

# Curso de Geofísica

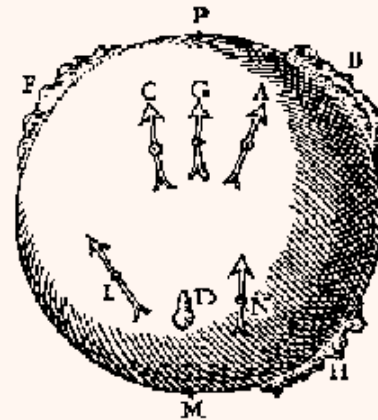
## Magnetometria

Dra. Mônica G. Von Huelsen

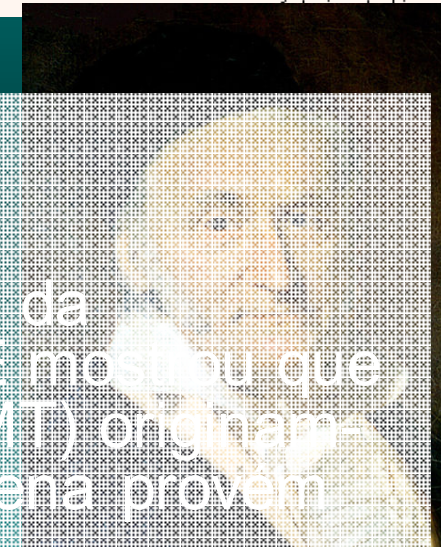
# Introdução

- Chineses já usavam a bússola por volta de 1100 d.c.
- 1269 – Petrus Peregrinus de Maricourt – Esculpiu magnetita numa forma esférica, da qual aproximava pequenos ímãs. Desenhou sobre a superfície esféricas as direções indicadas por eles, obtendo as linhas que circundavam a esfera e interceptavam-se em dois pontos, da mesma forma que as linhas de longitude interceptam-se nos pólos. (Pólos do ímã) – tratado *De Magnete*
- Médico Inglês - William Gilbert – Repetiu e ampliou diversas experiências, reunindo todo conhecimento. (1600 - *De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure* )

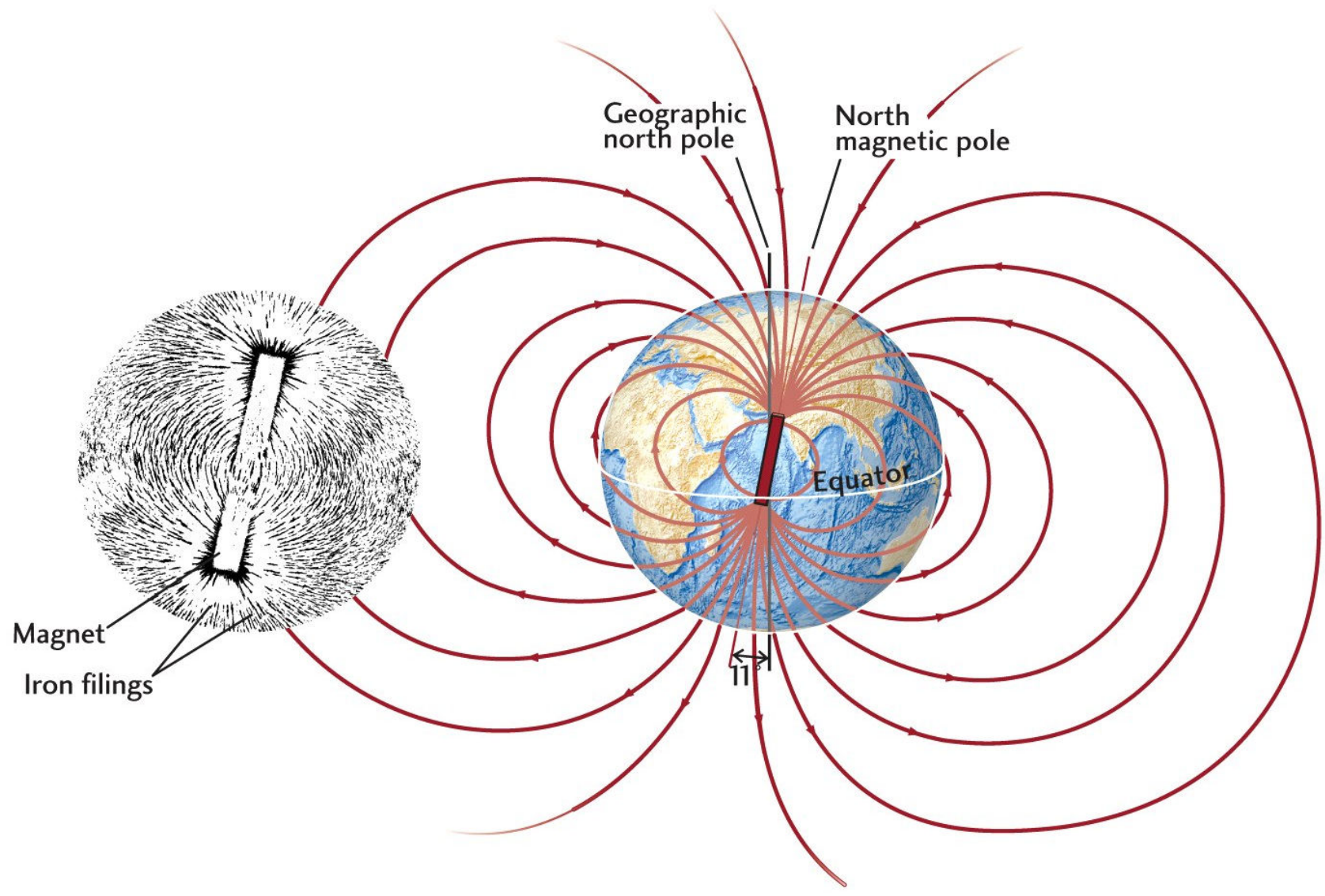
# Intr



- A terra era um grande ímã.
- 1838 – Carl Friedrich Gauss
  - Começou a fazer medidas sistemáticas da intensidade do campo geomagnético. E mostrou que, 95% do Campo Magnético da Terra(CMT) originam-se no seu interior e somente uma pequena provém de fontes externas.
- Gilbert – CMT é semelhante ao da esfera de magnetita, é equivalente dizer que a terra é esfera uniformemente magnetizada. Semelhante à de um ímã de barra (dipolo)



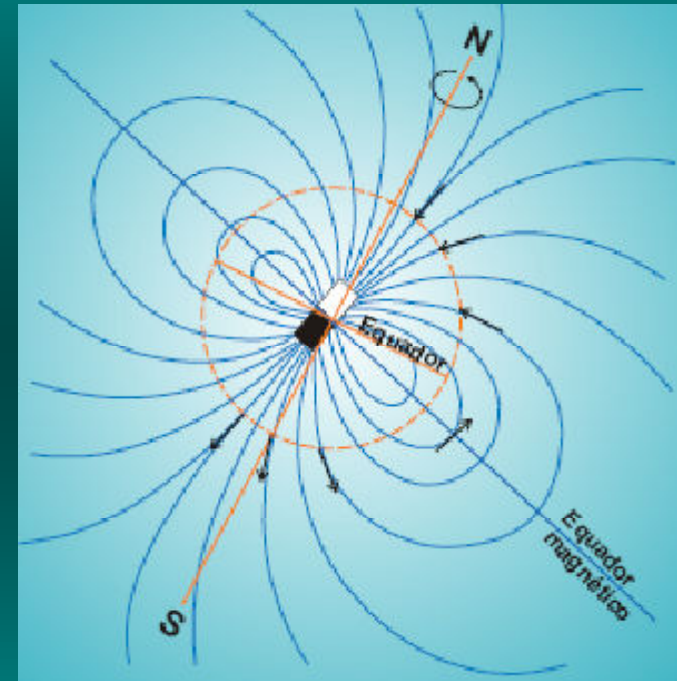
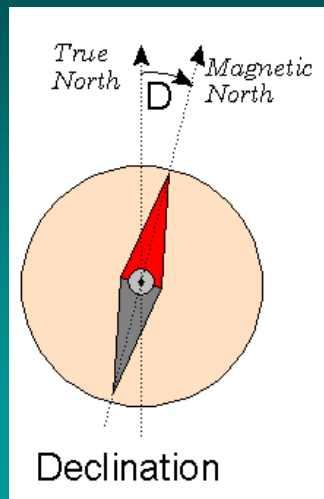
# dipolo



