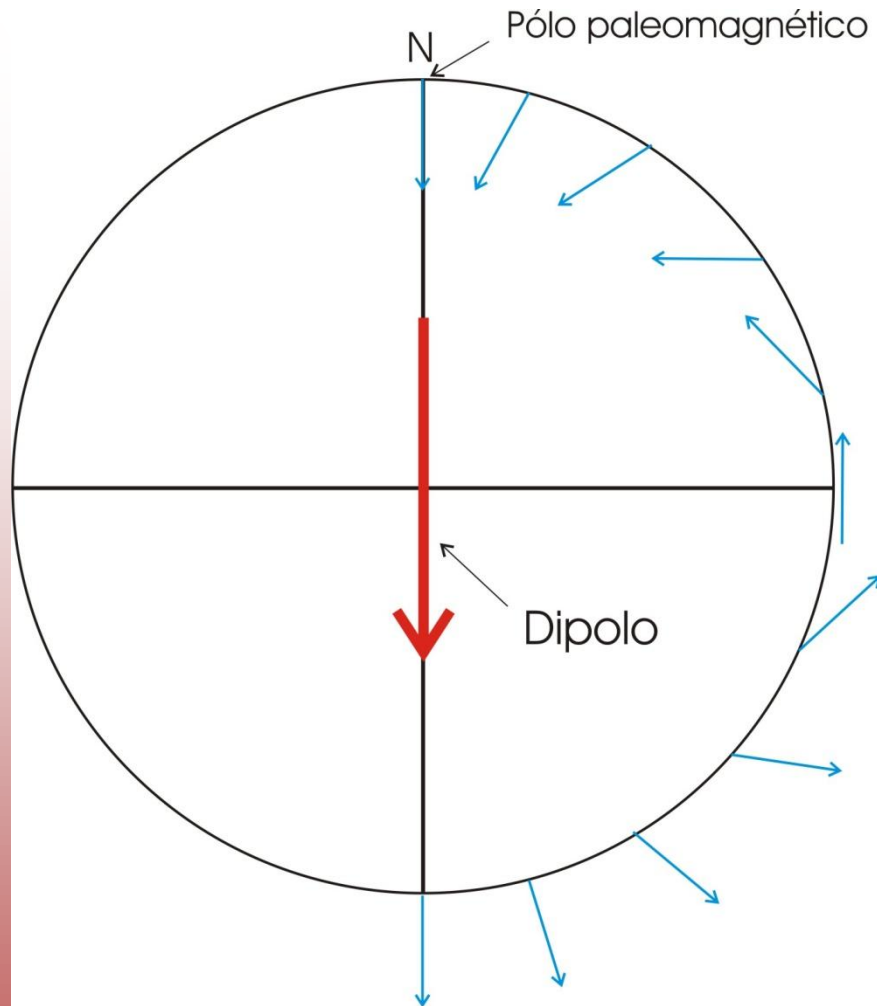


Reconstruções paleogeográficas

Manoel S. D'Agrella Filho

- 1. Modelo de campo de dipolo geocêntrico e axial;
- 2. Curva de deriva polar aparente;
- 3. Reconstruções paleogeográficas através de curvas deriva polar.

Modelo de campo de dipolo geocêntrico e axial



- O campo geomagnético varia lentamente no tempo. Entretanto, estudos mostram que se for feita uma média do campo em um intervalo de tempo de alguns milhares de anos, esta variação lenta do campo geomagnético é eliminada e o campo médio da terra pode ser representado, então, pelo **campo de um dipolo geocêntrico e axial**.

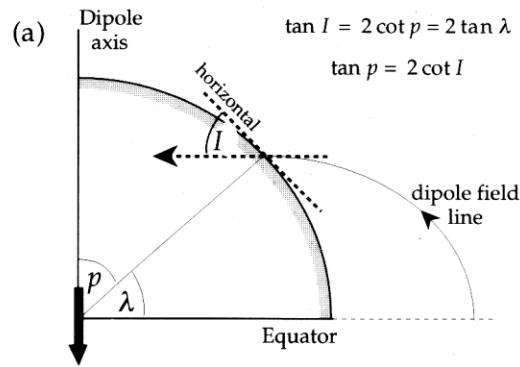
Devido a simetria do modelo de dipolo geocêntrico e axial, a inclinação magnética (I) varia de acordo com a equação:

$$\text{tg}(I) = 2 \text{tg}(\lambda)$$

Onde, λ é a paleolatidade. **Portanto, a inclinação magnética fornece a paleolatidade (λ) do corpo.**

Declinação magnética: $D = 0^\circ$
Declinação diferente de zero indica rotação do continente.

Modelo de campo de dipolo geocêntrico e axial



Devido a simetria do modelo de dipolo geocêntrico e axial, a inclinação magnética (I) varia de acordo com a equação:

$$\text{tg}(I) = 2 \text{tg}(\lambda)$$

Onde, λ é a paleolatidade.

