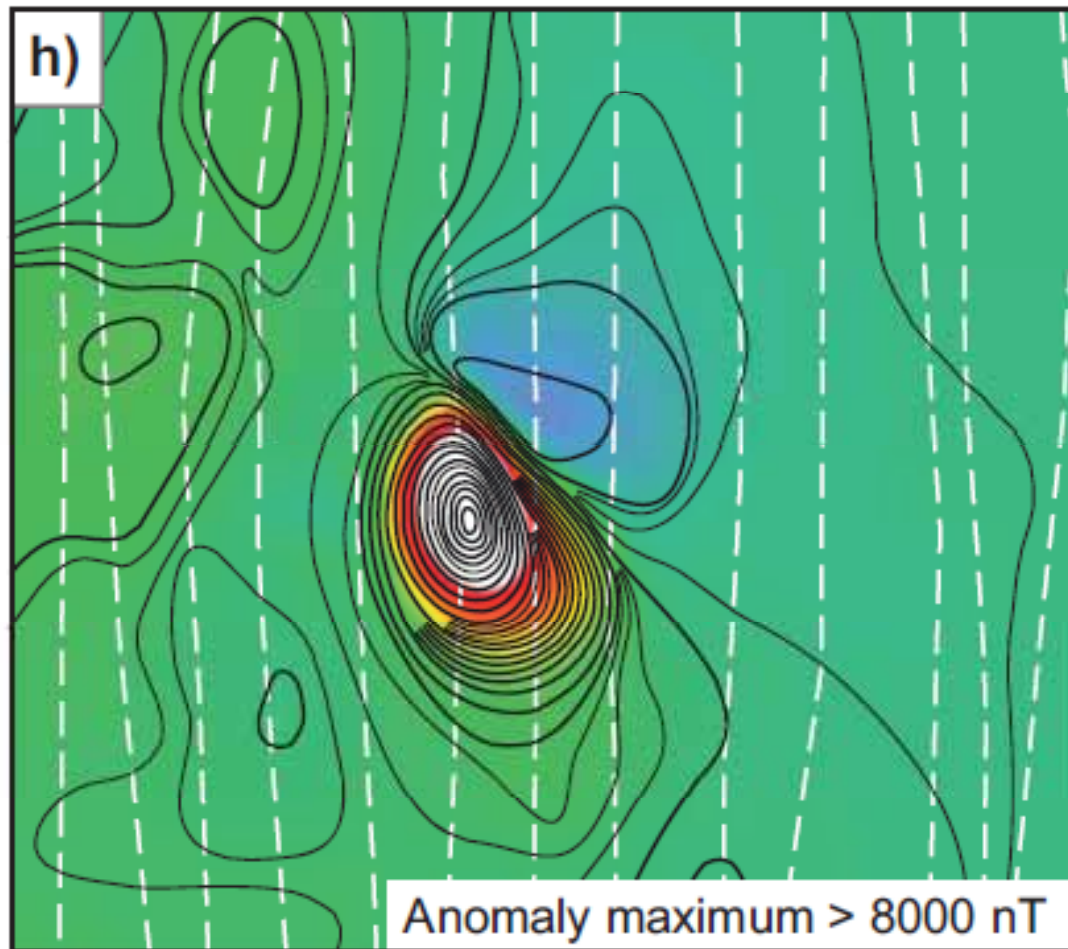
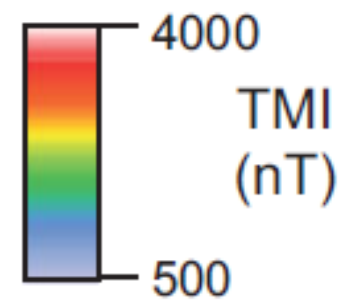


# Magnetometría

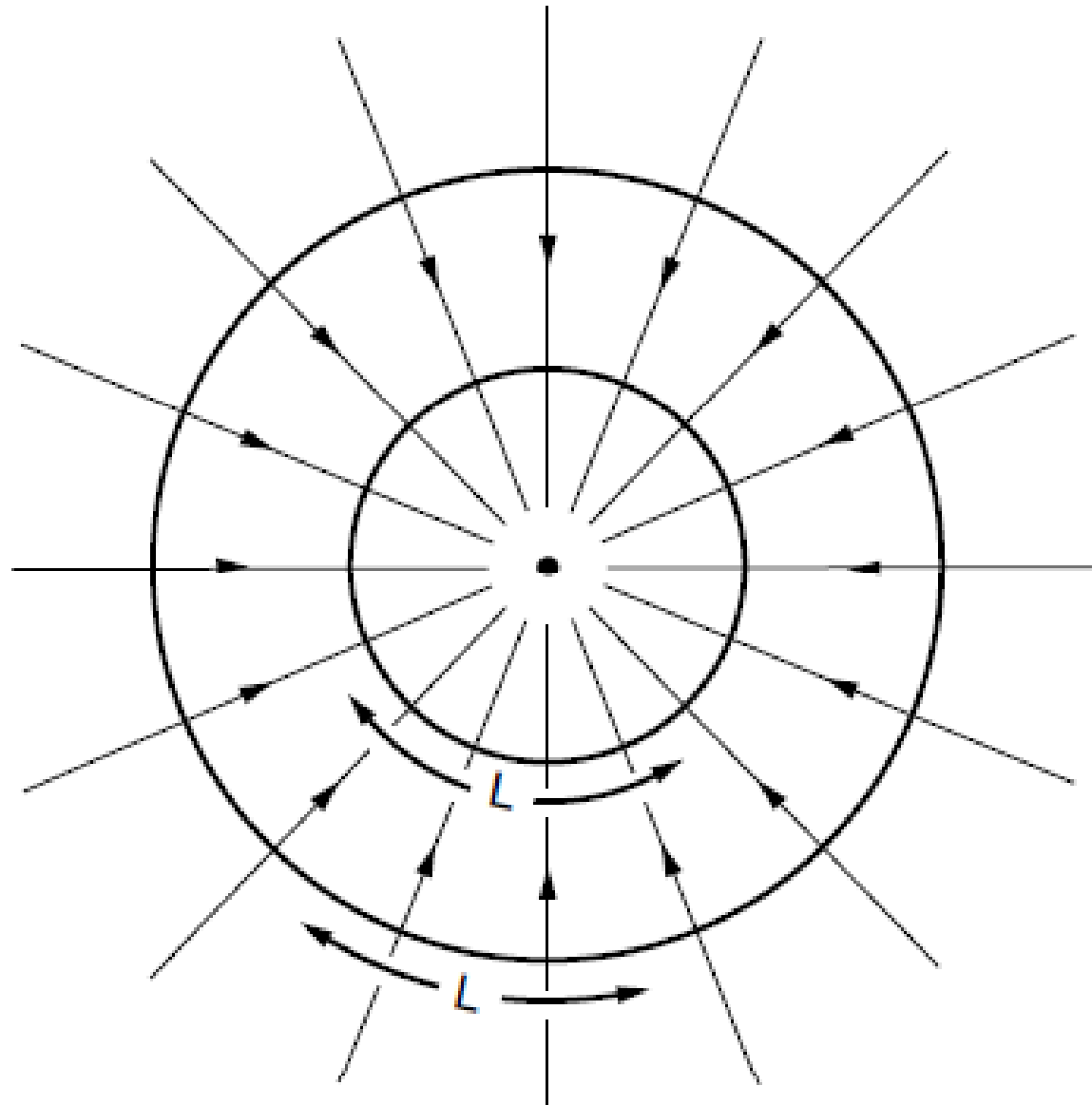


0 1  
Kilometre



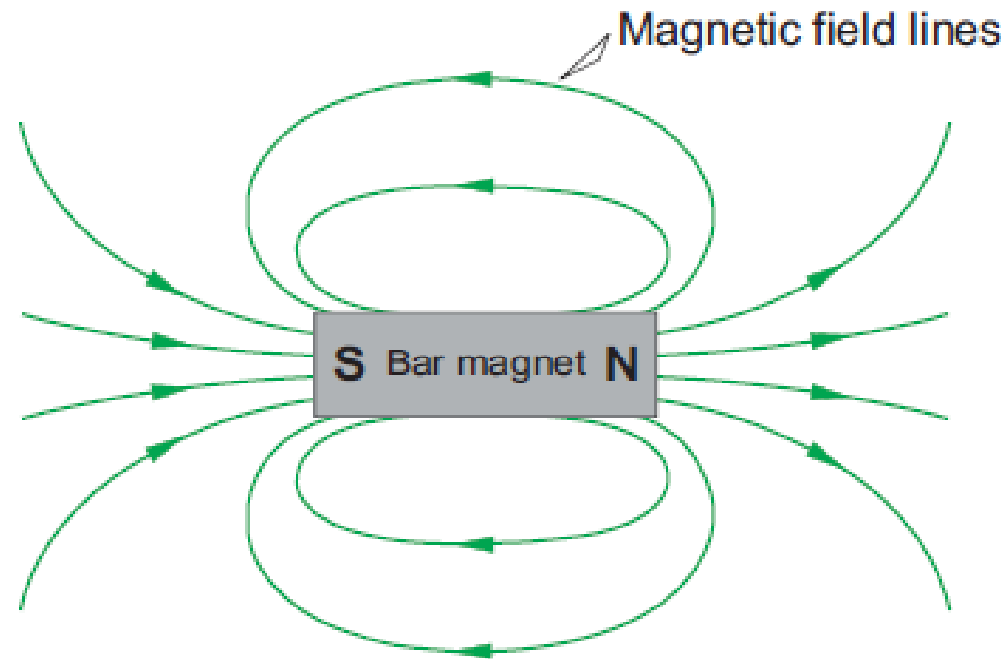
# Magnetometría

- Dipolo magnético
- Materiales magnéticos naturales
- Campo magnético terrestre
- Remanencia magnética
- Técnicas de adquisición, procesamiento e interpretación

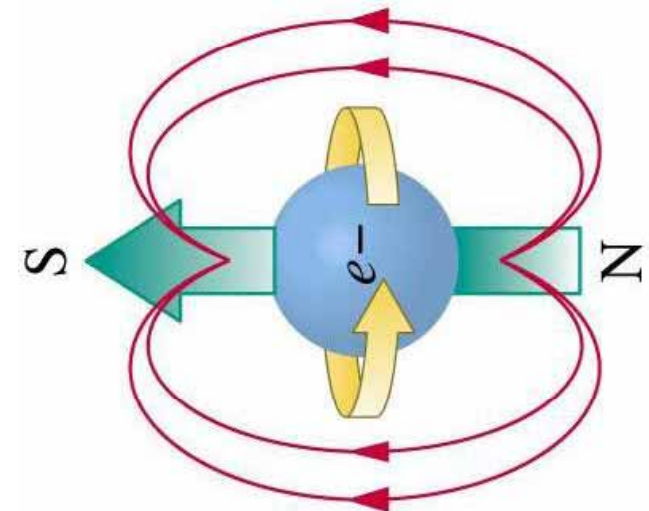
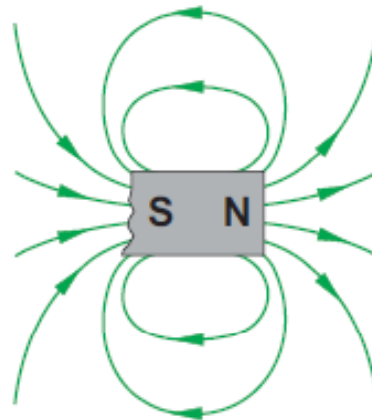
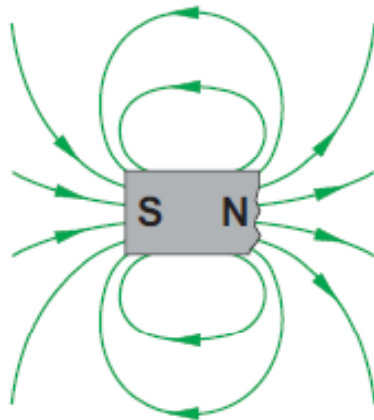


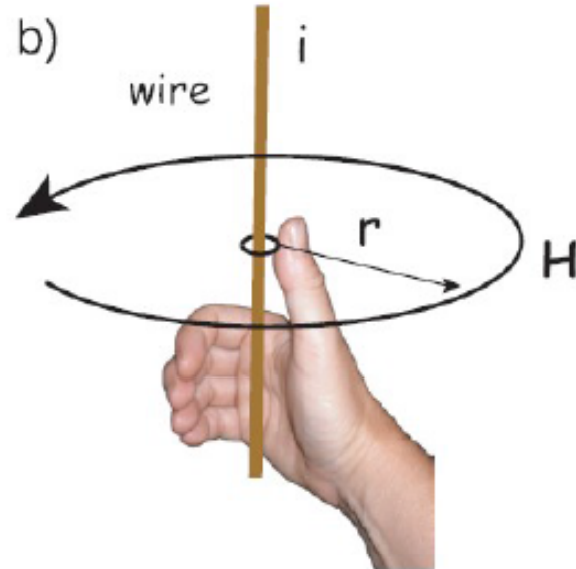
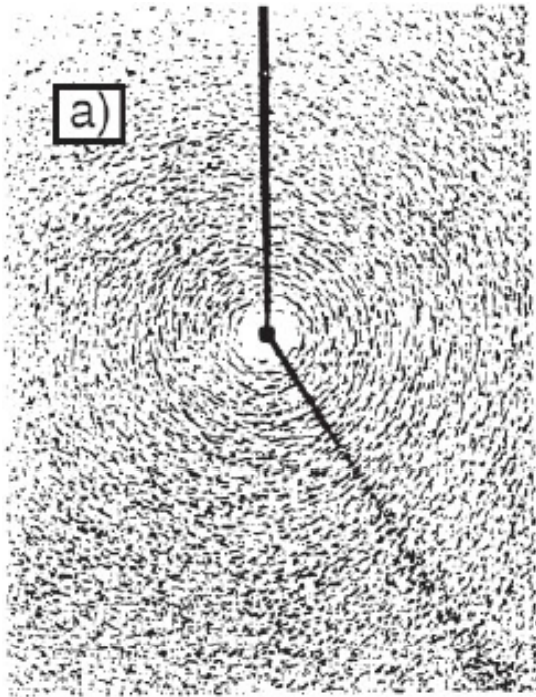
Líneas de fuerza y equipotenciales de un campo monopolar  
(ej. gravitatorio)

# Dipolo magnético



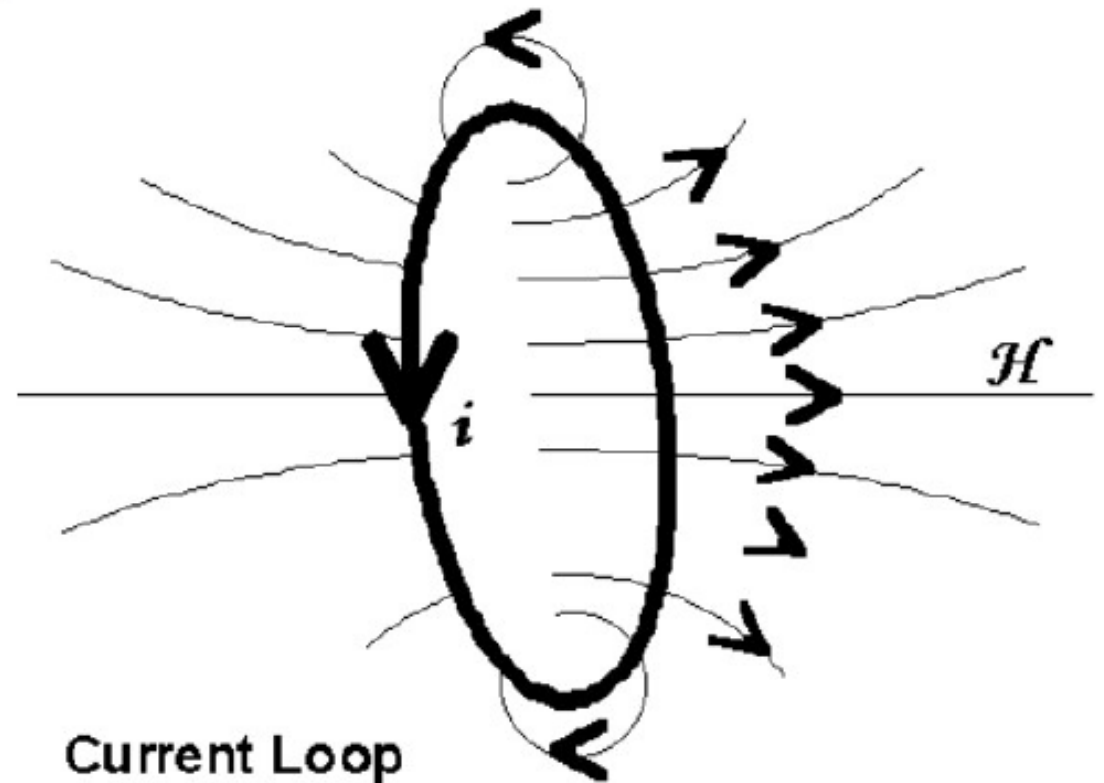
Dos “cargas” o “masas” magnéticas de igual intensidad y signo opuesto



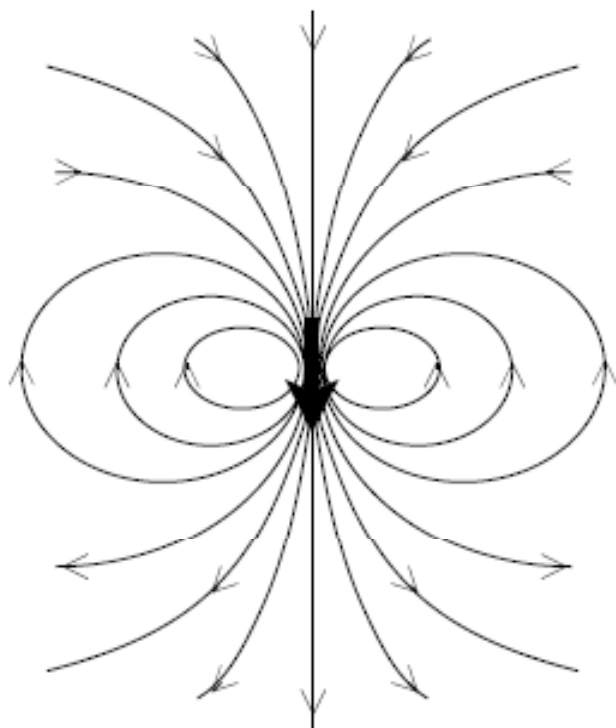


Corriente en un conductor rectilíneo genera un campo magnético concéntrico

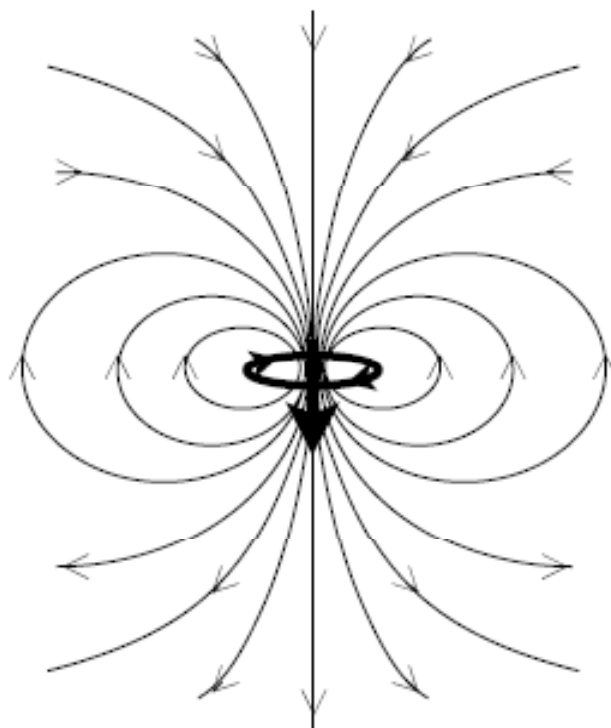
Corriente circular en una espira genera un campo magnético a lo largo de su eje



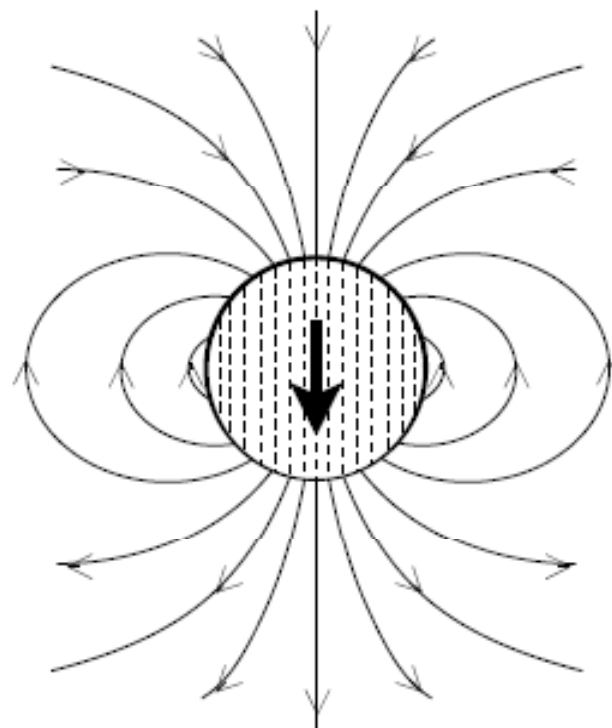
Current Loop



Imán

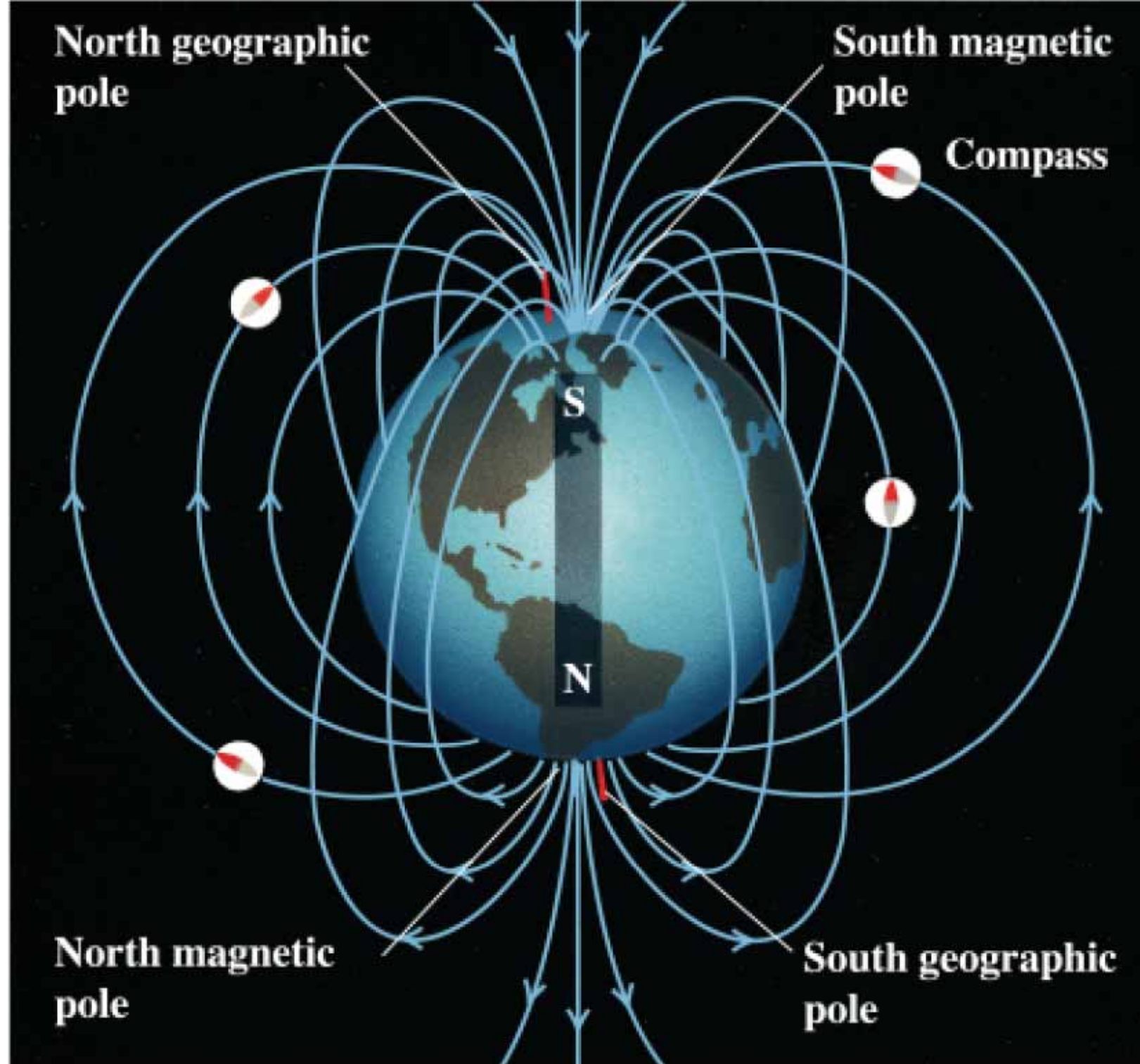


Espira conductora



Esfera  
magnetizada  
uniformemente





$$F = \frac{1}{\mu} \frac{P_0 P_1}{r^2}$$

**Teoría clásica:  
Ley de Coulomb**

La expresión adopta signo positivo para polos de igual signo (repulsión)  
Y signo negativo para polos de distinto signo (atracción)