Fonte: Understanding the Earth Fig.:21.11

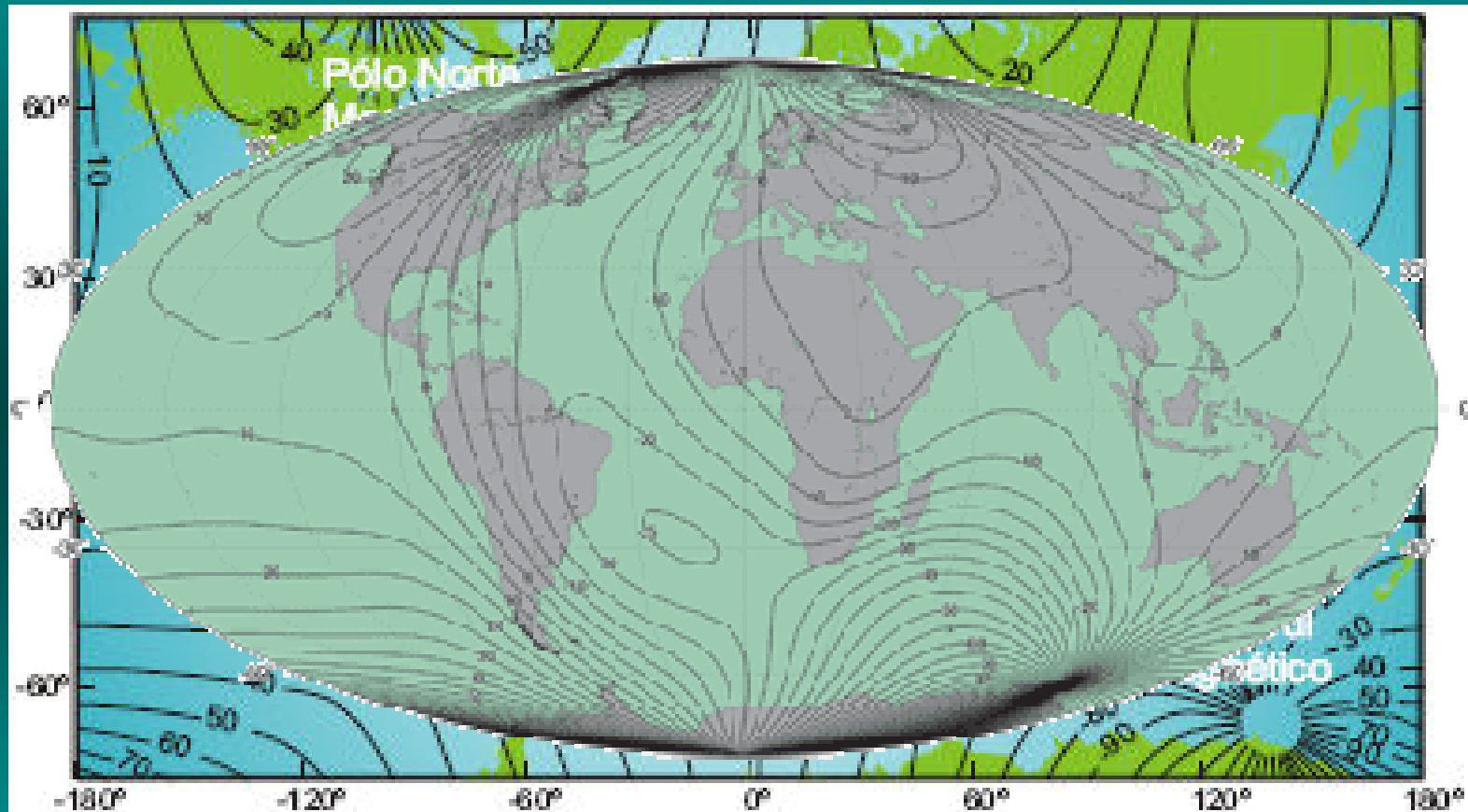
# Declinação?

- Imaginamos a que existe no centro Terra um dipolo ou ímã de barra.
- O eixo do **dipolo** geocêntrico está próximo ao eixo de rotação e faz um ângulo de cerca de  $11,5^\circ$ .
- Por esta razão a agulha não aponta para o norte, mas sua direção faz um ângulo com a direção N-S. Esse ângulo de desvio da agulha é a **Declinação magnética**.



