

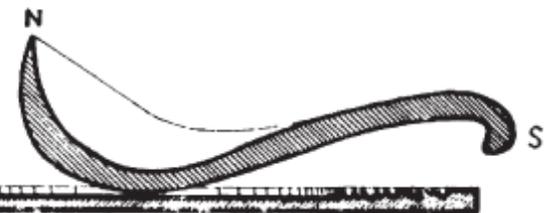
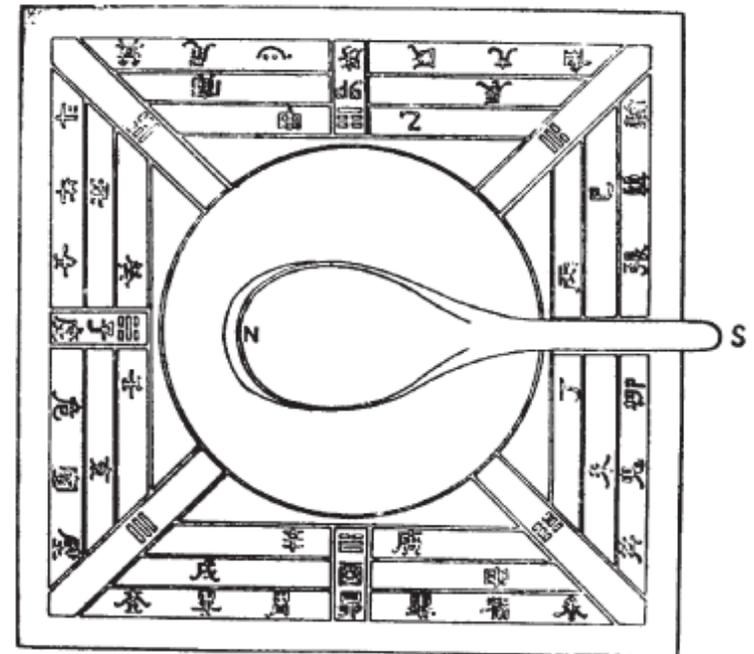


# O Campo Magnético da Terra

**Filipe Terra-Nova & Wilbor Poletti**  
**Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas**

# Geomagnetismo

- As primeiras observações de atração magnética são creditadas ao filósofo grego Tales de Mileto no século 6 AC.
- **A primeira bússola:** século 3 AC, os chineses observaram as propriedades de orientação Norte-Sul através de uma colher colocada em um prato com água.



... Século XIII AD

## ***Epístola (1269)*** de Petrus Peregrinus

### **1. Descoberta dos 2 polos magnéticos**

- Poliu um ímã esférico e colocou agulhas ao redor dele;
- Observou que todas apontavam para a mesma direção meridional.

### **2. Determinação da polaridade dos polos**

- Colocou um ímã em um recipiente de madeira cheio de água;
- Observou que o ímã se alinhava na direção N-S geográfica.

### **3. ‘Força’ entre os dois polos magnéticos**

- Verificou a atração e a repulsão dos ímãs aproximando ou afastando 2 ímãs.

### **4. Os polos magnéticos não podem ser isolados**

- Dividiu um ímã em dois e verificou que cada um dos novos pedaços apresentavam dois polos;
- Verificou isso dividindo diversas vezes cada um dos ímãs.

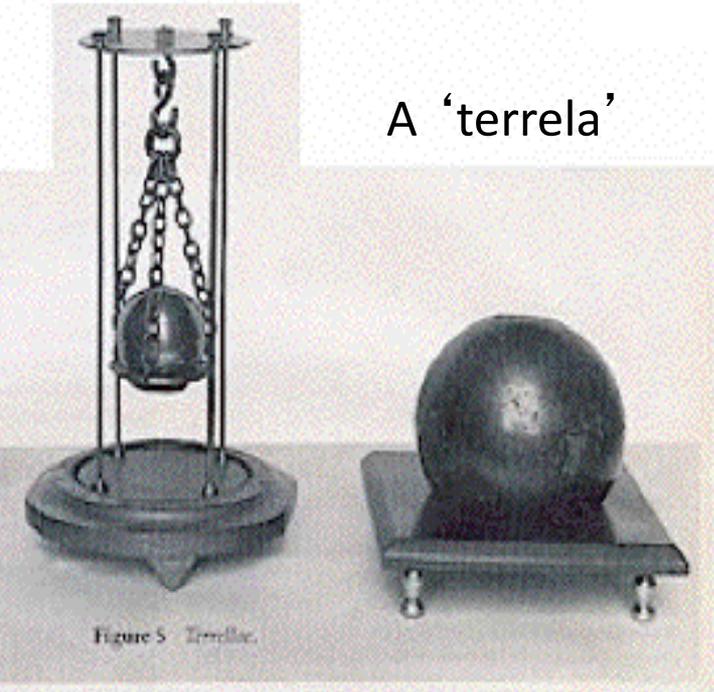


Kono (2007)



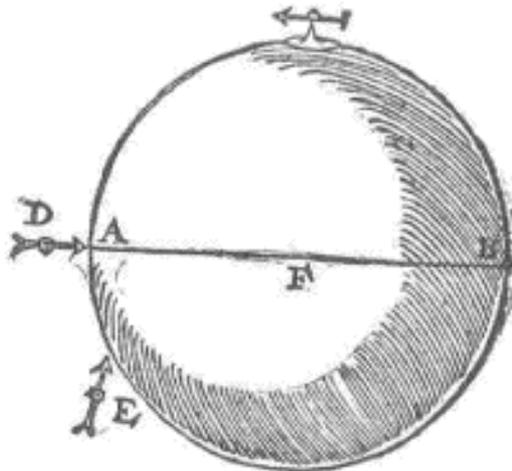
William Gilbert (1544-1603)  
(Médico da Rainha Vitória, da Inglaterra,  
autor de ‘De Magnete’ publicado em 1603)

“Magnus magne ipse est globus terrestris”,  
Gilbert, W. De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de  
Magno Magnete Tellure, 1603.



A ‘terrella’

A inclinação da bússola varia em torno da superfície da terrela, sendo horizontal no equador e vertical nos pólos.



A declinação da bússola estaria associada ao relevo terrestre (esse relevo foi esculpido na terrela).

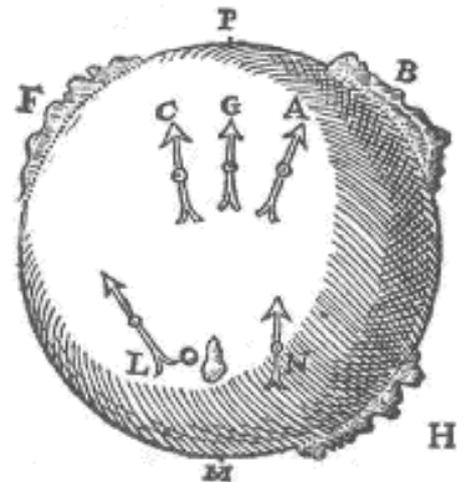


Figure 5 - Terrella.

# ... *De Magnete* (1600) de William Gilbert

## 1. Ímãs e ferro são idênticos

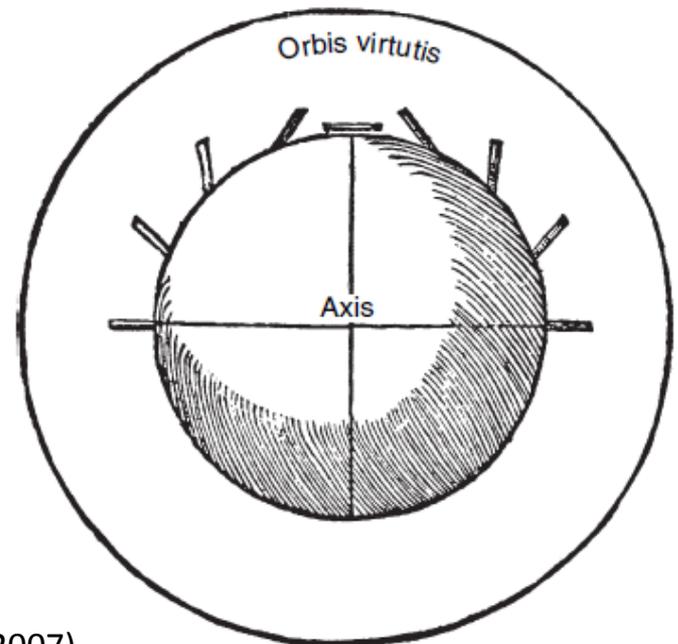
- Gilbert chegou a essa conclusão porque os melhores ímãs da época eram encontrados em minas de ferro.

## 2. Semelhança entre uma esfera imantada e a Terra (*Terrela*)

- Utilizando um 'versor', ele concluiu que a Terra era um grande ímã (*"Globus terrae est magneticus & magnes"*)

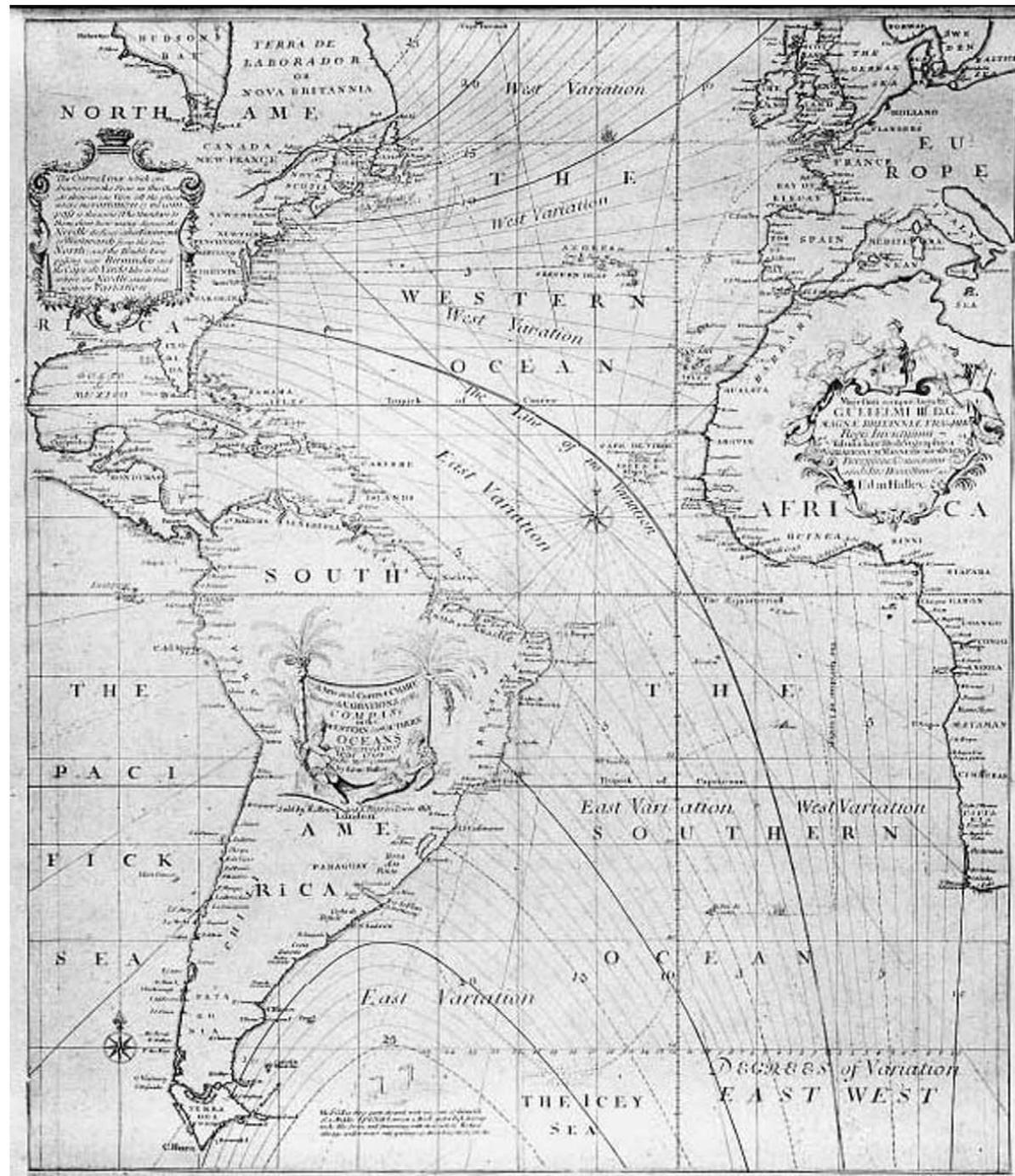
## 3. Inclinação varia com a latitude

- A inclinação será maior quanto maior for a 'força' magnética, i.e., a inclinação será máxima próximo aos pólos e mínima no Equador.



# ... Cartas magnéticas

Varição da declinação medida no Atlântico Sul:  
Mapa de Edmond Halley de 1701 AD.

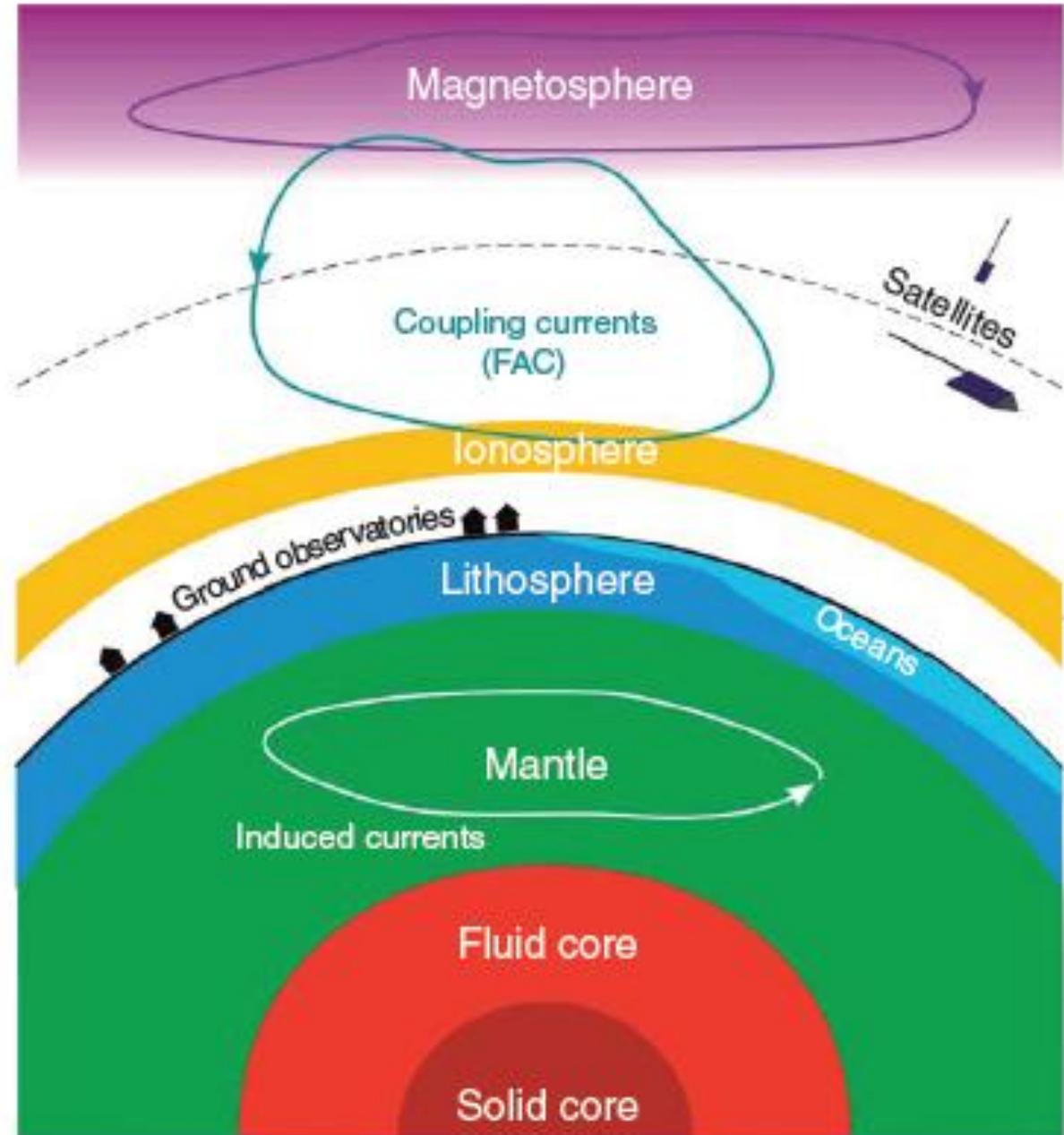


## Origem externa

- Ionosfera e magnetosfera: fluxo de correntes elétricas

## Origem Interna

- Campo principal: núcleo externo da Terra
- Campo crustal: materiais magnetizados da crosta