*Convención: polo positivo es el que es atraído hacia el polo Norte terrestre*

Campo magnetizante, o intensidad de campo magnético:

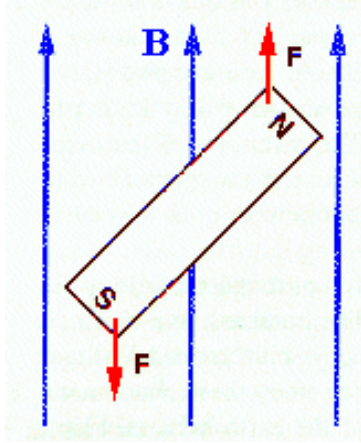
Fuerza por unidad de polo

$$H = \pm \frac{P}{r^2}$$

**Unidades: Oersted (Oe)**



## Teoría clásica: Ley de Coulomb



Momento magnético del dipolo

$$M = 2lP$$

Unidades: emu

Magnetización: momento por unidad de volumen

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

Unidades: emu cm<sup>-3</sup>

## Teoría electromagnética:

**Ley de Biot-Savart:** Toda corriente eléctrica genera un campo magnético. En un conductor rectilíneo, las líneas de campo son concéntricas al conductor

Para una espira circular de radio  $r$ , por la que circula una corriente  $I$ , el campo magnético  $H$  en el centro de la espira es:

$$H = \frac{I}{2 \pi r}$$

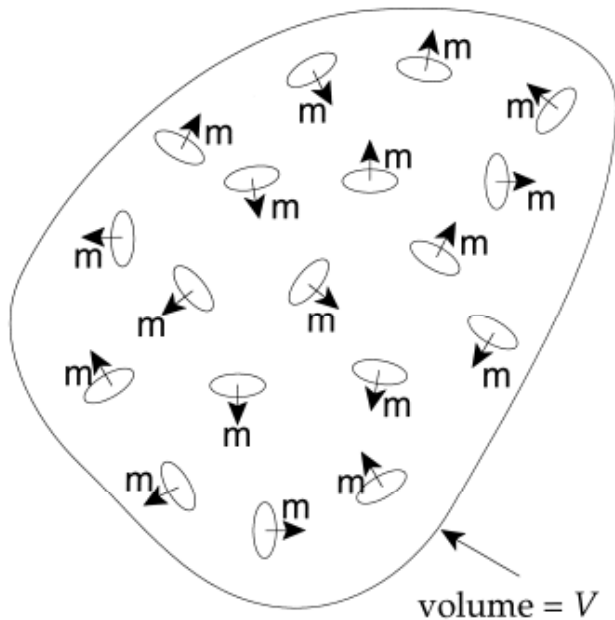
**Unidades: A m<sup>-1</sup>**

## Teoría electromagnética:

Para una espira circular de radio  $r$ , por la que circula una corriente  $I$ , el momento magnético  $M$  es:

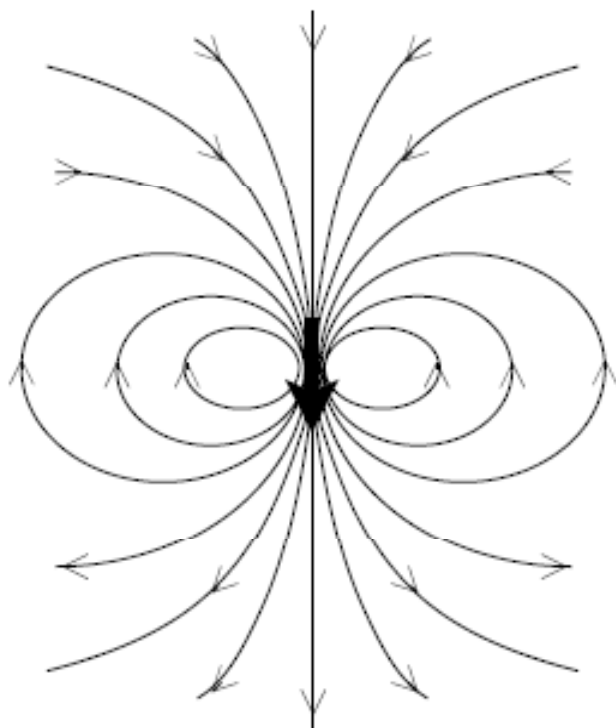
$$M = I \pi r^2 \quad \text{Unidades: A m}^2$$

Magnetización: momento por  
unidad de volumen

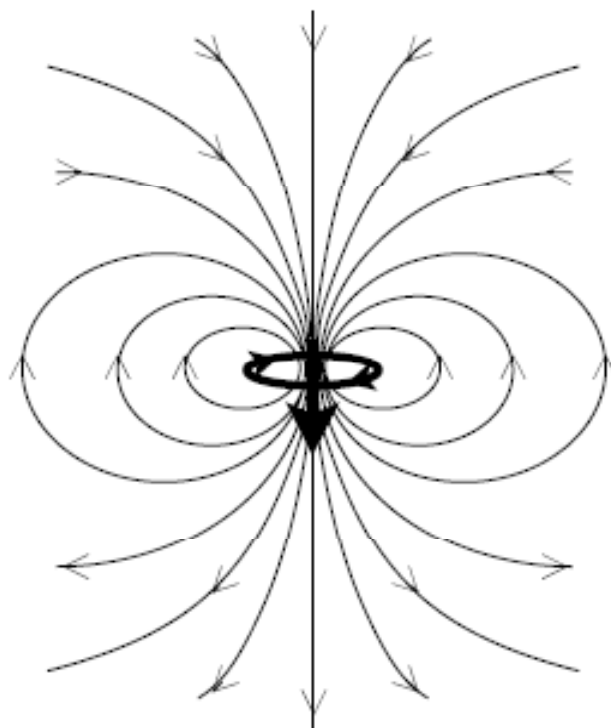


$$J = \frac{M}{V}$$

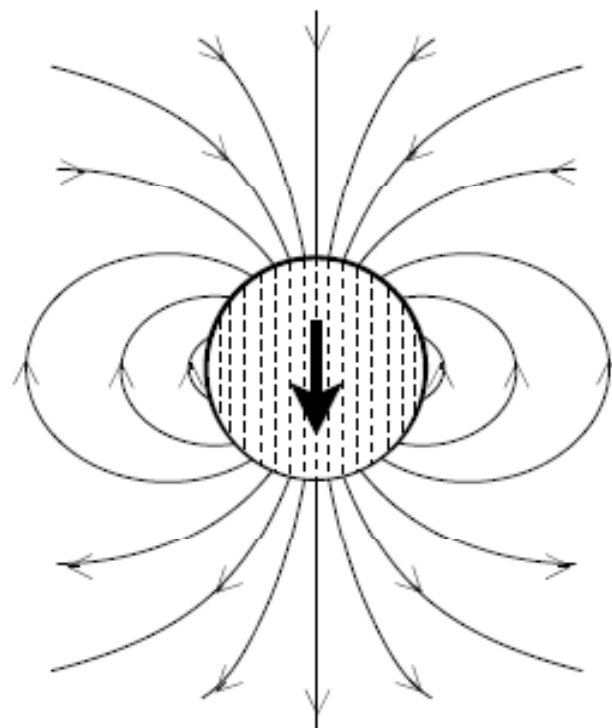
Unidades: A m<sup>-1</sup>



Imán



Espira conductora



Esfera  
magnetizada  
uniformemente

## Densidad de flujo magnético, o inducción magnética

$$B = \mu H$$

$\mu$ : permeabilidad magnética

En SI, unidades  $\text{Wb A}^{-1} \text{m}^{-1}$

Unidades de B,  $\text{Wb m}^{-2}$ : Tesla (T)

En cgs, permeabilidad  
adimensional

Unidades de B, Gauss (G)

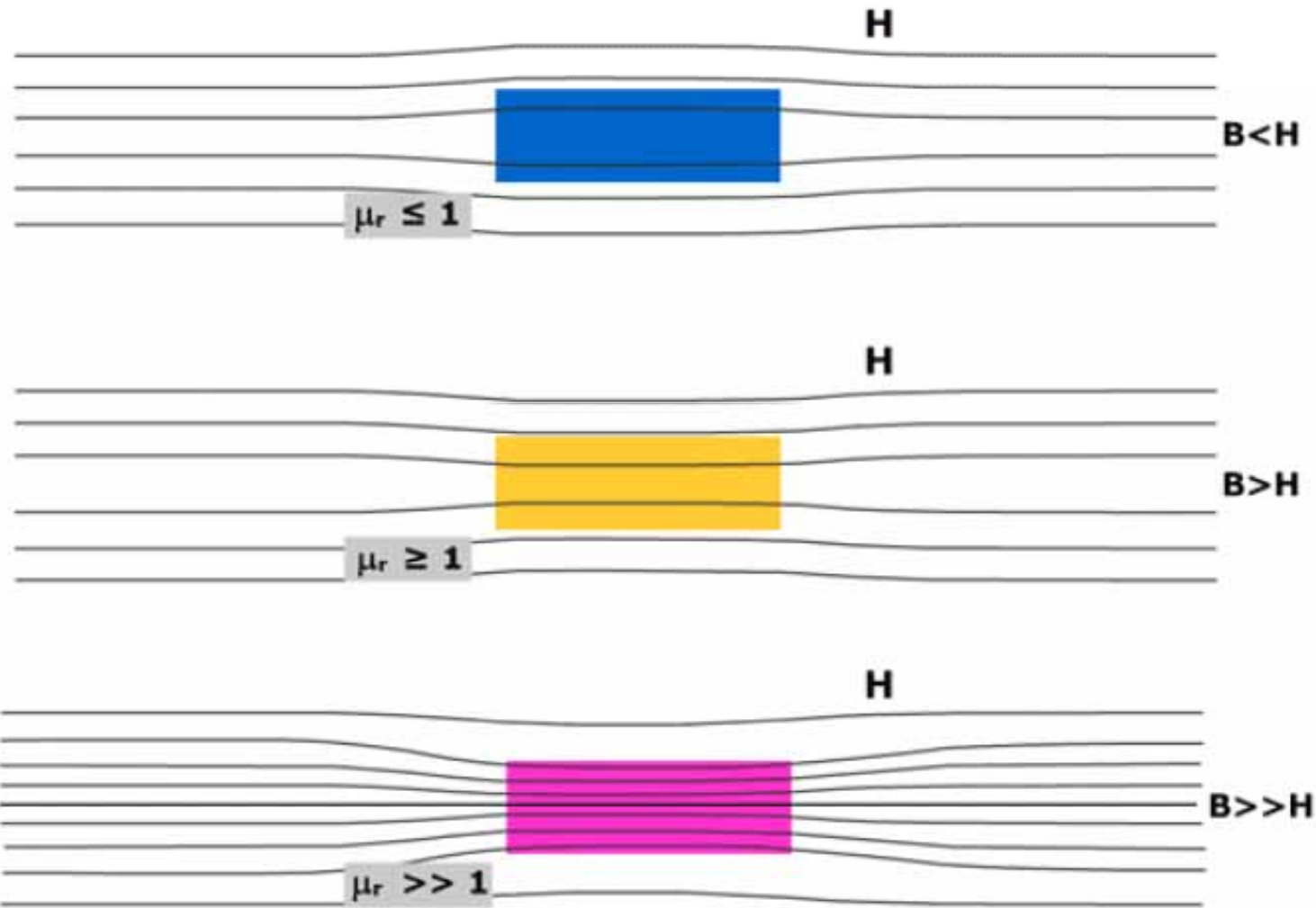
## Susceptibilidad magnética

$$J = \kappa H$$

$\kappa$ : susceptibilidad magnética

Adimensional en ambos sistemas, pero magnitudes difieren en  $4\pi$

$$\kappa_{\text{SI}} = 4\pi\kappa_{\text{cgs}}$$

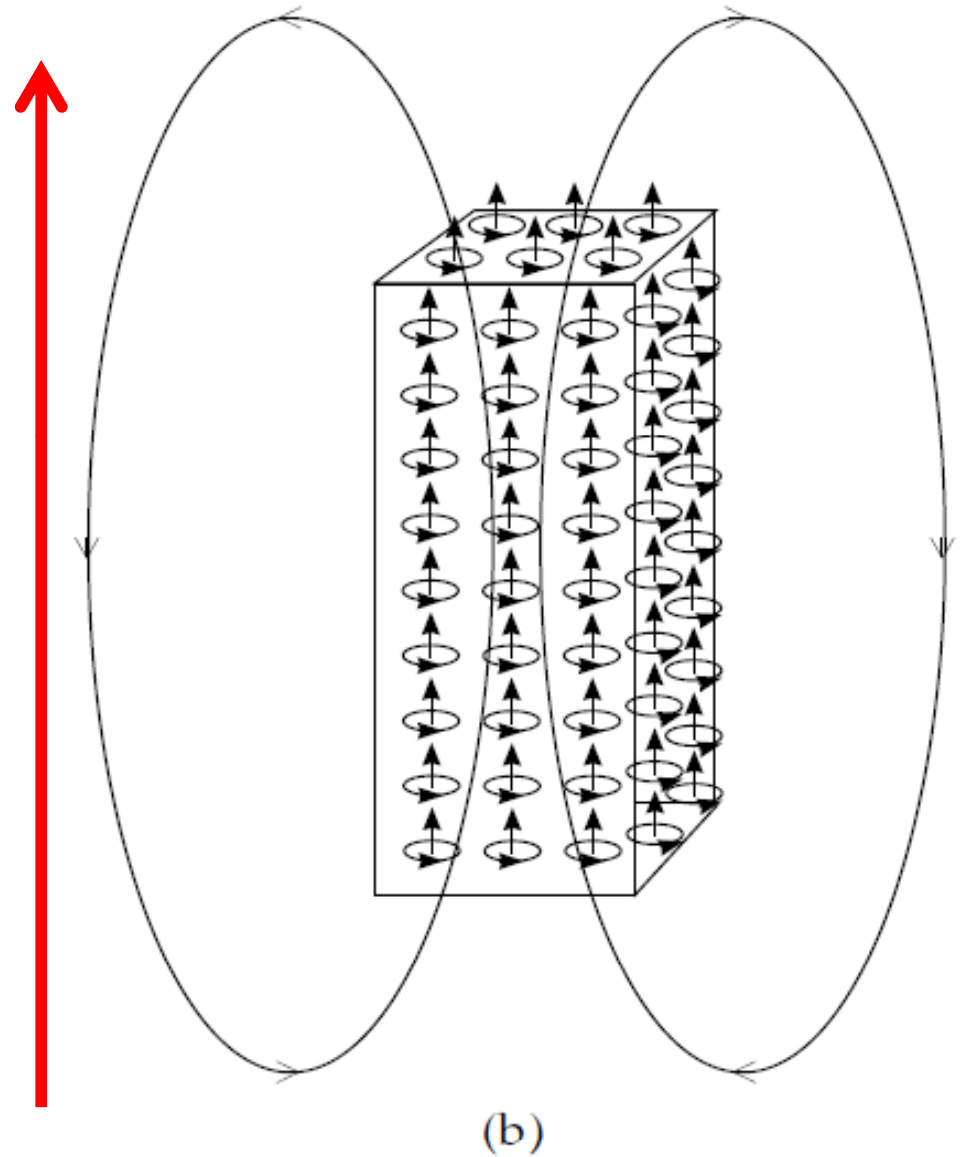
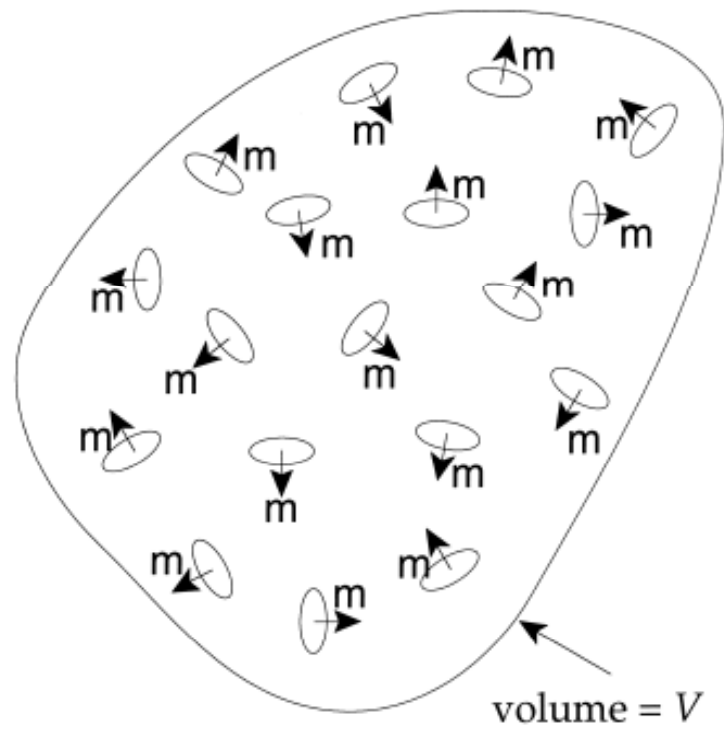


$$B = \mu_0 \mu_r H$$

$H$  es el campo magnetizante en el espacio  
 $B$  es el campo magnético resultante en el objeto  
 $\mu_r$  es la permeabilidad magnética relativa del objeto (su relación con la permeabilidad del vacío  $\mu_0$ )

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Wb A}^{-1} \text{ m}^{-1}$$

La inducción magnética  $B$  en el interior de un material estará compuesta por el campo externo aplicado  $H$ , y por la magnetización  $J$





La inducción magnética  $B$  en el interior de un material estará compuesta por el campo externo aplicado  $H$ , y por la magnetización  $J$

$$B = \mu_0 (H + J)$$

$$B = \mu_0 (H + \kappa H)$$

$$B = \mu_0 H (1 + \kappa)$$

*como*  $B = \mu H$

$$\mu = \mu_0 (1 + \kappa)$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = 1 + \kappa$$



## Densidad de flujo magnético, o inducción magnética

$$B = \mu H$$

$\mu$ : permeabilidad magnética

En SI, unidades  $\text{Wb A}^{-1} \text{m}^{-1}$

Unidades de B,  $\text{Wb m}^{-2}$ : Tesla (T)

En cgs, permeabilidad  
adimensional

Unidades de B, Gauss (G)