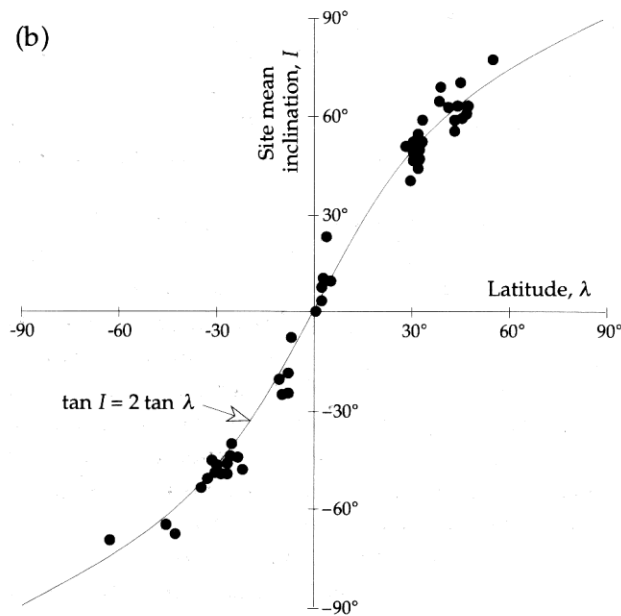
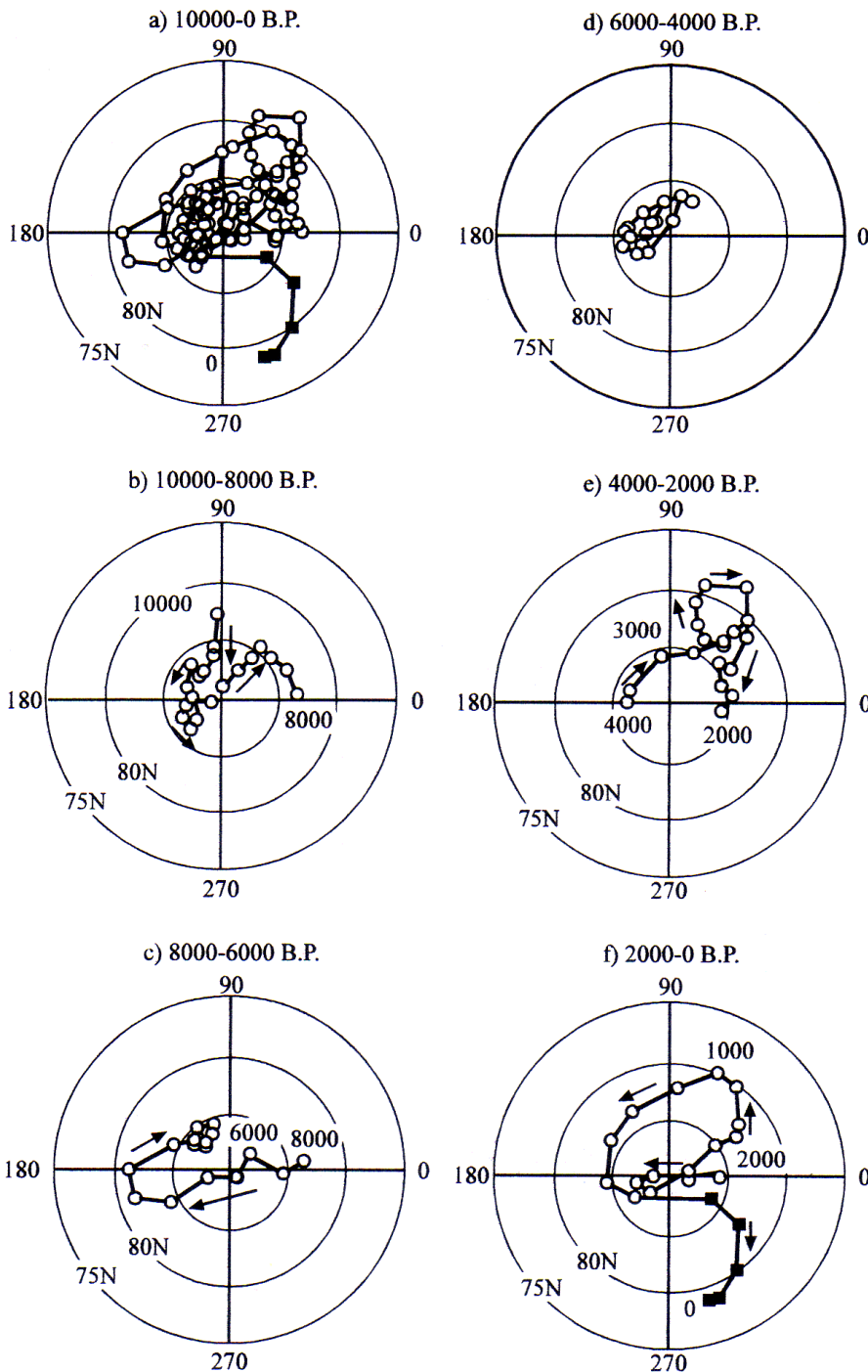


Fig. 5.54 (a) The geocentric axial dipole hypothesis predicts the relationship $\tan I = 2 \tan \lambda$ between the inclination I of a dipole field and the magnetic latitude λ . (b) The inclinations measured in modern deep-sea sediment cores agree well with the theoretical curve (based on data from Opdyke and Henry, 1969).

A figura mostra que a hipótese de dipolo geocêntrico axial é válida no estudo de sedimentos pelágicos recentes, onde as inclinações obtidas em rochas localizadas em várias latitudes concordam bem com a relação prevista pelo campo dipolar entre a inclinação e a paleolatidade.