Decifrando a terra

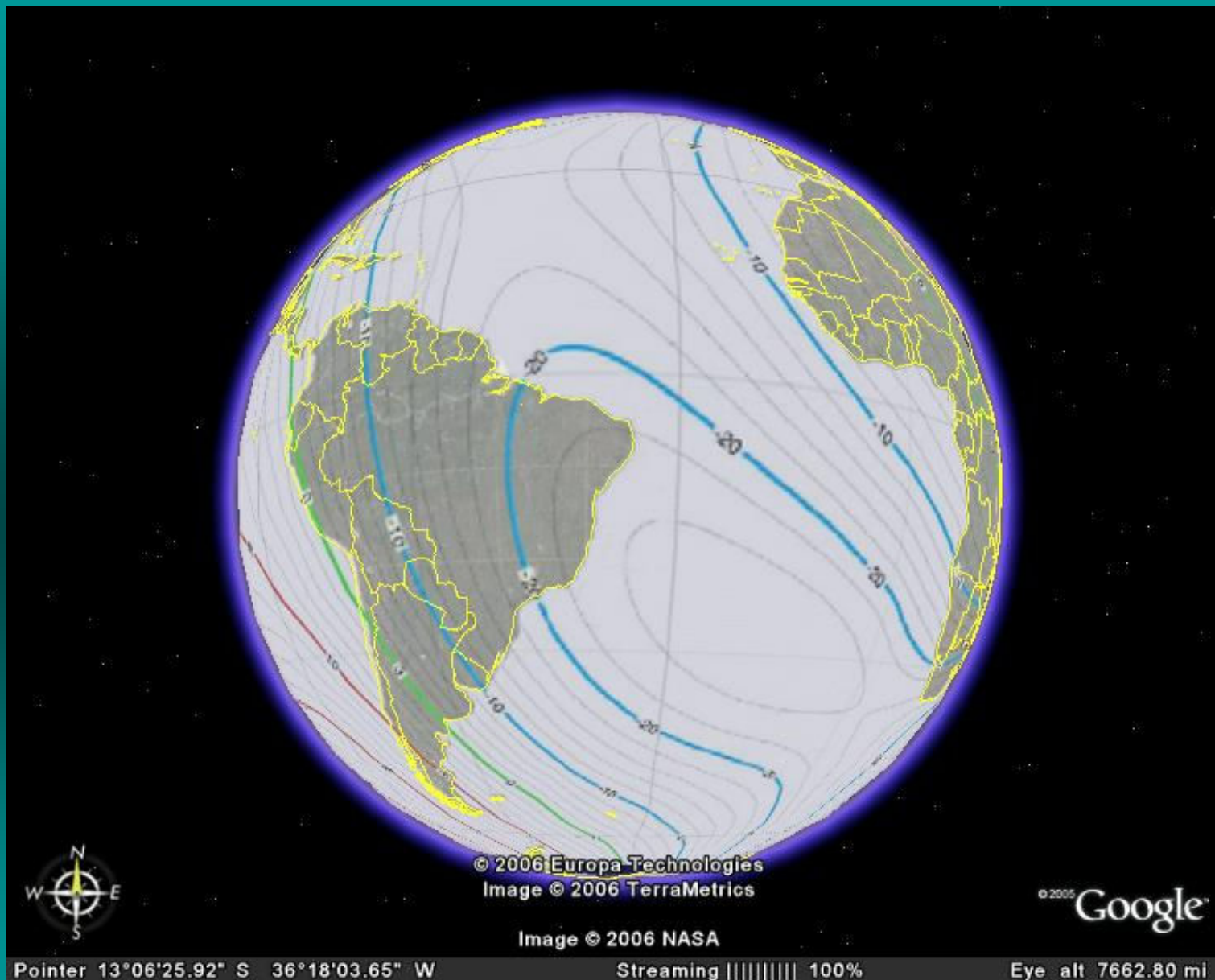
# Declinação 1980 - 2010

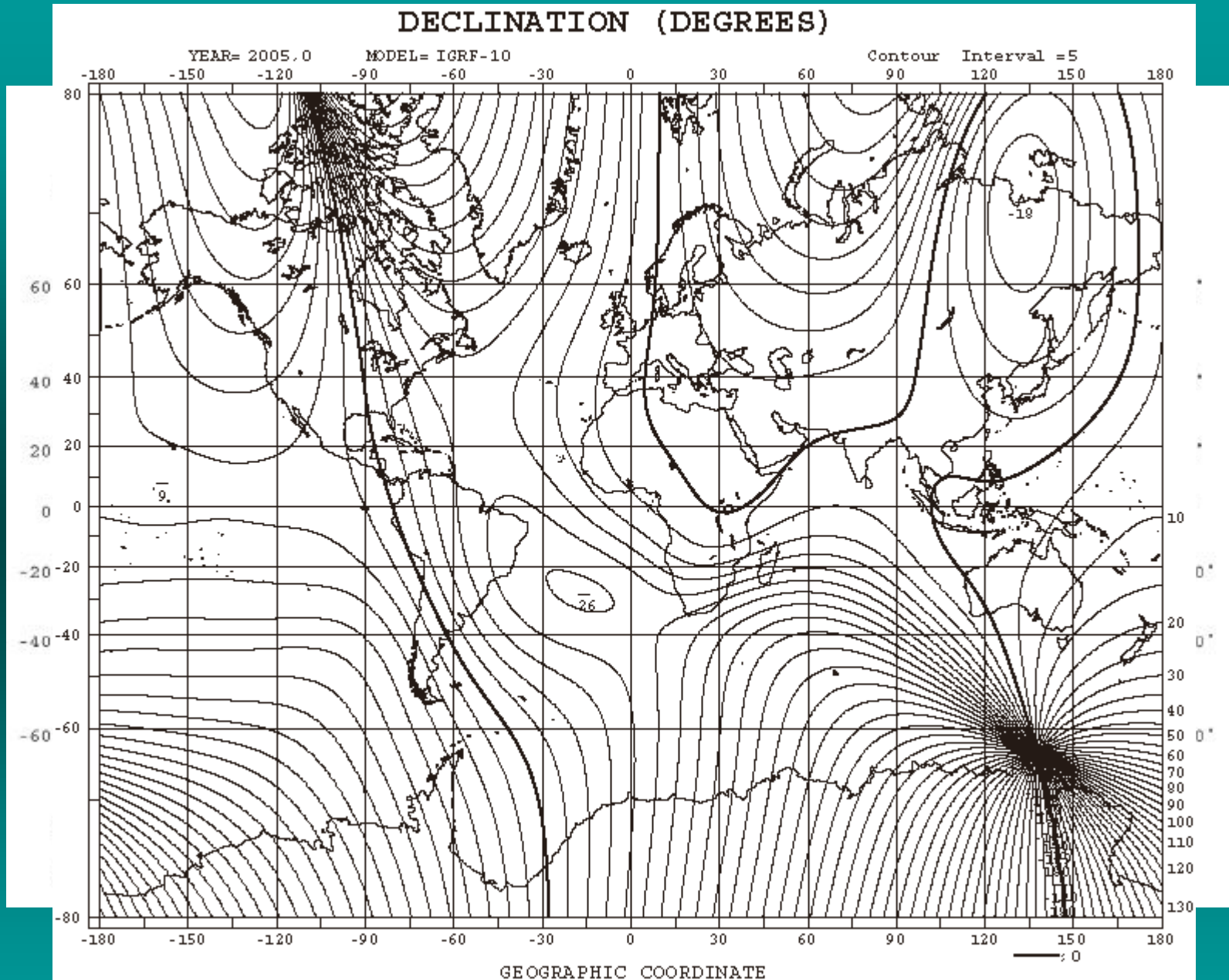


**Fig. 4.12** Mapa de declinação magnética indicando a posição dos pólos e a linha de declinação zero. Fonte: Langel et al., 1980.





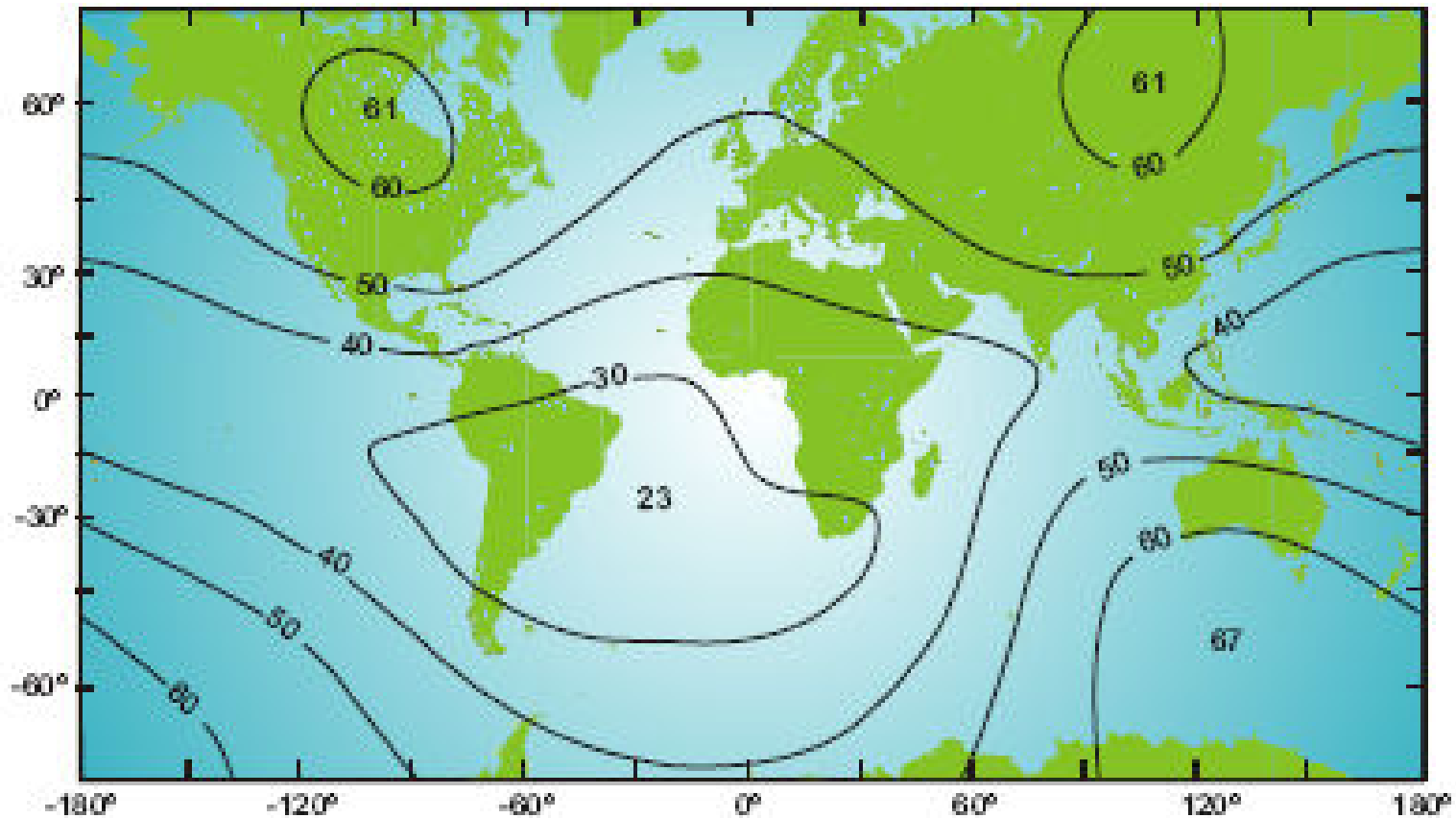




- ❑ International Geomagnetic Reference Field (IGRF)
- ❑ <http://www.ava.fmi.fi/MAGN/igrf/applet.html>