## Susceptibilidad magnética

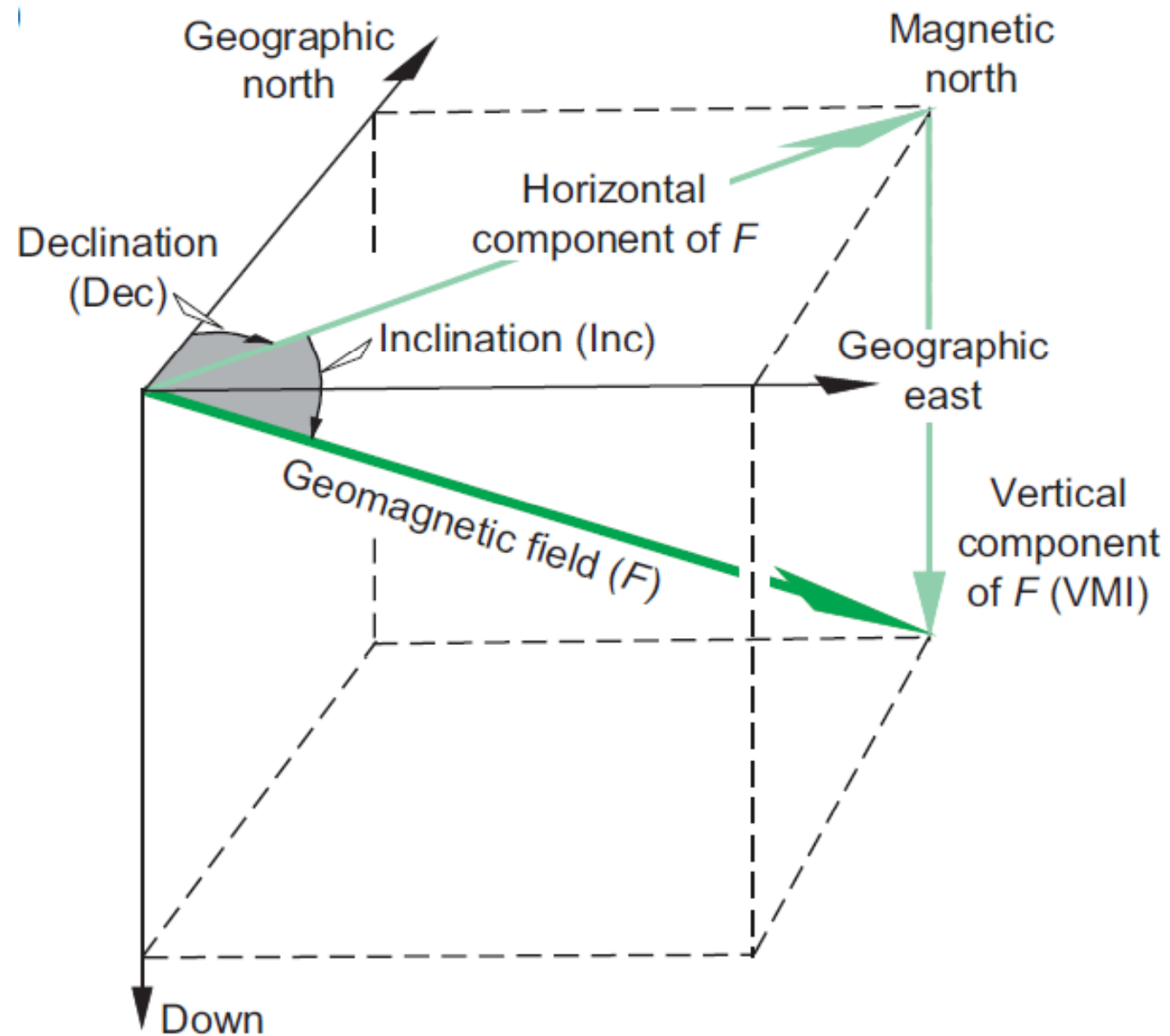
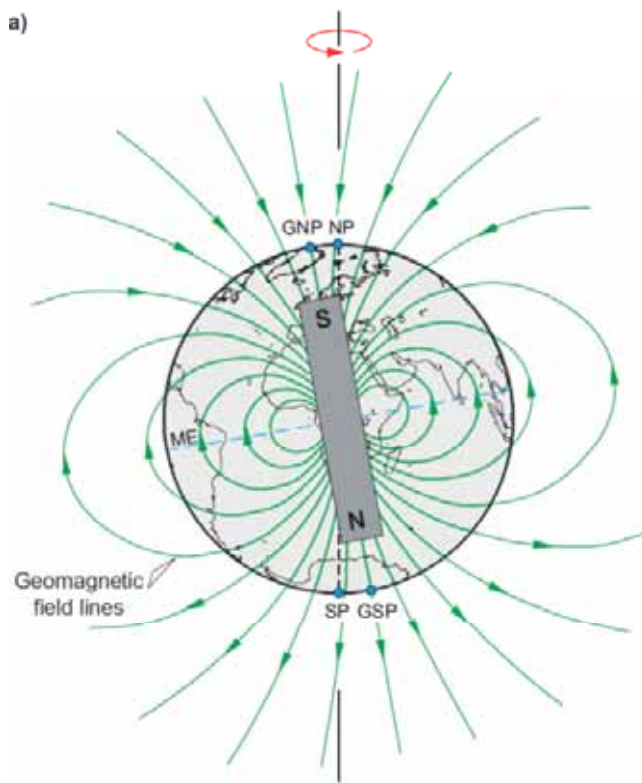
$$J = \kappa H$$

$\kappa$ : susceptibilidad magnética

Adimensional en ambos sistemas, pero magnitudes difieren en  $4\pi$

$$\kappa_{\text{SI}} = 4\pi\kappa_{\text{cgs}}$$

a)



# Unidades

Propiedad	cgs	SI	Factor de conversión	
B (inducción)	Gauss ( <b>G</b> )	Tesla ( <b>T</b> )	$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$	Propiedad que mide
H (campo)	oersted ( <b>Oe</b> )	<b>A/m</b>	$1 \text{ A/m} = 4\pi \cdot 10^{-3} \text{ Oe}$	
K (suscept. vol.)	<b>adimensional</b>	<b>adimensional</b>	$1 \text{ (SI)} = 1/4\pi \text{ (cgs)}$	
M (momento)	<b>emu = G cm<sup>3</sup></b>	<b>A m<sup>2</sup></b>	$1 \text{ A m}^2 = 10^3 \text{ emu}$	
J (magnetización)	<b>emu / cm<sup>3</sup></b>	<b>A/m</b>	$1 \text{ A/m} = 10^3 \text{ emu / cm}^3$	Propiedad que determina el contraste
P (intensidad de polo)	<b>G cm<sup>2</sup></b>	<b>A m</b>	$1 \text{ Am} = 10 \text{ G cm}^2$	

En relevamientos magnetométricos se usa la unidad de campo magnético:

gamma ( $\gamma$ )  $1 \gamma = 10^{-5} \text{ Oe (cgs)}$  o nanotesla (nT)  $1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T (SI)}$   
 $1 \gamma = 1 \text{ nT}$

$$H = -\frac{P}{r^2}$$

Componente vertical

$$H_z = H \operatorname{sen} Q$$

$$H_z = -\frac{P}{r^2} * \frac{z}{r}$$

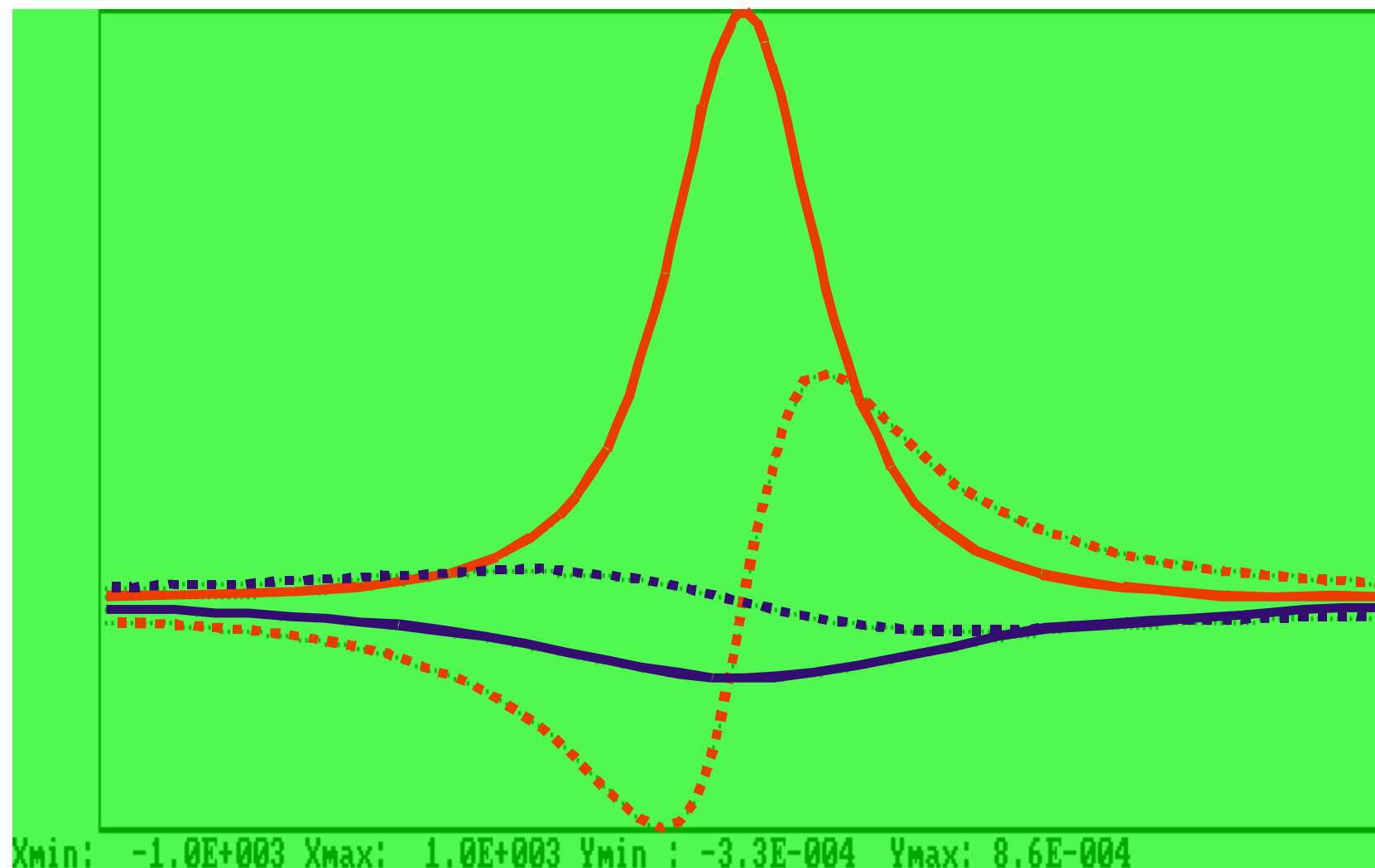
$$H_z = -\frac{P z}{\left(x^2 + z^2\right)^{3/2}}$$