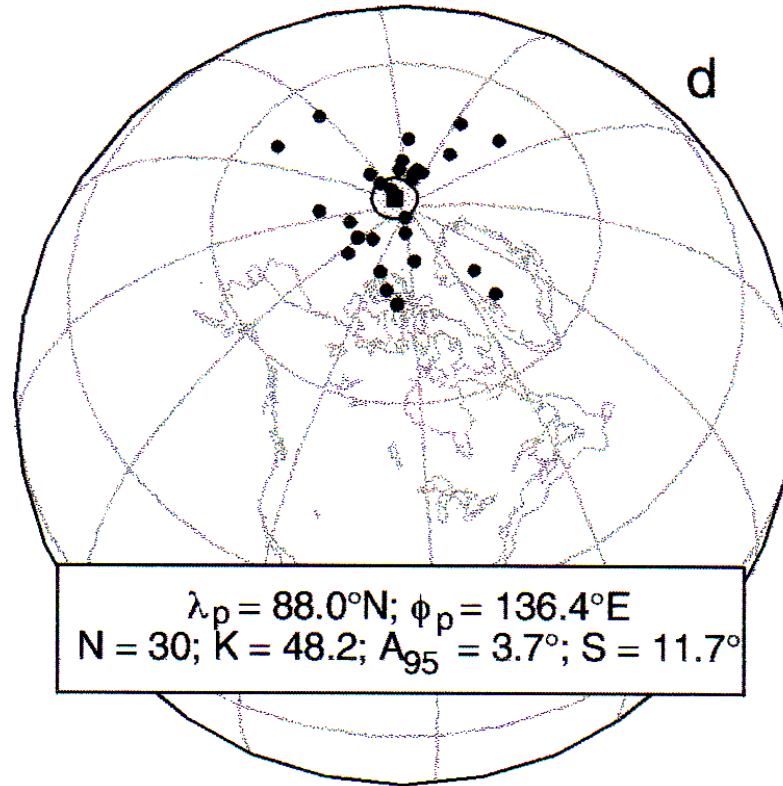
Varição secular registrada nas rochas.



Os resultados anteriores mostram que os pólos magnéticos migram para oeste a uma razão de $\sim 0,2^\circ$ /ano ao redor do pólo geográfico.

. A figura ao lado mostra (a) o movimento do pólo magnético norte ao redor do pólo geográfico para os últimos 10.000 anos; (b) a (f) representação a cada 2000 anos (os pontos representam as médias a cada 100 anos). Pode-se notar que para a eliminação da variação secular são necessários, pelo menos 10.000 anos.

Lavas Holocênicas da América do Norte

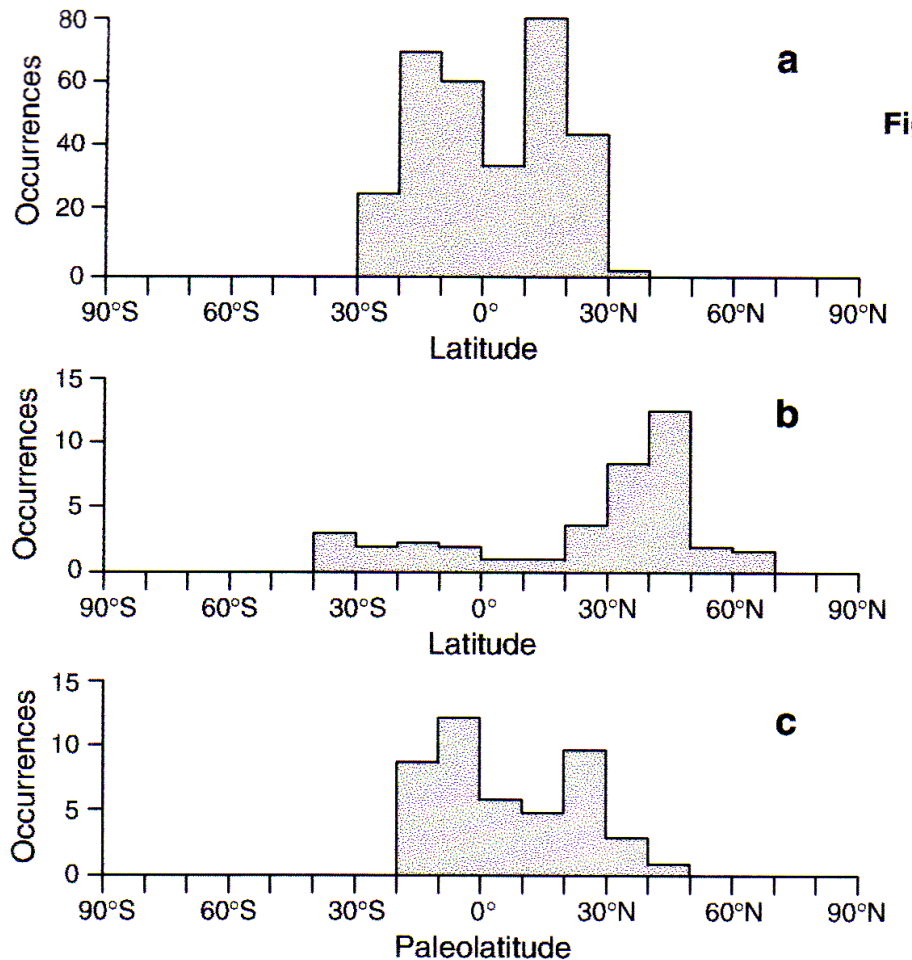


O pólo médio cai dentro de 3° em relação ao pólo de rotação.

Modelo de campo de dipolo geocêntrico e axial

- Estudos de rochas sedimentares e vulcânicas recentes, cobrindo os últimos 5 Ma fornecem evidências adicionais ao modelo do campo de dipolo geocêntrico e axial.
- A distribuição de pólos paleomagnéticos obtidos para este intervalo de idades se aglomeram em torno do pólo geográfico. Merrill e McElhinny (1983) mostram que o campo geomagnético é dipolar, geocêntrico e axial com um limite de confiança de 3° .

Evidências paleoclimáticas



Para épocas mais antigas, as paleolatitudes podem ser comparadas com evidências paleoclimáticas. Corais, evaporitos e sedimentos vermelhos são encontrados em regiões próximas de equador, enquanto rochas (tilito) com evidências de glaciação são encontradas em regiões polares.