# Intensidade



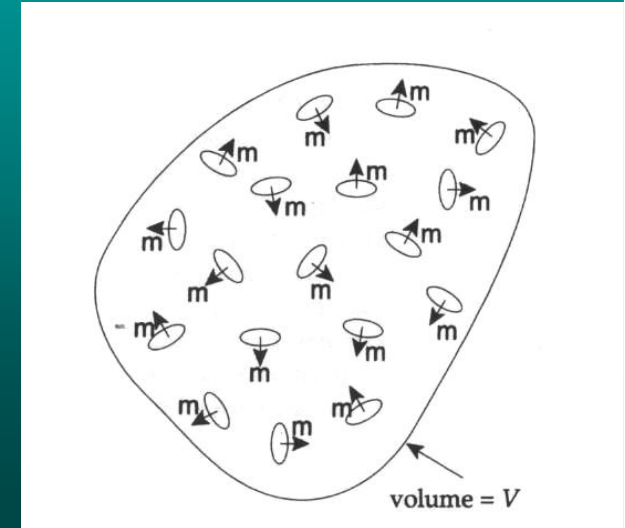
**Fig. 4.13** Mapa de intensidade total do campo geomagnético em milhares de nT.

- O Campo Geomagnético Total (CMT) é a soma do Campo Geomagnético Principal (CGM) e do Campo Geomagnético Anômalo (CGA) (eventualmente parte do campo superior) – Campo Crustal
- Intensidade fraca do CMT – 50000 nT
  - Unidade gamma  $\gamma = 1 \text{ nT}$

# Intensidade e susceptibilidade de magnetização

## Intensidade de Magnetização

- Um material colocado na presença de um campo magnético pode magnetizar-se. Momento magnético de cada átomo  $m$
- Em geral, proporcionalmente ao campo externo e com a mesma direção.
- De certa forma, é um processo de alinhamento dos dipolos magnéticos do material. Daí denominar-se, também, polarização magnética. Magnetização!



# Indução magnética

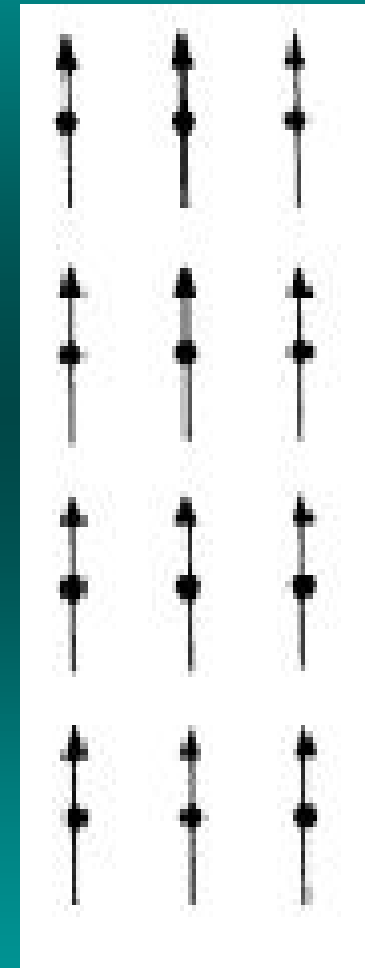
- Como visto, um material magnético sob a ação de um campo externo, torna-se magnetizado. O campo no seu interior passa a ser a soma do campo externo ( $H$ ) mais o campo associado à magnetização adquirida ( $M$ ).
- O campo magnético total é a indução magnética, é representado por
- $B = \mu_0(H + M) = \mu_0(1 + \chi)H = \mu_0\mu H \rightarrow \rightarrow$  onde  $M = \chi H$
- $\mu$  é a permeabilidade magnética
- em que o termo  $H$  à corresponde à componente do campo externo (campo magnético ambiente) - e o termo  $M$  ou  $M^R$  à componente remanescente da magnetização, que corresponde à componente *permanente* da magnetização.

# Tipos de magnetismo

- **Diamagnetismo.** Materiais com susceptibilidades negativas são diamagnéticos e constituem a maior parte dos casos.
- Prevalece somente quando o momento magnético atômico líquido é nulo.
- Característico dos átomos com cujos orbitais estão completos.
- Ex.: grafite, gesso, mármore, quartzo e sal.
- **Paramagnetismo.** Oposto ao diagnetismo.
- Ocorre quando o momento magnético atômico líquido não é nulo.
- É típico com os átomos cujos orbitais não estão completos (emparelhados).
- Ex.: séries Ca-Ni, Nb-Rh, La-Pt, Th-U.

# Tipos de magnetismo

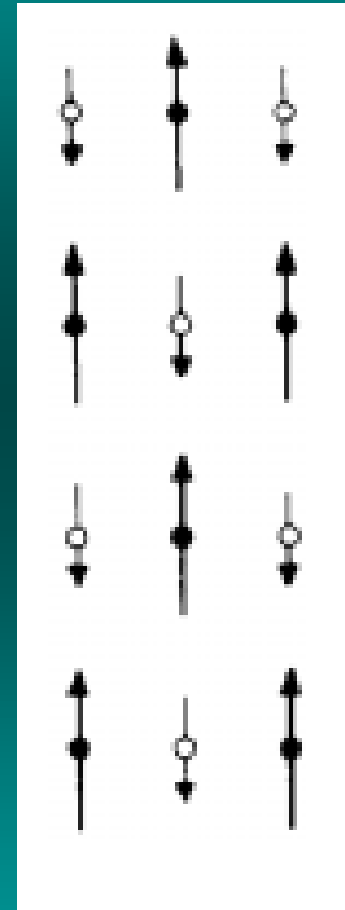
- **Ferromagnetismo.** Ferro, cobalto e níquel são elementos nos quais as interações magnéticas são tão fortes que provocam um alinhamento dos momentos magnéticos em grandes regiões ou domínios.
- Enquanto as susceptibilidades diamagnéticas e paramagnéticas são da ordem de  $10^{-3}$ , no ferromagnetismo do Fe, Co e Ni são  $10^6$  maiores.
- Aparentemente, minerais ferromagnéticos não existem na natureza.





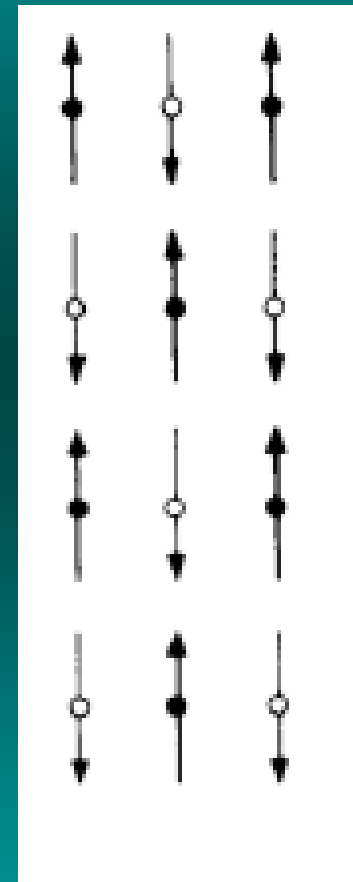
# Tipos de magnetismo

- **Ferrimagnetismo.** São materiais cujos subdomínios dividem-se em dois grupos alinhados em oposição, mas apresentando um momento líquido não nulo.
- Um grupo é mais forte que o outro mas ambos possuem a mesma quantidade de domínios.
- Ex.: magnetita, titanomagnetita e ilmenita, óxidos de ferro ou de ferro e titânio.
- É maior o número de subdomínios em um grupo que no outro. Ex.: pirrotita.