## Origem externa

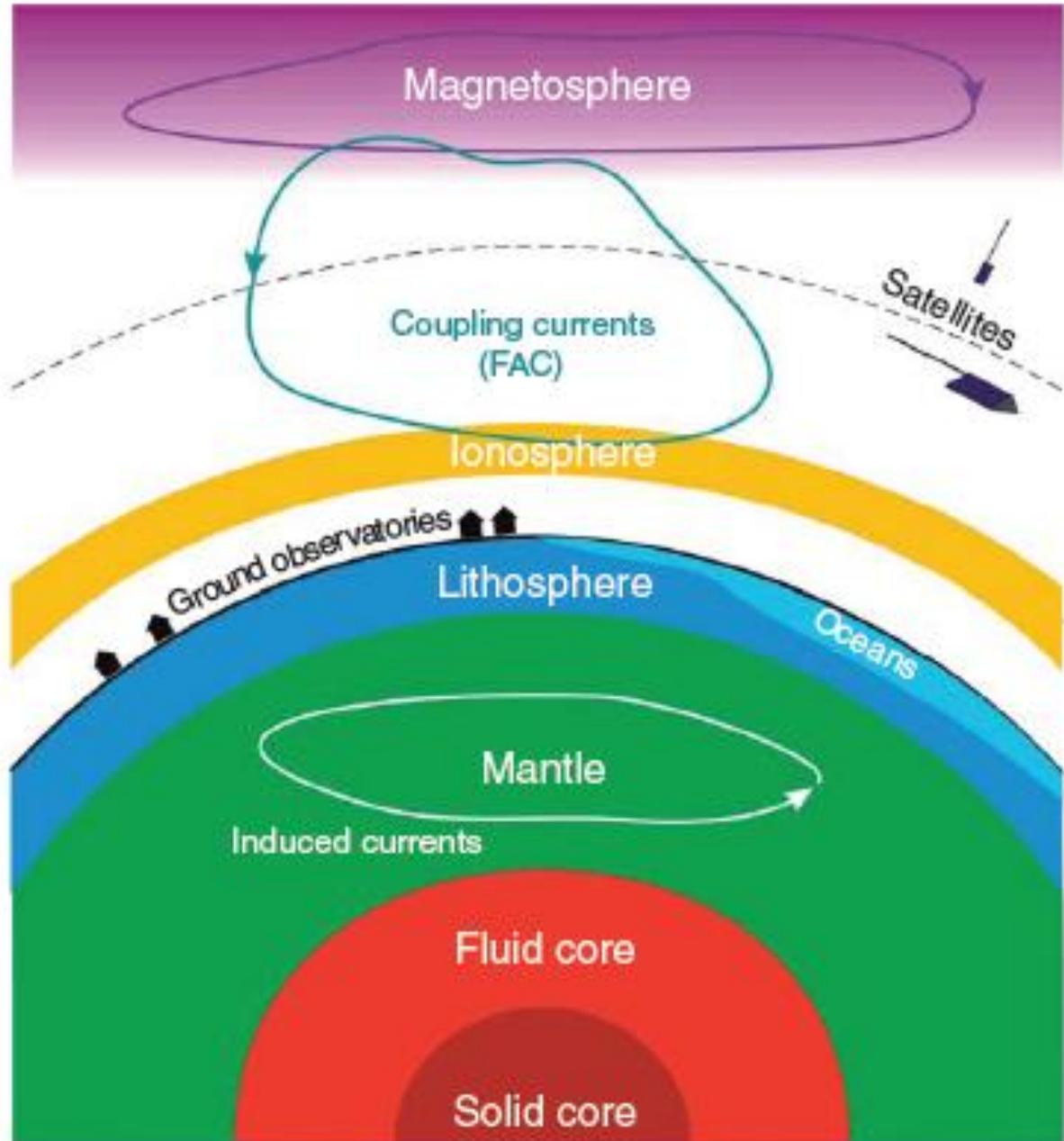
- Ionosfera e magnetosfera: fluxo de correntes elétricas

10%

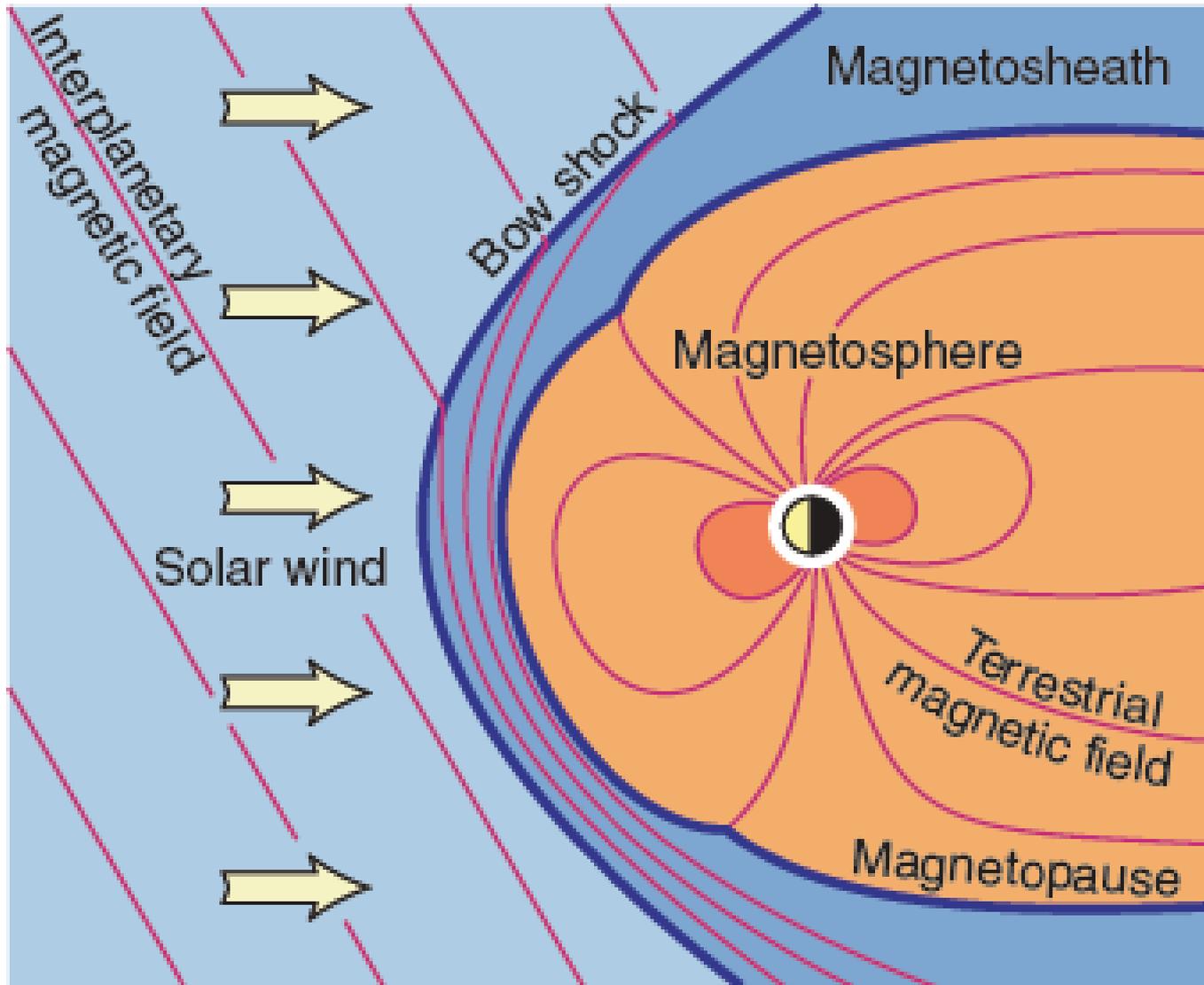
## Origem Interna

- Campo principal: núcleo externo da Terra
- Campo crustal: materiais magnetizados da crosta

90%

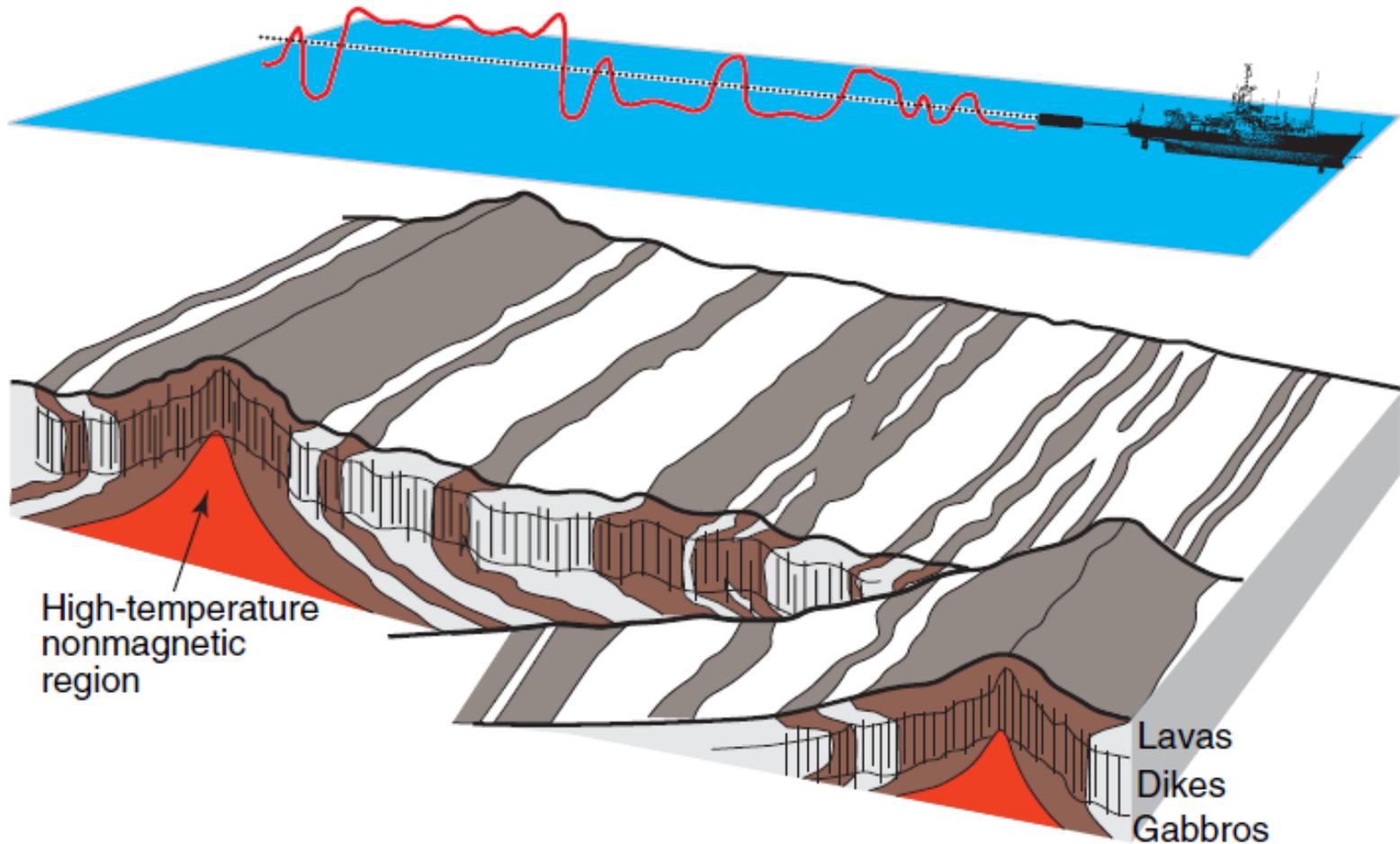


- **Campo esterno**

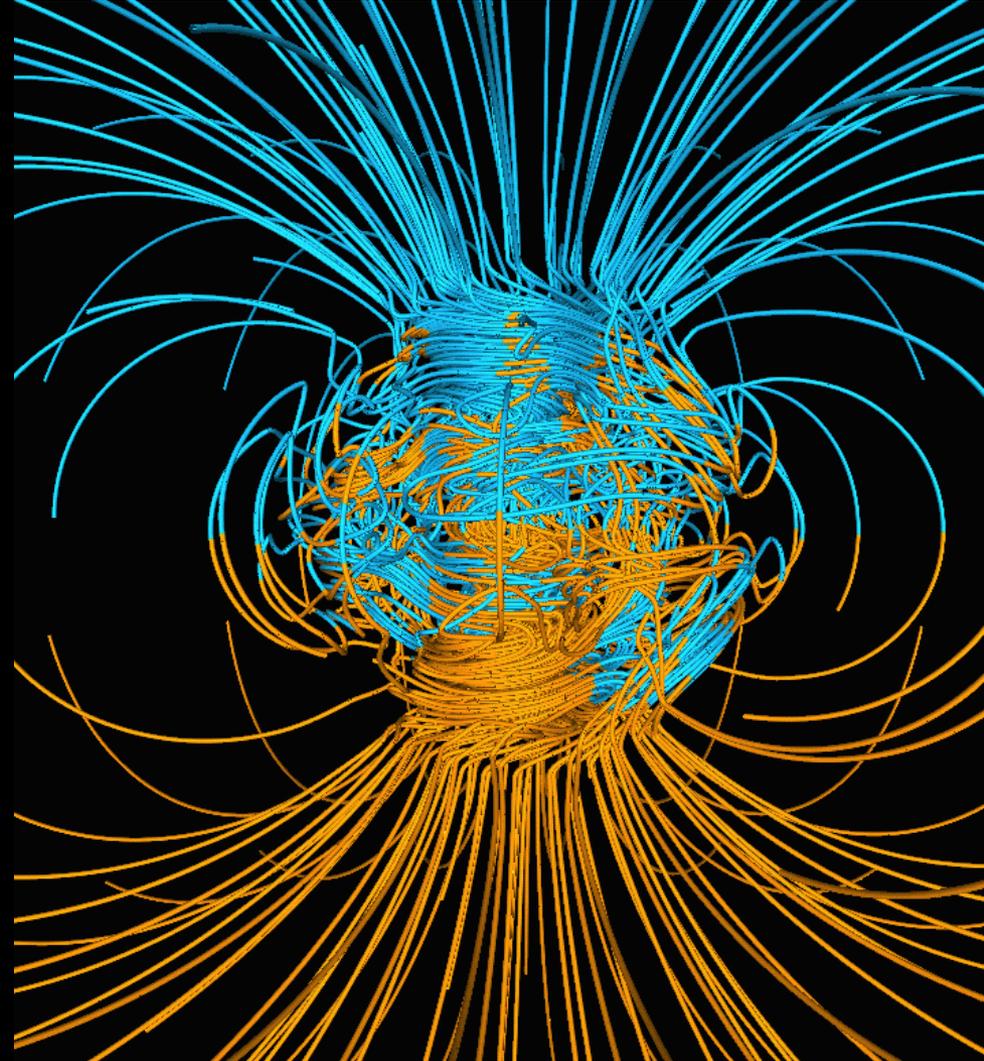
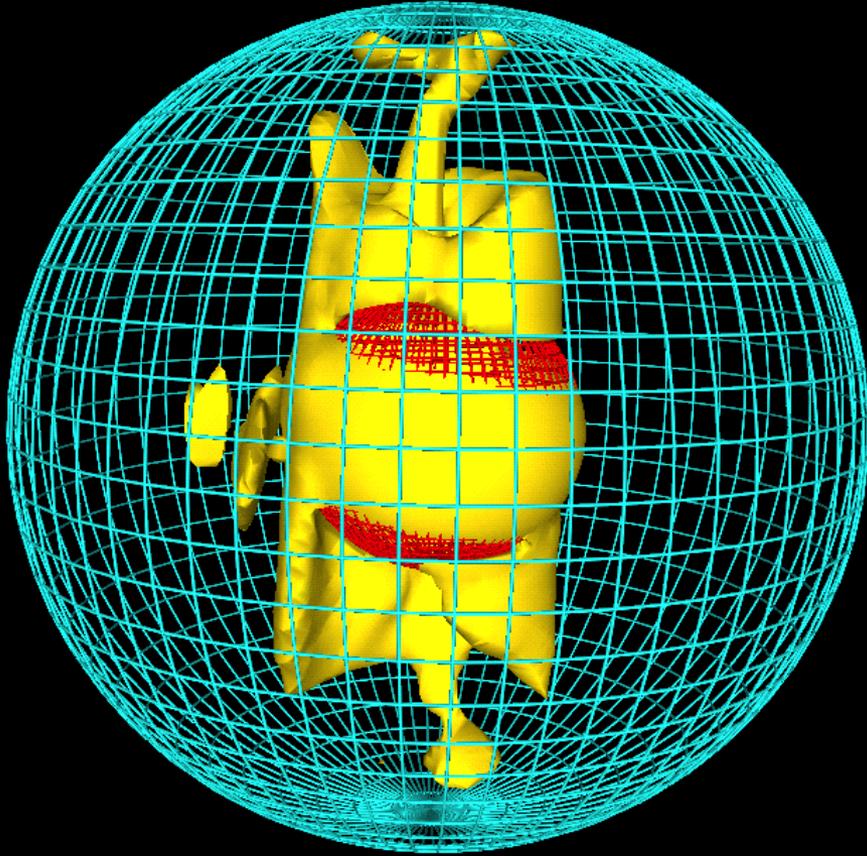


Baumjohann e Nakamura (2007)

- **Campo interno**
  - **Campo crustal:** espalhamento oceânico; tectônica de placas.