Componente horizontal

$$H_x = H \cos Q$$

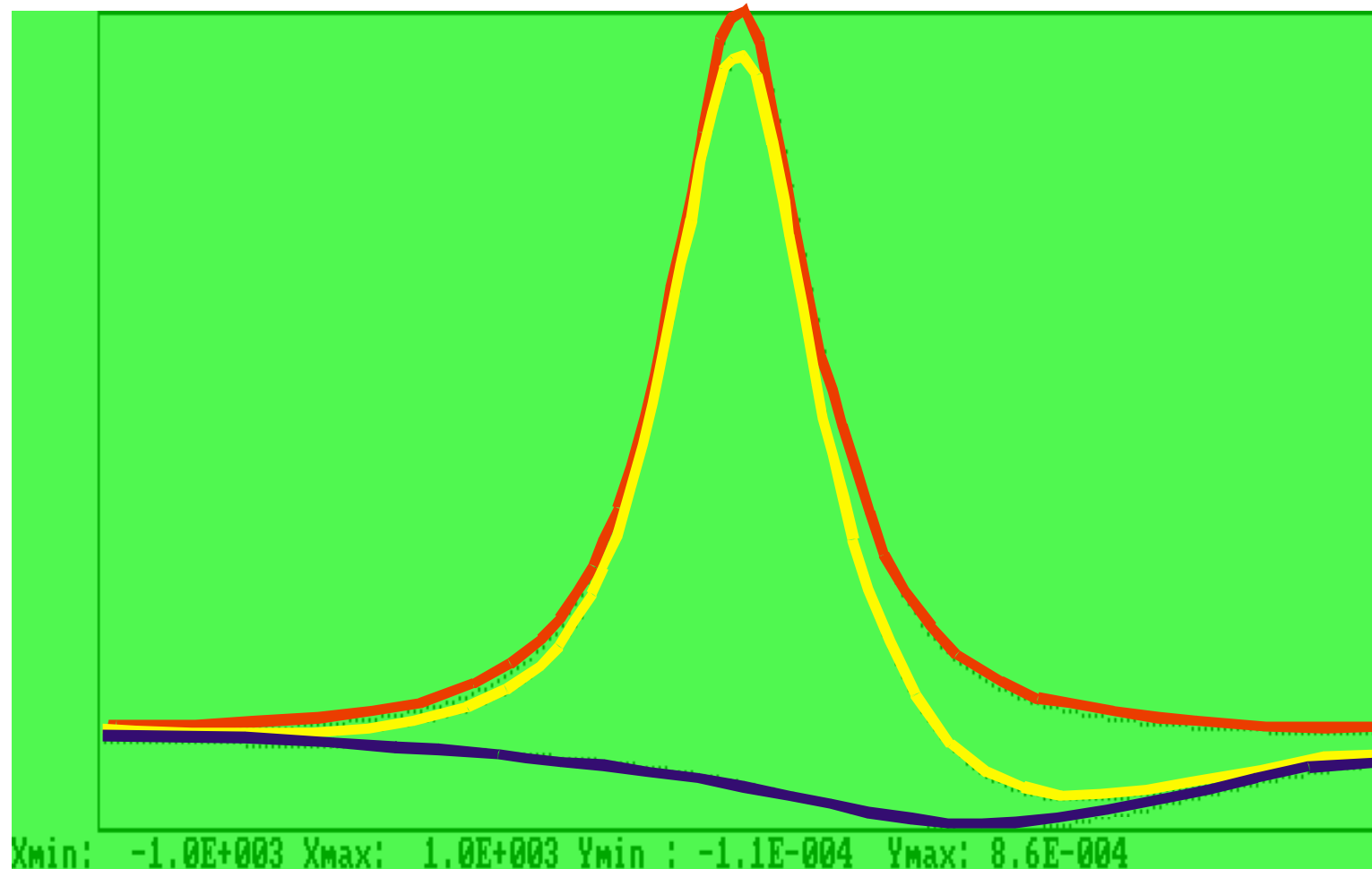
$$H_x = -\frac{P}{r^2} * \frac{x}{r}$$

$$H_x = -\frac{P x}{\left(x^2 + z^2\right)^{3/2}}$$

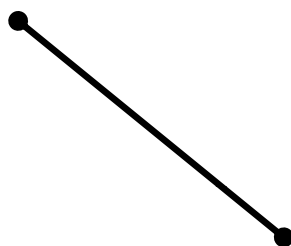


Programa DIPOLO

Sólo componente vertical



$P_1$

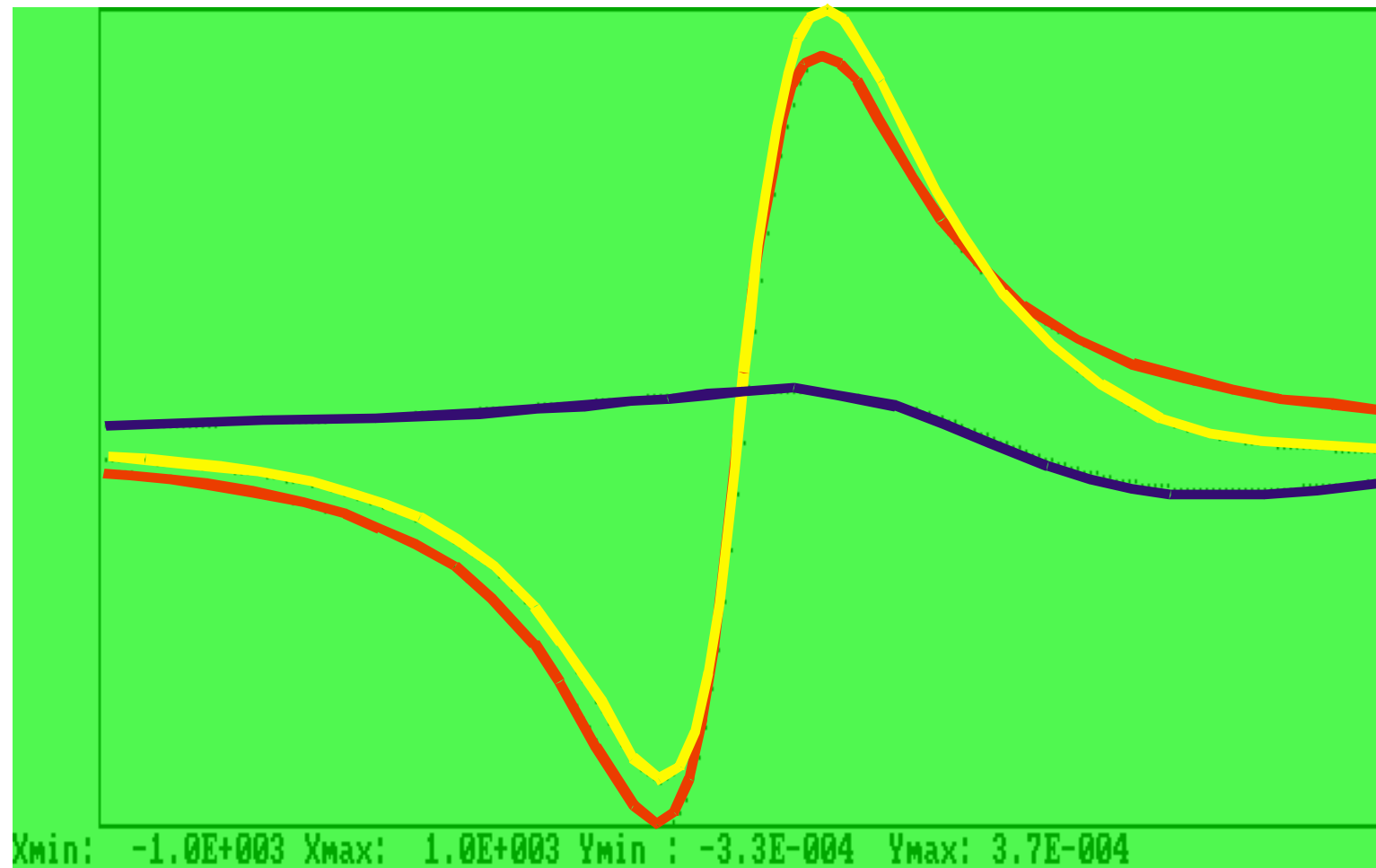


$P_2$

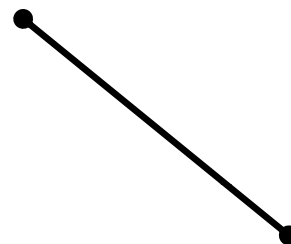
Programa DIP\_INCV



Sólo componente horizontal



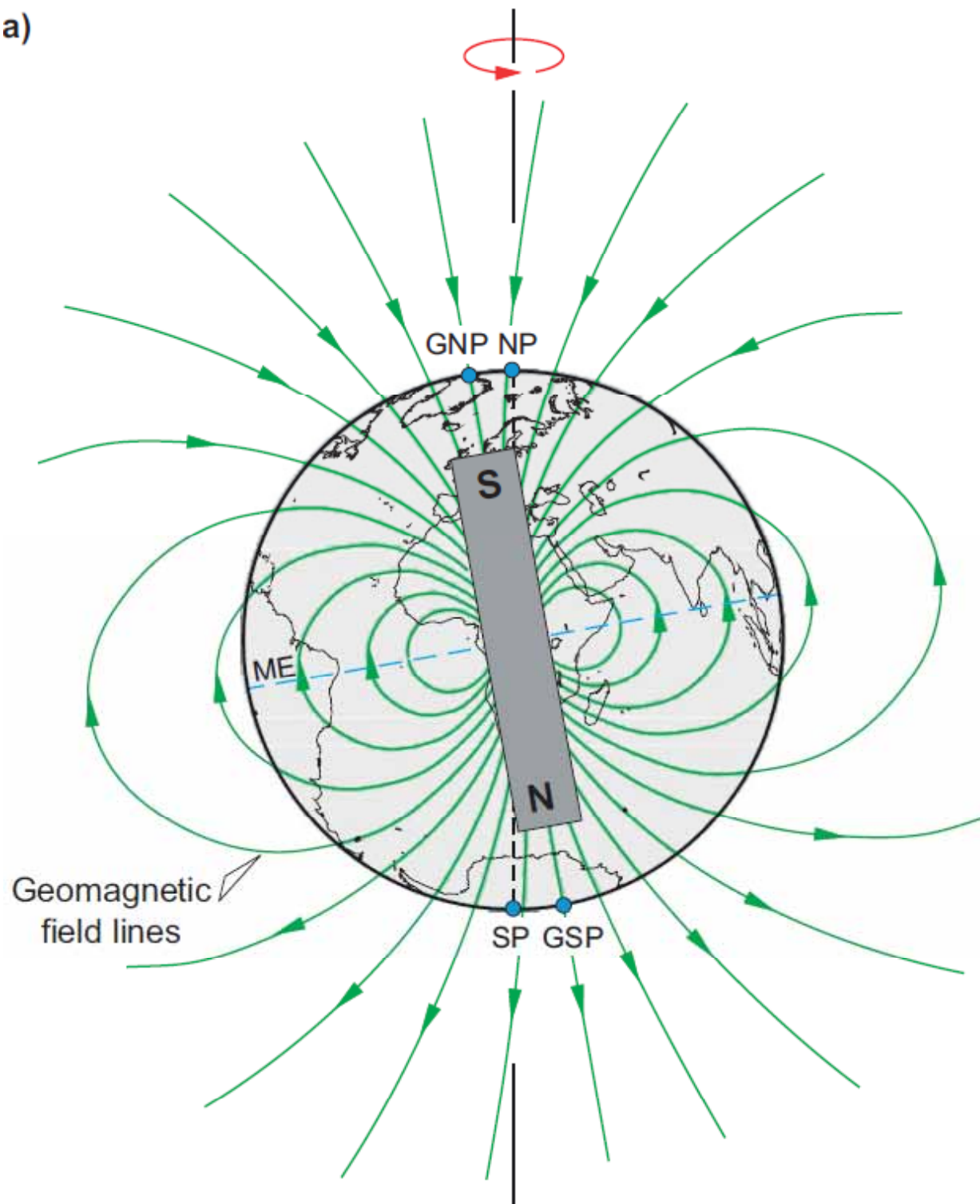
$P_1$



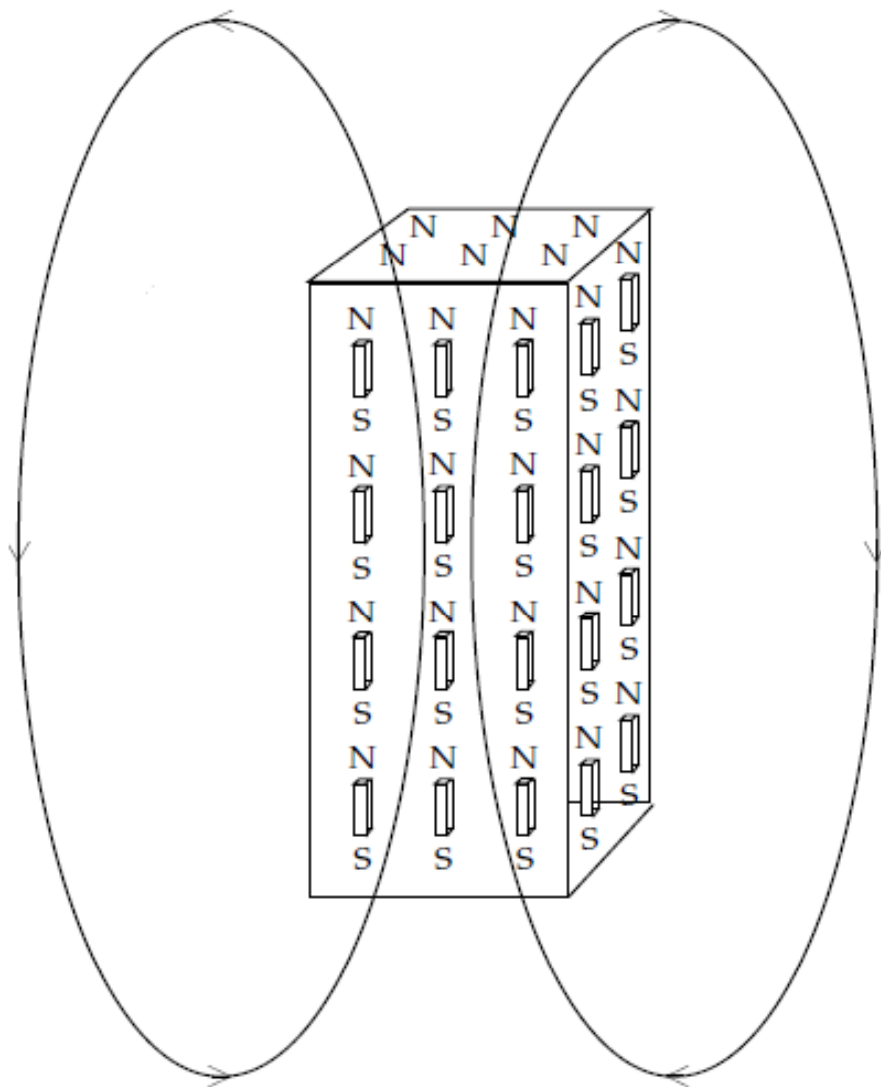
$P_2$

Programa DIP\_INCH

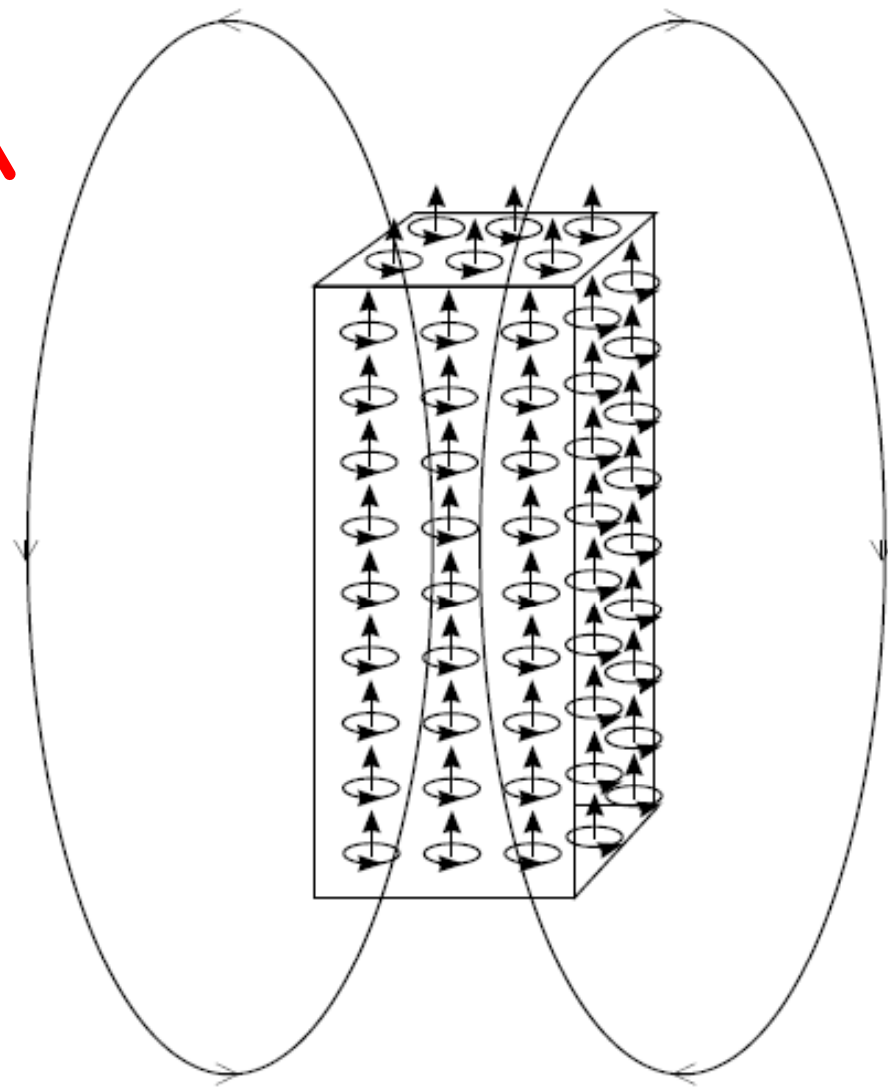
a)



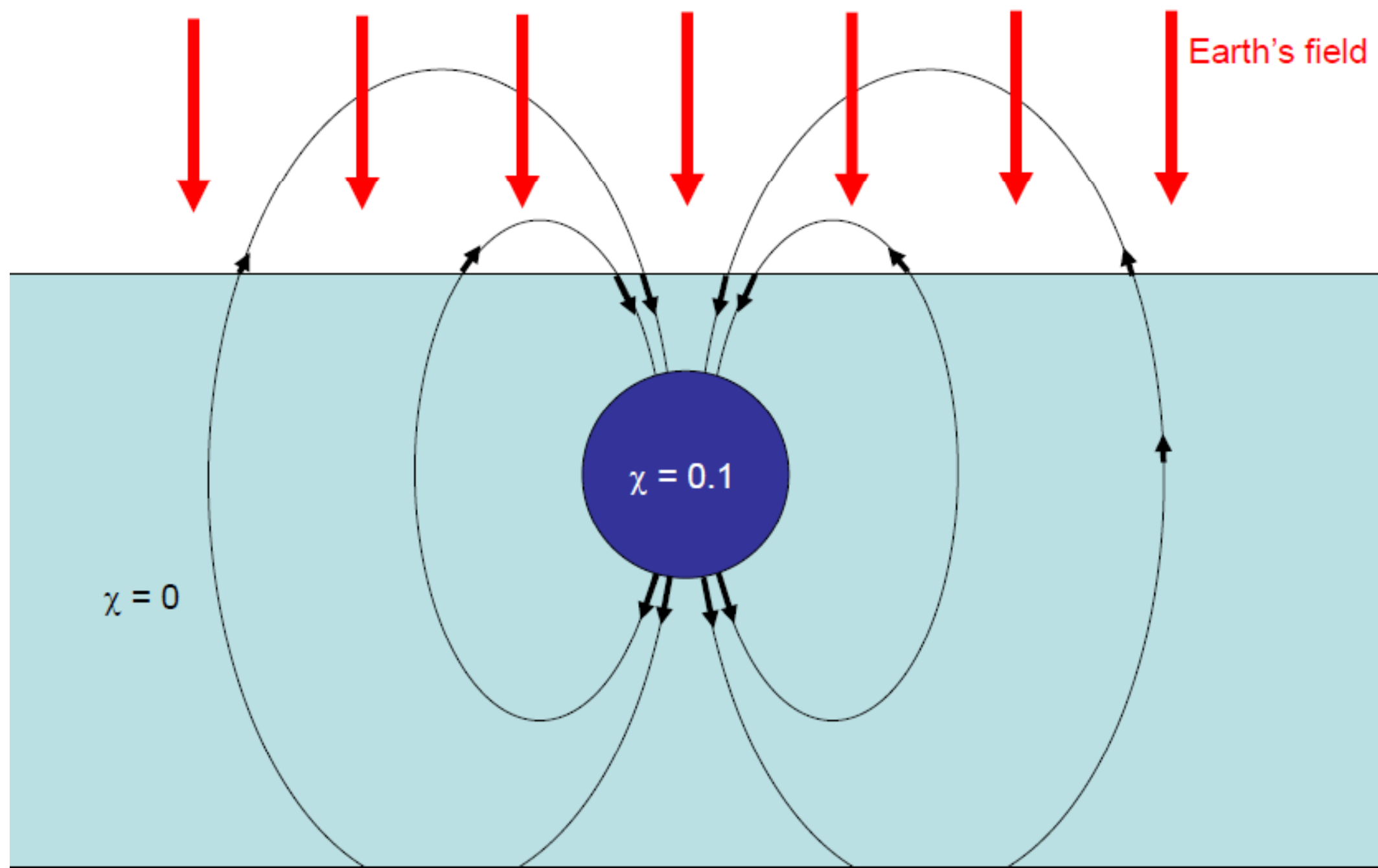
En presencia del CMT, los cuerpos magnetizables experimentarán inducción. Es decir, adquirirán una magnetización paralela a la del CMT

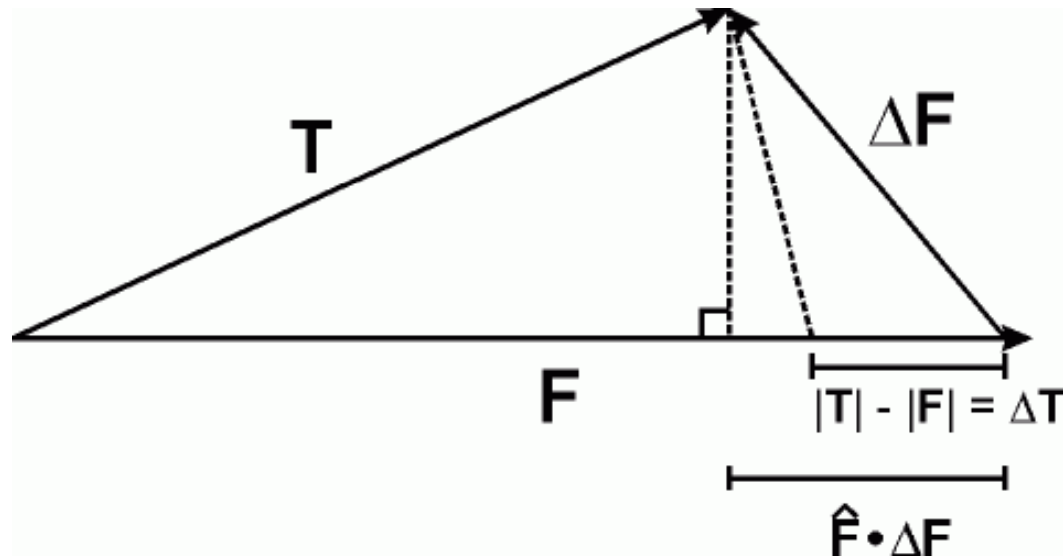


(a)



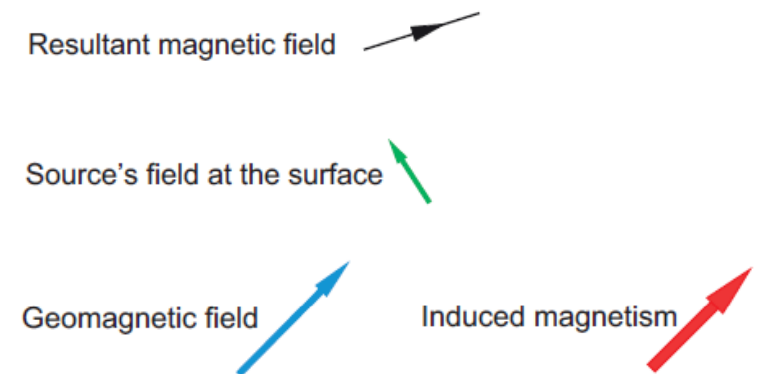
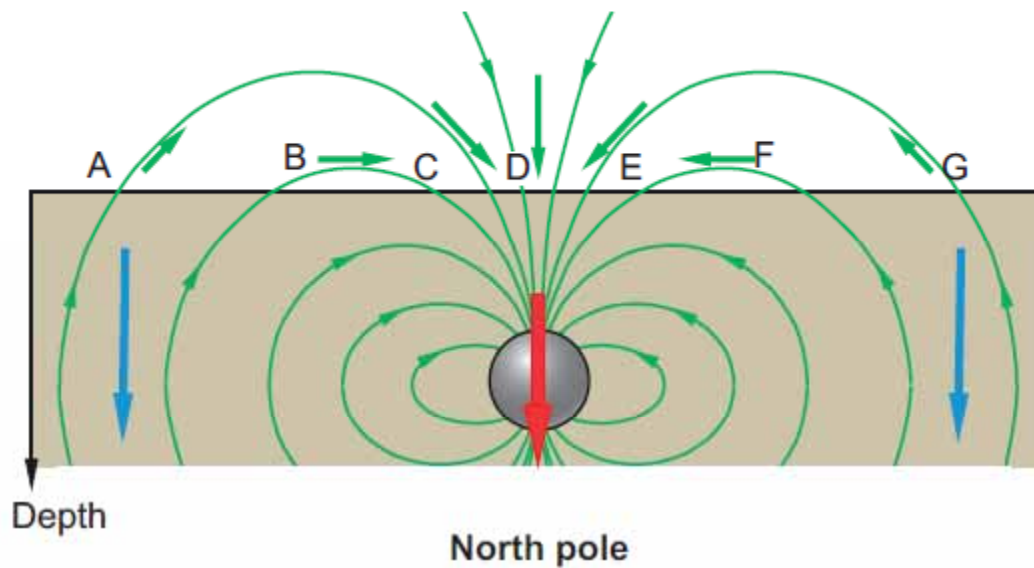
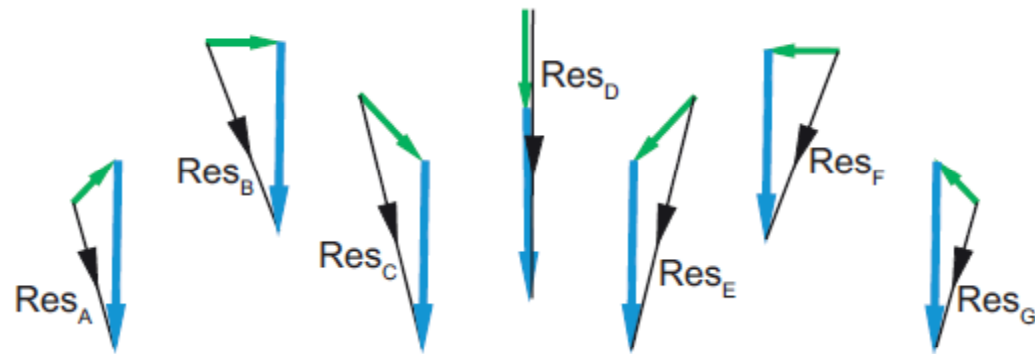
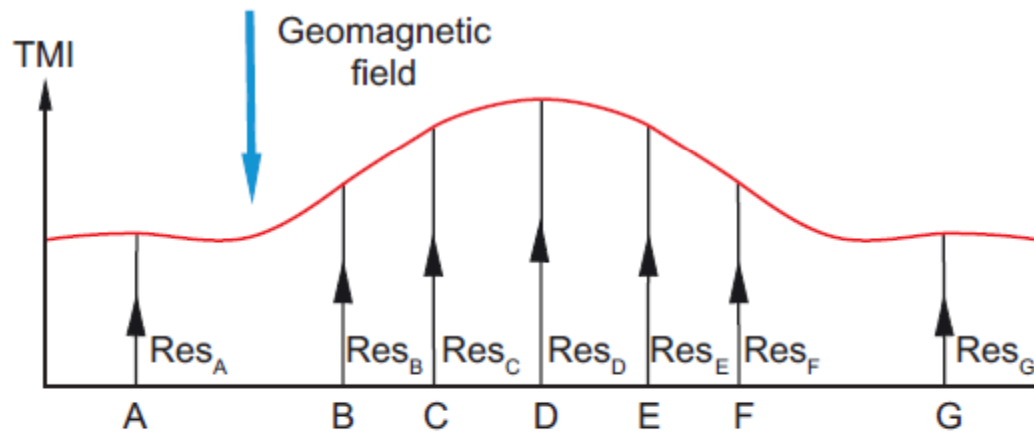
(b)



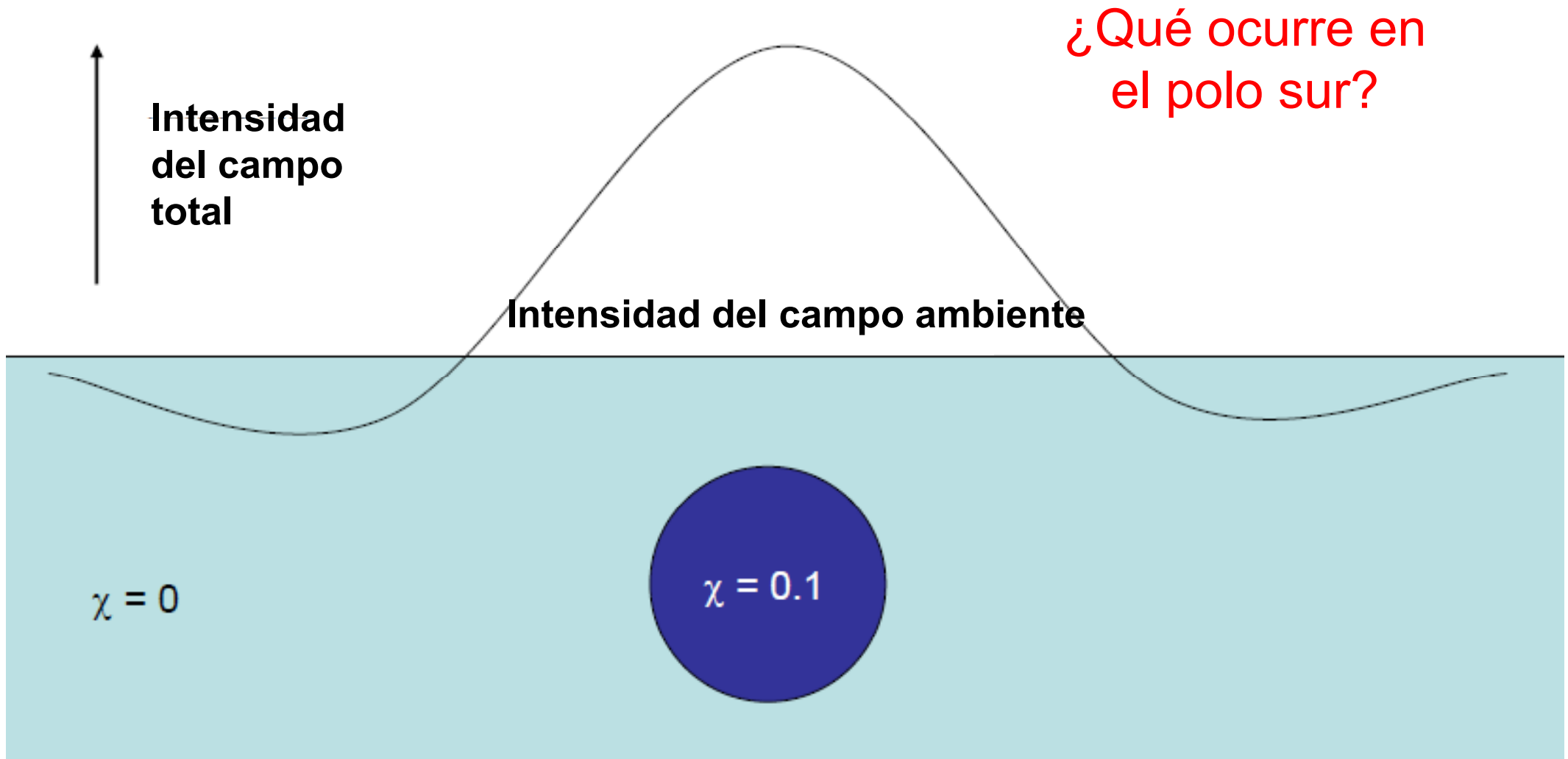


Los magnetómetros están diseñados para medir el módulo del campo resultante.

Por lo tanto, se determina la componente del campo anómalo en la dirección del campo ambiente.

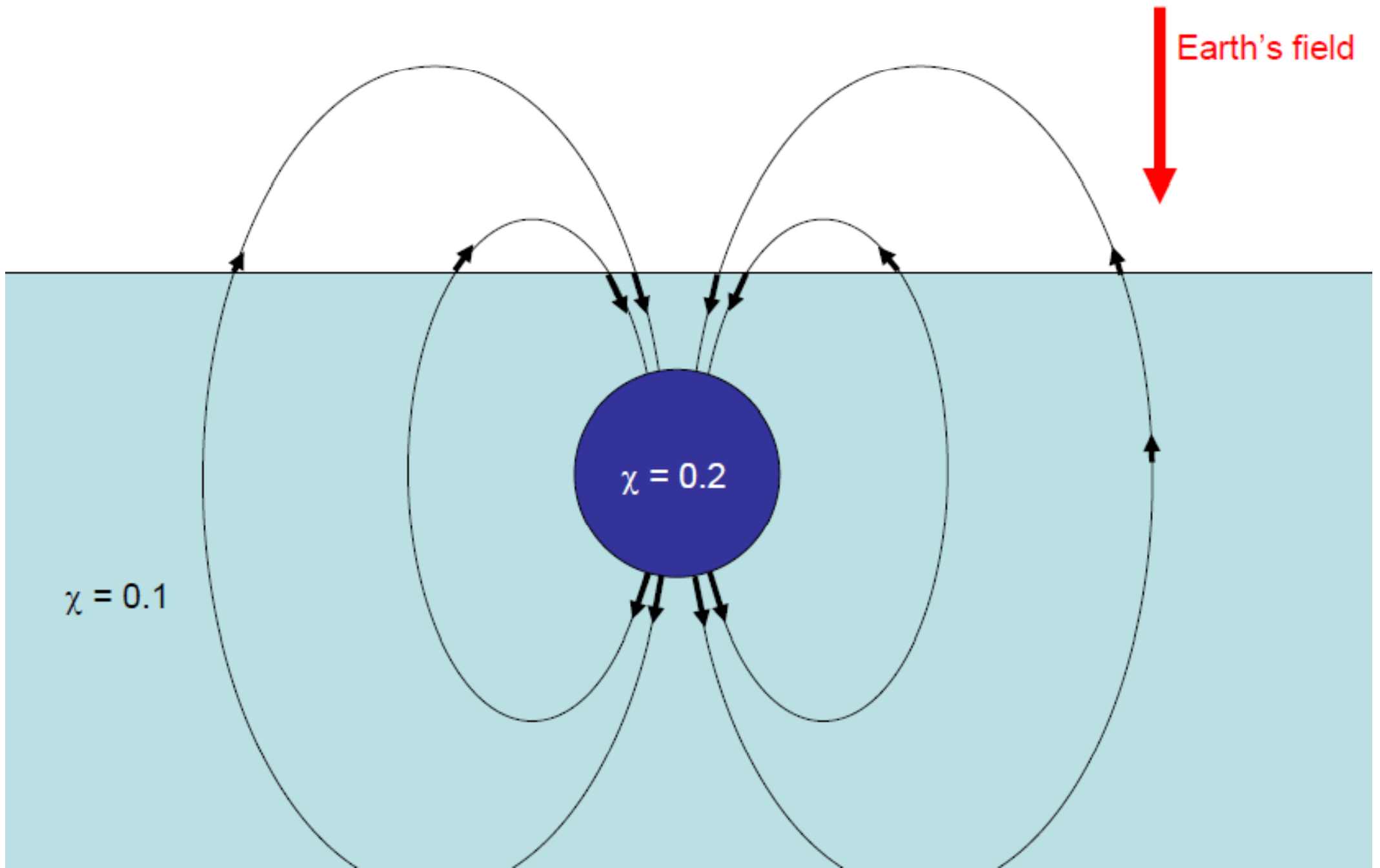


En el polo magnético norte, la señal de un cuerpo magnético enterrado con contraste de susceptibilidad positivo, es una anomalía con esta forma:

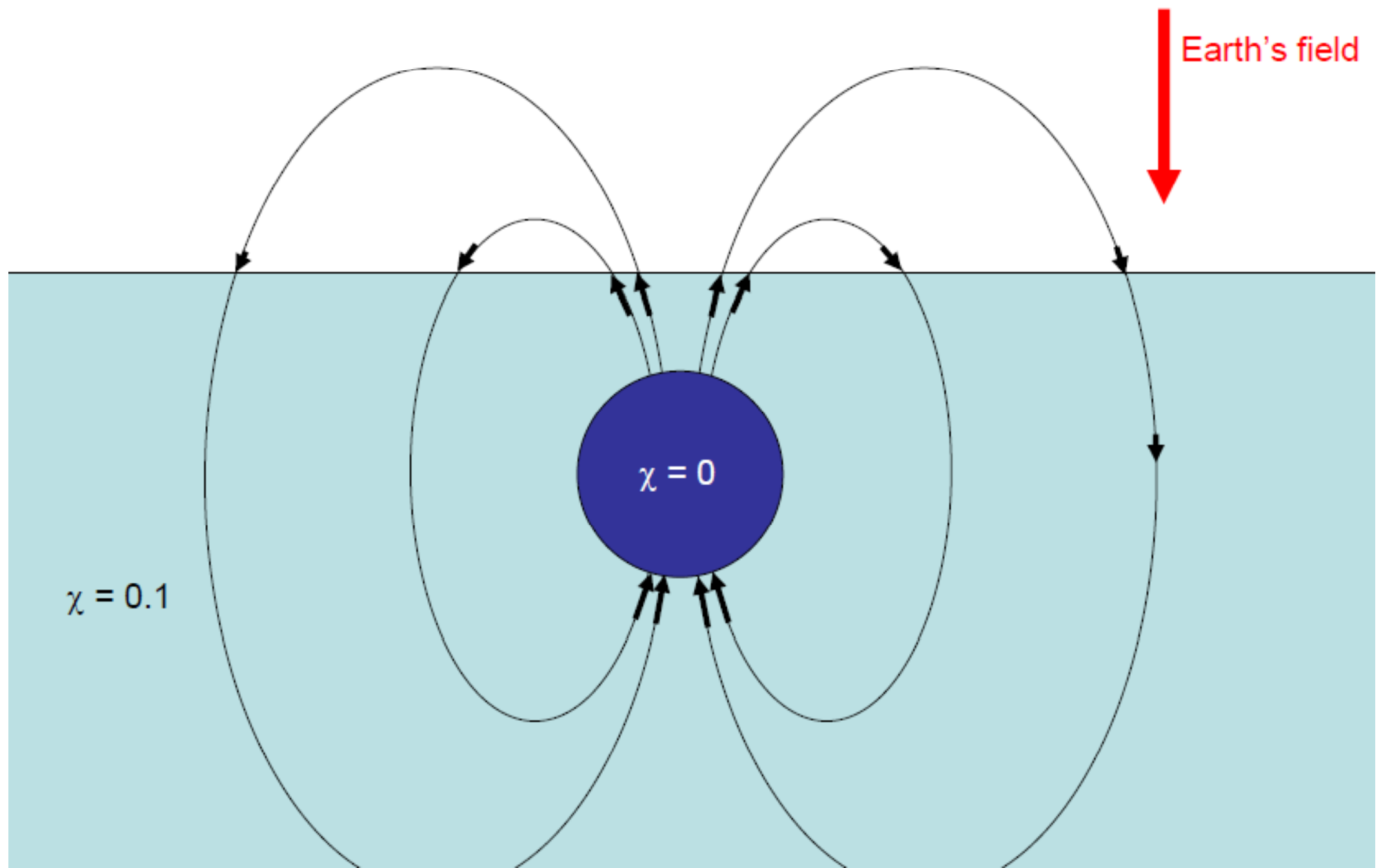




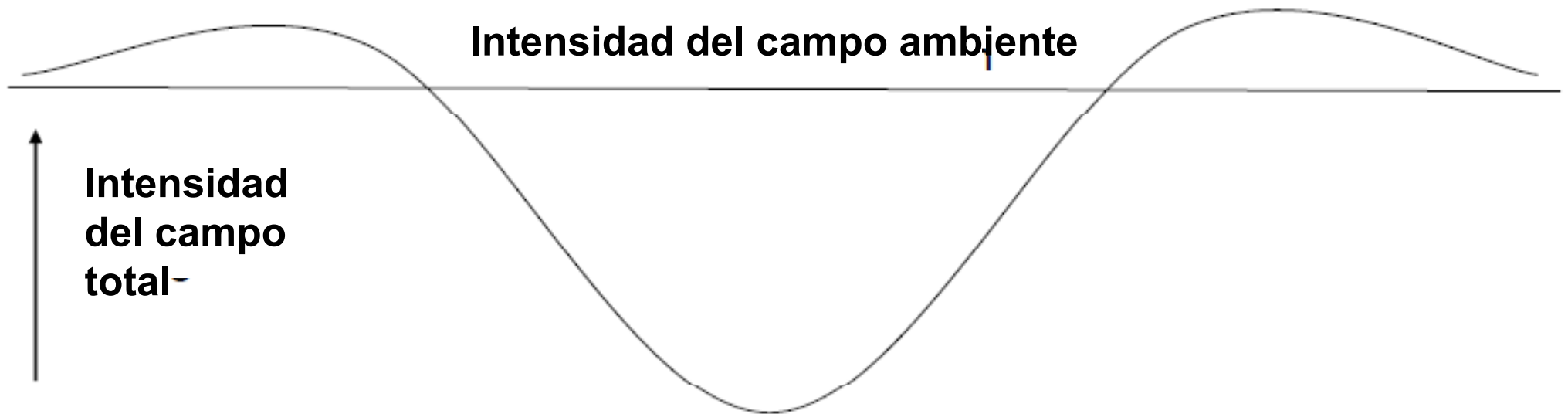
¿Cuál es el contraste de susceptibilidad magnética?

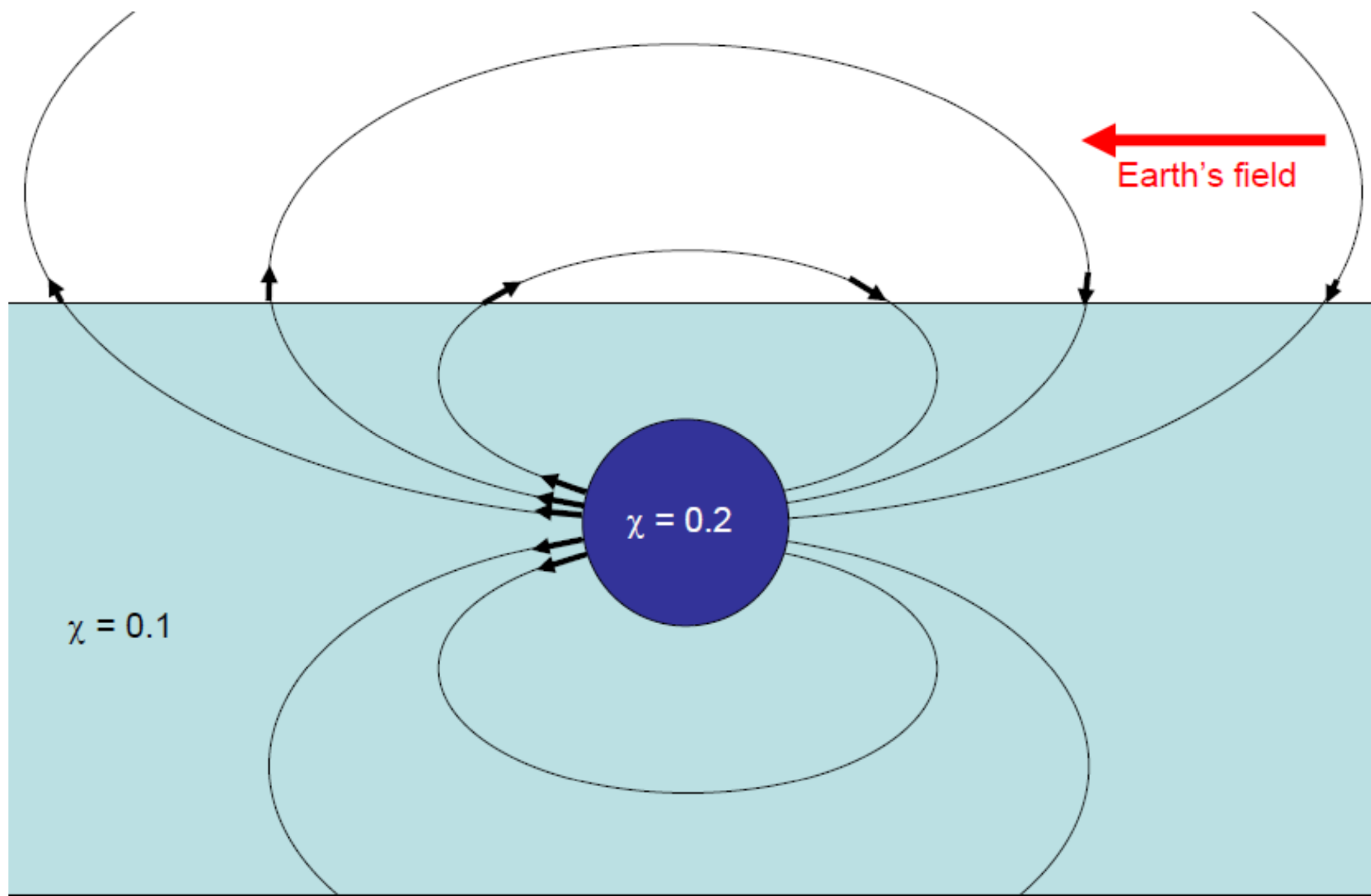


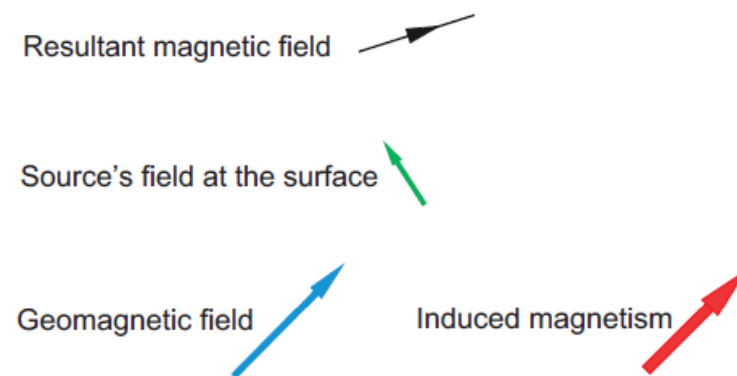
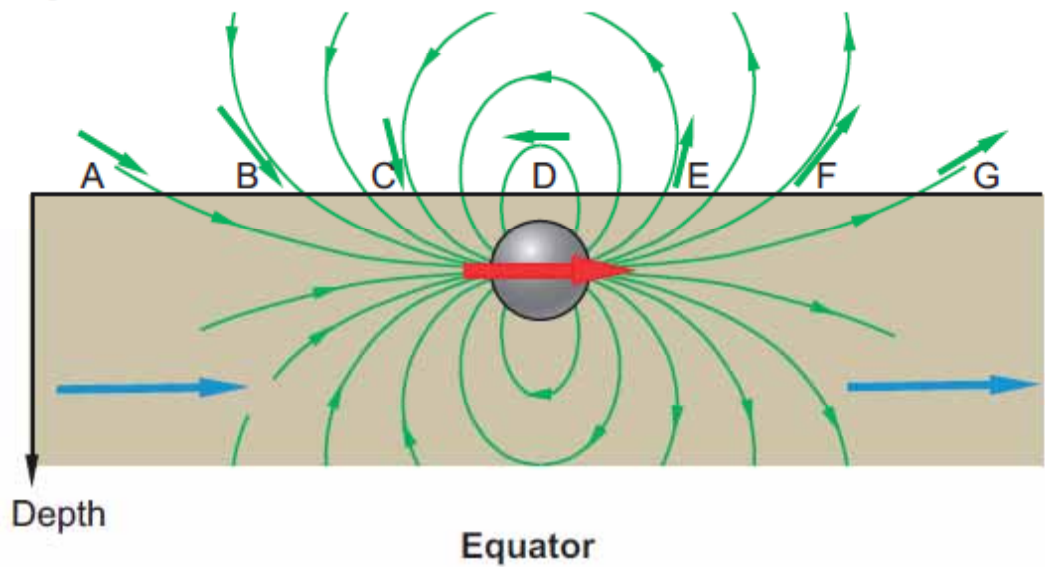
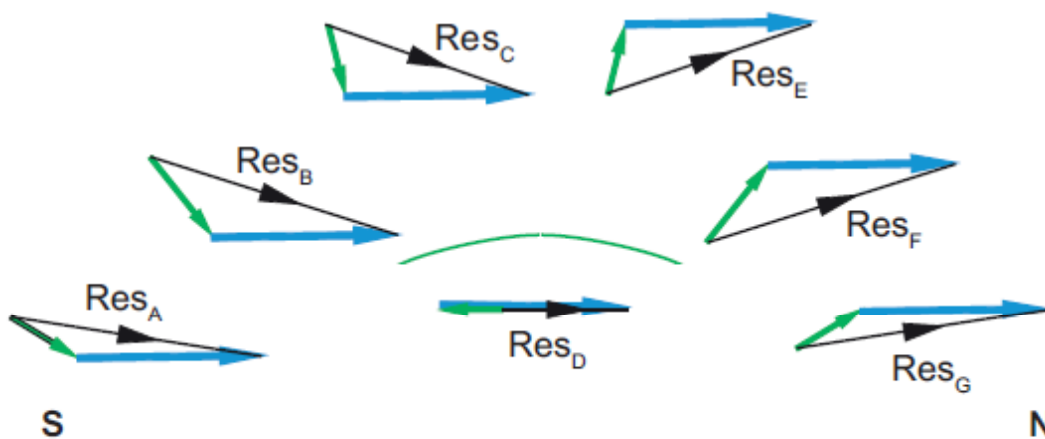
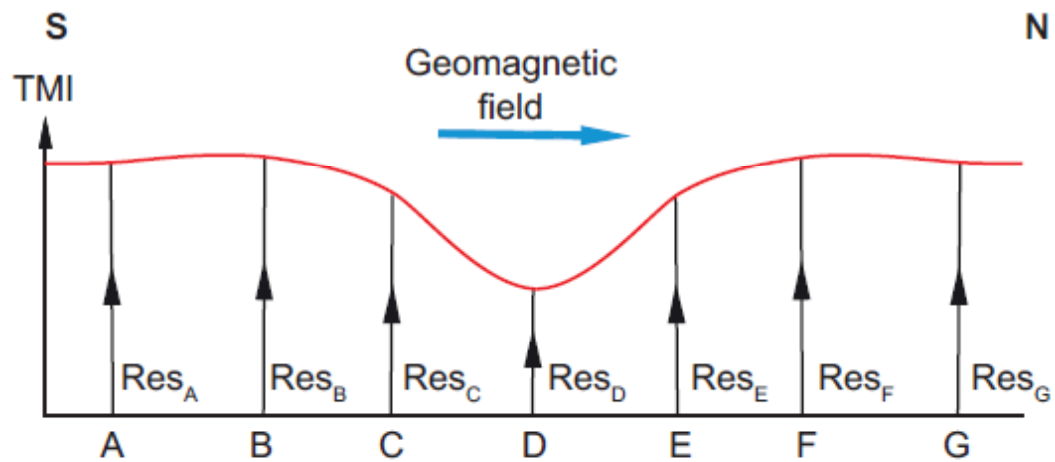
¿Y ahora?



En el polo magnético norte (o sur), la señal de un cuerpo magnético enterrado con contraste de susceptibilidad **negativo**, es una anomalía con esta forma:

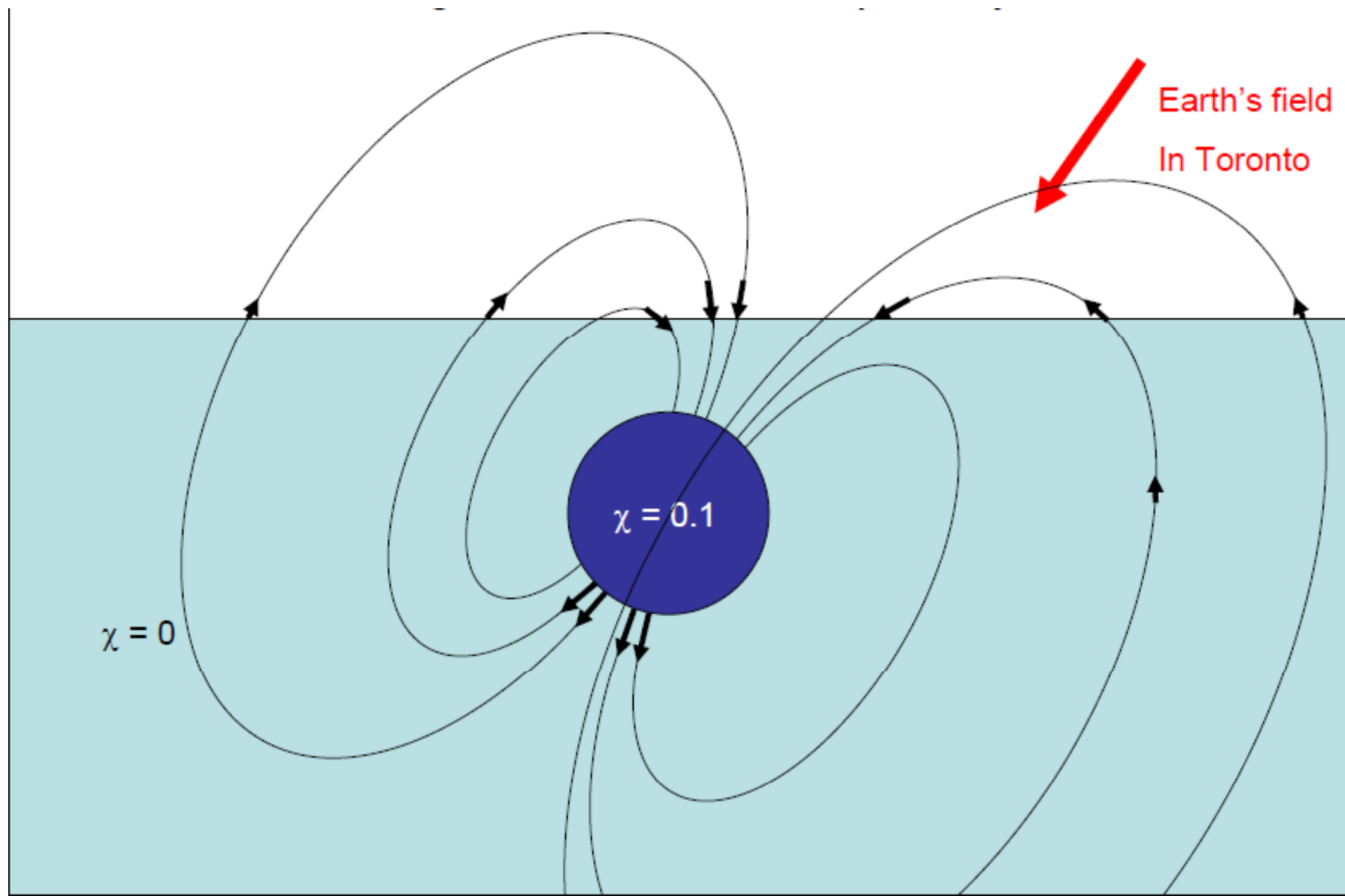




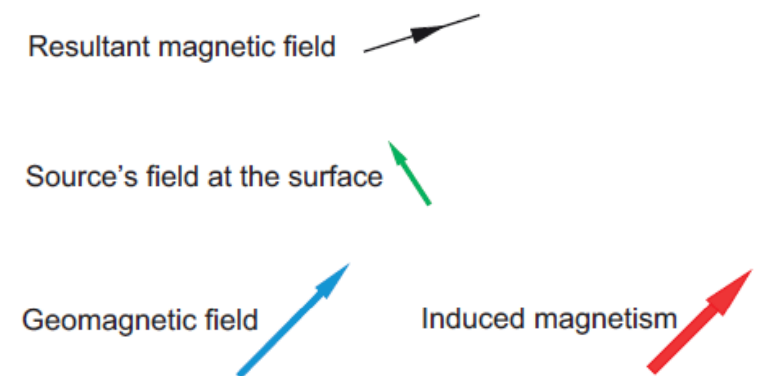
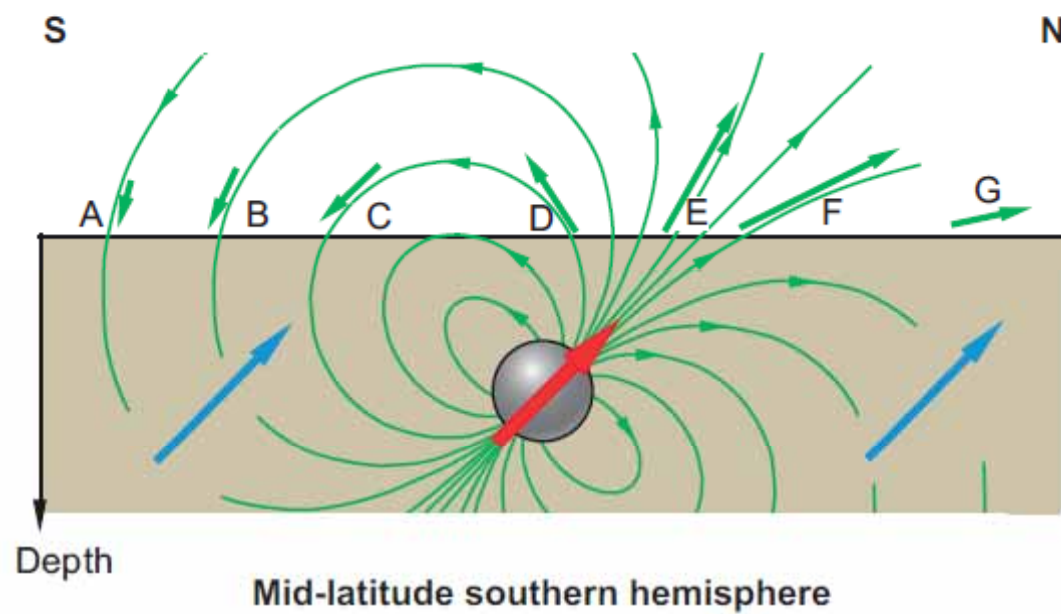
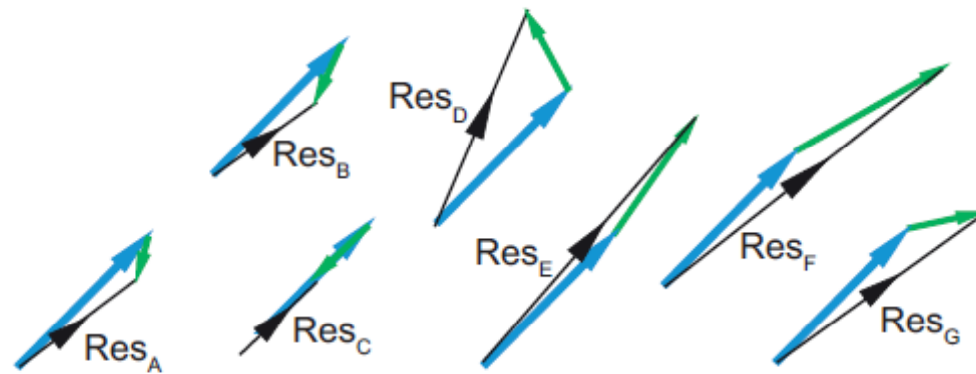
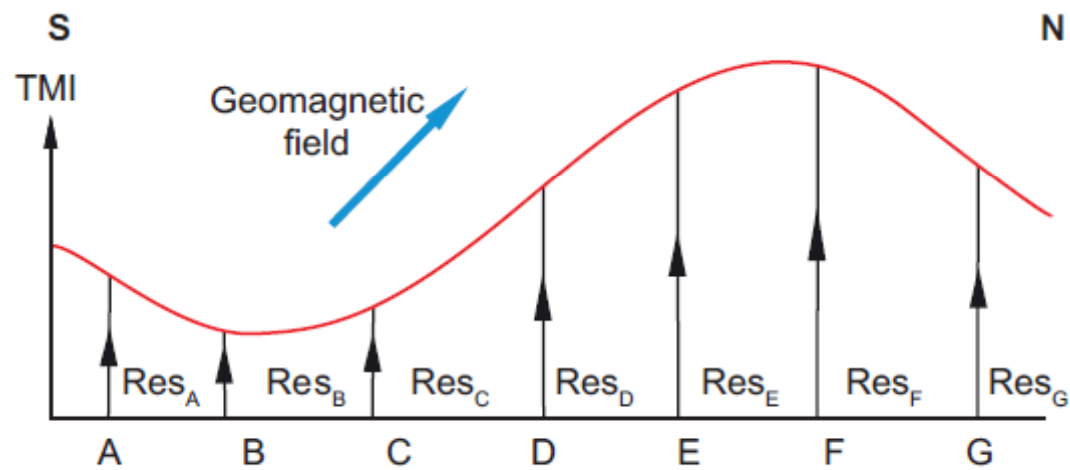