# Tipos de magnetismo (revisão)

- **Antiferromagnetismo.** Se os momentos magnéticos líquidos dos subdomínios paralelos e antiparalelos cancelam-se mutuamente no material, a susceptibilidade resultante é muito pequena, da ordem dos valores dos paramagnéticos.
- Exemplo: hematita



# Tipos Básicos de Comportamento Magnético das Rochas.

- A medida da importância relativa da magnetização remanescente em relação à magnetização induzida é dada pela razão de **Koenigsberger** :
- $Q = \mathbf{M} / \chi \mathbf{H}$
- O valor de  $\chi$  não é necessariamente constante para uma dada substância, podendo ser função do valor do campo  $\mathbf{H}$ . Assim apresentam-se, no próximo slide, nas tabelas uma gama de valores de  $\chi$ , para cada rocha ou mineral, assim como o seu valor "médio", que corresponde a uma média pesada de observações laboratoriais.

# Tipos de magnetismo (revisão)

- **Diamagnetismo**
  - susceptibilidades negativas (ordem  $10^{-3}$ ) são diamagnéticos e constituem a maior parte dos casos.
  - o momento magnético atômico é nulo.
  - Característico dos átomos com cujos orbitais estão completos.
  - Ex.: grafite, gesso, mármore, quartzo e sal.
- **Paramagnetismo.**
  - susceptibilidades positivas
  - o momento magnético atômico não é nulo.
  - É típico com os átomos cujos orbitais não estão completos (emparelhados).
  - Ex.: séries Ca-Ni, Nb-Rh, La-Pt, Th-U.
- **Ferromagnetismo.** (Ferro, cobalto e níquel)
  - Elementos nos quais as interações magnéticas são tão fortes que provocam um alinhamento dos momentos magnéticos em grandes regiões ou domínios.
  - As susceptibilidades são da ordem  $10^6$ .
  - Aparentemente, minerais ferromagnéticos não existem na natureza.
- **Ferrimagnetismo.**
  - subdomínios dividem-se em dois grupos alinhados em oposição, mas apresentando um momento não nulo.
  - Um grupo é mais forte que o outro mas ambos possuem a mesma quantidade de domínios.
  - Ex.: magnetita, titanomagnetita e ilmenita, óxidos de ferro ou de ferro e titânio.
  - É maior o número de subdomínios em um grupo que no outro. Ex.: pirrotita

# ROCHAS

Tipo	$\chi(\text{SI})$
Dolomite	-12.5 a 44
Calcário	10 a 25000
Arenito	0 a 21000
Xisto	315 a 3000
Gneisse	125 a 25000
Serpentine	3100 a 75000
Granito	10 a 65
Riolite	250 a 37700
Gabro	800 a 76000
Basaltos	500 a 182000
Peridotite	95500 a 196000

## Minerais

	$\chi(\text{SI})$
Grafite	-80 a -200
Quartzo	-15
Sal Gema	-10
Calcopirite	400
Pirite	50 a 500
Hematite	420 a 38000
Pirrotite	1250 a $6.3 \times 10^6$
Ilmenite	314000 a $3.8 \times 10^6$
Magnetite	70000 a $2 \times 10^7$



# Magnetização remanente

- Como já estudamos, minerais com ferro, ao serem submetidos a um campo magnético, comportam-se como ímãs permanentes, i. é. materiais retêm uma magnetização que é chamada de **remanescente ou remanente**. (mesmo depois de cessar o CM externo) Ferromagnéticos.
- Óxidos de Ferro → magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )
- **Magnetização remanente isotérmica (IRM)**: com a temperatura constante, a rocha é exposta a um campo externo por um curto período de tempo, tais como aqueles provocados pelo relâmpagos. São magnetizações localizadas, apresentam alta intensidade e distribuem-se irregularmente.
- **Magnetização remanente viscosa (VRM)**: adquirida de forma secundária pela longa exposição a um campo externo (como o da Terra).
- **Magnetização termo remanente (TRM)**: adquirida pelas rochas durante o resfriamento a partir de uma temperatura superior a de Curie nas condições atmosféricas normais, porém na presença de um campo externo.

