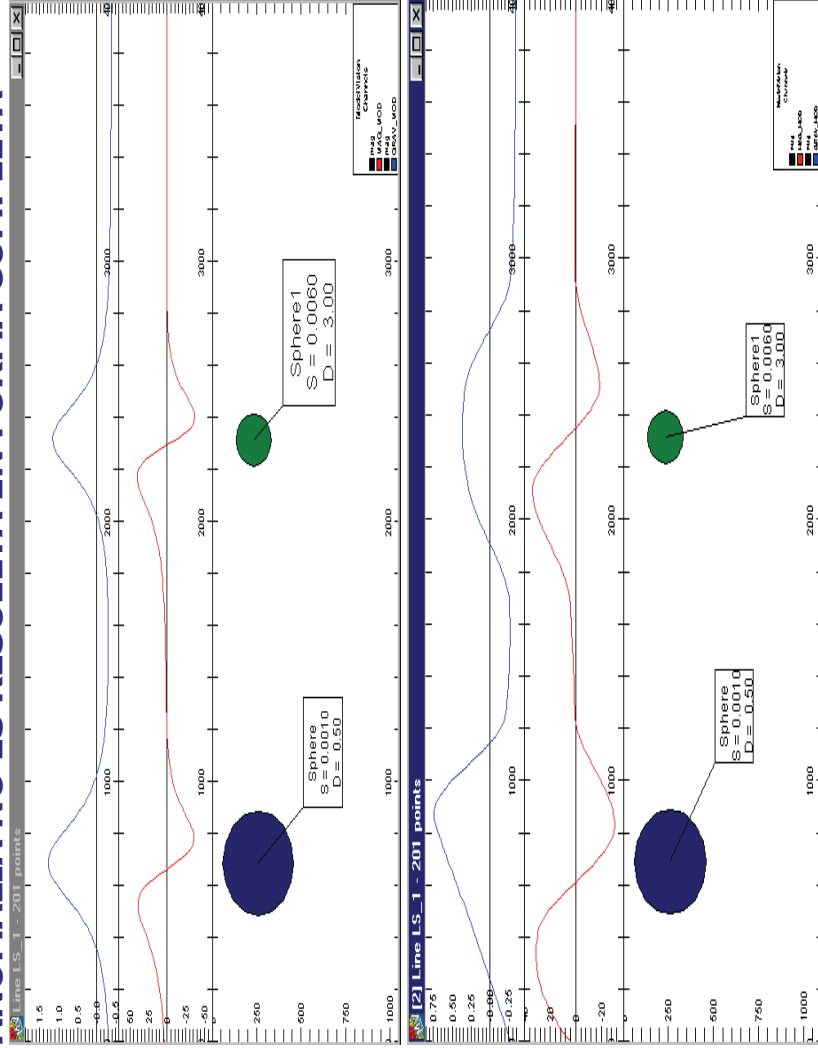
MÓDULO IV.- Modelación directa

ANOMALIA RESULTANTE DE LA SUPERPOSICION DE CUERPOS ANOMALOS ES IGUAL A LA SUMA DE LOS EFECTOS INDIVIDUALES