En el ecuador magnético, la señal de un cuerpo magnético enterrado con contraste de susceptibilidad **positivo**, es una anomalía con esta forma:







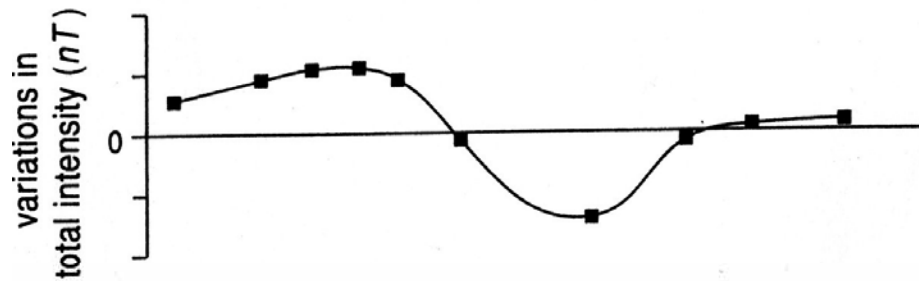


En latitudes intermedias, la señal de un cuerpo magnético enterrado es una anomalía asimétrica con esta forma:

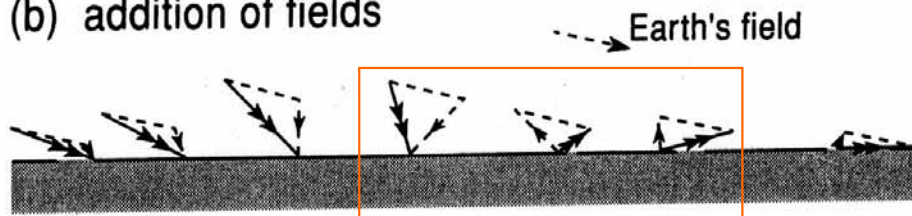


El pico positivo de la anomalía se encuentra al sur del cuerpo, en el hemisferio norte.  
El pico positivo de la anomalía se encuentra al norte del cuerpo, en el hemisferio sur.

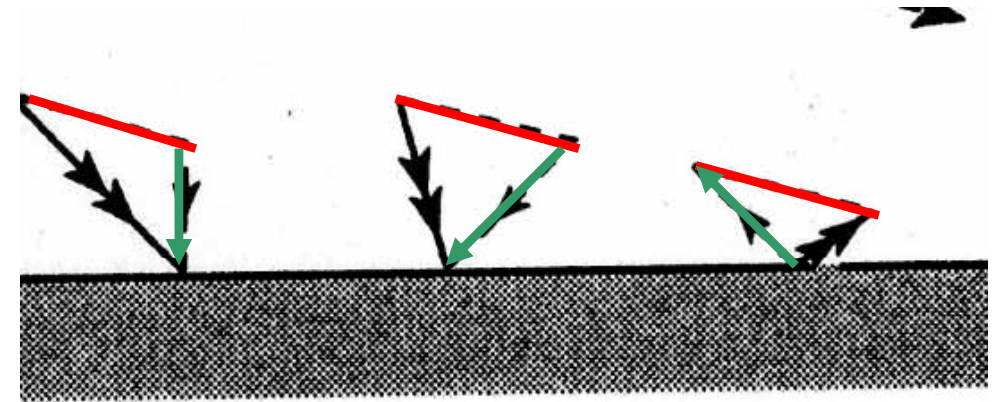
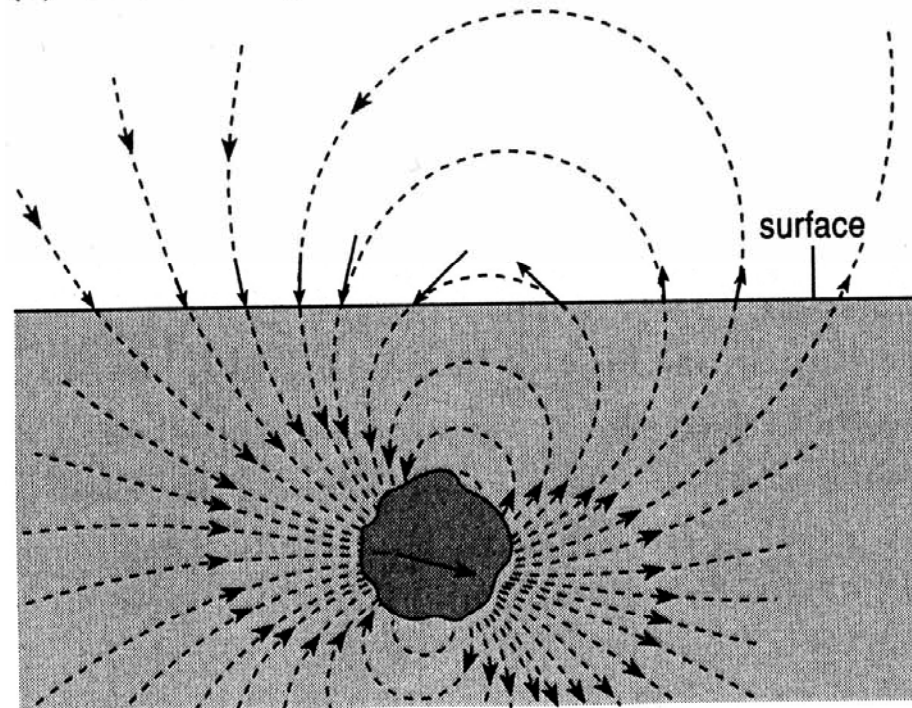
(a) anomaly



(b) addition of fields



(c) field of body

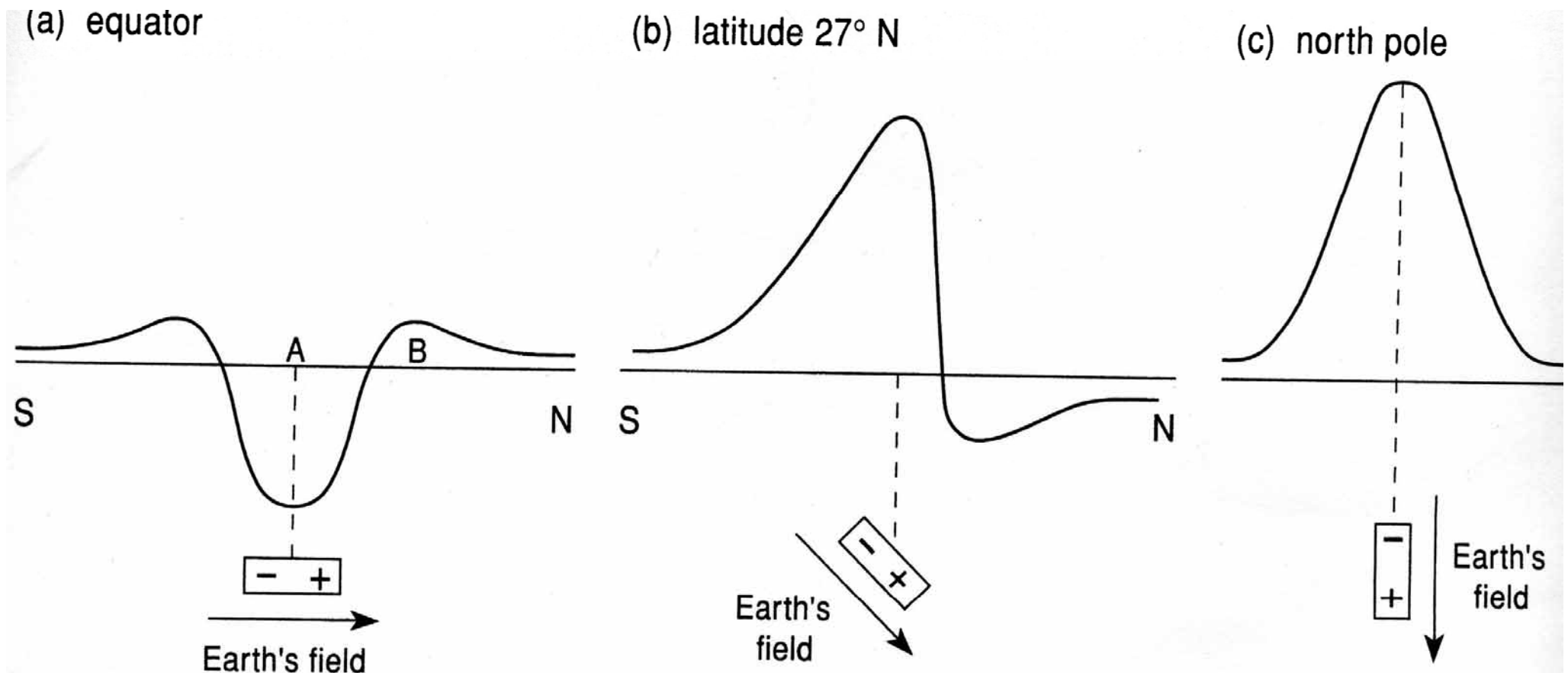


**Mido intensidad del campo  
magnético total (IMT o TMI)**

Es el módulo del vector resultante de  
sumar:

- 1) El CM terrestre (principal, de entre 30000 y 70000 nT)
- 2) La contribución anómala debida al campo local del cuerpo magnetizado (variable entre decenas y miles de nT)

**Figure 11.1** Magnetic field of a buried dipole.

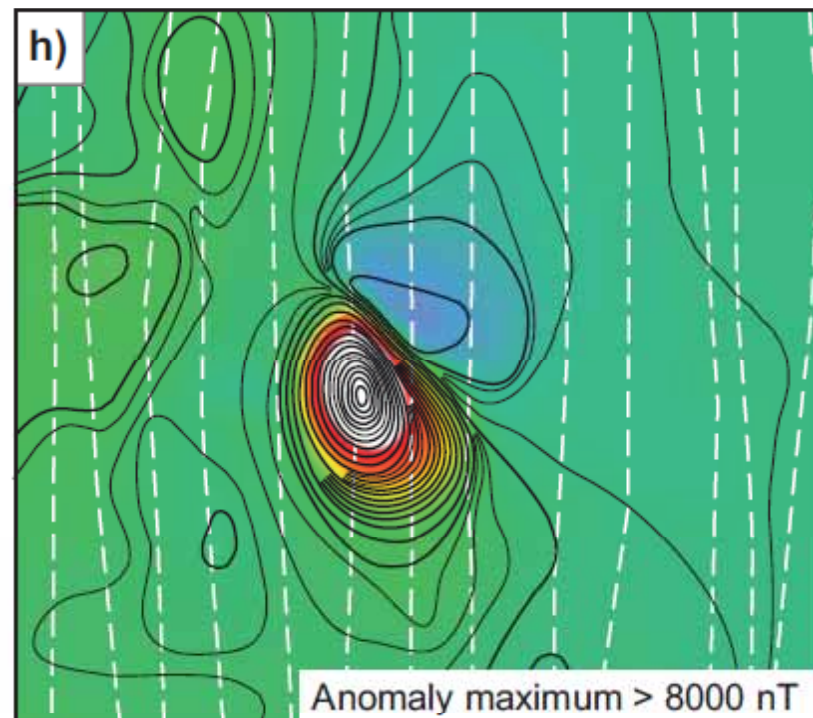
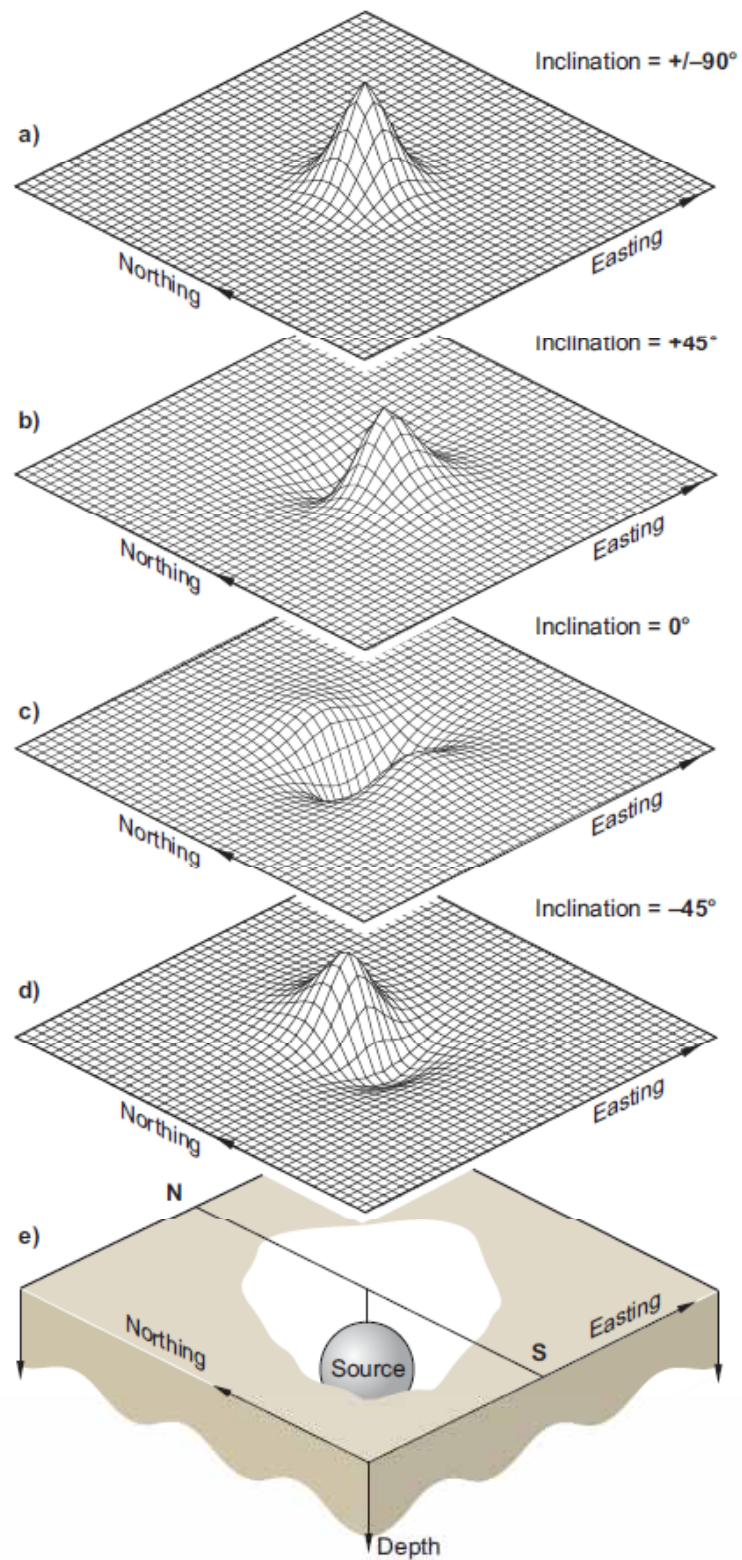


**Figure 11.9** Anomaly of a dipole at different latitudes.

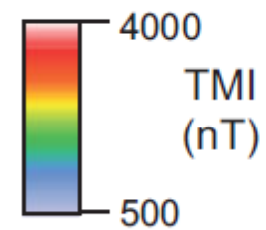
Anomalía positiva donde CM terrestre es reforzado por campo local  
 Anomalía negativa donde CM terrestre es contrarrestado por campo local

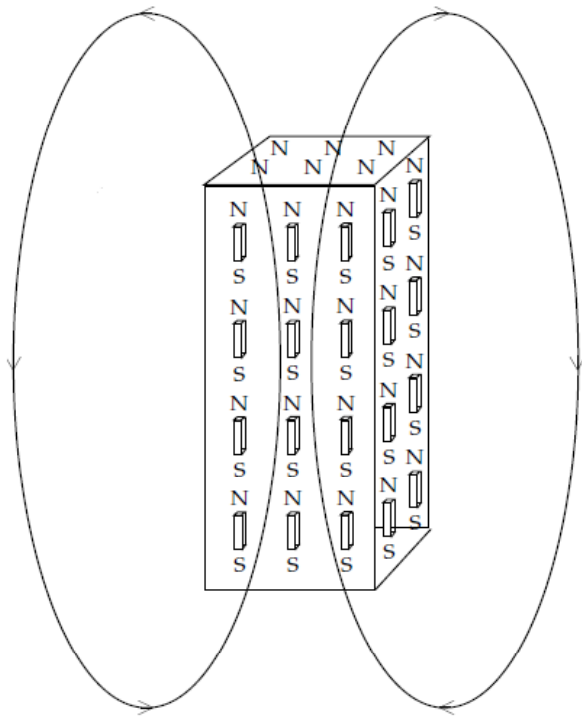
El modo en que se polaricen magnéticamente los cuerpos dependerá de su geometría y de su orientación relativa con respecto a la dirección del CM terrestre, del siguiente modo:



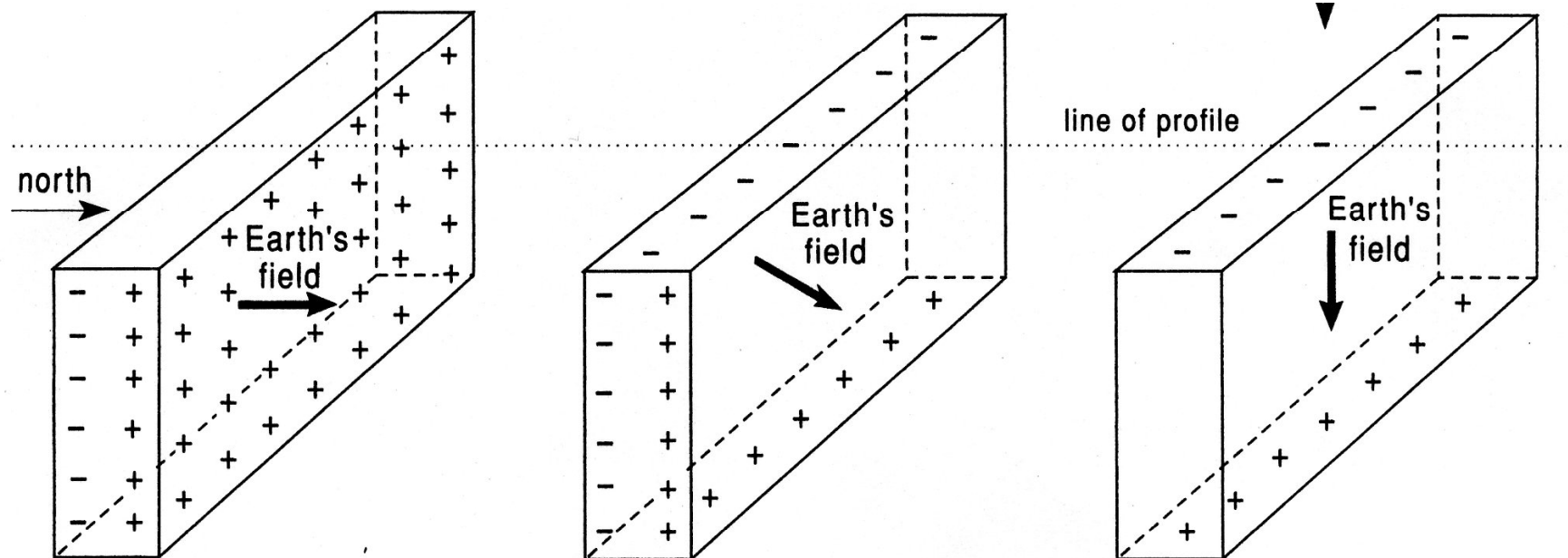


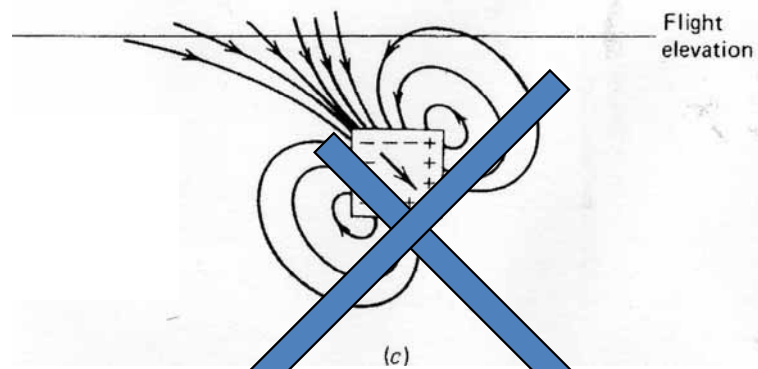
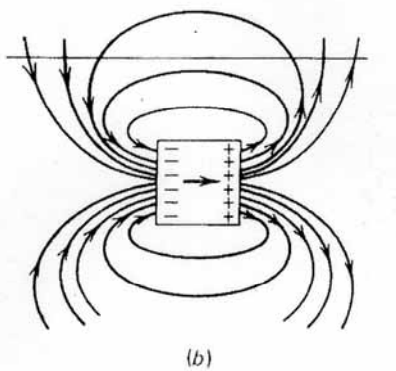
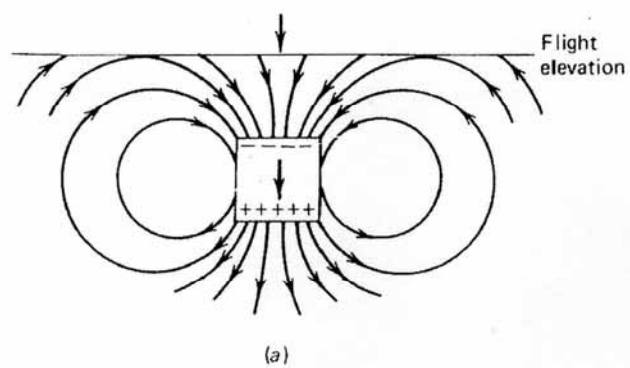
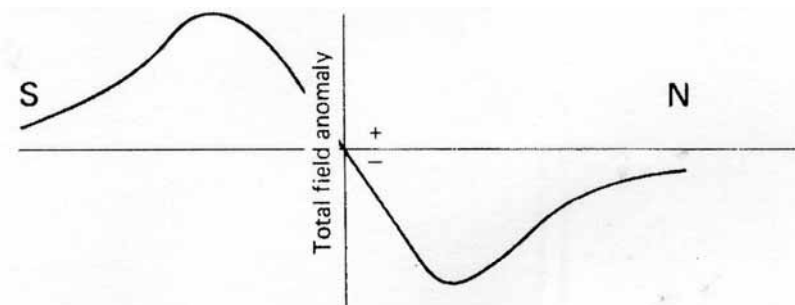
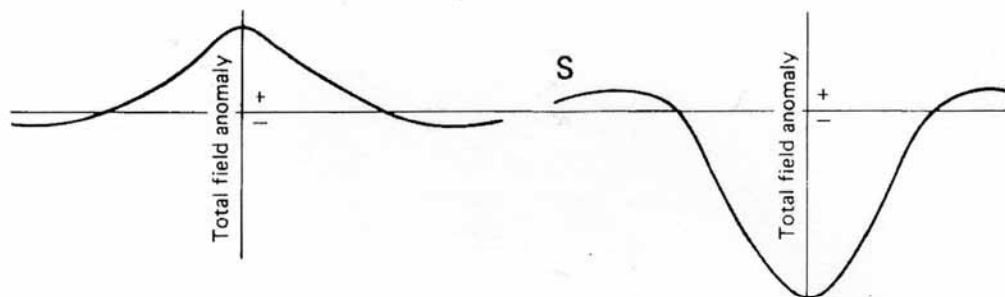
0 1  
Kilometre