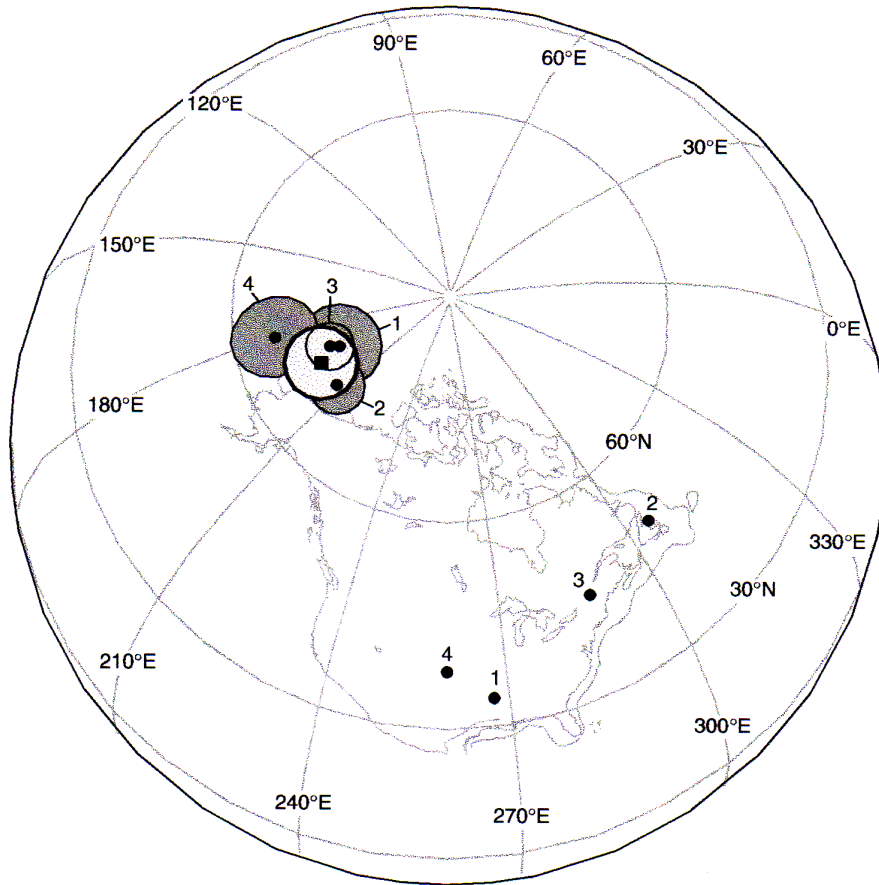
A Figura mostra em (a) um histograma com as latitudes em que ocorrem os corais modernos; em (b) um histograma com as latitudes atuais em que ocorrem antigos corais e em (c) um histograma com as paleolatitudes de corais fósseis determinadas através do paleomagnetismo.

Pólo paleomagnético médio

Costuma-se determinar a média de pólos paleomagnéticos para representar um período geológico.

A Figura mostra o pólo médio (quadrado cheio) que representa a América do Norte durante o Cretáceo Médio, obtido da média de quatro pólos paleomagnéticos (1 a 4 na Figura).

A média é efetuada com os mesmos programas de cálculo de médias de direções: neste caso, a longitude do pólo equivale à declinação e a latitude equivale à inclinação.



Cretáceo – 65-142 Ma

Pólo Geomagnético Virtual - PGV

- A hipótese fundamental do paleomagnetismo é a de que a média, no tempo, do campo geomagnético corresponde ao campo de um dipólo geocêntrico e axial.
- No trabalho paleomagnético coletamos vários sítios de uma formação geológica que cubram um intervalo de tempo suficiente para eliminar a variação secular do campo geomagnético.
- Cada sítio (um nível sedimentar, um dique, um derrame de lava,...) pode representar um instante do tempo geológico e, assim, estar afetado pela variação secular.
- Neste caso, o pólo determinado para o sítio estará também afetado pela variação secular e é chamado de pólo geomagnético virtual (PGV, VGP em inglês).
- A média de um conjunto de PGVs pode eliminar a variação secular e nos fornecer um pólo paleomagnético.