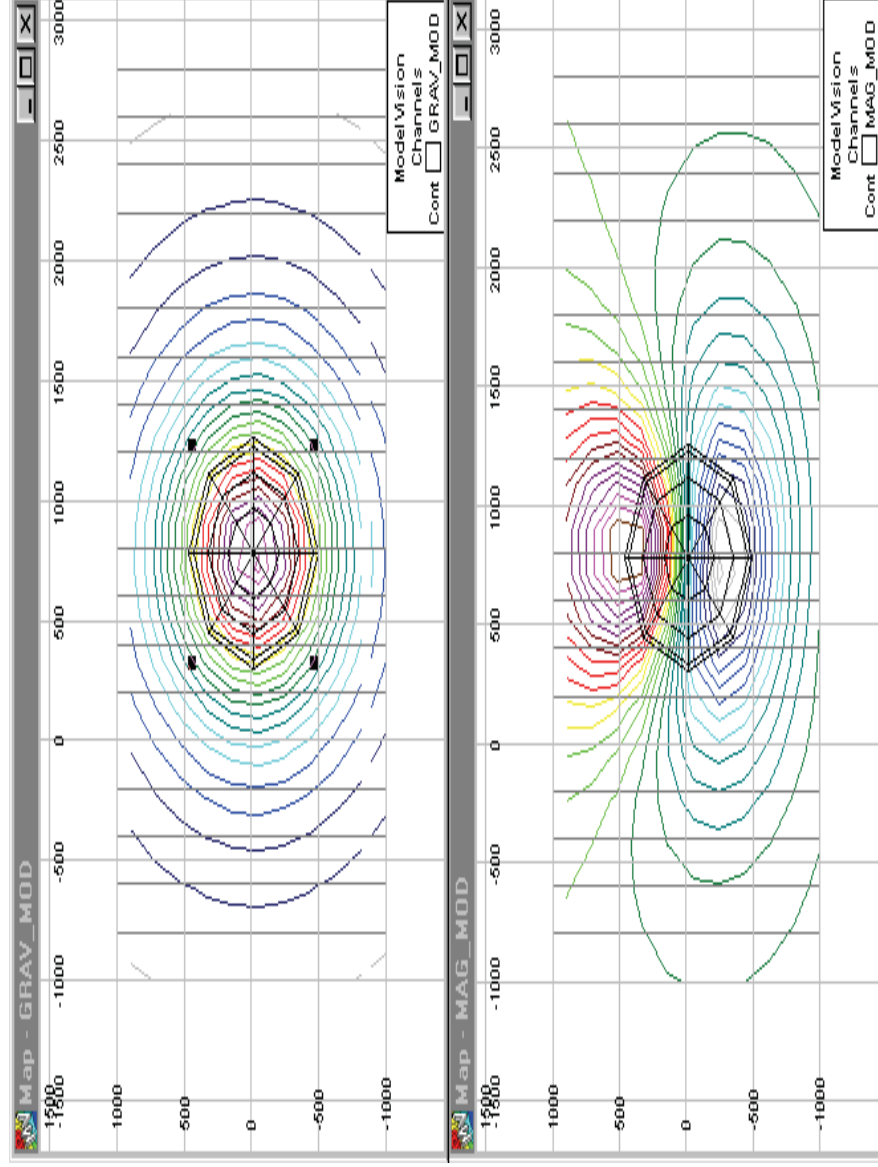
MÓDULO IV.- Modelación directa

TEORIA DE MUESTREO "ALIASING": AL MUESTREAR LA ANOMALIA CON UN INTERVALO INFERIOR AL TAMAÑO DEL CUERPO LA ANOMALIA NO ES RESUELTA EN FORMA COMPLETA