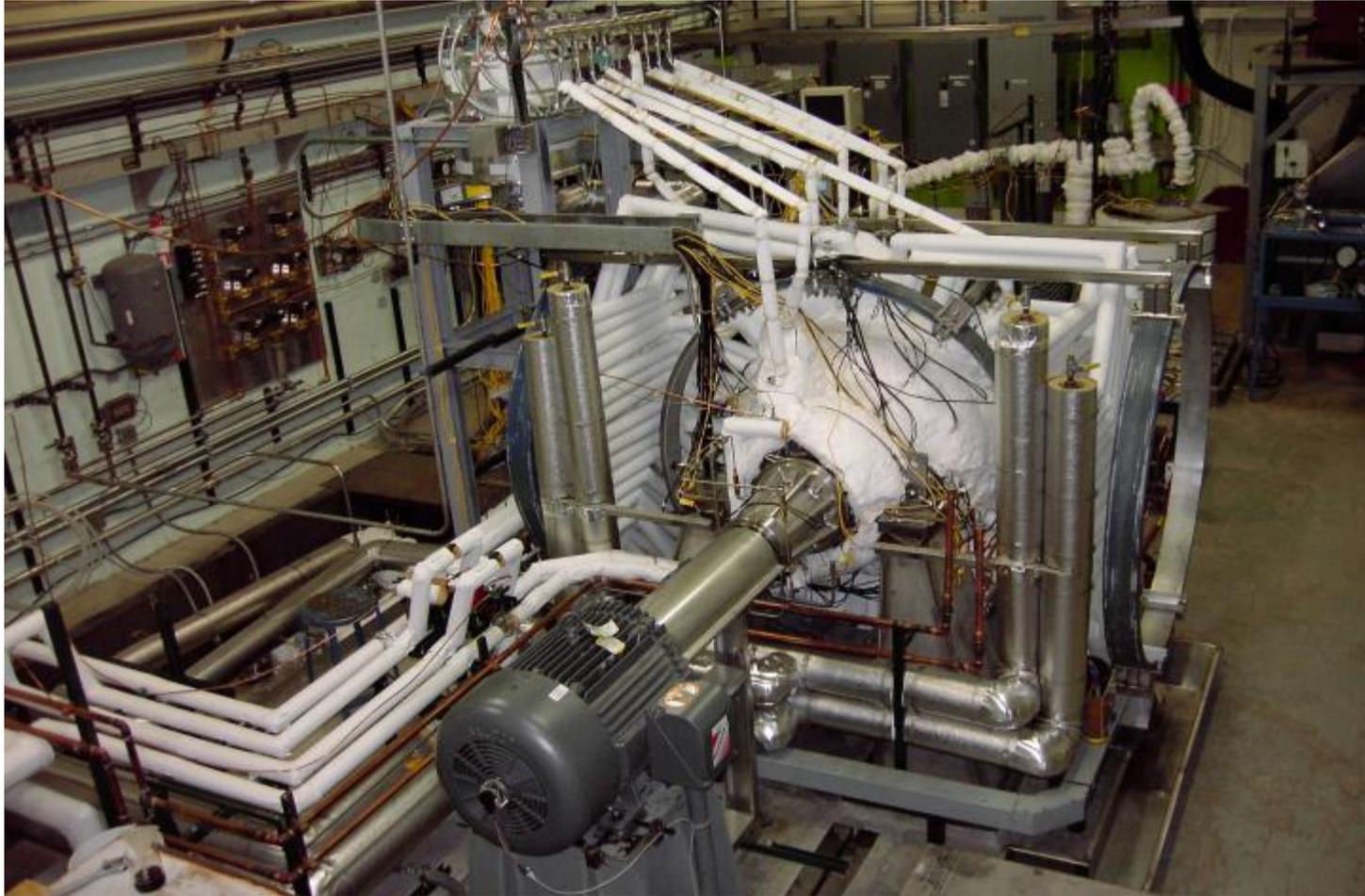
- **Campo interno:** Modelos numéricos do geodínamo



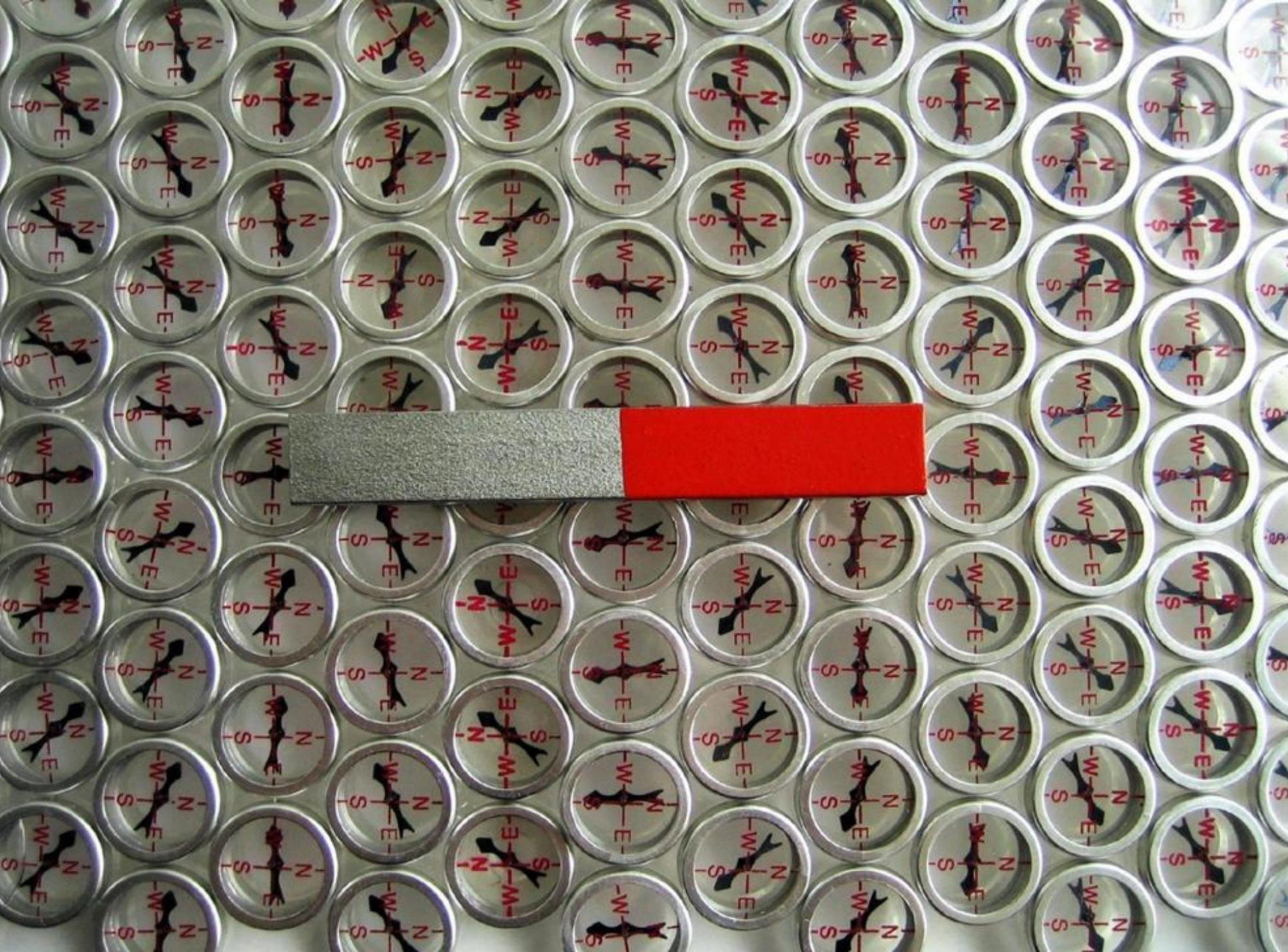
Glatzmaier and Roberts, 1995, Nature,  
vol. 377, p. 203-209.

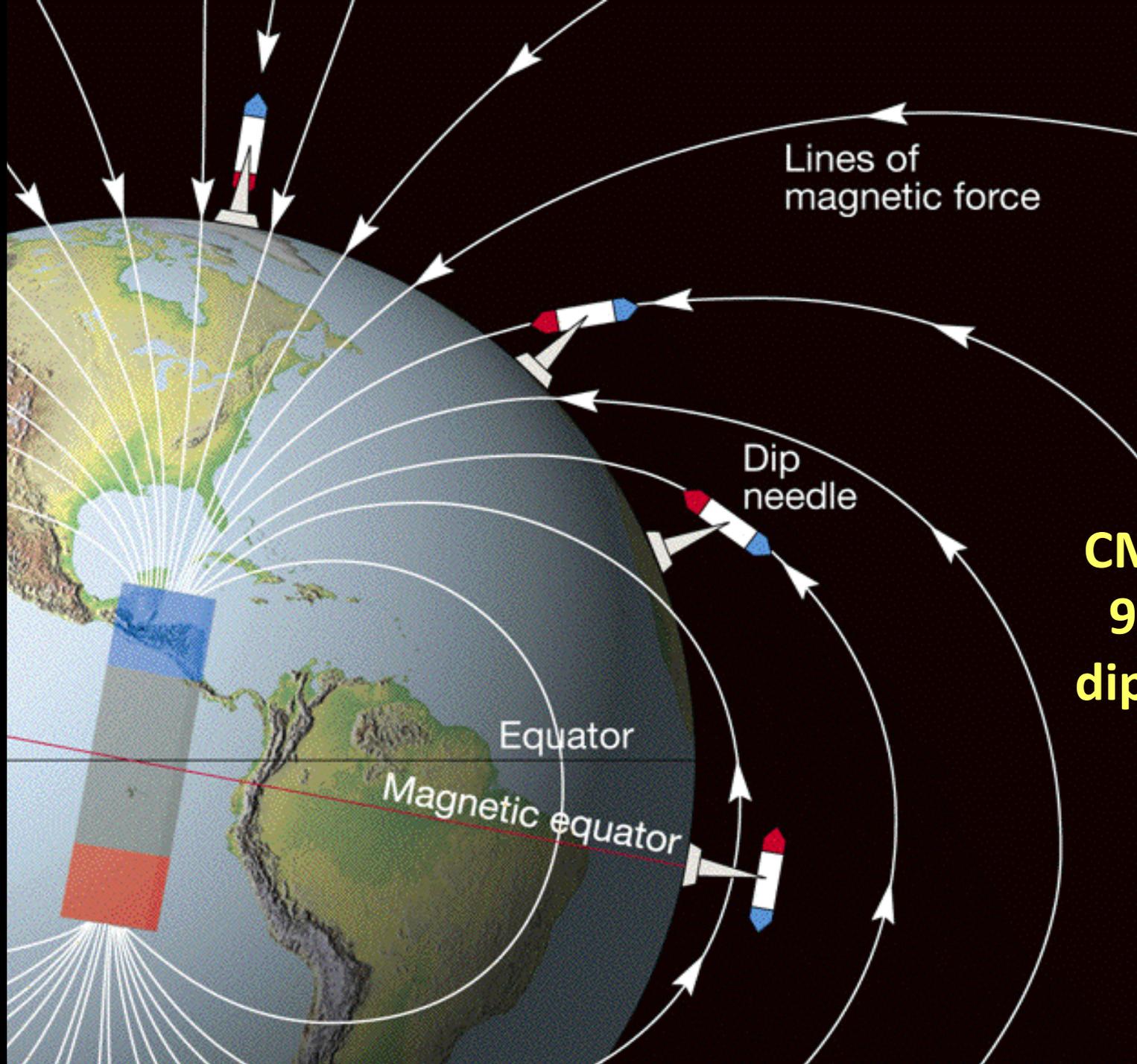
- **Campo interno**

- Modelos experimentais (em geral, esferas contendo sódio líquido).



Dínamo experimental do grupo de Geomagnetismo do ETH Zurich.





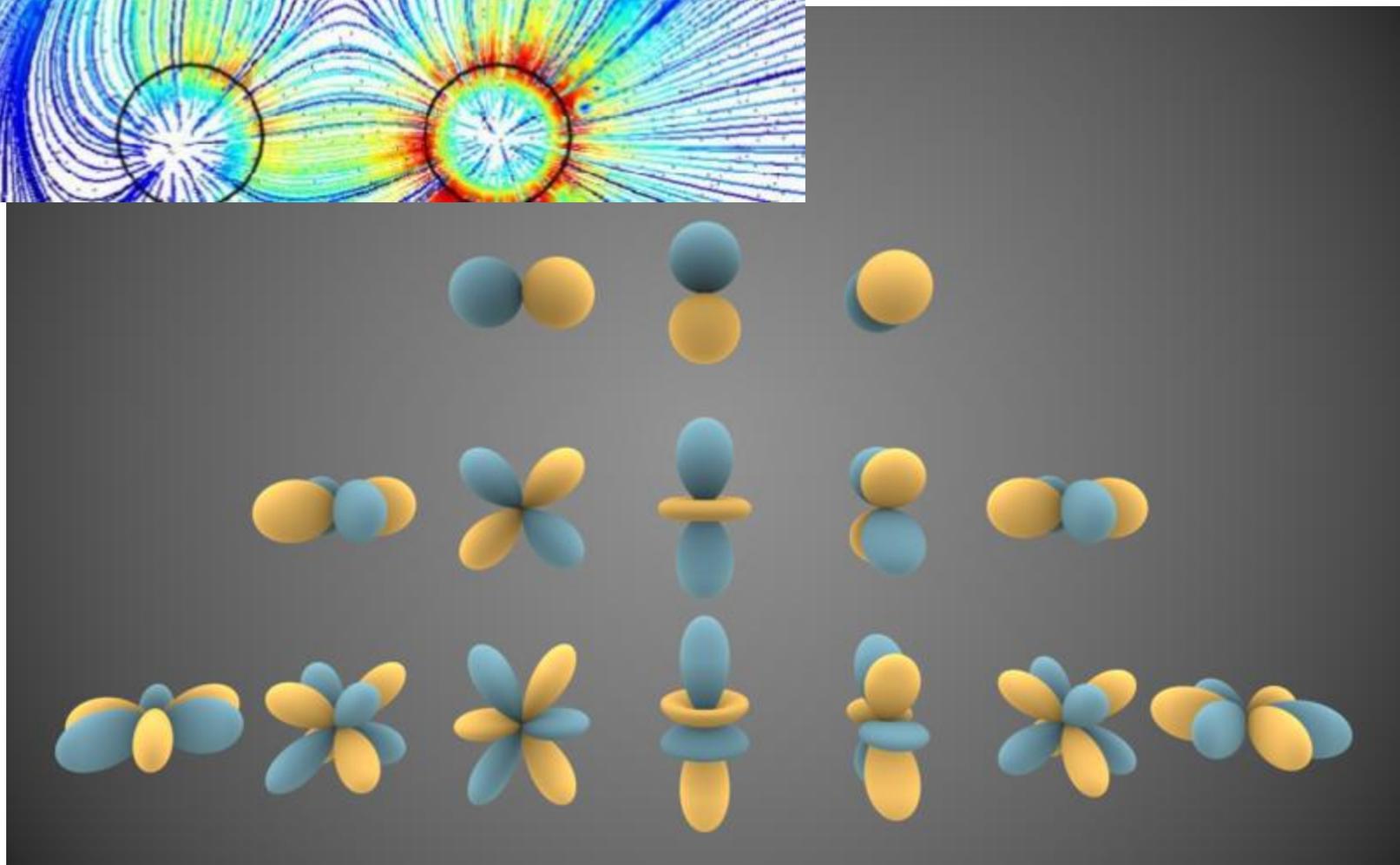
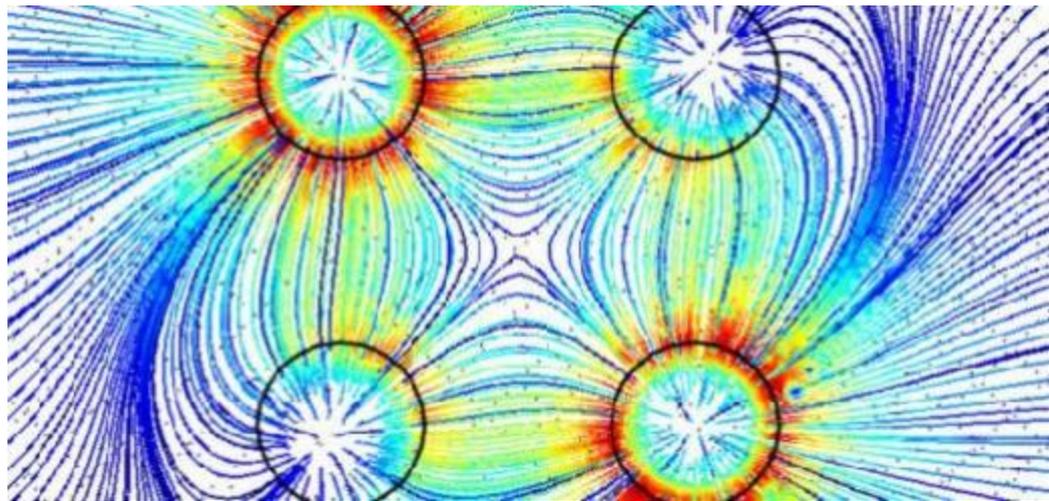
Lines of magnetic force