Pólo paleomagnético

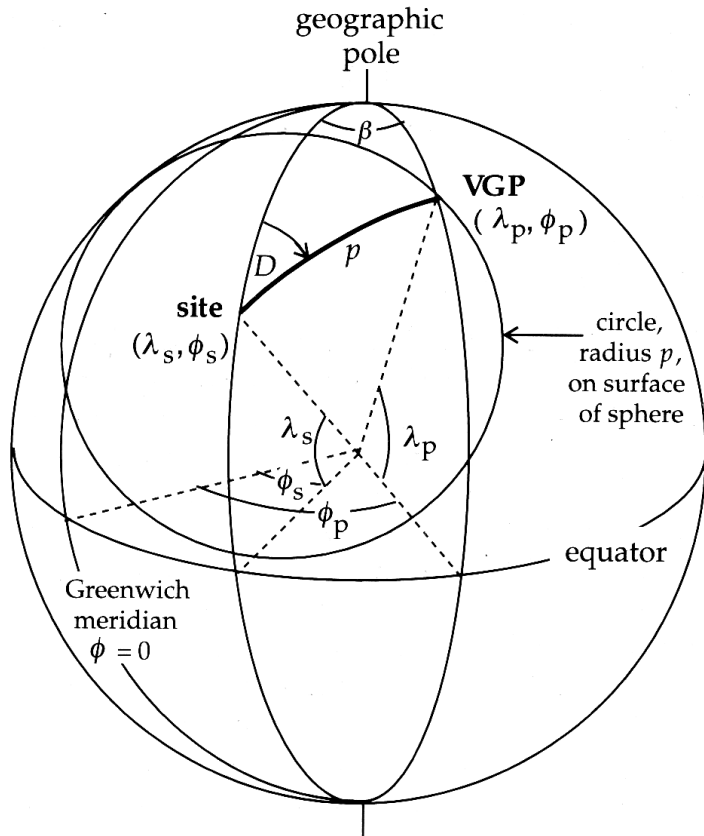


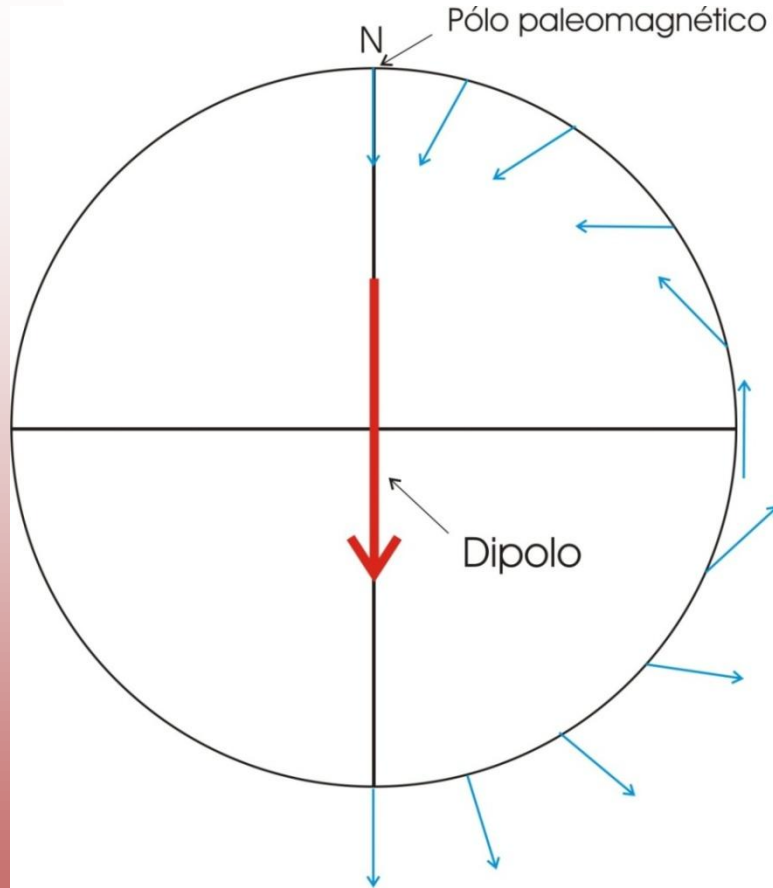
Fig. 5.64 Method of locating the virtual geomagnetic pole (VGP) from the declination D and inclination I measured at a site (after Nagata, 1961).

- O pólo geomagnético virtual (VGP) obtido para um sítio de amostragem (λ_s, ϕ_s) , pode ser determinado através da declinação (D) e inclinação (I) médias obtidas através da estatística de Fisher. A paleocolatitude (p) é dada pela expressão:

- $\text{tg}(I) = 2 \cotg(p)$

- p determina o raio de um círculo mínimo centrado no sítio de amostragem.
- D é o ângulo entre o meridiano que passa pelo pólo geográfico e o paleomeridiano magnético, o qual passa pelo pólo magnético antigo.
- O VGP (λ_p, ϕ_p) situa-se na interseção entre o paleomeridiano magnético e o círculo de raio p .
- O VGP pode ser determinado também por trigonometria esférica.

Ambiguidade



Pela própria simetria do modelo do campo geomagnético, a longitude do bloco tectônico estudado não pode ser estabelecida através do pólo paleomagnético.

Somente a paleolatitude e a rotação do corpo podem ser determinadas através da inclinação magnética média (I_m) e da declinação magnética média (D_m) determinadas para a formação geológica estudada.

Pólo paleomagnético de referência

Um pólo paleomagnético deve passar por critérios de confiabilidade, antes de ser utilizado nas reconstruções paleogeográficas.

Van der Voo (1990) estabeleceu 7 critérios, os quais caracterizam um pólo paleomagnético.

Quanto maior é o número de critérios satisfeitos, mais confiável será o pólo paleomagnético a ser usado nas reconstruções paleogeográficas.

Critérios de confiabilidade

- 1- A idade da unidade estudada deve apresentar um erro inferior a $\pm 4\%$. Além disso, deve-se demonstrar que esta idade equivale à idade de aquisição da magnetização remanente;**
- 2- Apresentar parâmetros estatísticos satisfatórios: número de amostras (N) superior a 24, parâmetro K maior que 10,0 e α_{95} inferior a 16° ;**
- 3- Apresentar desmagnetização adequada: a magnetização remanente característica deve ser obtida através da subtração de componentes secundárias em diagramas vetoriais ou através de análise por componentes principais;**

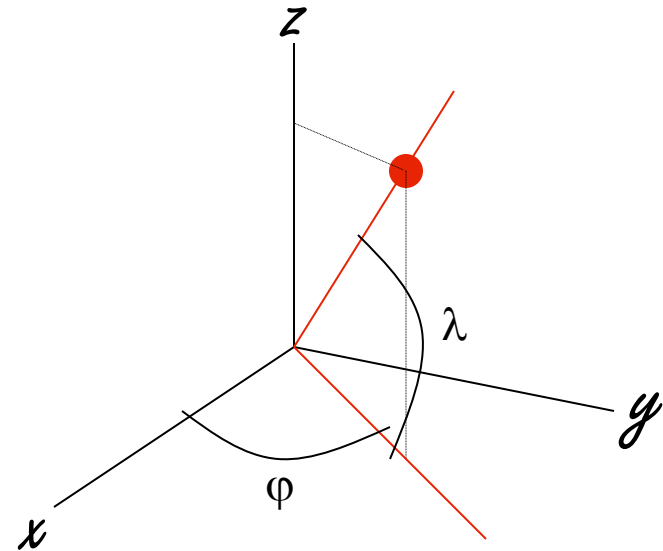
Critérios de confiabilidade

- 4- Apresentar testes de campo (testes da dobra, do contato cozido ou do conglomerado) positivos e estatisticamente significativos, que confirmem o caráter primário da magnetização;**
- 5- Apresentar controle estrutural e tectônico coerentes para a unidade estudada;**
- 6- Presença de reversões, indicando um intervalo de tempo significativo durante a aquisição da remanência;**
- 7- O paleopólo obtido não deve coincidir com a posição de pólos paleomagnéticos mais jovens.**