MÓDULO IV.- Modelación directa

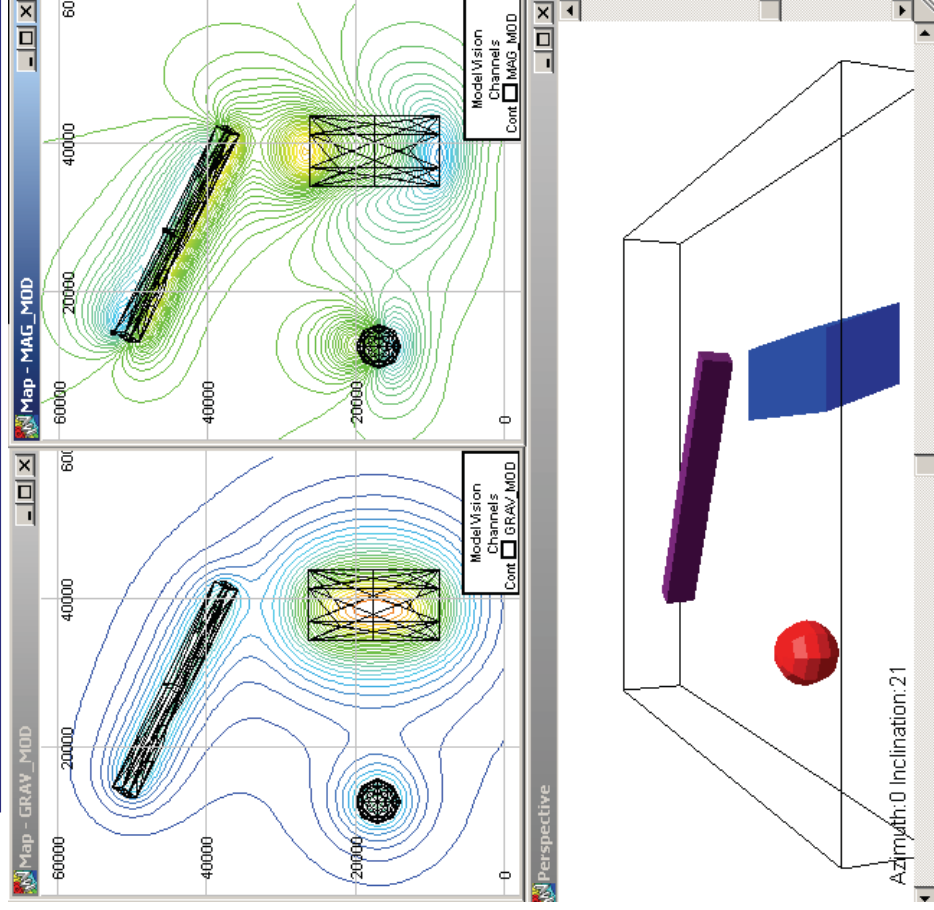
•CUERPOS TRIDIMENSIONALES:



MÓDULO V.- ANALISIS EN DOMINIO DE FRECUENCIAS

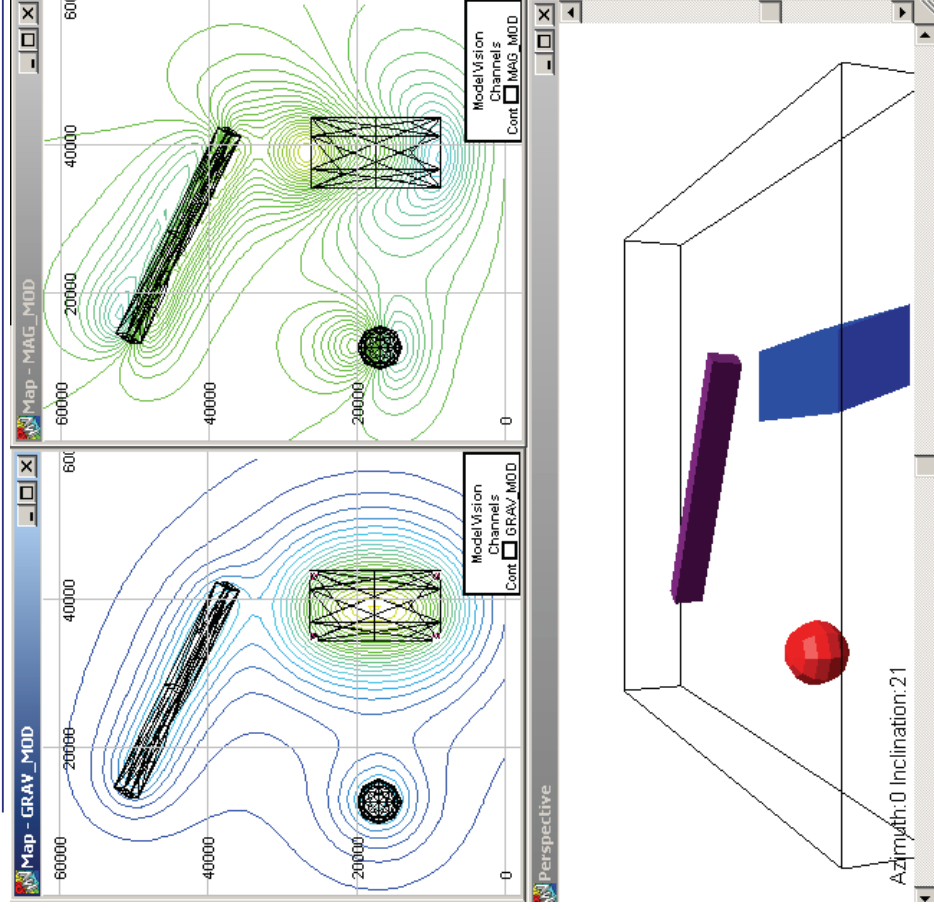
PROCESO DE DATOS

MÓDULO V.- ANALISIS EN DOMINIO DE FRECUENCIAS



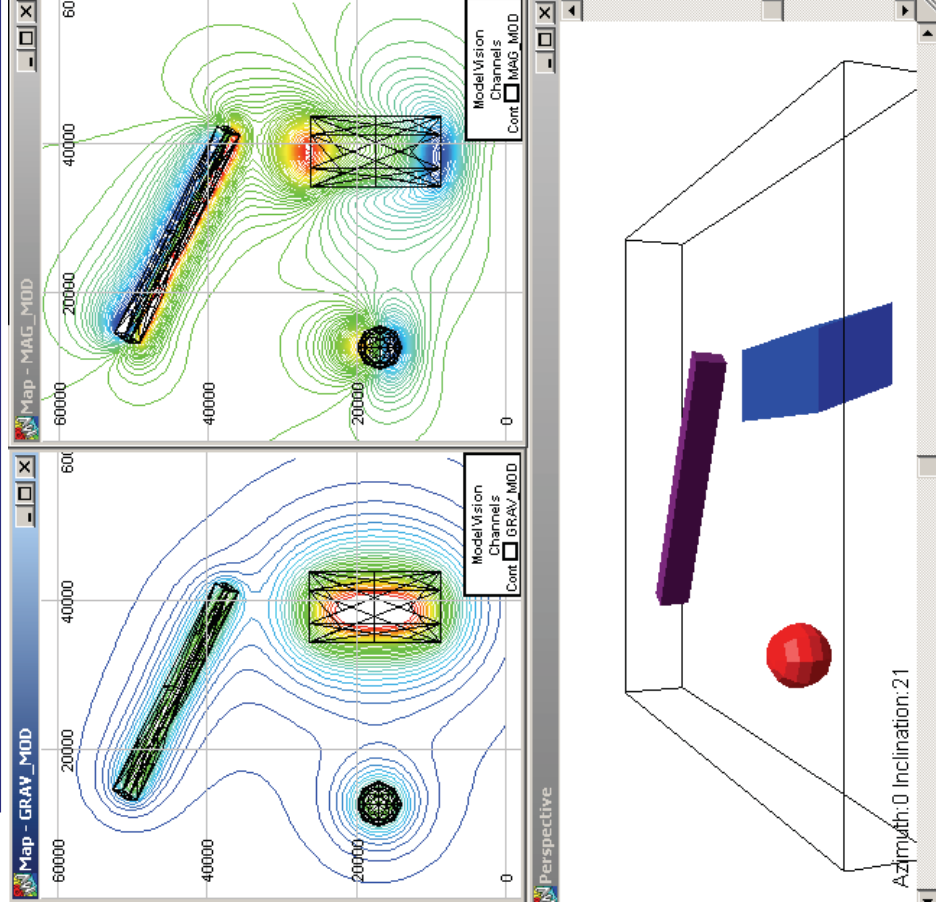
**EJEMPLO DE
CONTINUACI
ON SOBRE
CUERPOS
TEORICOS**

MÓDULO V.- ANALISIS EN DOMINIO DE FRECUENCIAS



**EJEMPLO DE
CONTINUACI
ON SOBRE
CUERPOS
TEORICOS:
CONTINUAD
O 1000M
ARRIBA**

EJEMPLO DE CONTINUACION SOBRE CUERPOS TEORICOS: CONTINUACION O 1000M ABAJO



Reducción al Polo

La relación de Poisson establece:

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

Donde $A \equiv$ Pot. Magnético; $U \equiv$ Pot. Gravitatorio; $\alpha \equiv$ Dir. Mag. Fuente