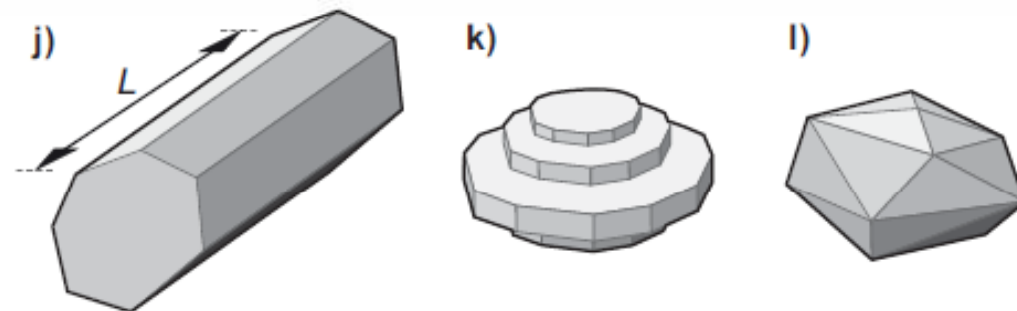
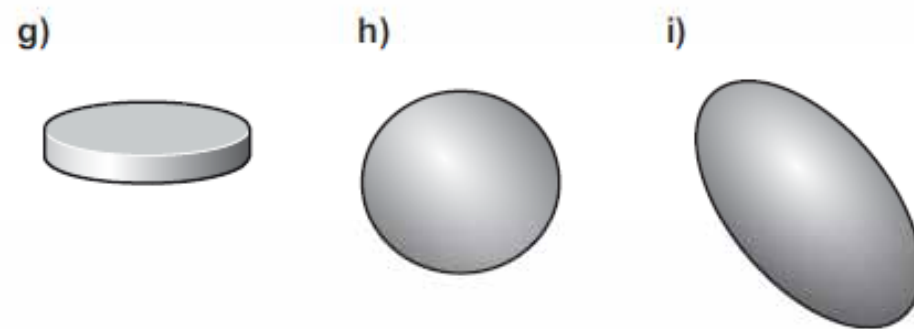
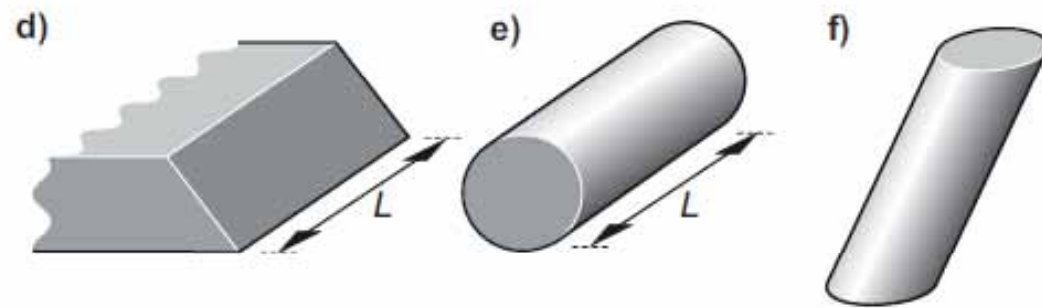
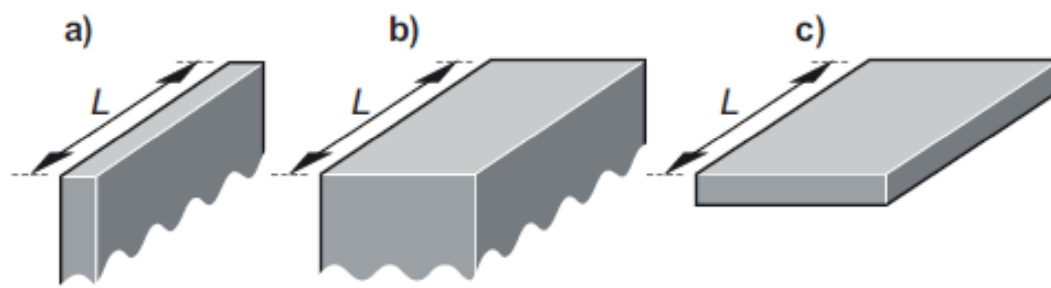




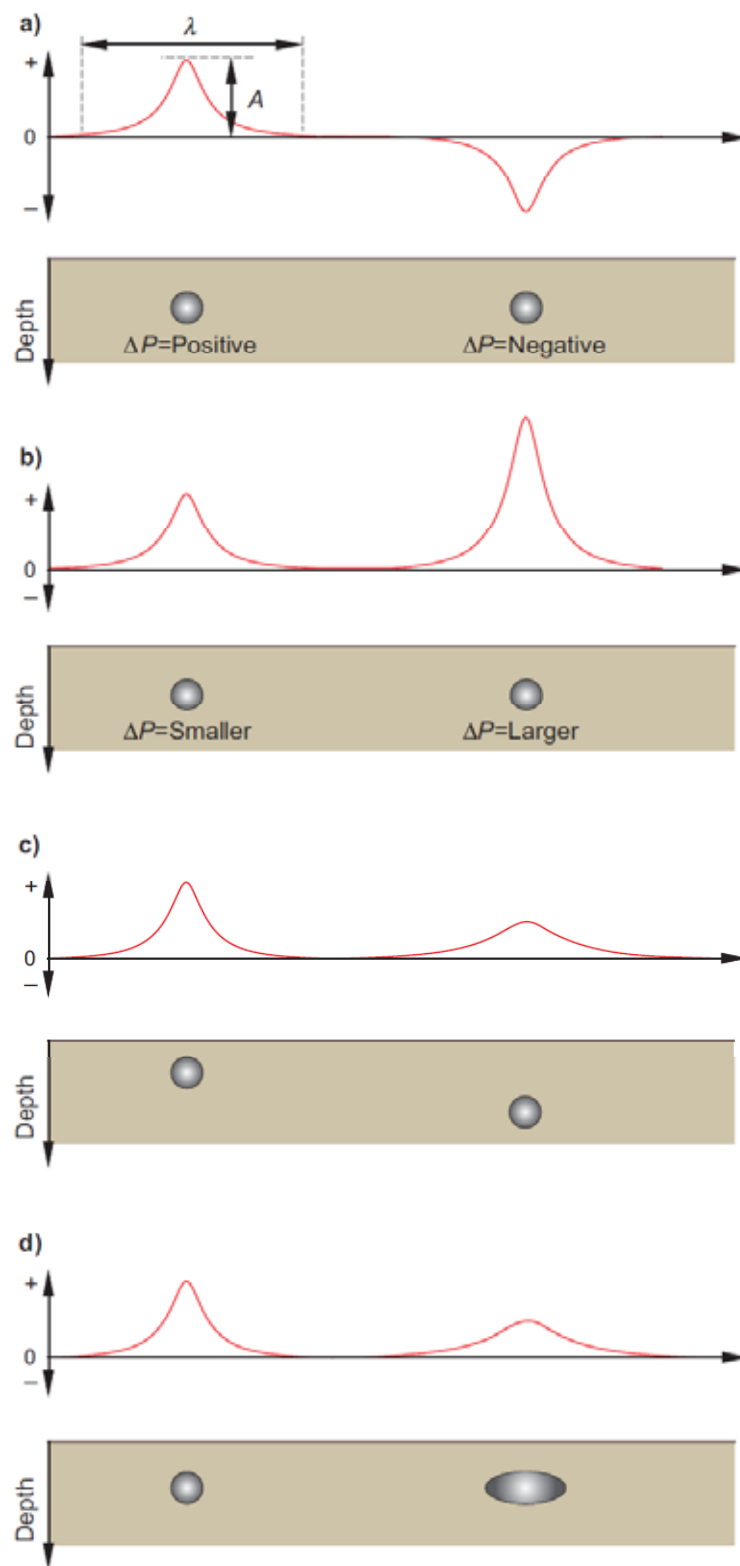
Si el cuerpo no es puntual, su respuesta se calcula integrando la de infinitos dipolos.  
Como los polos de dipolos sucesivos se cancelan mutuamente, sólo tendrán efecto los polos “libres” en los límites del cuerpo.











En términos generales valen las mismas consideraciones vistas en gravimetría en cuanto a longitud de onda vs. profundidad, amplitud vs. contraste, etc.

**Pero se agrega la dependencia en cuanto a ubicación geográfica y orientación espacial**

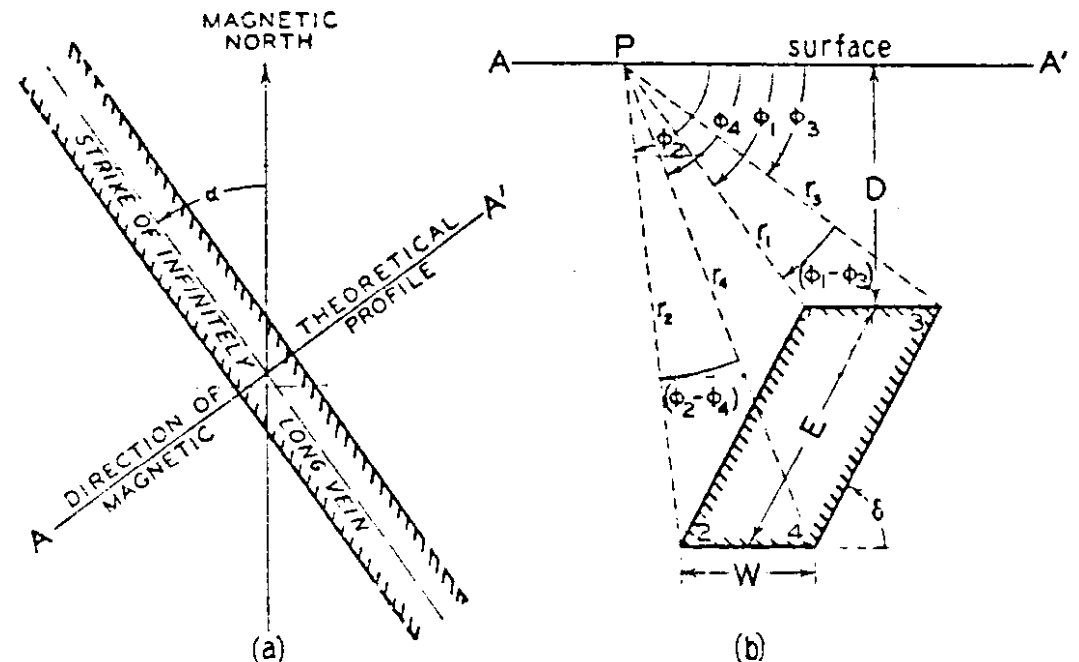
Para un dique de extensión infinita en el rumbo, uniformemente magnetizado, la componente vertical de la anomalía del campo magnético causado por él en cualquier punto se aproxima a (Cook, 1950):

$$\Delta Z = 2\kappa \sin \delta \left[ \begin{aligned} & (H_o \sin \alpha \sin \delta + Z_o \cos \delta) \log_e r_2 r_3 / r_1 r_4 \\ & - (H_o \sin \alpha \cos \delta - Z_o \sin \delta) (\phi_1 - \phi_2 - \phi_3 + \phi_4) \end{aligned} \right]$$

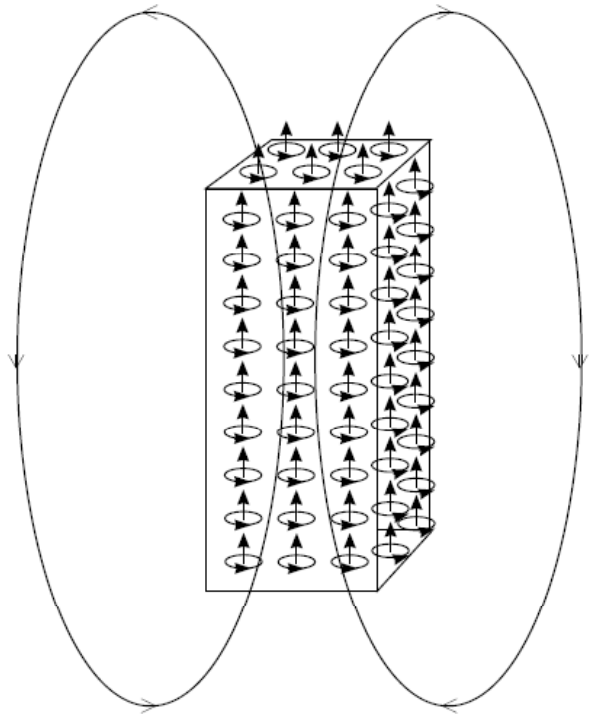
Parámetros que dependen de la geometría del cuerpo:  $r$ ,  $\theta$ ,  $\delta$

Parámetros que dependen de la dirección del CM y de la orientación del cuerpo con respecto al CM:  $\alpha$ ,  $H_o$ ,  $Z_o$

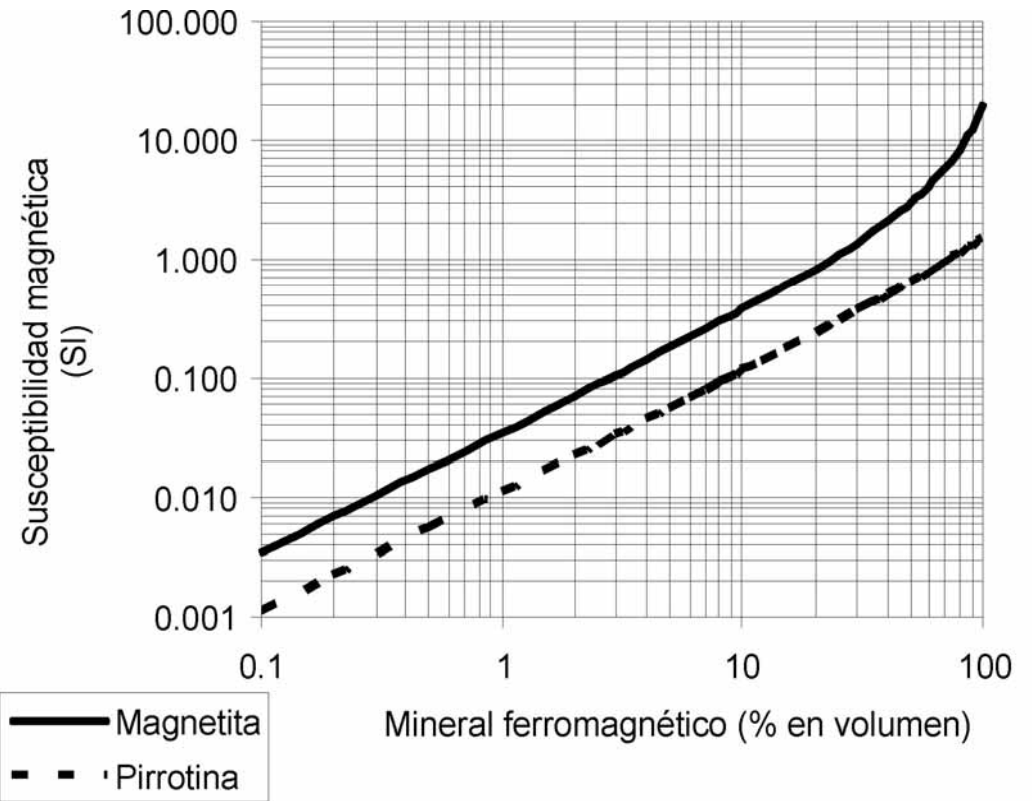
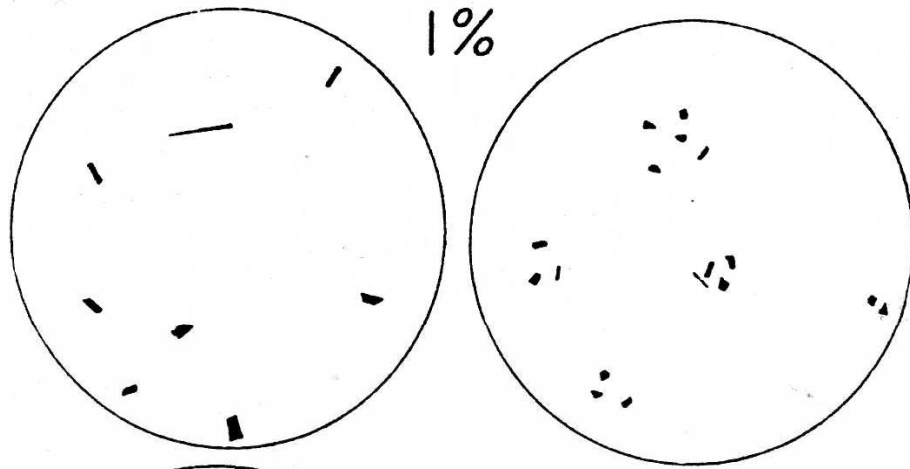
La intensidad de la anomalía estará controlada por la susceptibilidad magnética  $\kappa$



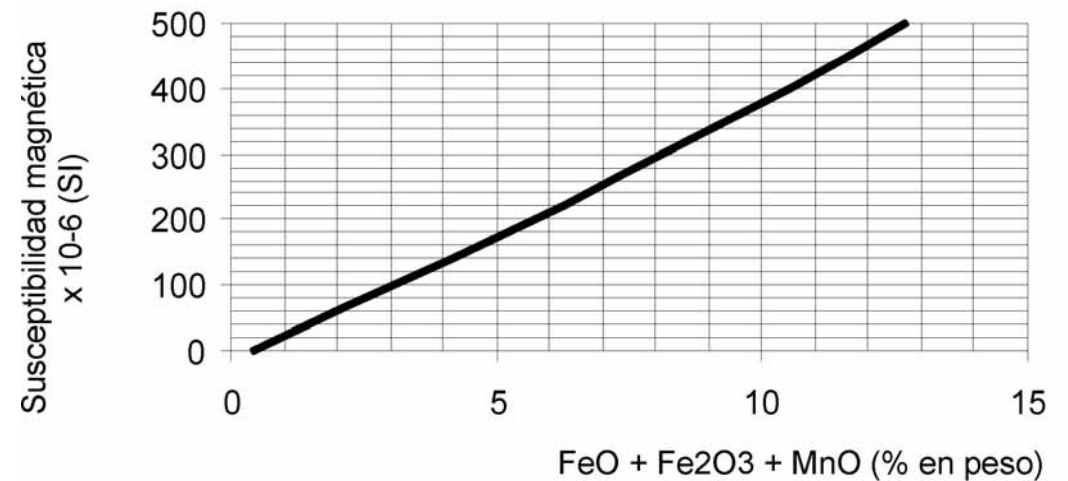
$$\Delta Z = 2\kappa \sin \delta \left[ \begin{array}{l} (H_o \sin \alpha \sin \delta + Z_o \cos \delta) \log_e r_2 r_3 / r_1 r_4 \\ - (H_o \sin \alpha \cos \delta - Z_o \sin \delta)(\phi_1 - \phi_2 - \phi_3 + \phi_4) \end{array} \right]$$



(b)



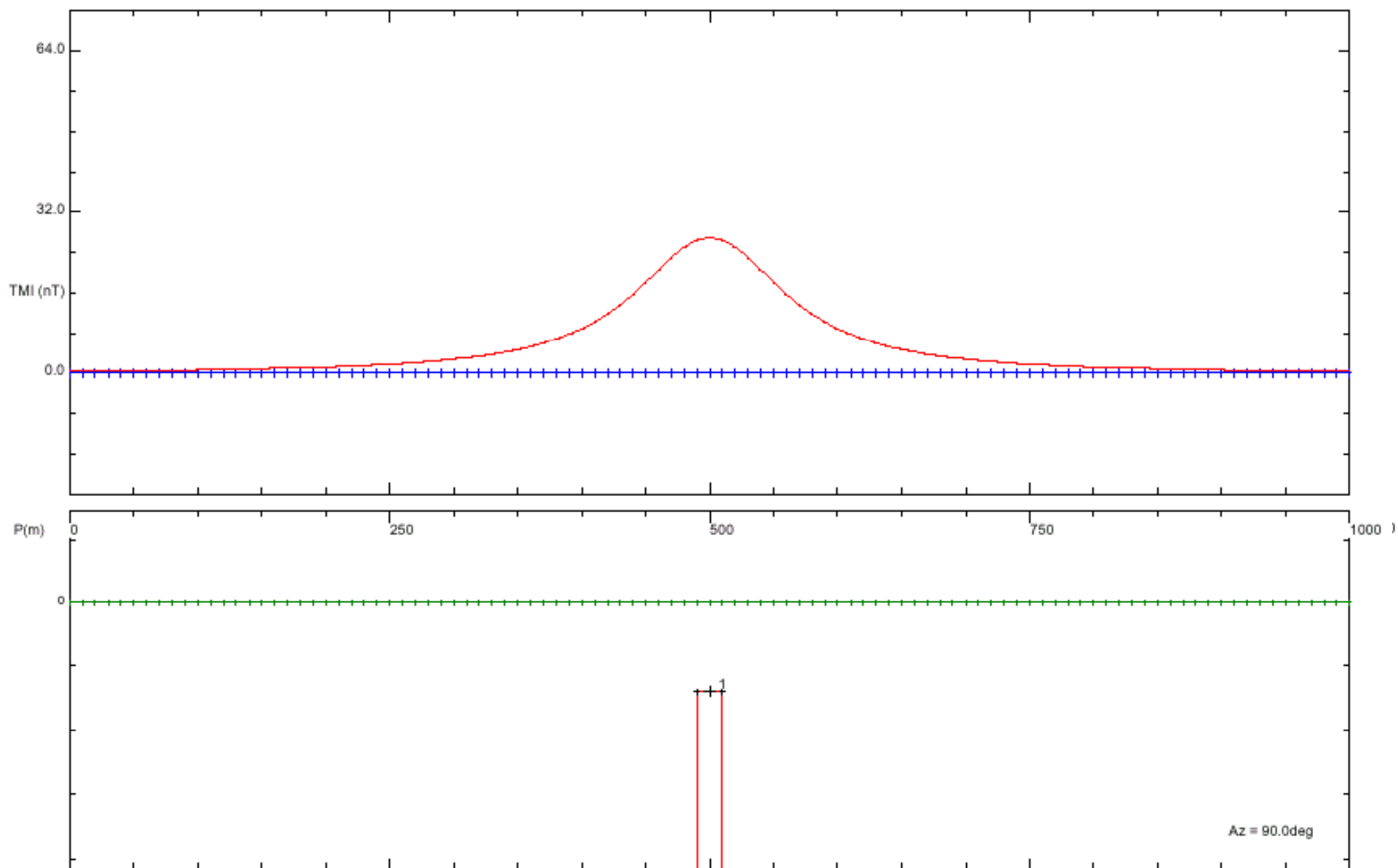
**En ausencia de minerales ferromagnéticos**