Pólo de referência

- **Um pólo de referência é aquele que satisfaz o máximo de critérios possível.**
- **Entretanto, os critérios 1 (da idade) e 6 (dos testes de campo) são importantes para que um pólo seja considerado de um pólo de referência.**

Leonhardt Euler



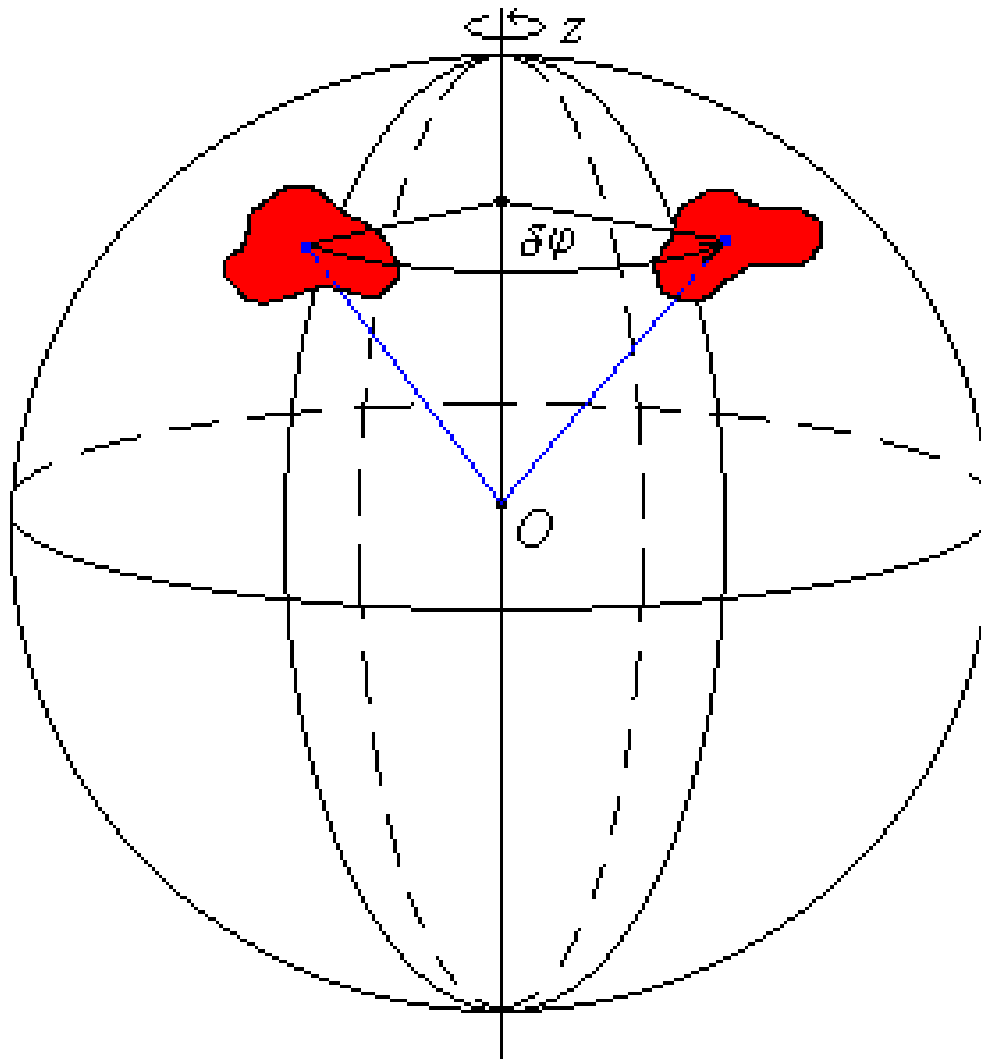
$$\begin{cases} x = \cos \lambda \cos \varphi \\ y = \cos \lambda \sin \varphi \\ z = \sin \lambda \end{cases}$$