Dip needle

Equator

Magnetic equator

**CMT é 90% dipolar**



# Representação do campo geomagnético

- Interna
- Externa

$$V = V_{\text{int}} + V_{\text{ext}}$$

$$= a \sum_{n=1}^{N_{\text{int}}} \sum_{m=0}^n \left( g_n^m \cos m\phi + h_n^m \sin m\phi \right) \cdot \left( \frac{a}{r} \right)^{n+1} P_n^m(\cos \theta)$$

$$+ a \sum_{n=1}^{N_{\text{ext}}} \sum_{m=0}^n \left( c_n^m \cos m\phi + s_n^m \sin m\phi \right) \cdot \left( \frac{a}{r} \right)^n P_n^m(\cos \theta)$$

# Fontes do campo

- Campo dipolar: até 90% do campo total

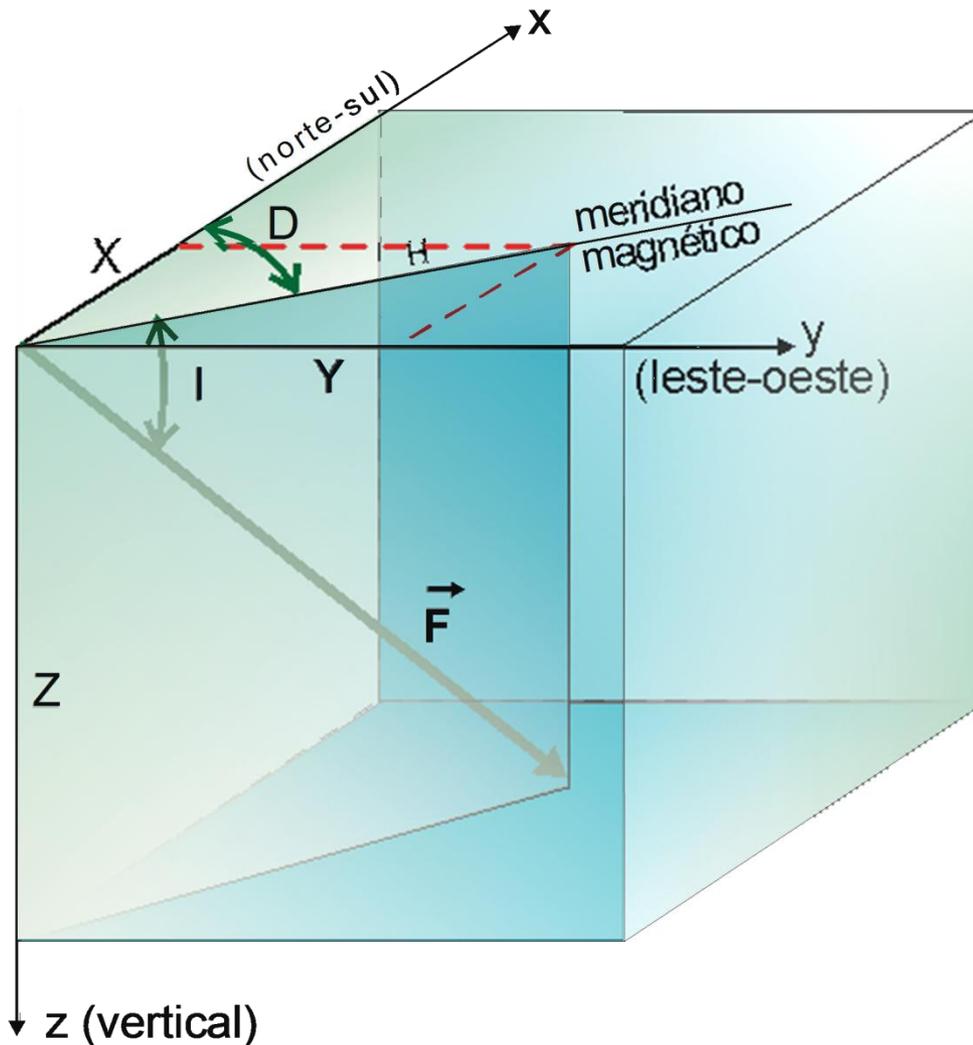
$$V = g_1^0 \left( \frac{a^3}{r^2} \right) (2 \cos \theta) + g_1^1 \left( \frac{a^3}{r^2} \right) (2\sqrt{2} \sin \theta \cos \phi) + h_1^1 \left( \frac{a^3}{r^2} \right) (2\sqrt{2} \sin \theta \cos \phi)$$

**DIPOLO GEOCÊNTRICO AXIAL**

- Campo não-dipolar: até 20% do campo total

$$2 \leq n \leq 14$$

- Observações do CMT na superfície: compreensão de processos internos.



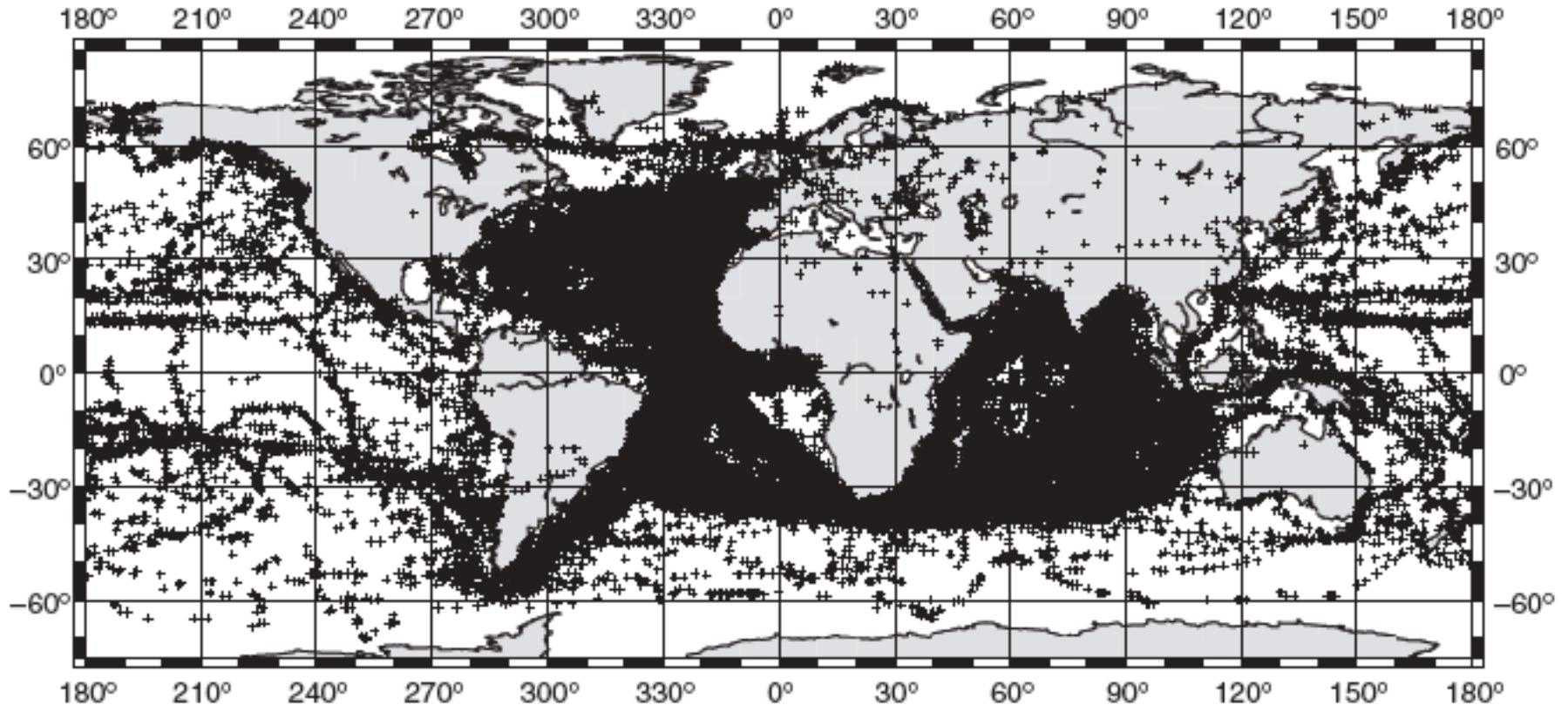
$$H = (X^2 + Y^2)^{1/2}$$

$$F = (X^2 + Y^2 + Z^2)^{1/2}$$

$$I = \arctan\left(\frac{Z}{H}\right)$$

$$D = \arctan\left(\frac{Y}{X}\right)$$

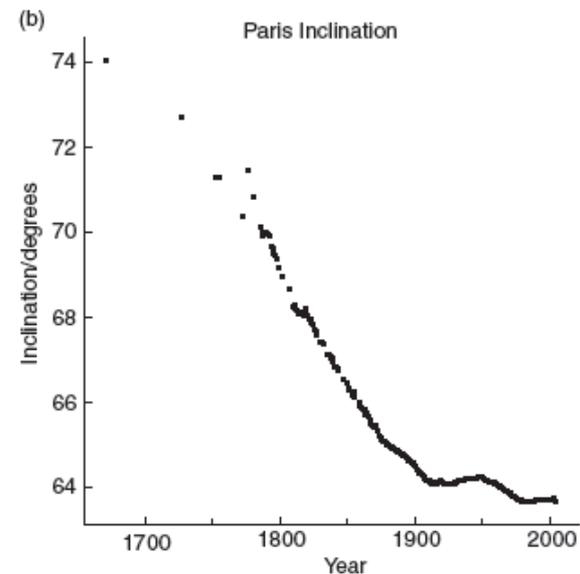
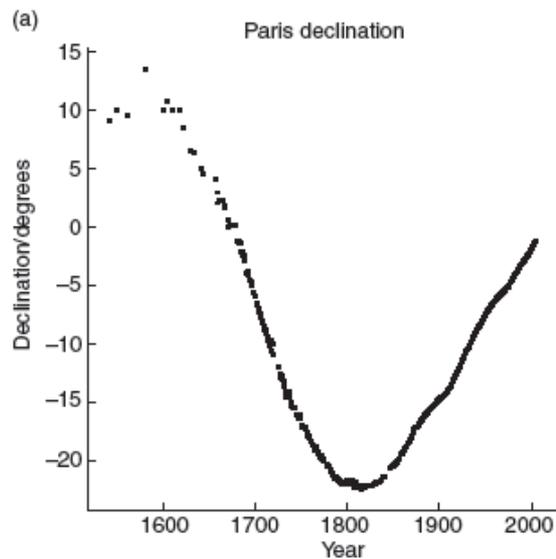
- **Observação direta**
  - **Grandes navegações**



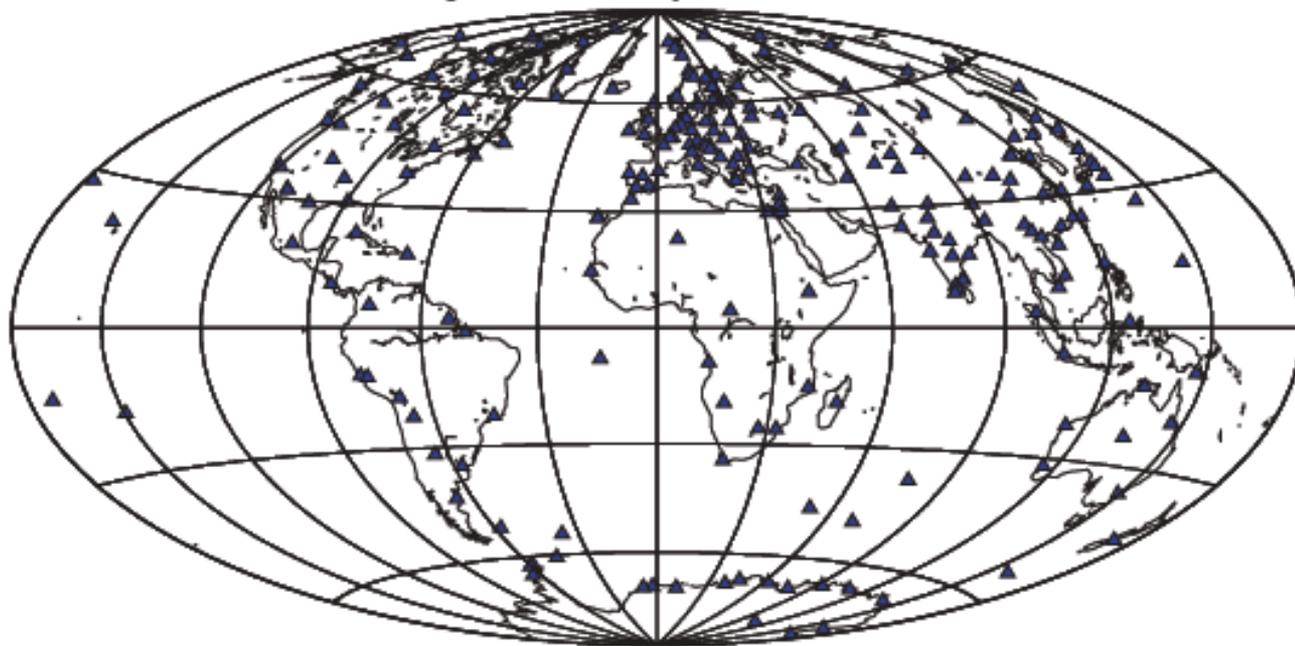
Dados de declinação para o período de 1700 – 1800 AD (Jackson e Finlay, 2007).

- **Observação direta**

- **Observatórios magnéticos**



Geomagnetic observatory locations 1980–2005



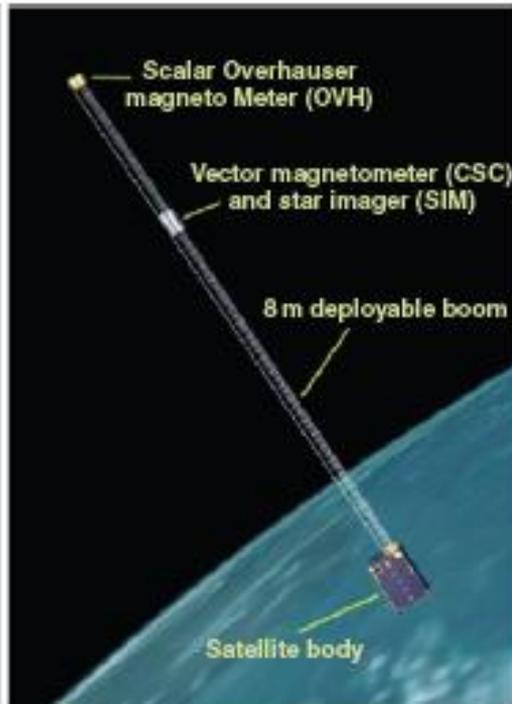
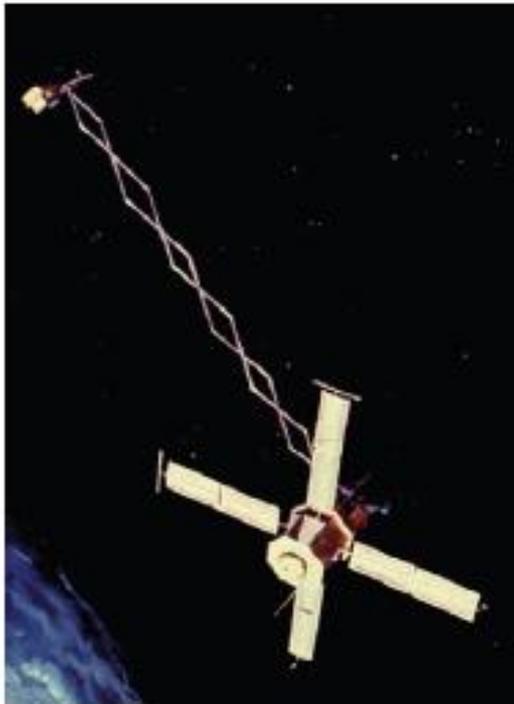
▲ Observatory location

- **Observação direta**

- **Satélites**

Magsat (1979-1980)

Oersted (1999)