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

$$(1) \quad T(r) = \frac{M}{G\rho} \frac{\partial^2}{\partial t \partial \alpha} U(r)$$

con $T \equiv$ Campo mag. cuerpo anómalo

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

$$(2) \quad T_{\text{polo}}(r) = \frac{M}{G\rho} \frac{\partial^2}{\partial z^2} U(r)$$

$$\hat{t} = \hat{a}\hat{i} + \hat{b}\hat{j} + \hat{c}\hat{k}$$

$$\alpha = \hat{\alpha}\hat{i} + \hat{\beta}\hat{j} + \hat{\gamma}\hat{k}$$

Reducción al Polo

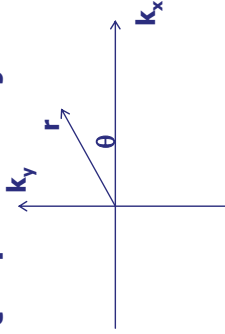
Tomando FT a las ecuaciones (1) y (2) e igualando $FT[U(r)]$, obtenemos:

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

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 ($I < 20^\circ$) ?



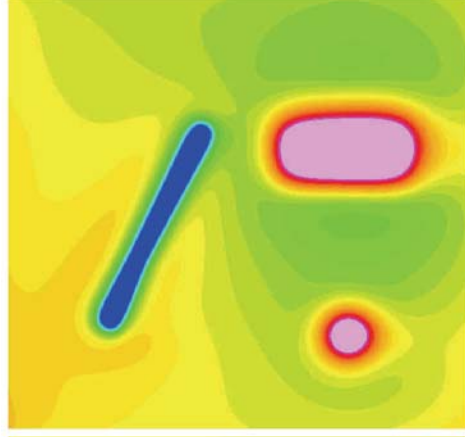
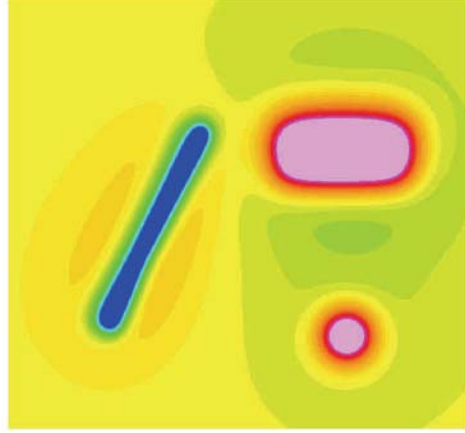
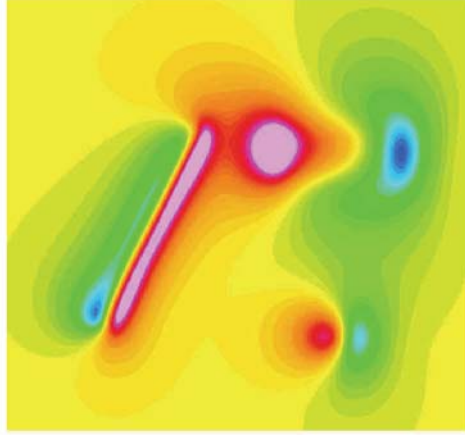
En polares $k_x = r \cos(\theta)$; $k_y = r \sin(\theta)$