λ = latitude

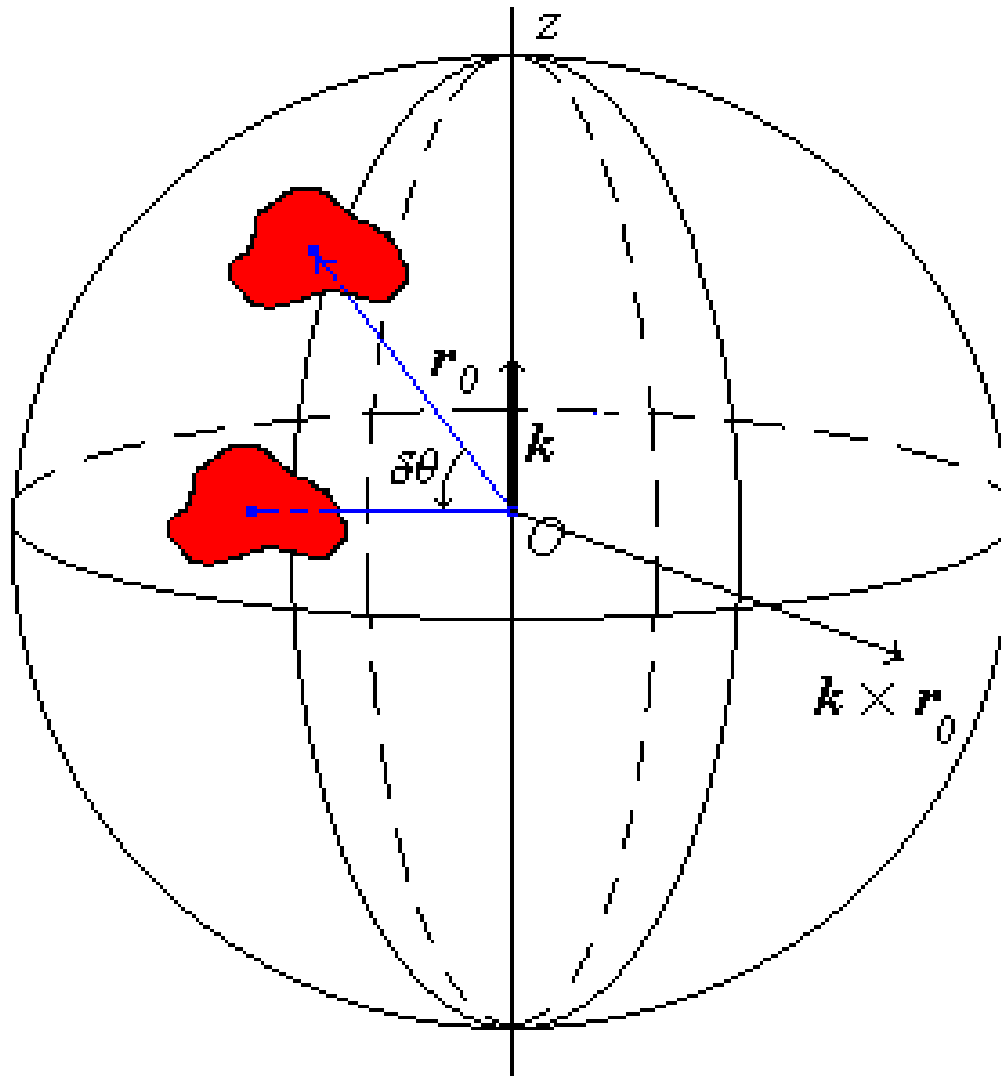
φ = longitude

Uma placa sobre uma esfera pode ser movida para qualquer outra orientação por meio de uma única rotação ao redor de um eixo através da esfera, selecionado apropriadamente.