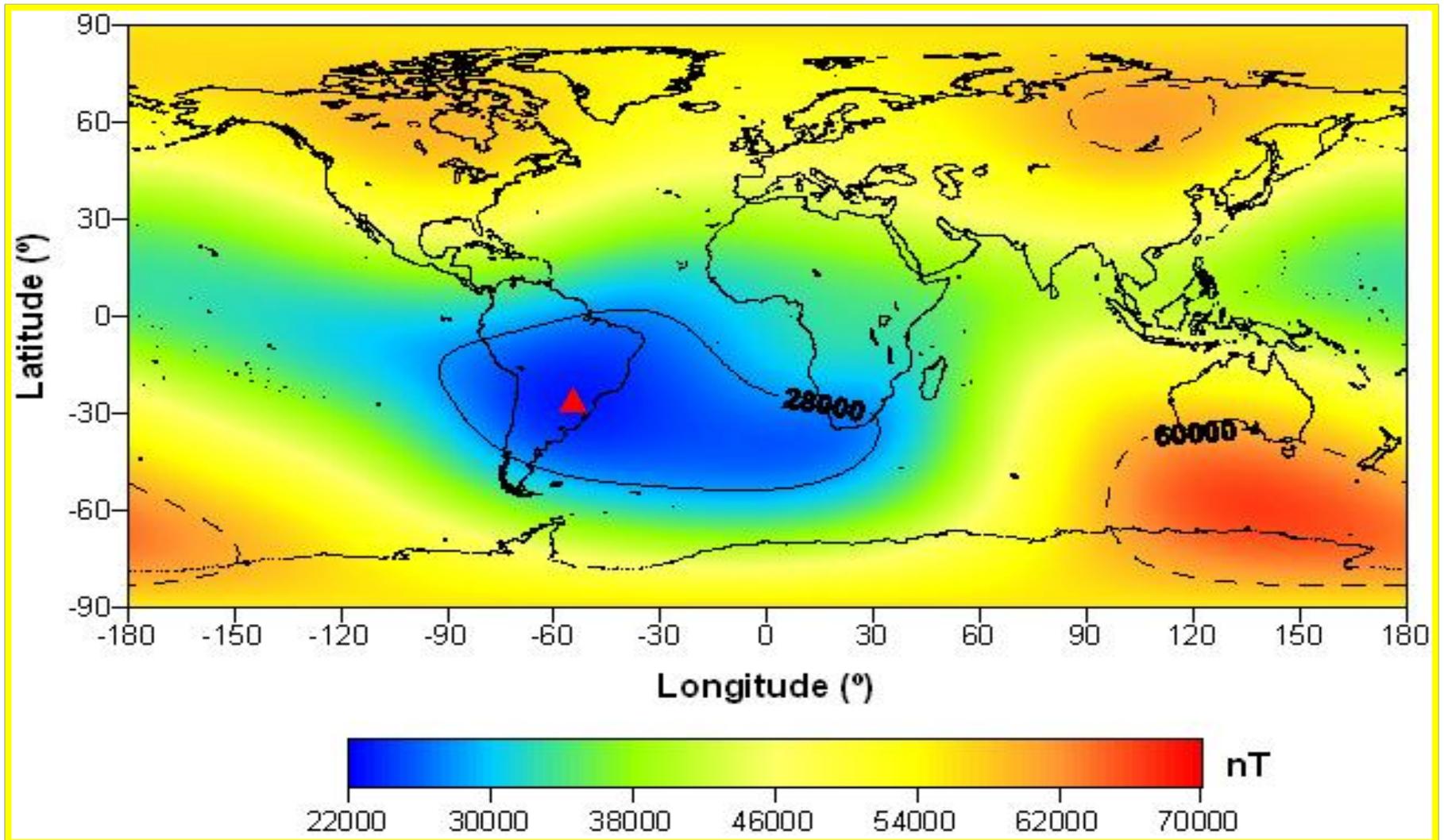
CHAMP (2000)



Olsen et al. (2007)

- SAC-C (2000-2004).
- SWARM (previsto para ser lançado em 2013).

### 3) O campo geomagnético no Brasil: Anomalia Magnética do Atlântico Sul



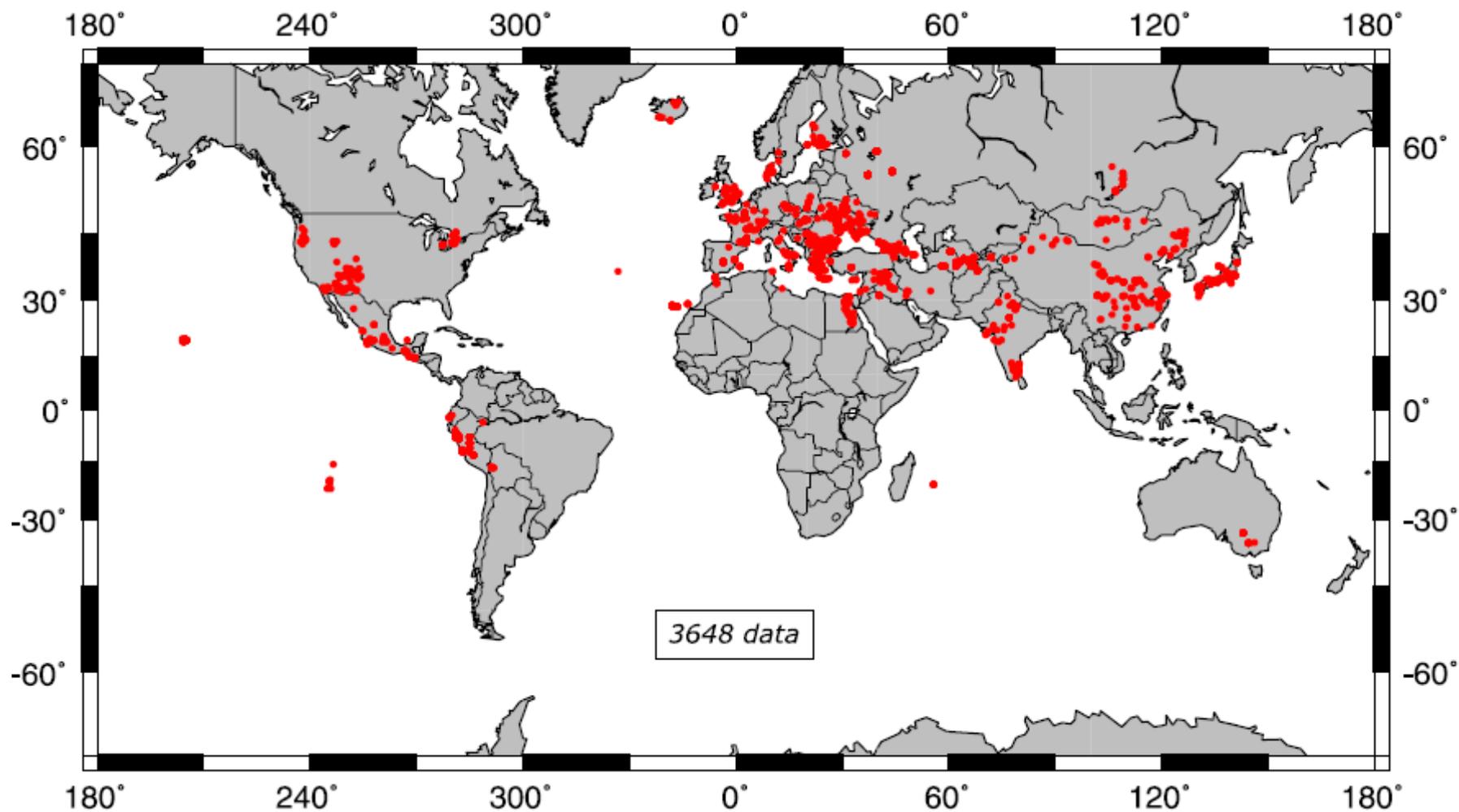


**Observação indireta...**

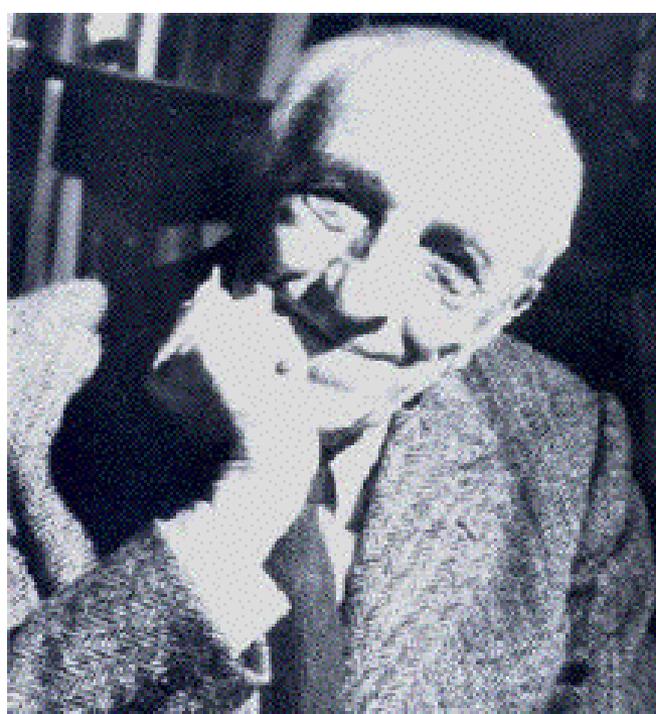
- Dados do campo histórico existentes na literatura;
- Como uma rocha ou artefato arqueológico registra o campo antigo;
- Como extrair essa informação em laboratório;
- Os diferentes métodos experimentais;
- Arqueomagnetismo no Brasil: estudo do campo magnético histórico;
- Visão geral pensando nos dados de campo antigo como registro da dinâmica do núcleo.

# Observação indireta

Rochas, sedimentos e materiais arqueológicos



Distribuição de dados para os últimos 3000 anos



Louis Néel (1904-2000)  
(Prêmio Nobel de Física, 1970)

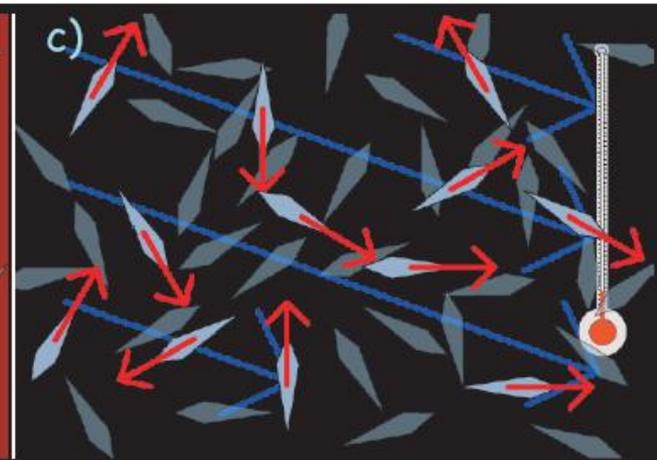
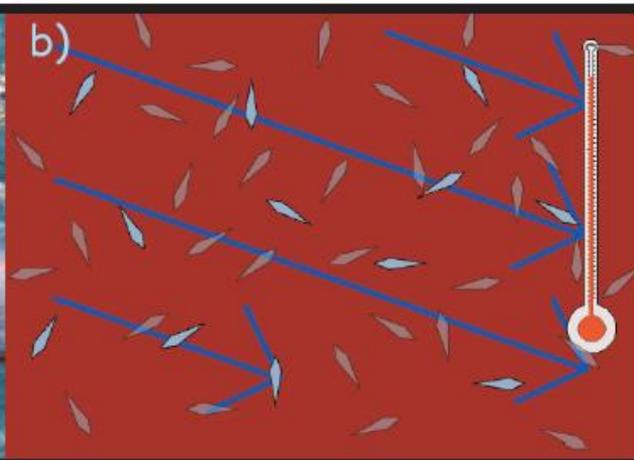
$$P(E) \propto \exp(-E_m/kT) \longrightarrow M(t) = M_o \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right)$$

Onde:

$$\tau = \frac{1}{C} \exp \frac{[\text{anisotropy energy}]}{[\text{thermal energy}]} = \frac{1}{C} \exp \frac{[Kv]}{[kT]}$$

$$T > T_{\text{bloqueio}}$$

$$T < T_{\text{bloqueio}}$$



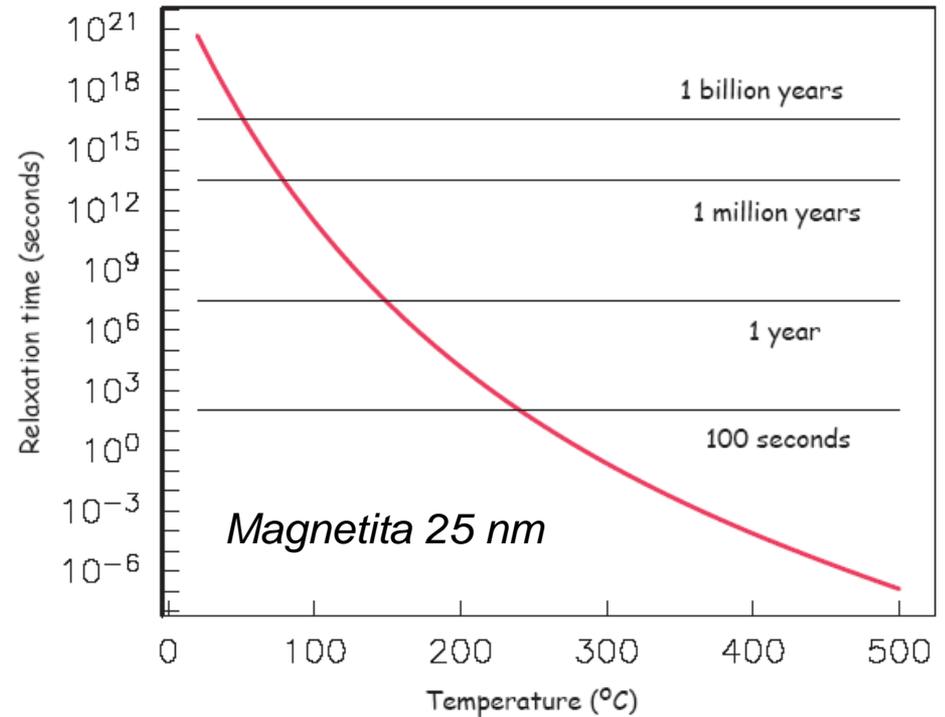
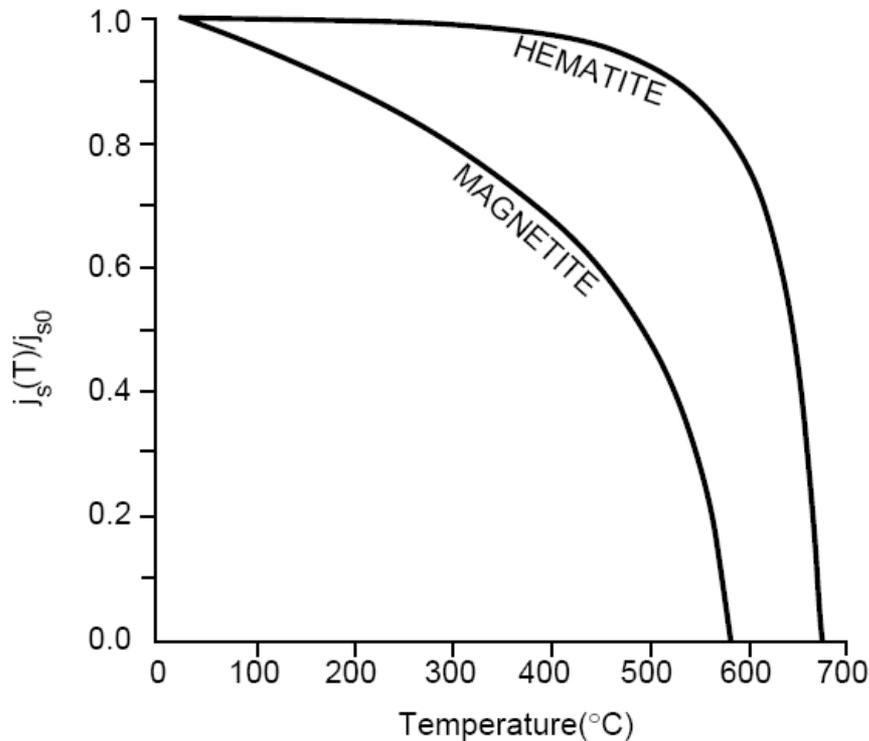
*momentos magnéticos aleatórios*

*momentos magnéticos alinhados com o campo magnético ambiente*

# Magnetização termoremanescente (MRT)

$$\tau = \frac{1}{C} \exp \frac{[\Delta N \mu_o M_s^2 v]}{[2kT]}$$

A relação entre o tempo de relaxação e a temperatura indica que, uma vez próximo à superfície, um grão magnético pode guardar a direção do campo magnético por *bilhões de anos*.