Relaciones teóricas aproximadas de acuerdo a Rochette et al. (1992) y Clark (1999). El gráfico superior asume un aumento gradual de la densidad de la roca con el aumento del contenido de Fe

*En latitud intermedia del hemisferio Sur*

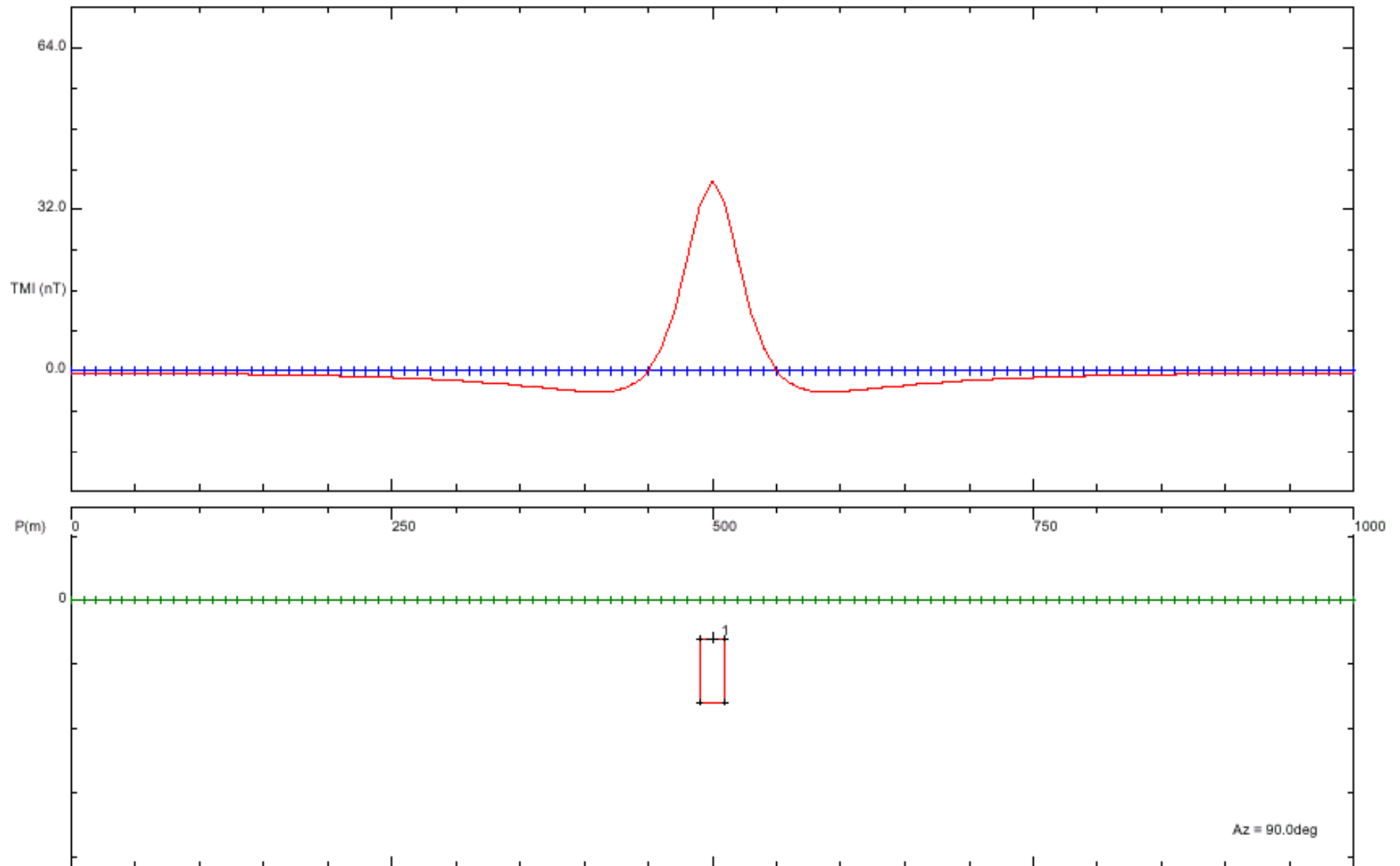
Dique de rumbo N-S, profundidad infinita



Anomalía sencilla, simétrica y positiva

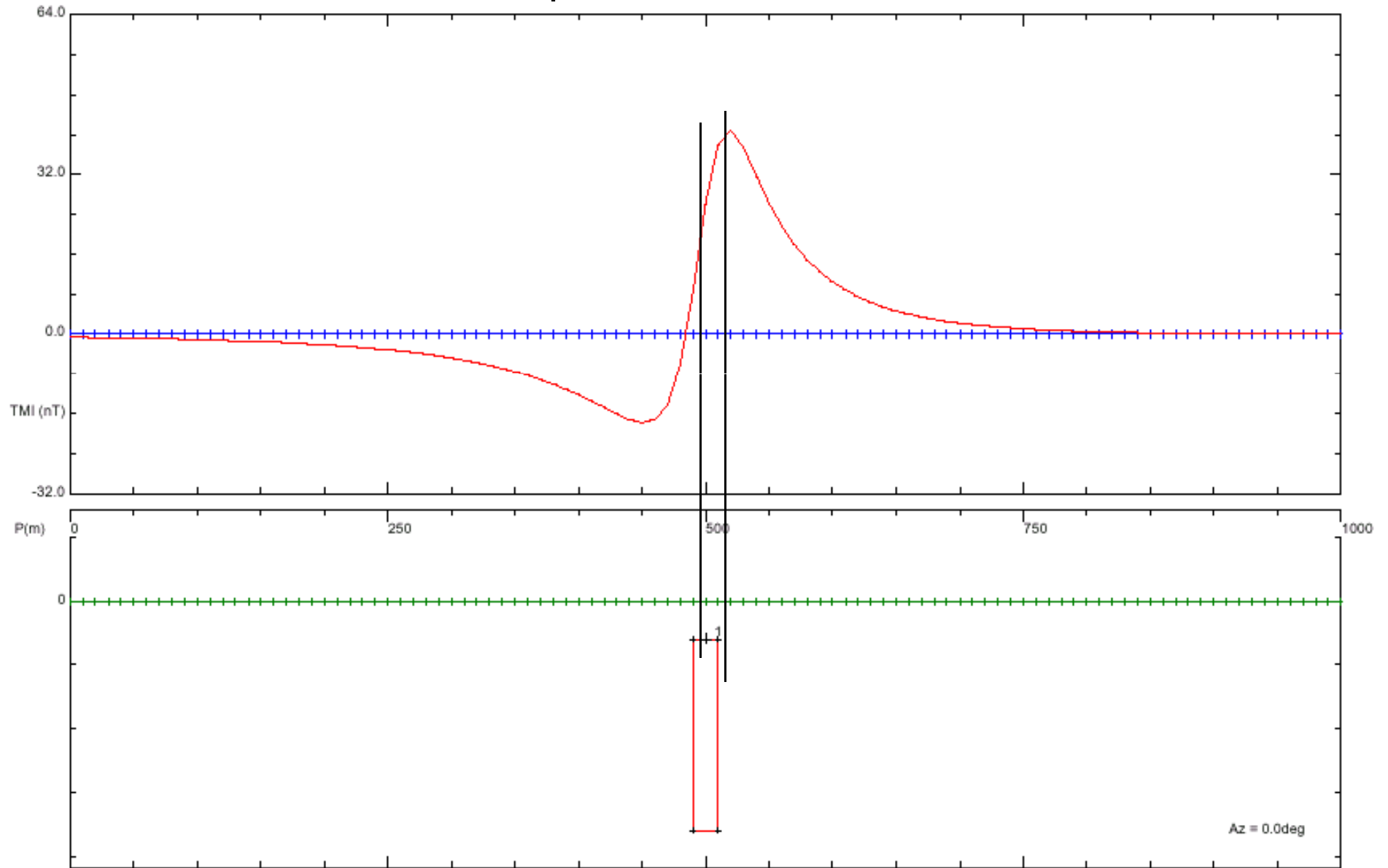
*En latitud intermedia del hemisferio Sur*

Dique de rumbo N-S, profundidad finita



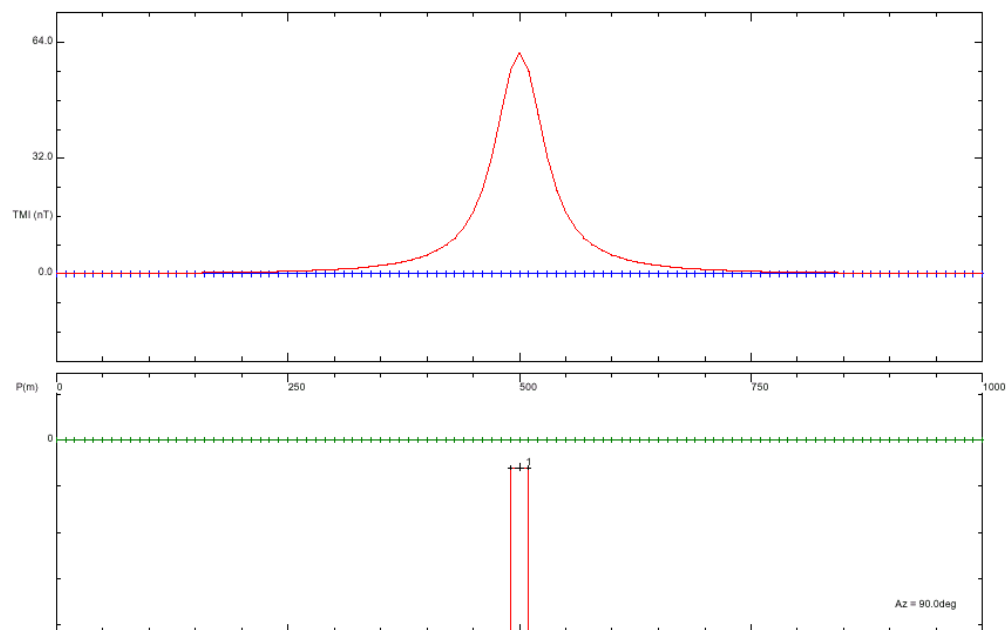
*En latitud intermedia del hemisferio Sur*

Dique de rumbo E-O

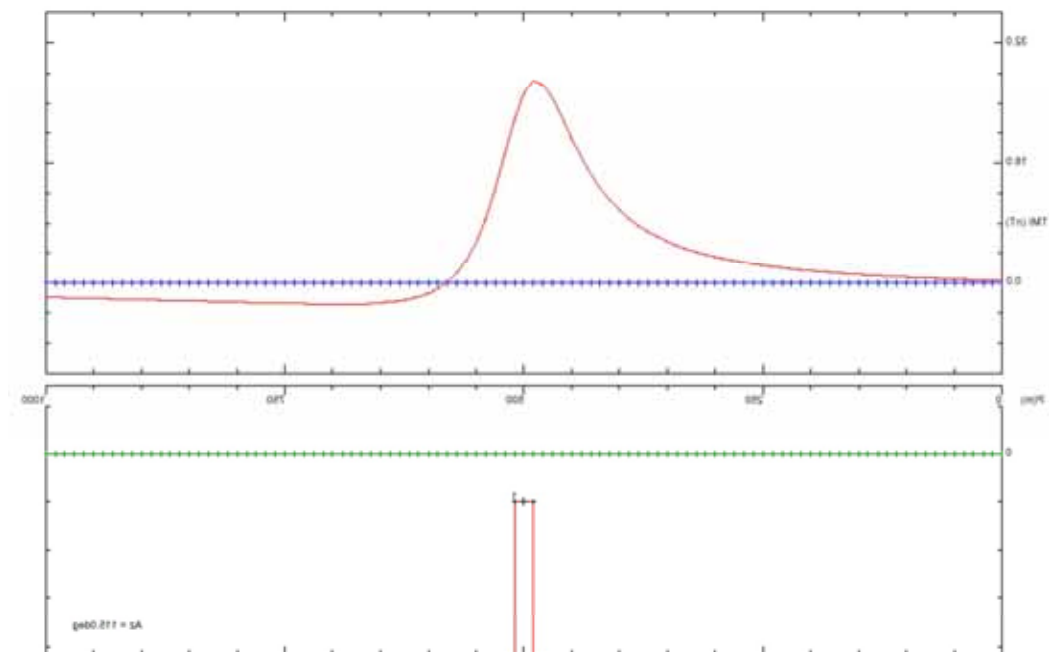
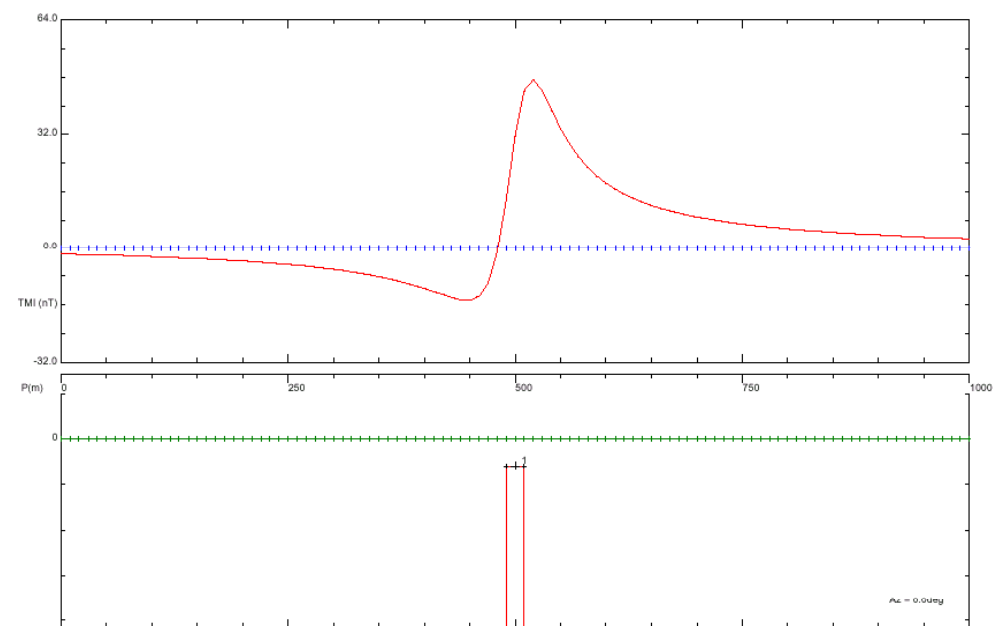


Anomalía compuesta: doblete de pico positivo al norte y pico negativo al sur

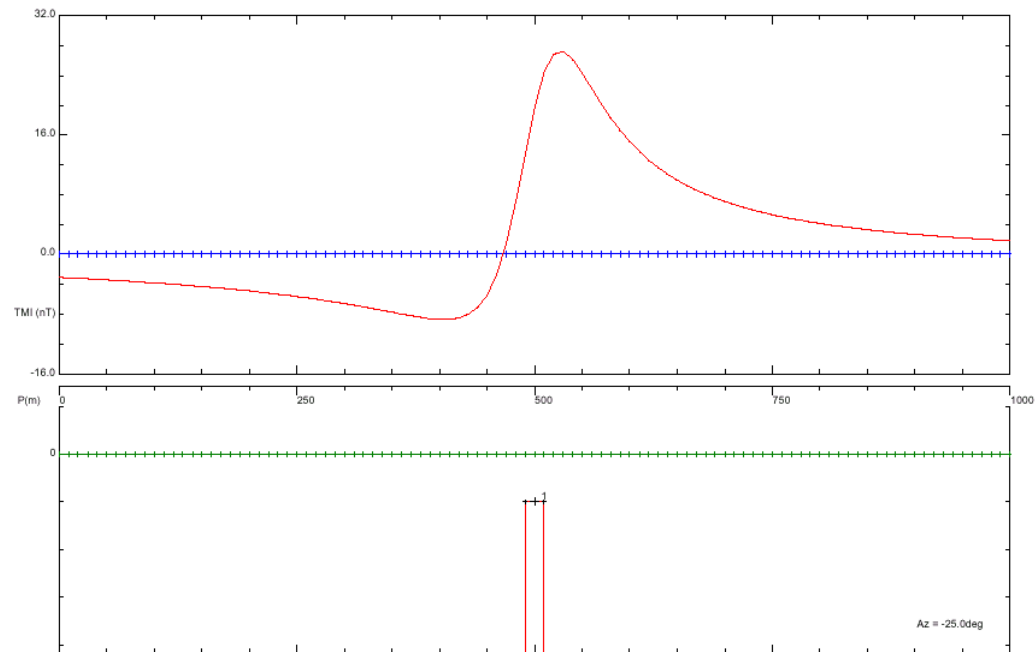
# Dique de rumbo N-S



# Dique de rumbo E-O



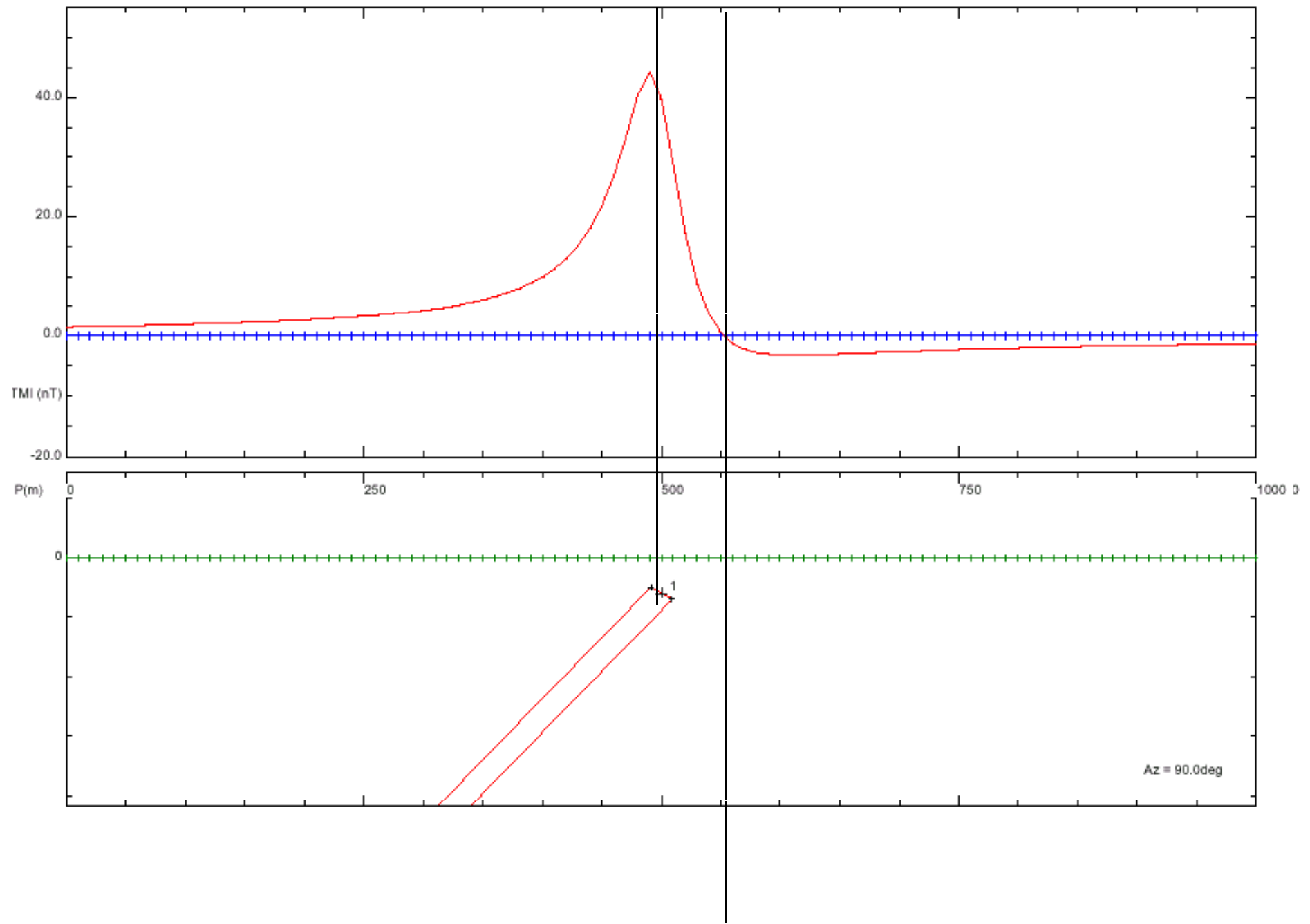
# Dique de rumbo 25o



# Dique de rumbo 65o

*En latitud intermedia del hemisferio Sur*

Dique de rumbo N-S, inclinado al oeste





- Campo magnético local del cuerpo: depende de
  - o Forma y tamaño
  - o Orientación, posición con respecto al CMT
  - o Susceptibilidad magnética
- La forma de la anomalía depende de cómo interactúa el CMT principal con el campo local del cuerpo
- Valen generalizaciones sobre relación profundidad/longitud de onda, contraste/amplitud, pero la forma de la anomalía es compleja debido a los múltiples factores que la controlan.  
*Ambigüedad!*
- Para describir anomalías:
  - Simetría
  - Ubicación del pico de anomalía con respecto al cuerpo
  - Ubicación de máximos respecto a mínimos
  - Relación de amplitudes entre máximos y mínimos
  - Variaciones de amplitud y/o longitud de onda al cambiar parámetros