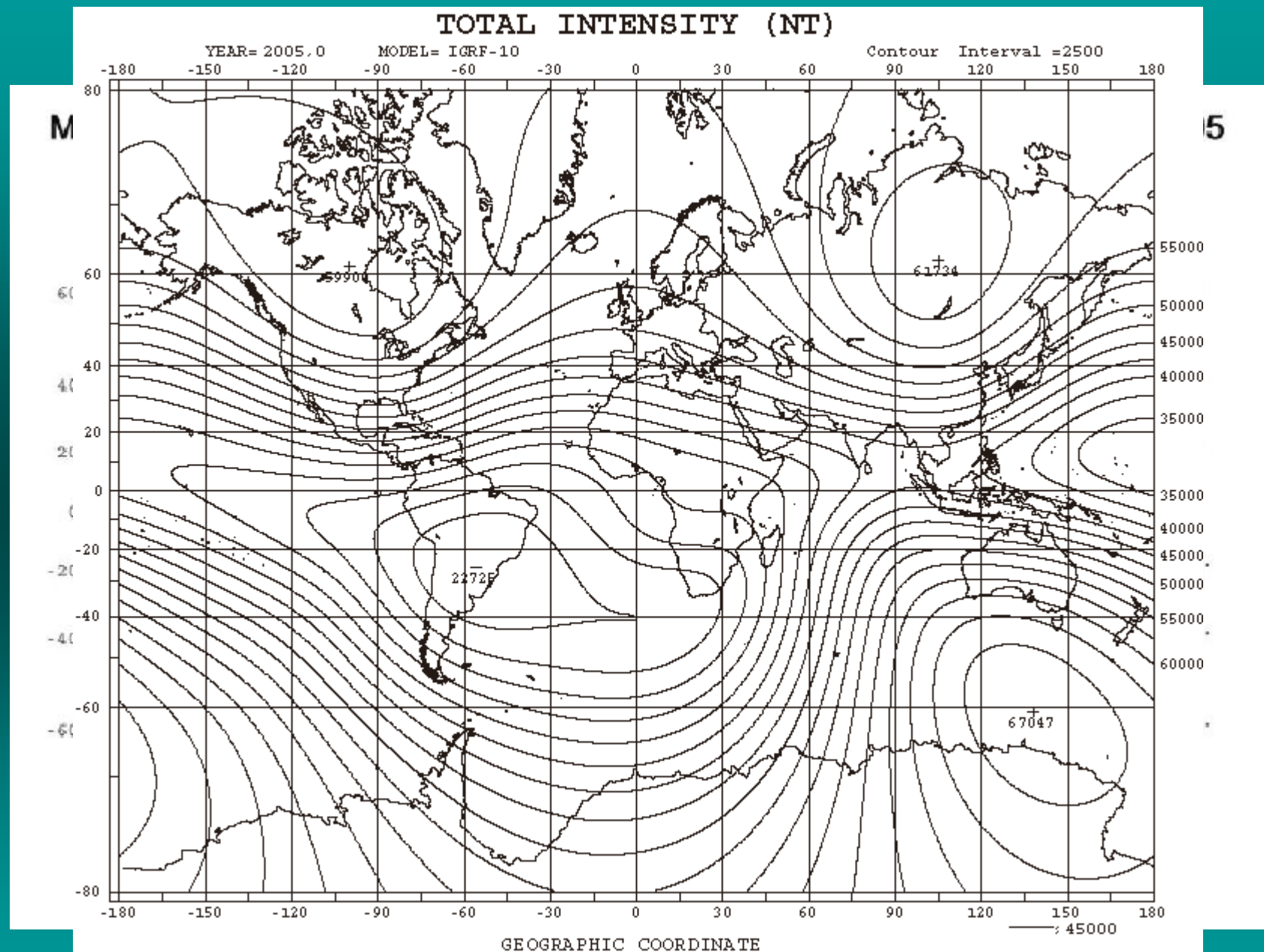
# Magnetização remanente

- **Magnetização remanente deposicional ou detrítica (DRM):** grãos de minerais magnéticos com remanência adquirida previamente podem orientar-se com o campo da Terra à medida em que decantam permeando os sedimentos.
- **Magnetização remanente química ou de cristalização (CRM):** esta magnetização é adquirida quando ocorre a nucleação e o crescimento (ou recristalização) de finos grãos, devido a certas reações químicas, abaixo da temperatura de Curie), sob a ação de um campo ambiente.
- **Magnetização piezoremanente (PRM):** geralmente adicional, é adquirida quando se aplica ou retira tensões mecânicas sob a ação de um campo ambiente a temperatura constante.

# Intensidade e susceptibilidade de magnetização

- **Susceptibilidade**

- O grau com que a polarização magnética ocorre com um material característico.
- Quando a intensidade de magnetização varia linearmente com a ação do campo magnético externo, temos
  - $M = \chi H$ , em que  $\chi$  é susceptibilidade e representa a “facilidade” com que uma substância pode ser magnetizada e produzir, por consequência, o seu próprio campo magnético.



- International Geomagnetic Reference Field (IGRF)

## IGRF for Epoch 2010

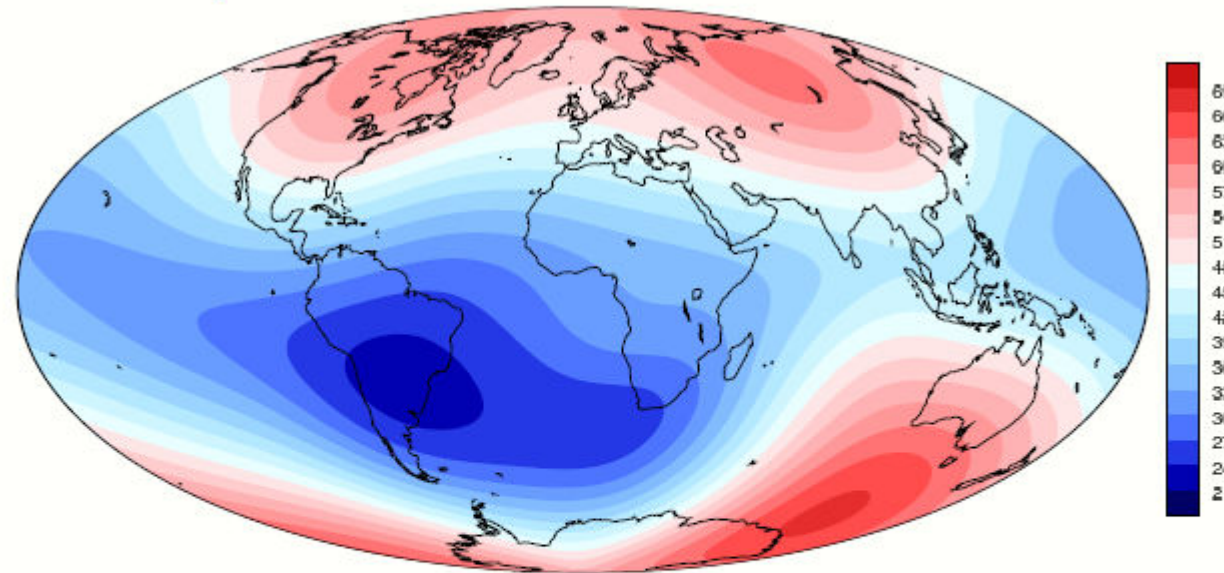


Fig 4: Field intensity ( $F$ ) at Earth's surface in 2010 : units micro Tesla.

Fall AGU Meeting 2009

- International Geomagnetic Reference Field (IGRF)
- [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/igrf\\_vitmo.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/igrf_vitmo.html)