# Paleointensidade absoluta

## Magnetização termoremanente (MTR)

Teoria de Néel (1955) para grãos SD

CMT (até ~100  $\mu\text{T}$ )

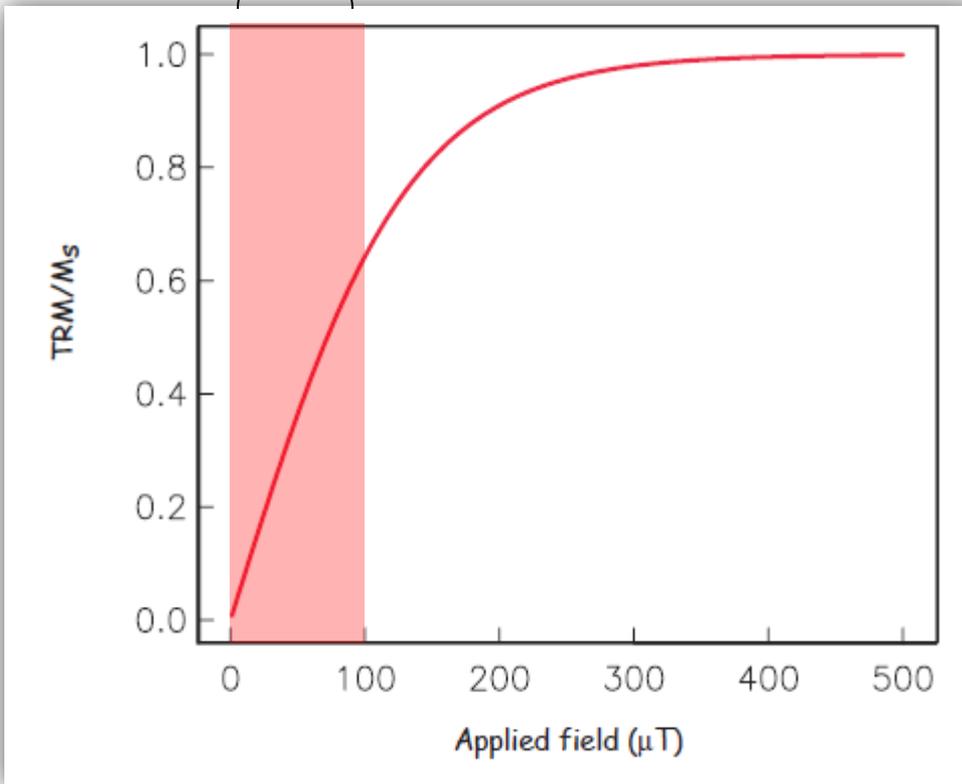


Figura modificada de Tauxe, 2007.

$$\mathbf{M}_{\text{TR}}(\mathbf{H}_A) = \mathbf{M}_{\text{RS}} \tanh\left(\frac{\mu_0 V \mathbf{M}_S(T_B) \mathbf{H}_A}{k T_B}\right)$$
$$\mathbf{M}_{\text{TR}}(\mathbf{H}_A) = \alpha \tanh(\beta \mathbf{H}_A)$$

Como:

~~$$\tanh(x) = x - \frac{x^3}{3} + \frac{2x^5}{15} - \frac{17x^7}{315} + \dots + \frac{2^{2n}(2^{2n}-1)B_{2n}}{(2n)!} + \dots$$~~

Pode-se aproximar a MTR e a magnetização de laboratório:

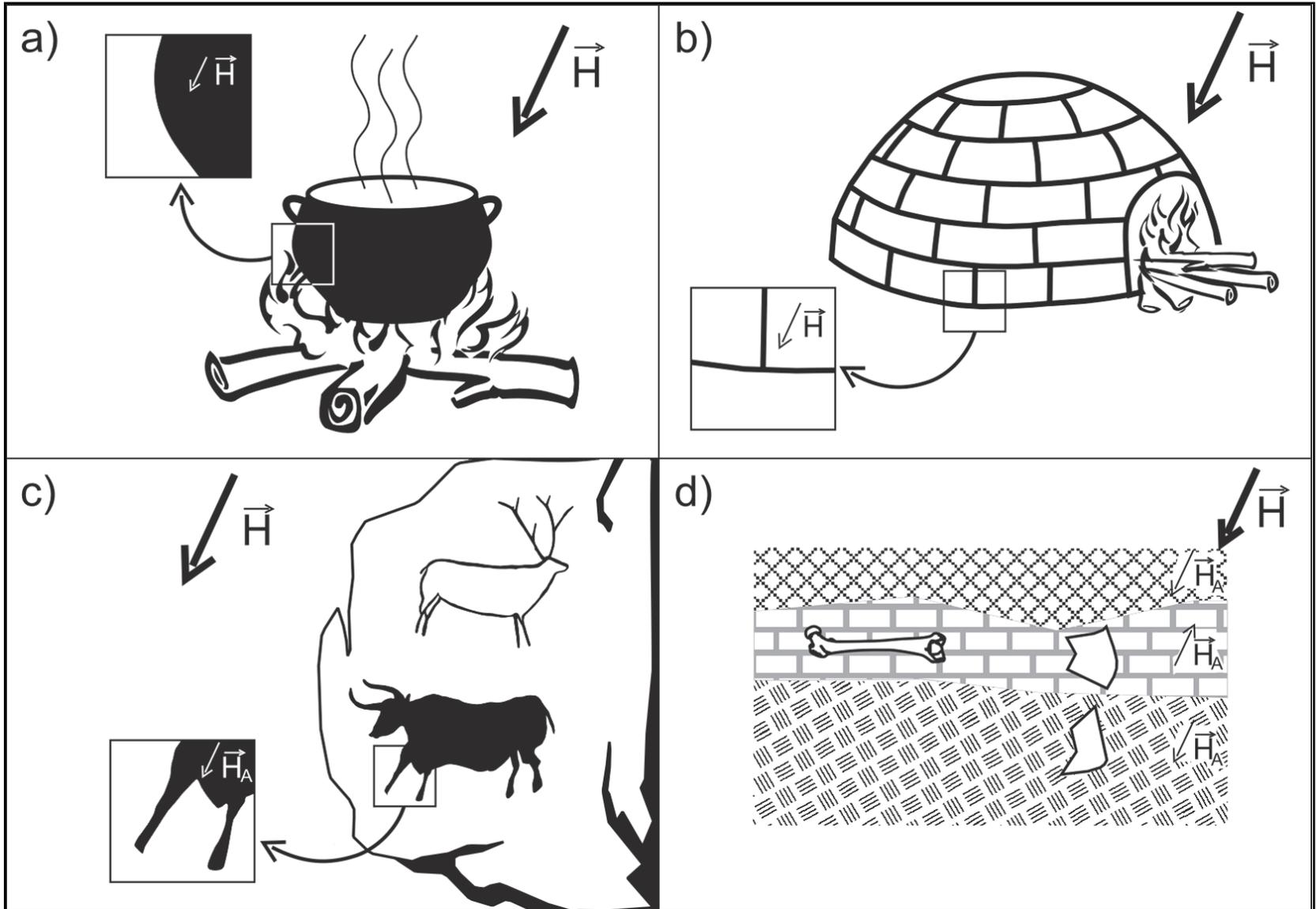
$$\mathbf{M}_{\text{TR}} = \alpha \mathbf{H}_A$$

$$\mathbf{M}_L = \alpha \mathbf{H}_L$$

E o campo antigo será:

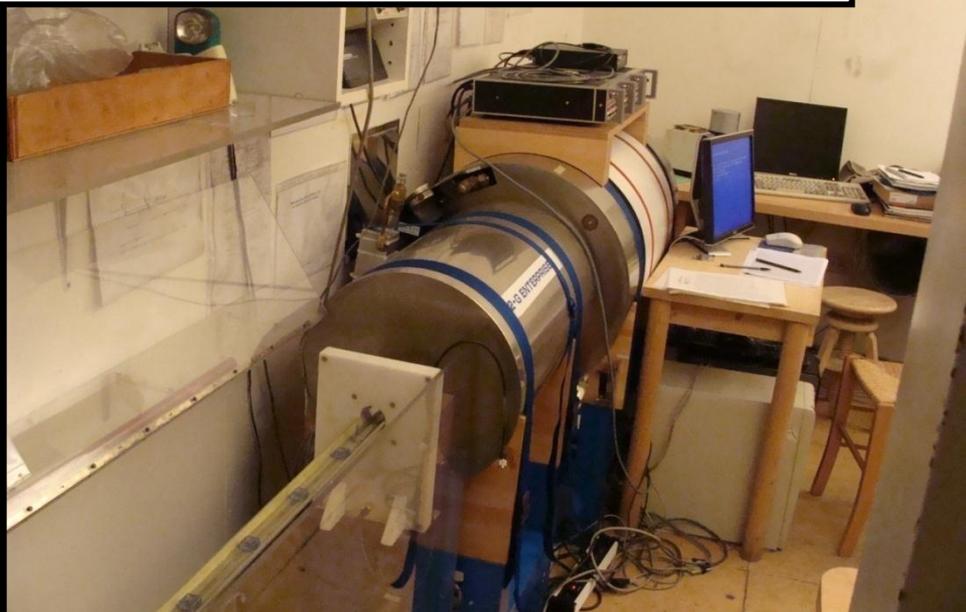
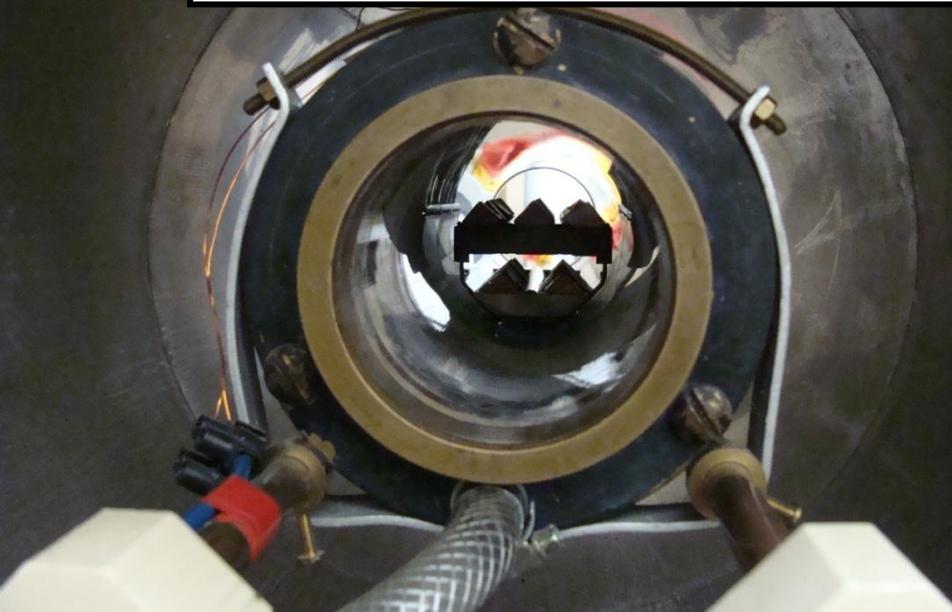
$$\mathbf{H}_A = \mathbf{H}_L \frac{\mathbf{M}_{\text{TR}}}{\mathbf{M}_L}$$

# Arqueologia

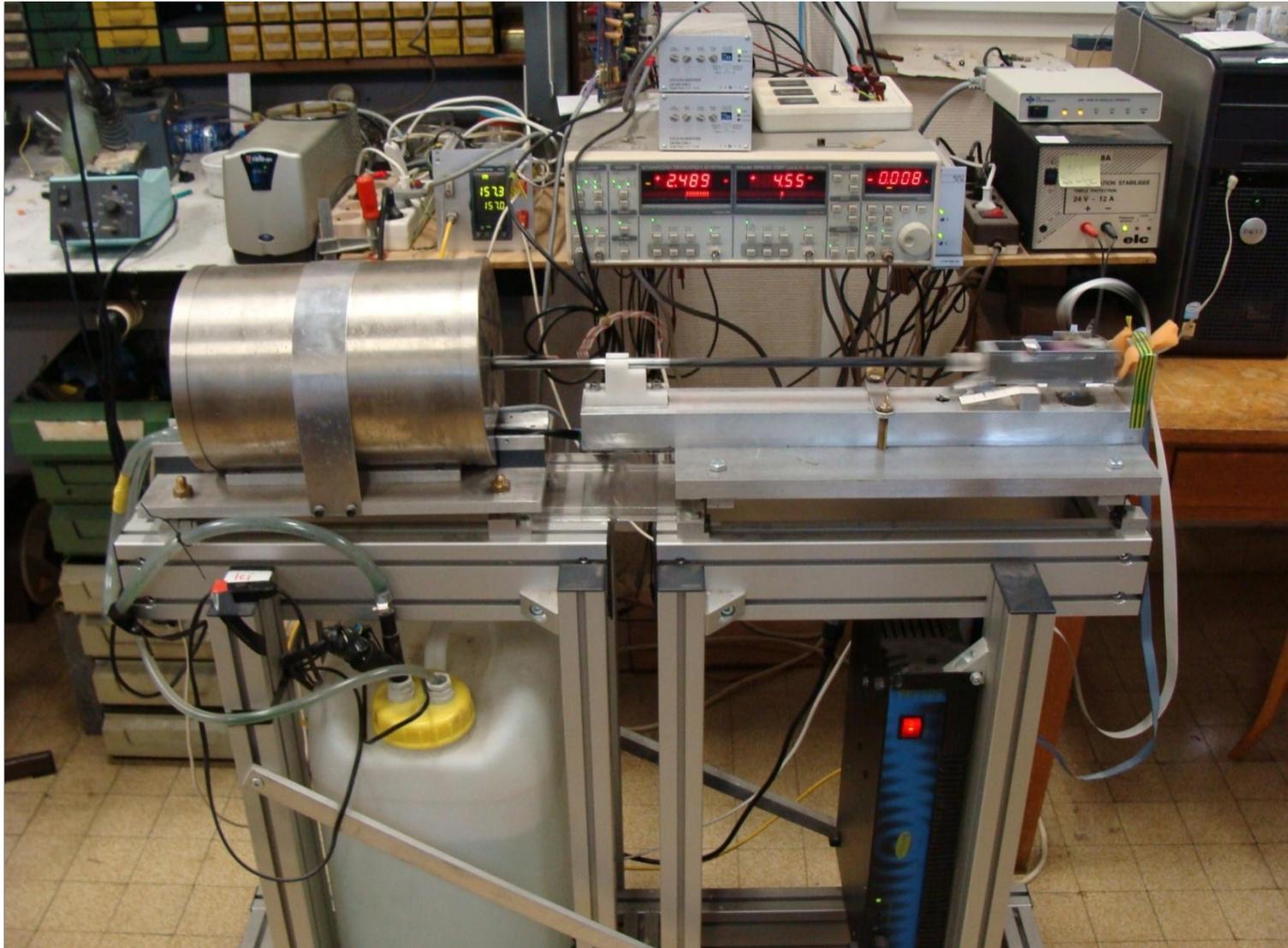




Método clássico por duplo aquecimento  
Protocolo :Thellier e Thellier (1959), modificado por Coe (1967)  
Relação linear entre campo aplicado e magnetização



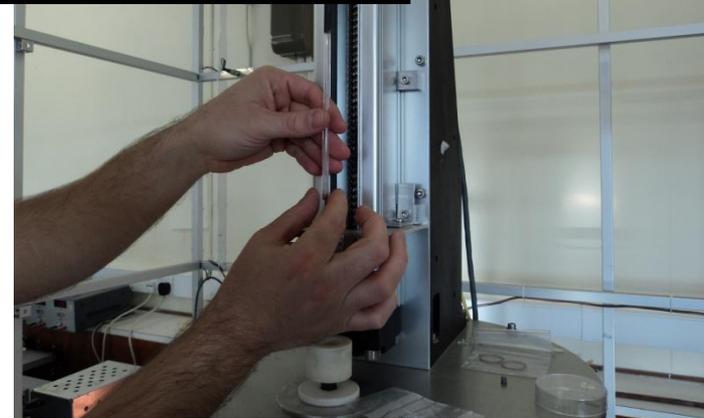
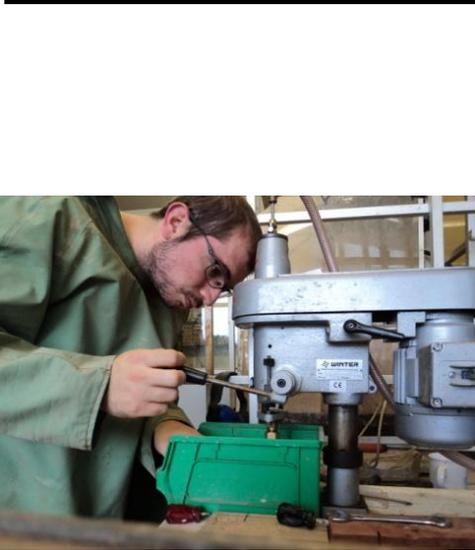
Protocolo Triaxe (Le Goff e Gallet, 2004) ,  
medidas contínuas de magnetização em altas temperaturas  
Relação linear entre campo aplicado e magnetização