REDUCCION AL POLO

OBSERVACION

OBSERVACION
I=90

REDUCCION AL
POLO

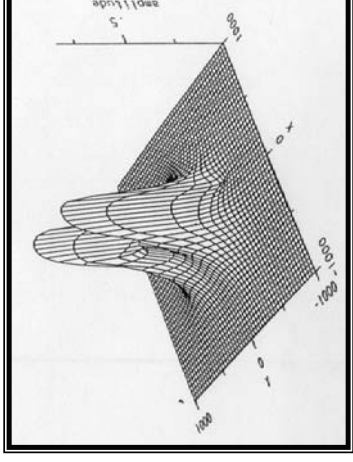
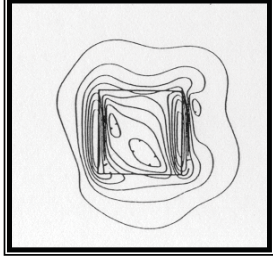
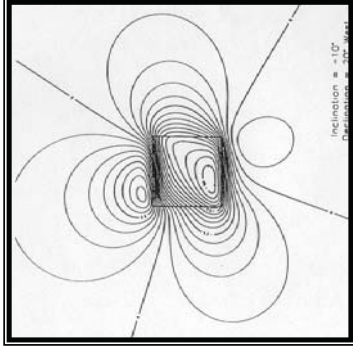


MÓDULO V.- ANALISIS EN DOMINIO DE FRECUENCIAS

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.



MÓDULO V.- ANALISIS EN DOMINIO DE FRECUENCIAS

Señal Analítica

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, que pueden ser fácilmente calculados en el dominio de Fourier.

El ruido presente en los datos observados, es amplificado al calcular la "Señal Analítica" (recordar que las derivadas equivalen a filtros pasa-alto), por lo que es recomendable filtrar las altas frecuencias antes de calcular AS.

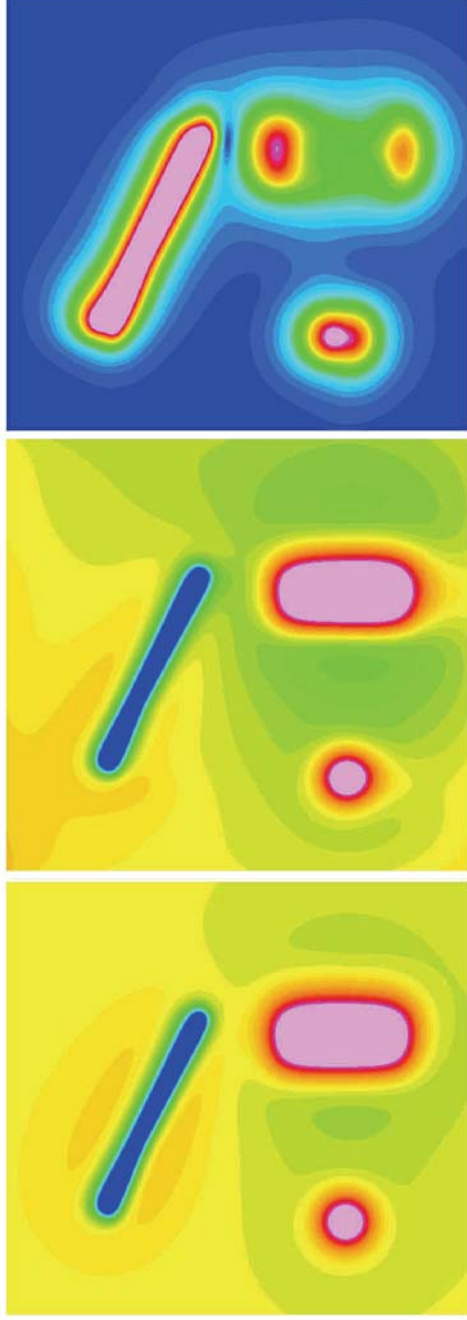
"An Analytic Signal Approach to the Interpretation of Total Field Magnetic Anomalies". Shuang Qin., Geophysical Prospecting Vol.42 pp.665-675

REDUCCION AL POLO VS SEÑAL ANALITICA

OBSERVACION
I=90

REDUCCION
AL POLO

SEÑAL
ANALITICA



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:

$$TF \left[\frac{d^n}{dx^n} f(x) \right] = (ik_x)^n TF[f(x)]$$

Si estas derivadas incluyen la dirección z hay que tener presente la relación:

$$\nabla^2 T = 0 = \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{d^2 T}{dy^2} + \frac{d^2 T}{dz^2}$$

De tal manera que las derivadas c/r corresponden a:

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

PLANOS DE DERIVADAS EN MAGNETISMO

POLO 1a DER.X

POLO 1a DER.Y

POLO 2a DER.Z