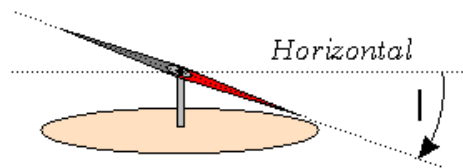
# Inclinação



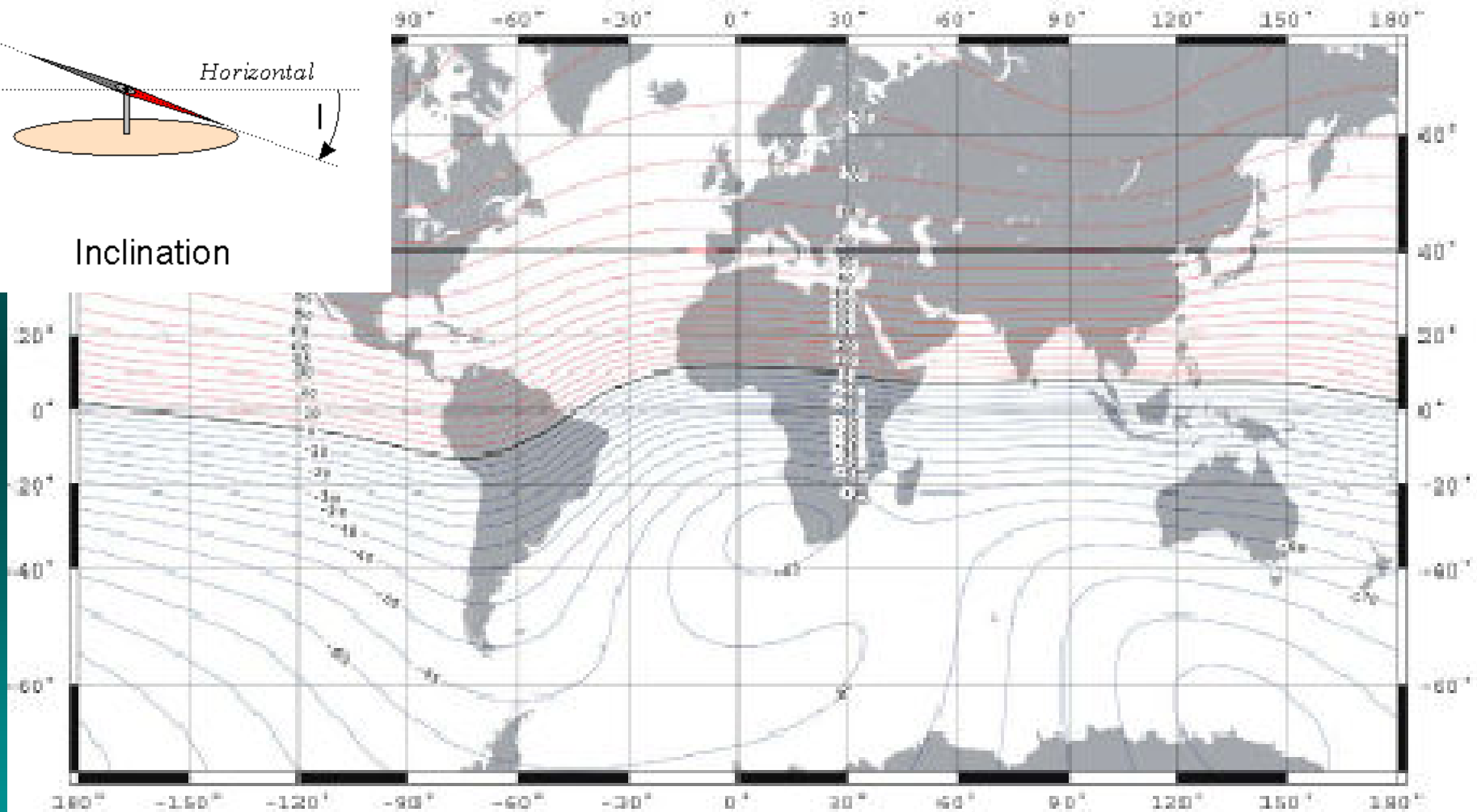
USP/SC, Programa  
educ@r

- Inclinação magnética — é o ângulo que a agulha faz com o plano horizontal.
- Os polos magnéticos estão localizados a aproximadamente  $78^{\circ}\text{N}$   $104^{\circ}\text{W}$  e  $65^{\circ}\text{S}$   $139^{\circ}\text{E}$ . (fonte: decifrando a terra).  $76^{\circ}\text{N}$   $101^{\circ}\text{E}$  e  $66^{\circ}\text{S}$   $141^{\circ}\text{W}$  (em 1990)
- Não são diametralmente simétricos.
- A melhor representação do CMT é de um dipolo cujo o eixo está deslocado ao centro da Terra de 490 km (Dipolo excêntrico)

**Magnetic Inclination (I) at 2005.0 from the World Magnetic Model 2005**



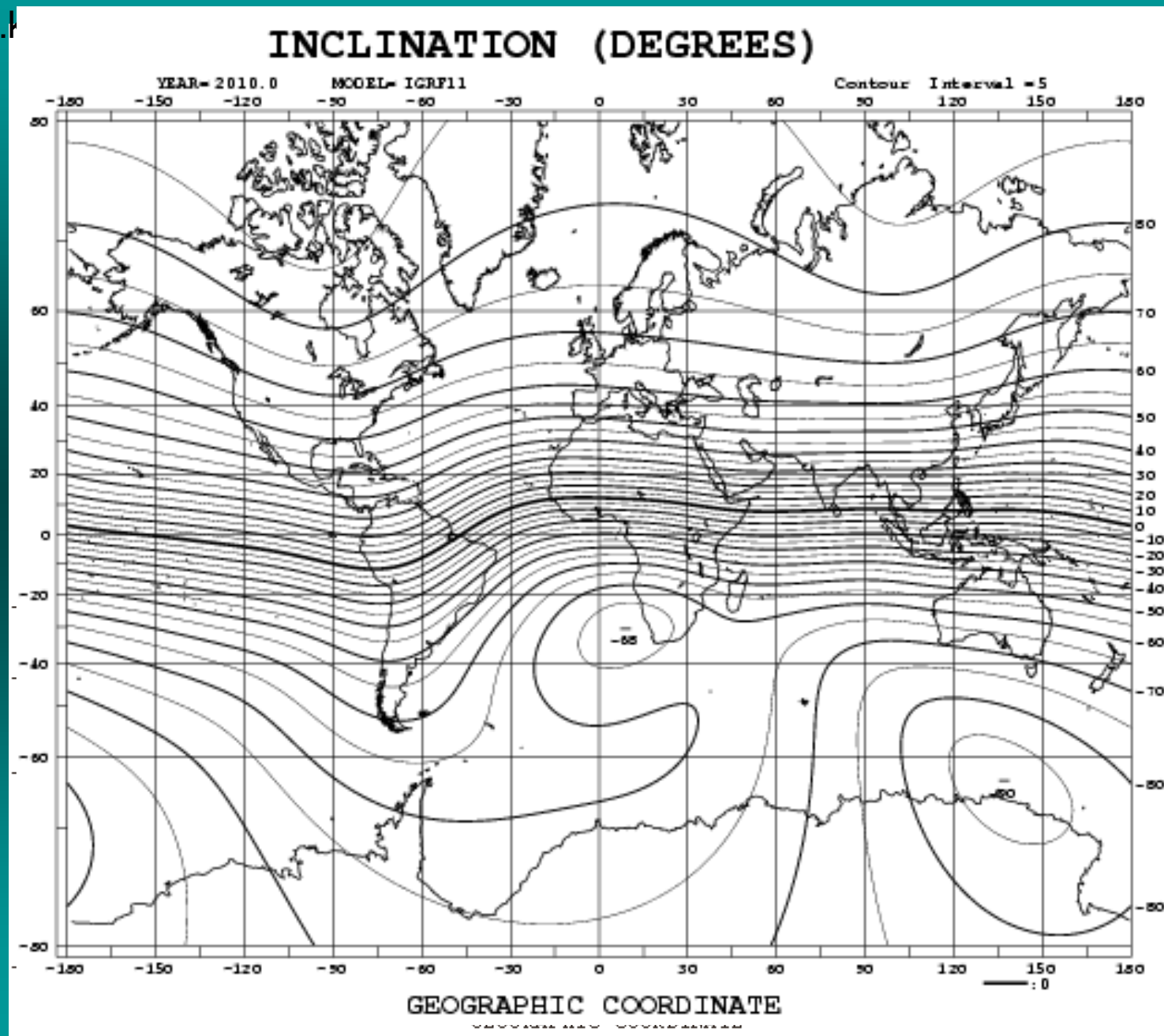
### Inclination



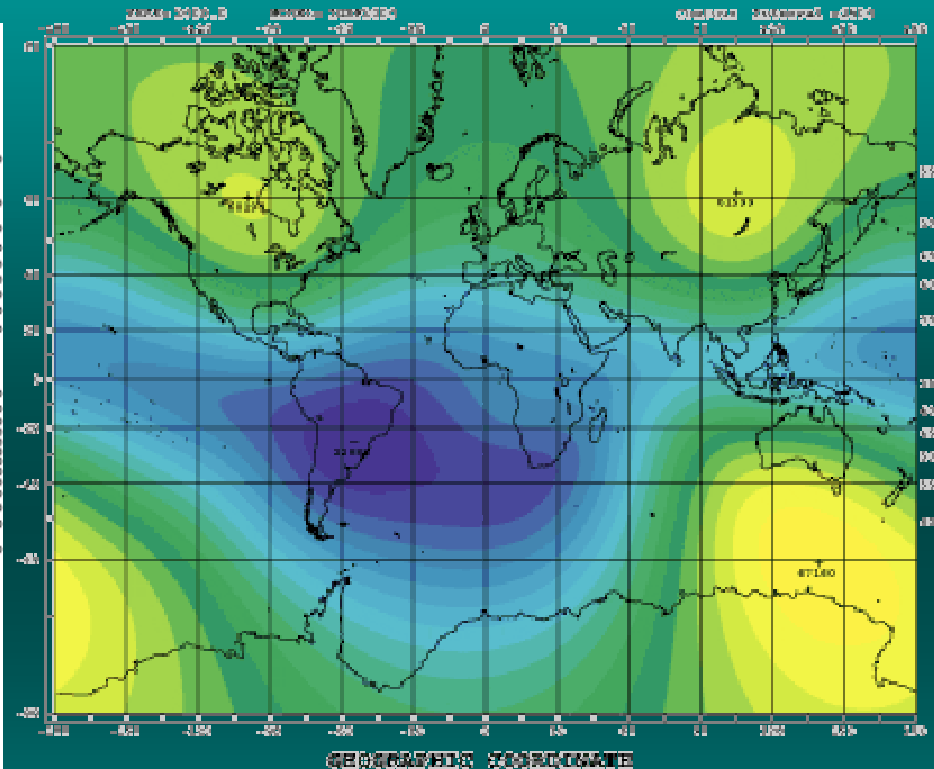
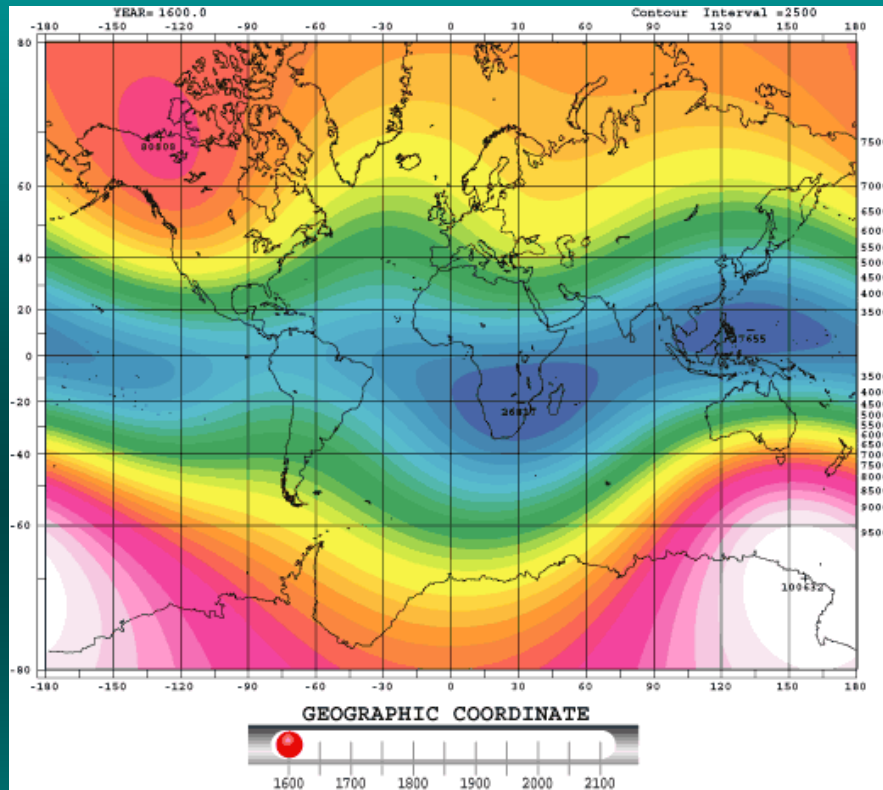
Contour interval is 5 degrees, and includes positive (0-270); zero is 0-180; 180-270 (negative) line. Mercator projection.