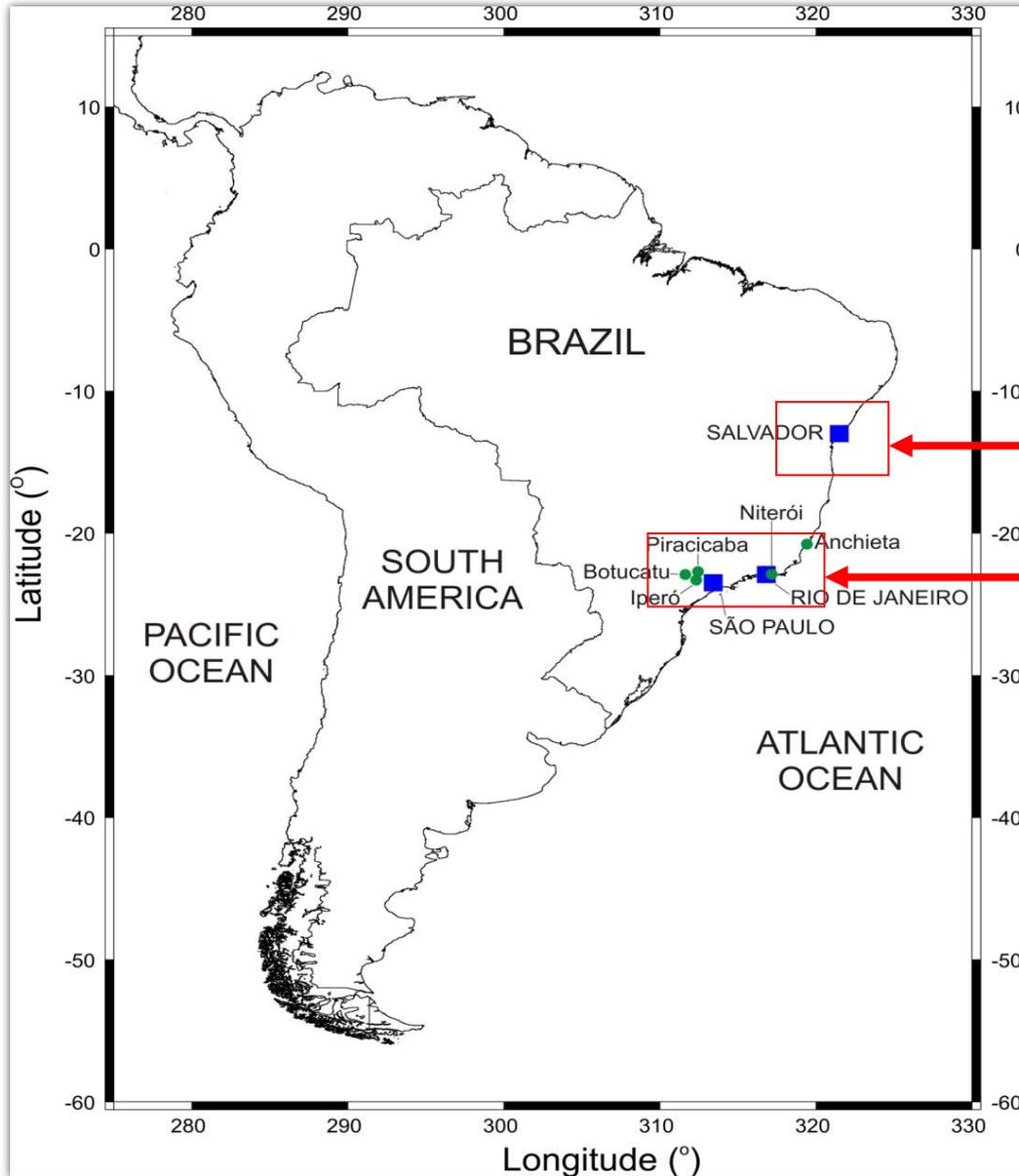
# Método de Microondas

Protocolo: Thellier e Thellier (1959), modificado por Coe (1967)

Relação linear entre campo aplicado e magnetização



# Arqueomagnetismo no Brasil



Amostras coletadas em construções históricas

NE: Salvador  
(14 sítios)

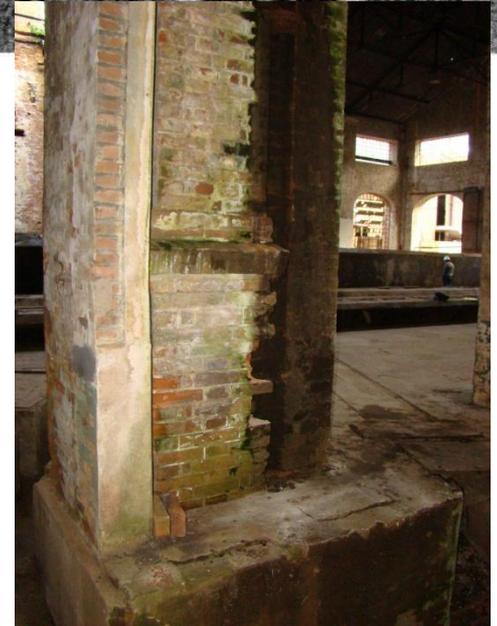
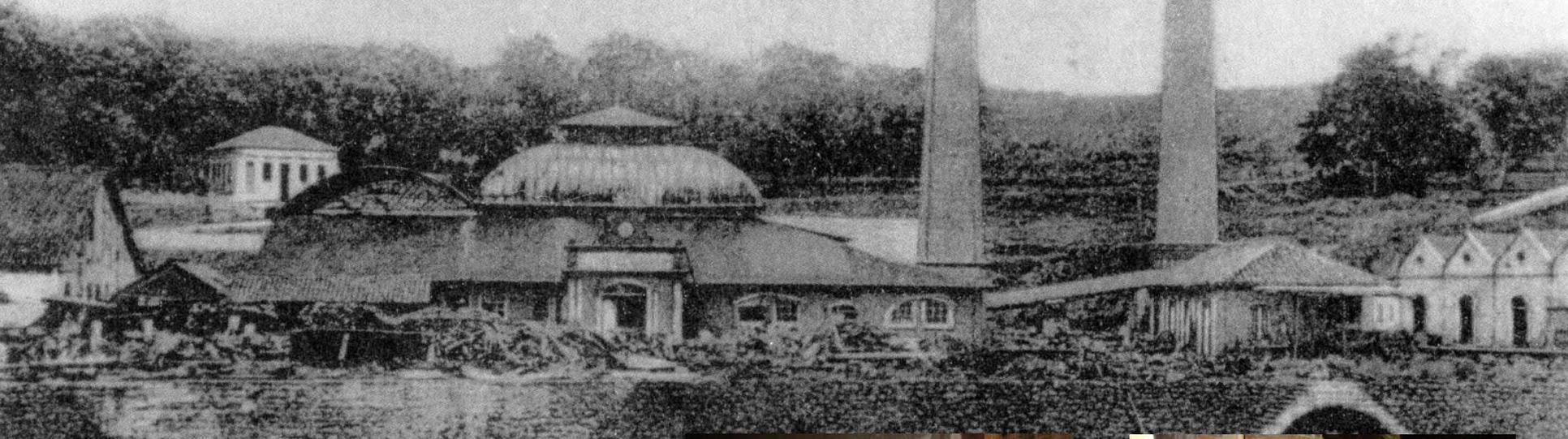
SE: 6 cidades (11  
sítios)

Distantes ~1  
0° em  
latitude

- **Materiais construtivos (tijolos e algumas telhas) cujas idades são determinadas por registros históricos e/ou informações arqueológicas.**
- **Precisão de idades sempre inferior a 30 anos.**

# Região Sudeste

## Engenho Central de Piracicaba: 1881 - 1974



**1781 AD**



## Sítios bem datados

Residência do primeiro prefeito de Salvador: Conde dos Arcos.

**Construção datada historicamente e com o ano de construção inscrito na fachada da casa!**

**1870 AD**



Residência do terceiro Presidente do Brasil:  
Prudente de Moraes.