## □ International Geomagnetic Reference Field (IGRF)

<http://wdc.riken.go.jp/>



## □ International Geomagnetic Reference Field (IGRF)



<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/index.html> -

animação secular

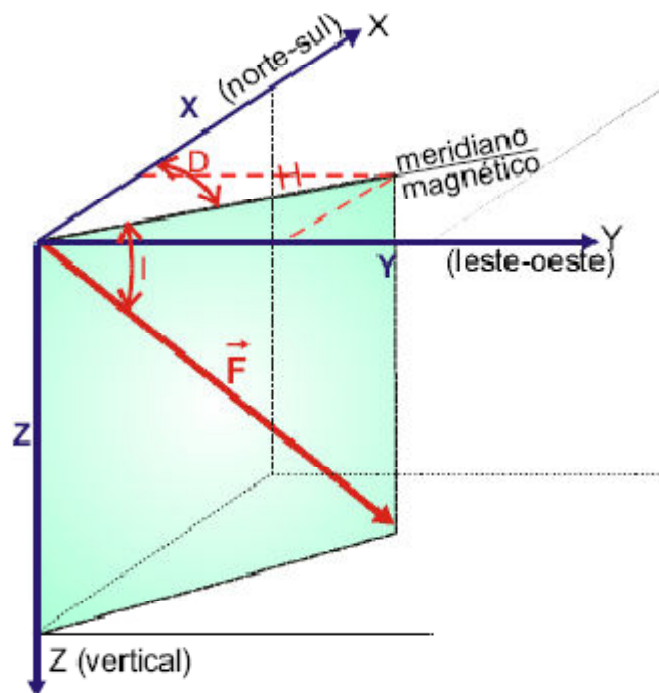
Vídeo:

<http://www.youtube.com/watch?v=5XmaAzdK>

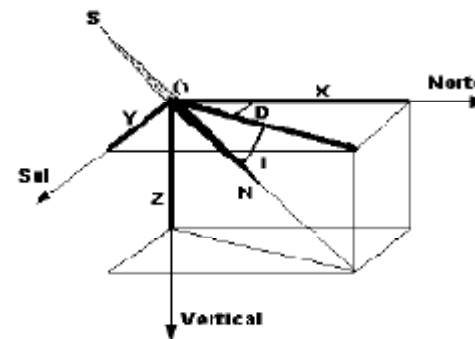
fDk

# Vetorial do Campo magnético

- Sendo o CMT ( $\vec{F}$ ) um campo vetorial, a sua medição exige o conhecimento da sua amplitude e dos dois ângulos - declinação e inclinação - ou a medição das suas três componentes num referencial conhecido.



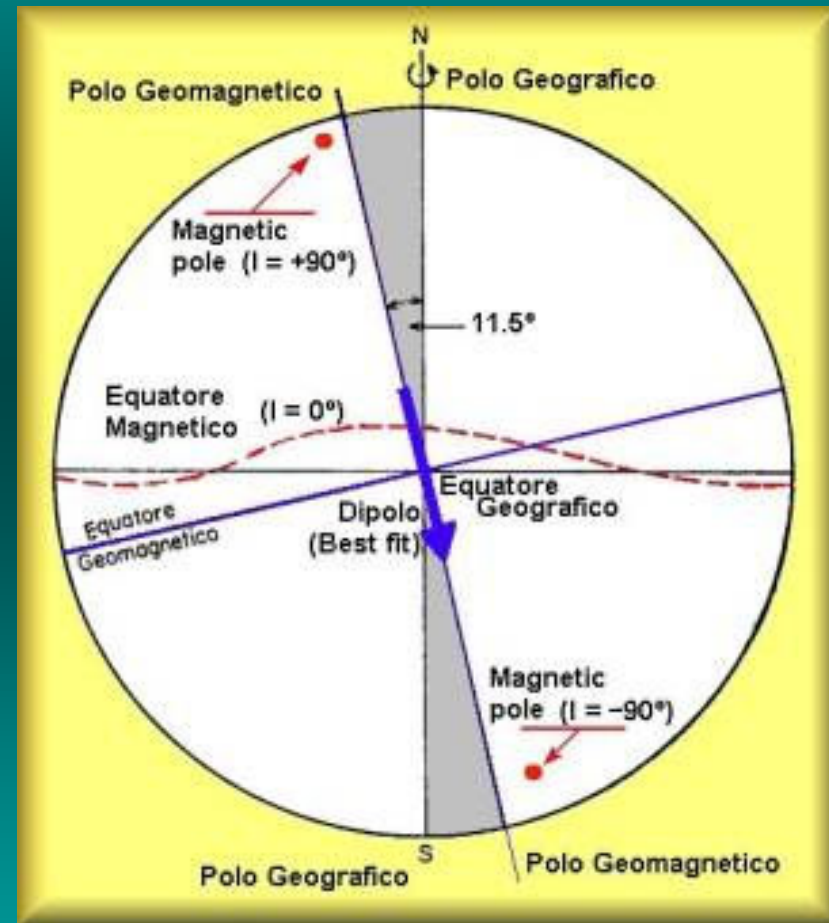
$$F = (H^2 + Z^2)^{1/2} = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2}$$
$$D = \arctg\left(\frac{Y}{X}\right), I = \arctg\left(\frac{Z}{H}\right)$$





# Campo magnético terrestre

- Observar que os elementos geomagnéticos não coincidem com os geográficos.
- Os pólos e equador magnético referem-se ao dipolo magnético no interior da Terra que melhor reproduz os dados.
- Os pólos e equador magnético definidos segundo a inclinação do campo magnético.



<http://www.ingv.it/geomag/>