**Nessa casa foram realizadas reuniões políticas que influíram para a proclamação da República em 1889.**

# Forte São João da Barra (1696 – 1702 AD), Salvador



Amostragem  
com  
perfuratriz



Casa Número 06 (1700-  
1710 AD), Salvador



Fragmentos de tijolos  
coletados no piso térreo  
da casa

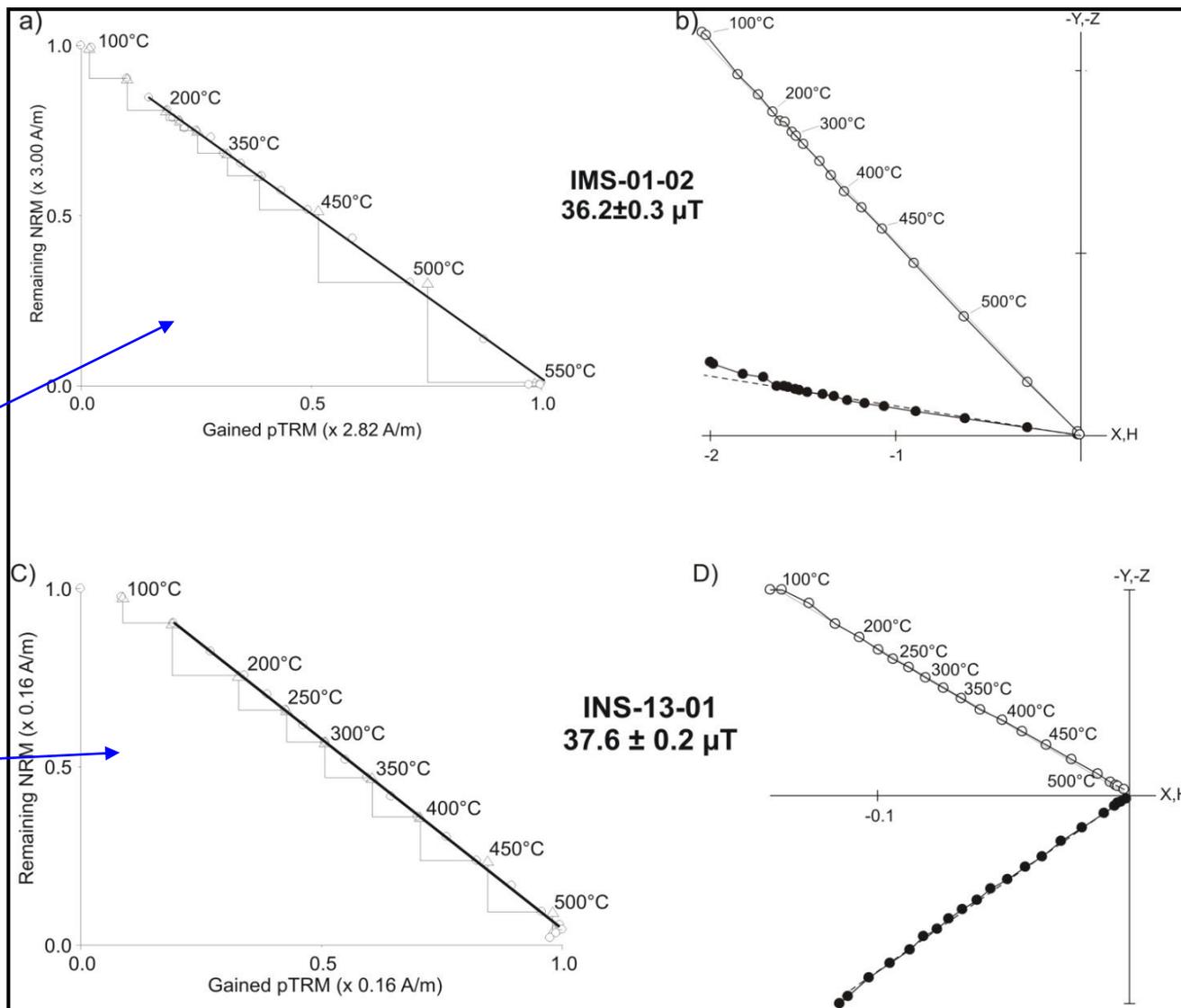


# Resultados de arqueointensidade: regiões NE e SE

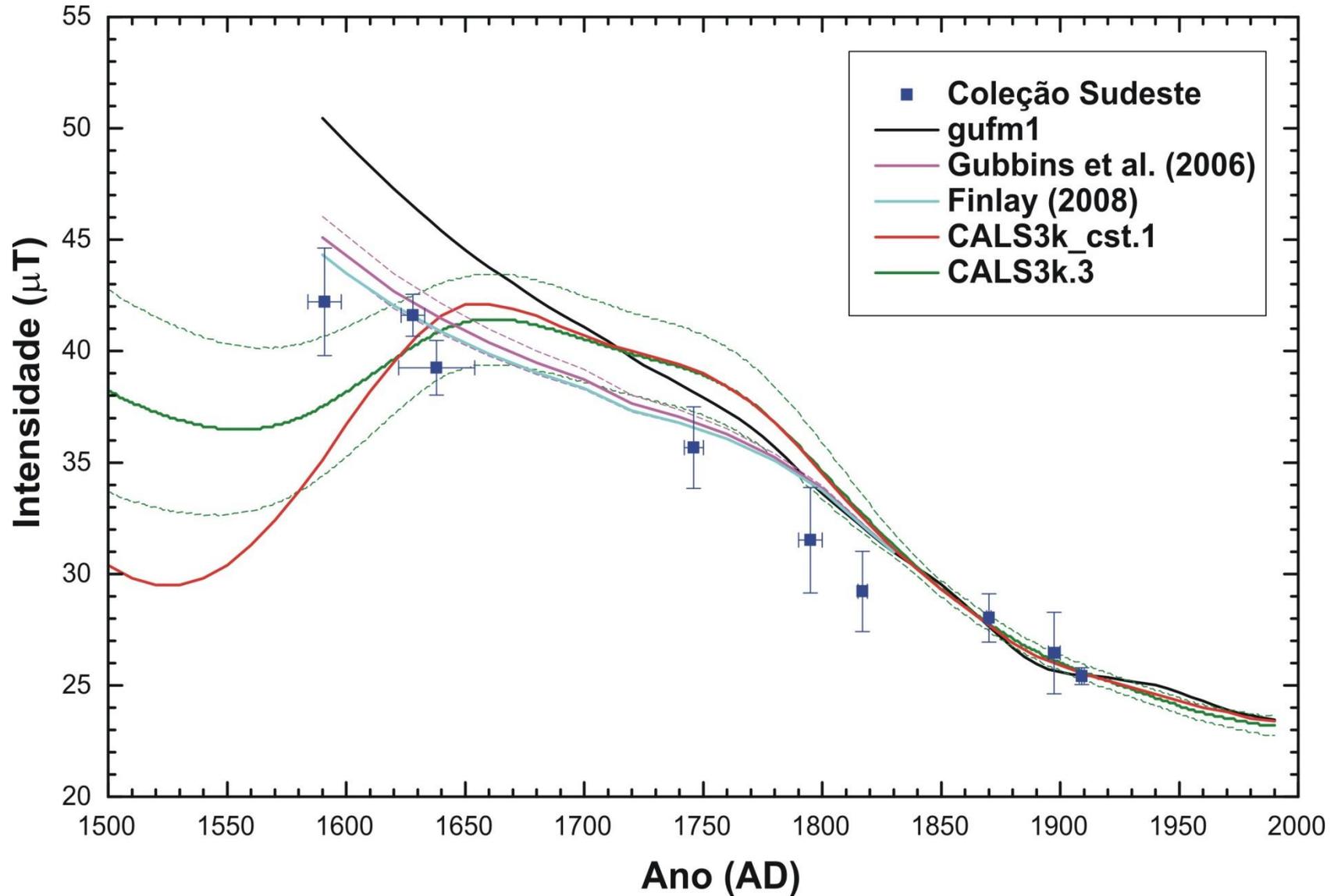
TAXA DE SUCESSO

NE: ~56%

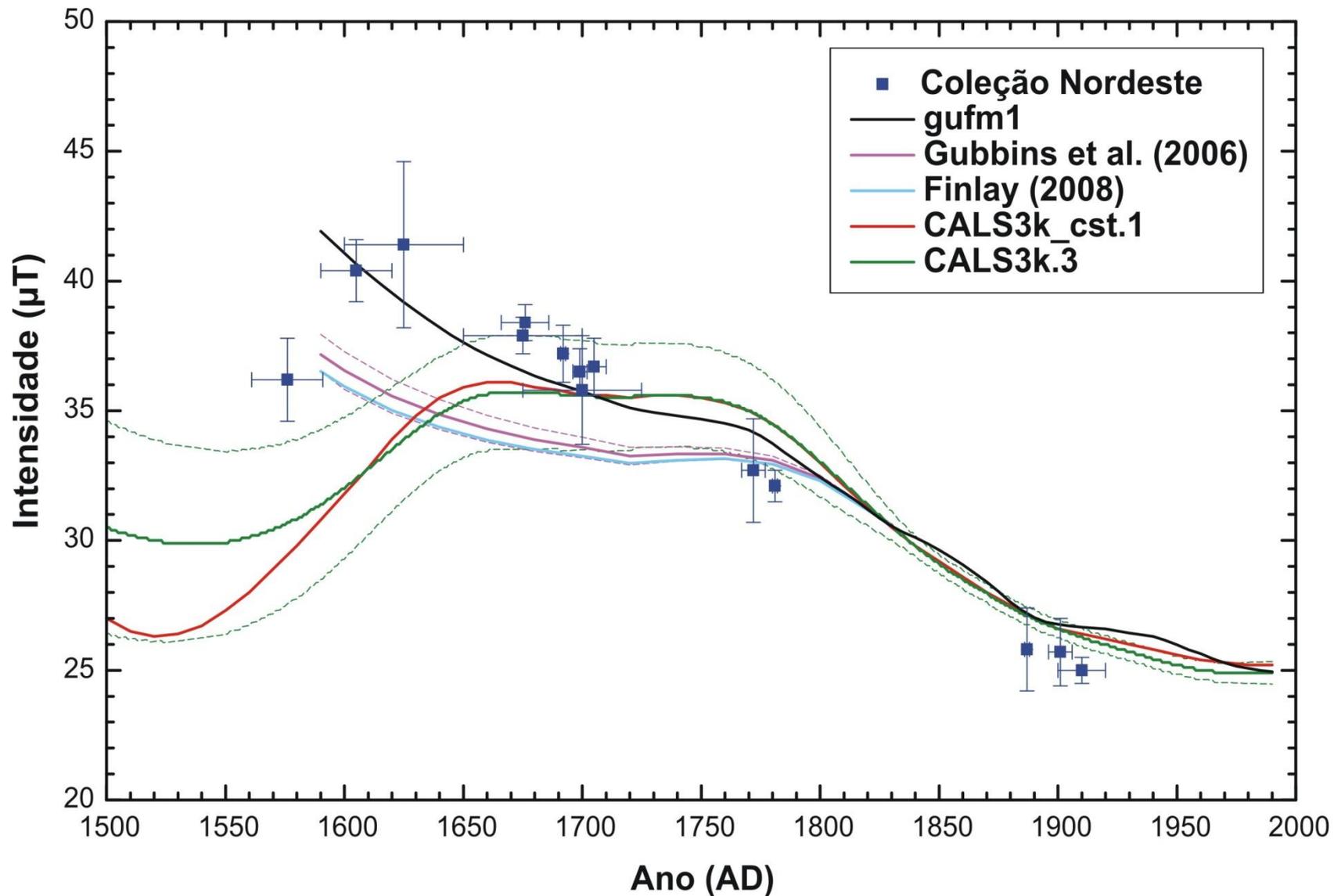
SE: ~38%



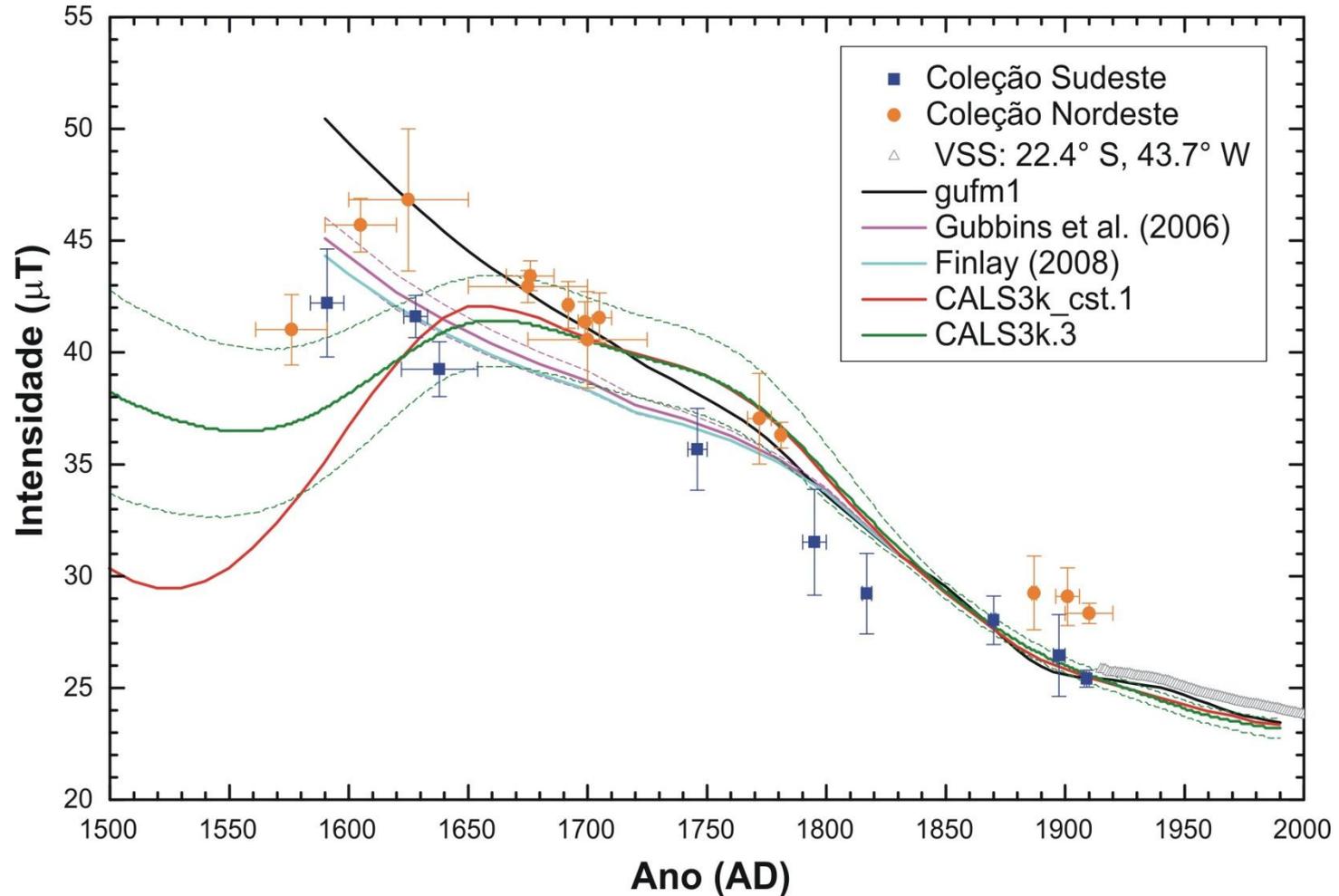
# Variação da intensidade na região SE do Brasil



# Variação da intensidade na região NE do Brasil



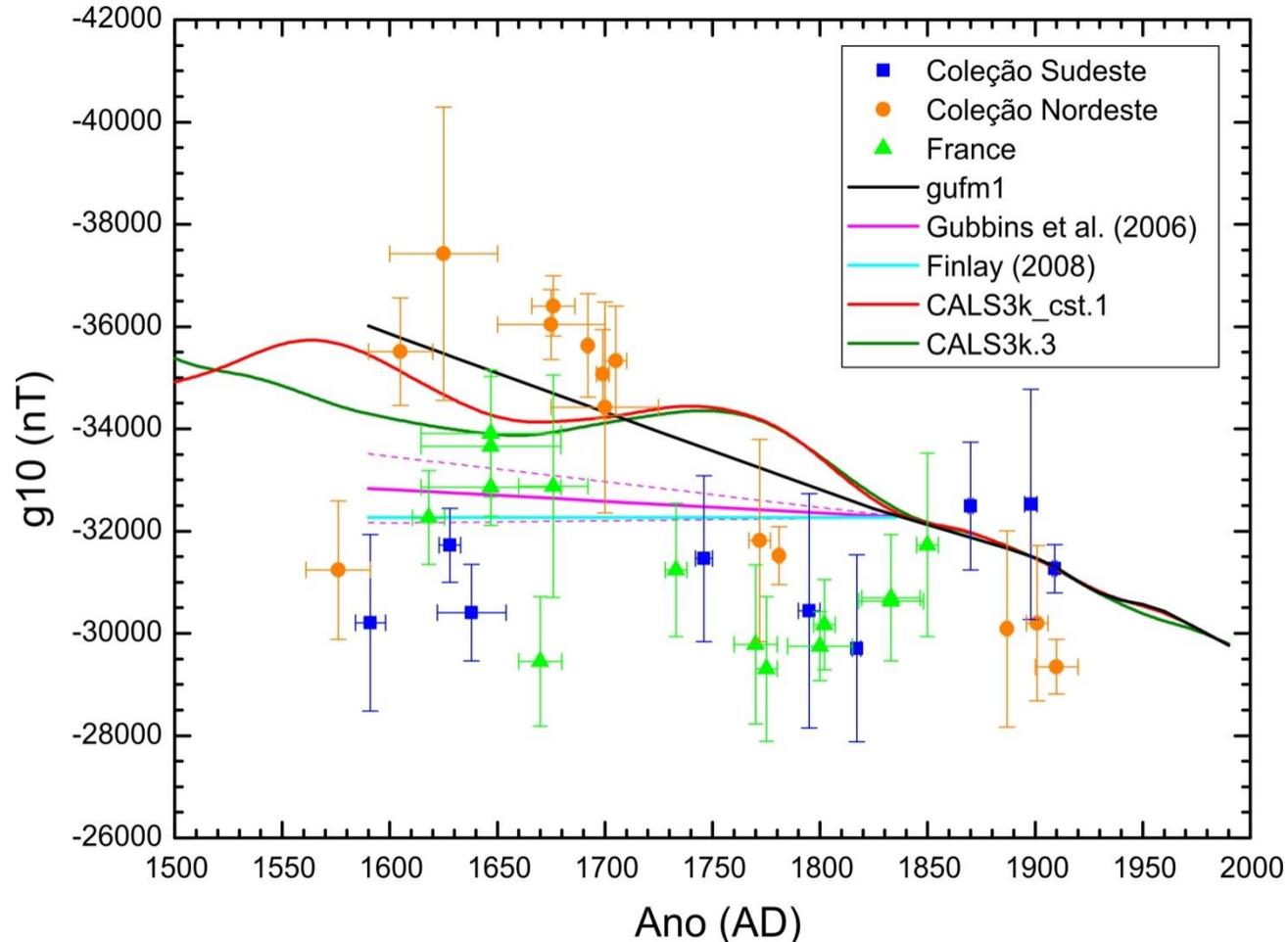
# Diferença entre as curvas



a) contribuições não-dipolares do CMT

b) aplicação à datação difere de região para região

# Implicações geomagnéticas



## Variação do $g_{10}$ : comportamento oscilatório

- variação para os últimos 160 anos – feição de curto período
- evolução para o último milênio – fenômeno mais complexo

# Paleomagnetismo



# ***Amostragem***

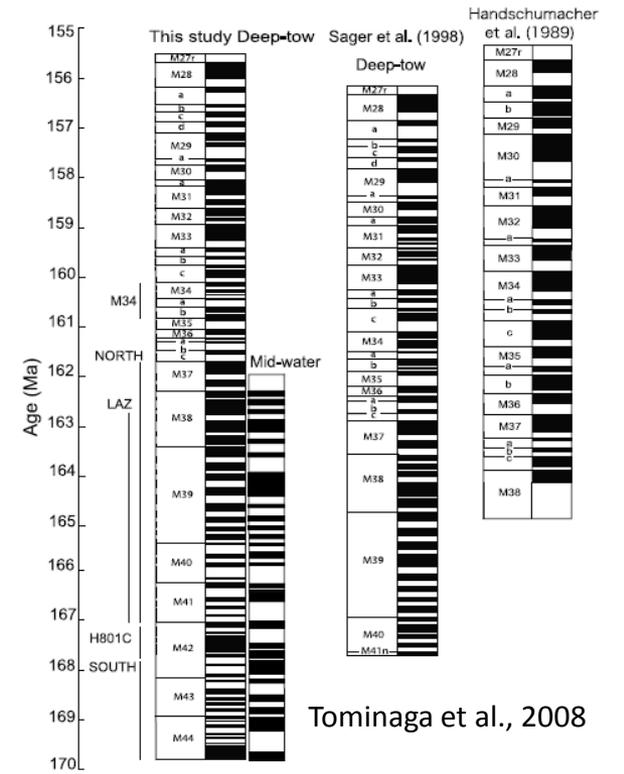
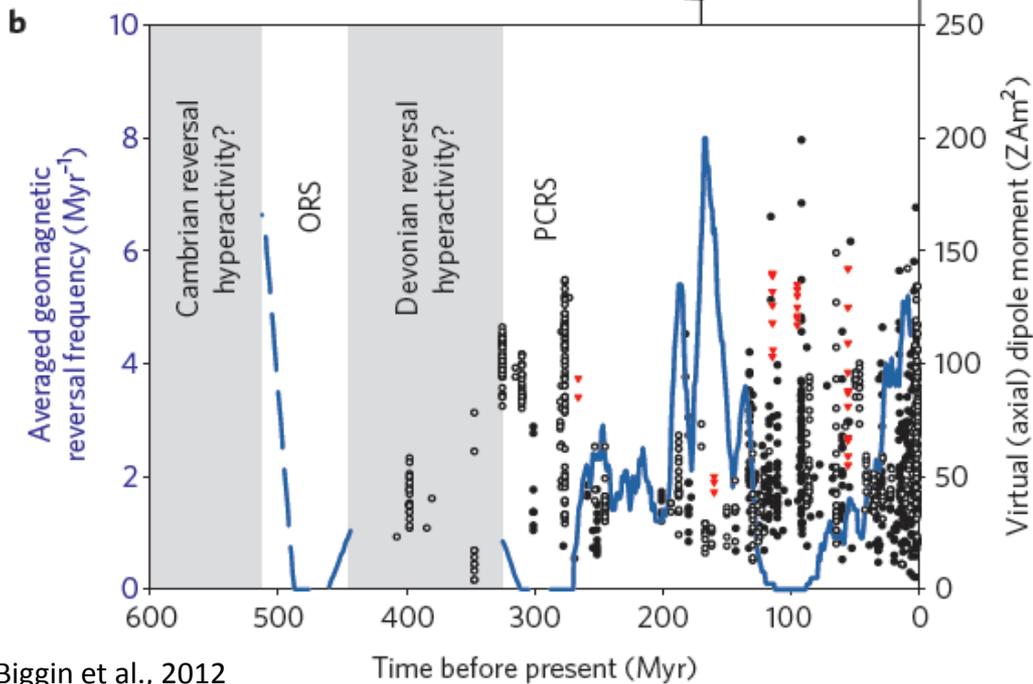
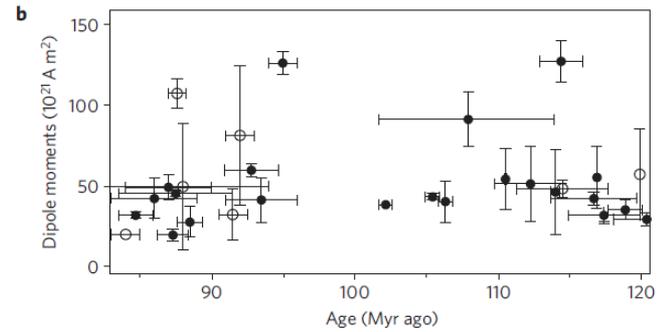
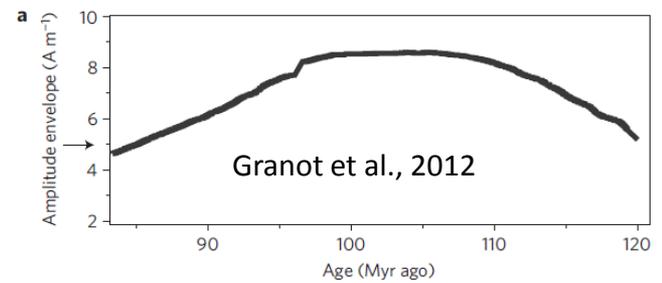
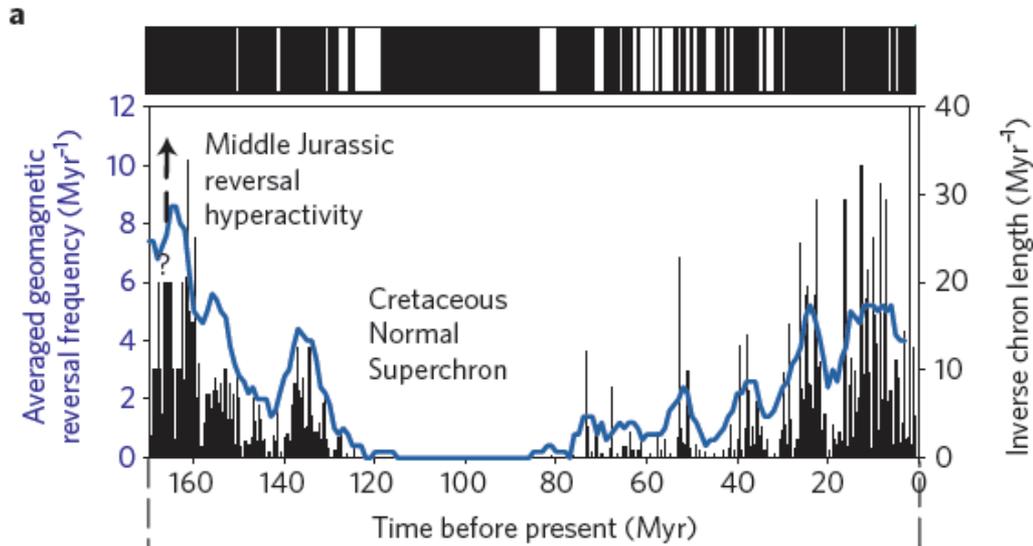


***Aparato para  
orientação do  
plug***

**Amostra com marca  
de orientação**



# Exemplo de estudo do campo antigo



# Considerações finais

- As curvas de referência devem ser sempre “alimentadas” com novos dados, permitindo:
  - Aprimorar os estudos sobre o campo geomagnético.
  - Aplicar as curvas em estudos arqueológicos.
- Potenciais aplicações do Arqueomagnetismo na Arqueologia:
  - **Datação.**
  - **Proveniência de materiais** (por exemplo, contraste de valores em materiais brasileiros e europeus).
  - **Determinação de processos de manufatura** (comparação de formas de fabricação e parâmetros de anisotropia magnética).
  - **Determinação de níveis estratigráficos de origem antrópica** (variação de parâmetros magnéticos com os níveis de escavação).
- **PERSPECTIVAS**
  - Aquisição de intensidade total em outras regiões do país (Norte e Sul) e de dados direcionais (D e I) no Brasil.
  - Aquisição de dados de intensidade total e direção em outros países da América do Sul.