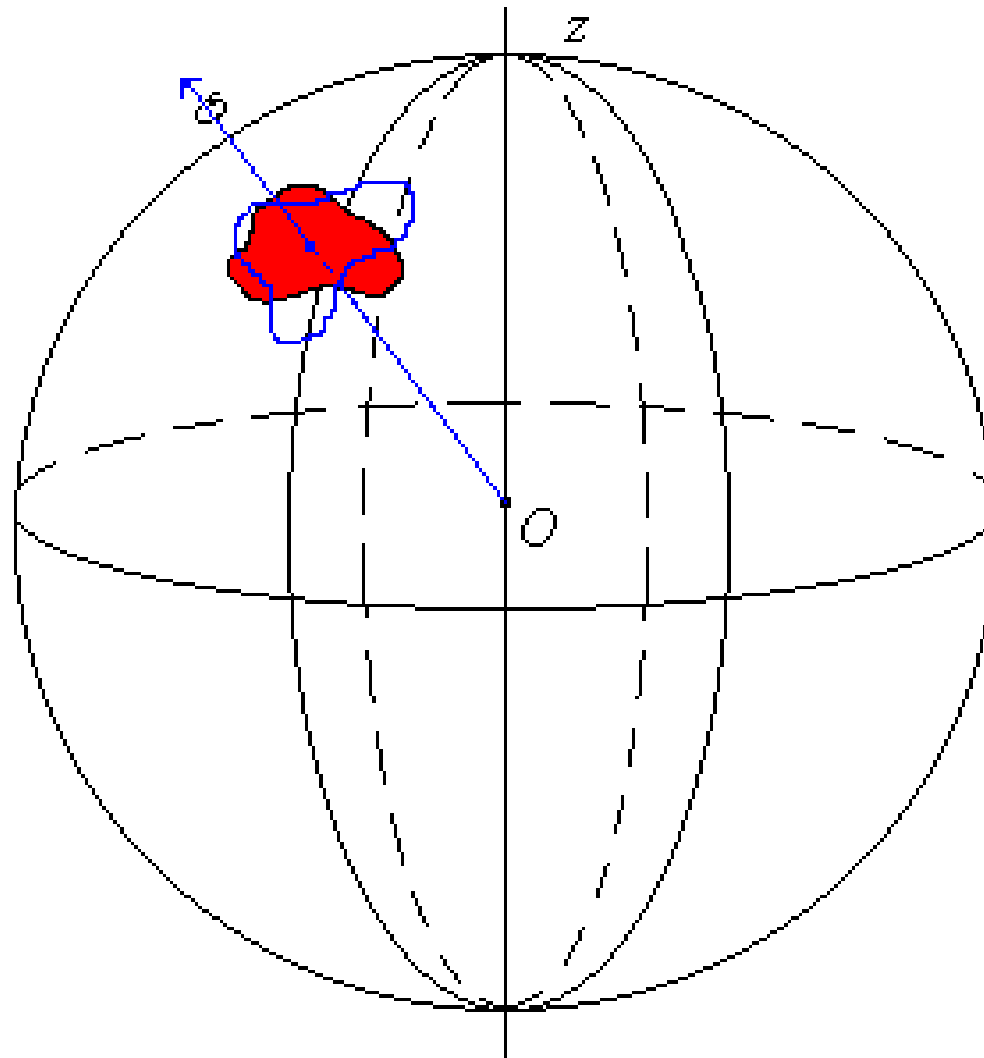
Rotação em torno do eixo Z



Rotação em torno do eixo horizontal

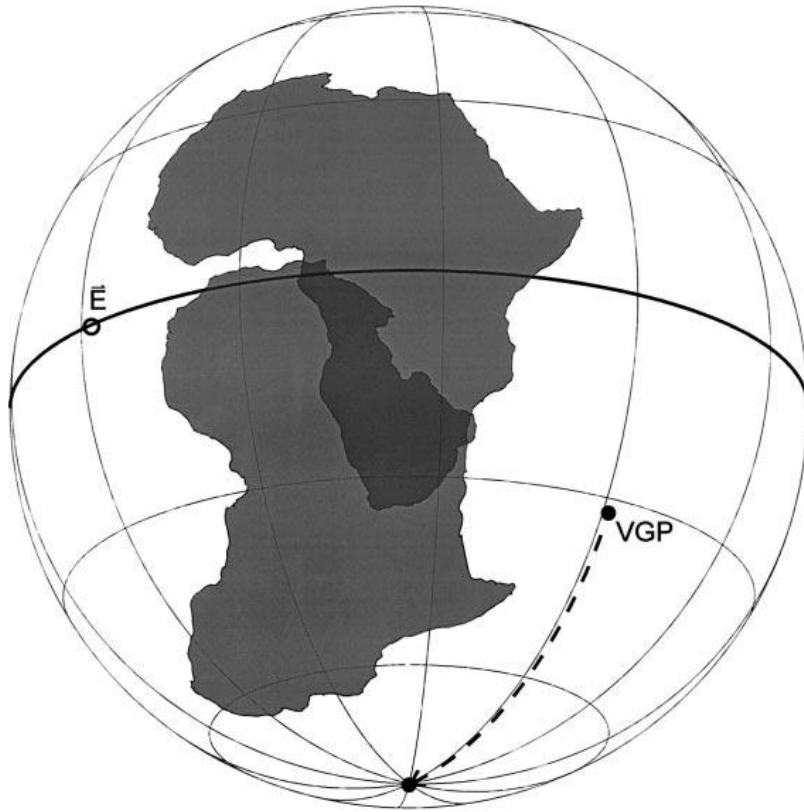


Rotação em torno do eixo vertical



Reconstrução paleogeográfica

Absolute Position



- O pólo paleomagnético Sul calculado para a África é representado na Figura (ponto VGP).
- A rotação em torno do pólo de rotação E, como mostrado pela linha tracejada, faz com que o pólo VGP coincida com o pólo sul geográfico. A mesma rotação é realizada para a África.
- Se as coordenadas do pólo são, φ_p (longitude) e λ_p (latitude), as coordenadas do pólo de rotação E (φ_E , λ_E) serão:
 - $\varphi_E = \varphi_p - 90^\circ$ e $\lambda_E = 0^\circ$;
- O ângulo de rotação (θ) será:
 - $\theta = \text{latitude do PGV} - 90^\circ$

Reconstrução paleogeográfica

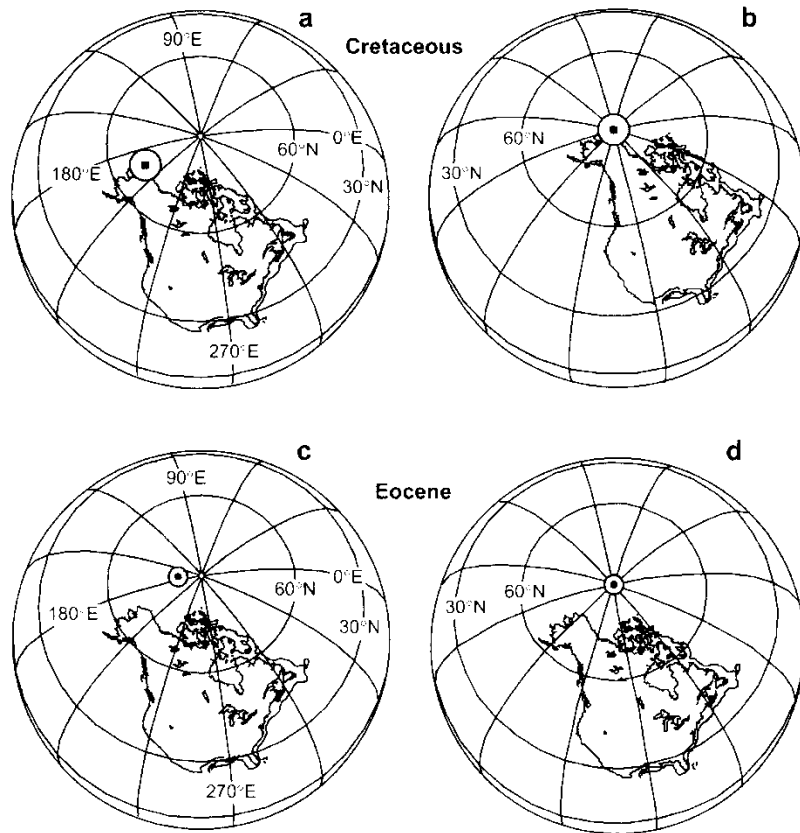


Figure 10.4 North American mid-Cretaceous and Eocene paleomagnetic poles and resulting paleogeographies. (a) Mid-Cretaceous paleomagnetic pole plotted on the present geographic grid; (b) mid-Cretaceous paleogeographic position of North America resulting from rotating the mid-Cretaceous paleomagnetic pole (and North America) so that the paleomagnetic pole coincides with the axis of the grid; (c) Eocene paleomagnetic pole of Diehl et al. (1983) plotted on the present geographic grid; (d) Eocene paleogeographic position of North America.

Reconstrução paleogeográfica da América do Norte para duas épocas:

Cretáceo – figuras (a) e (b);

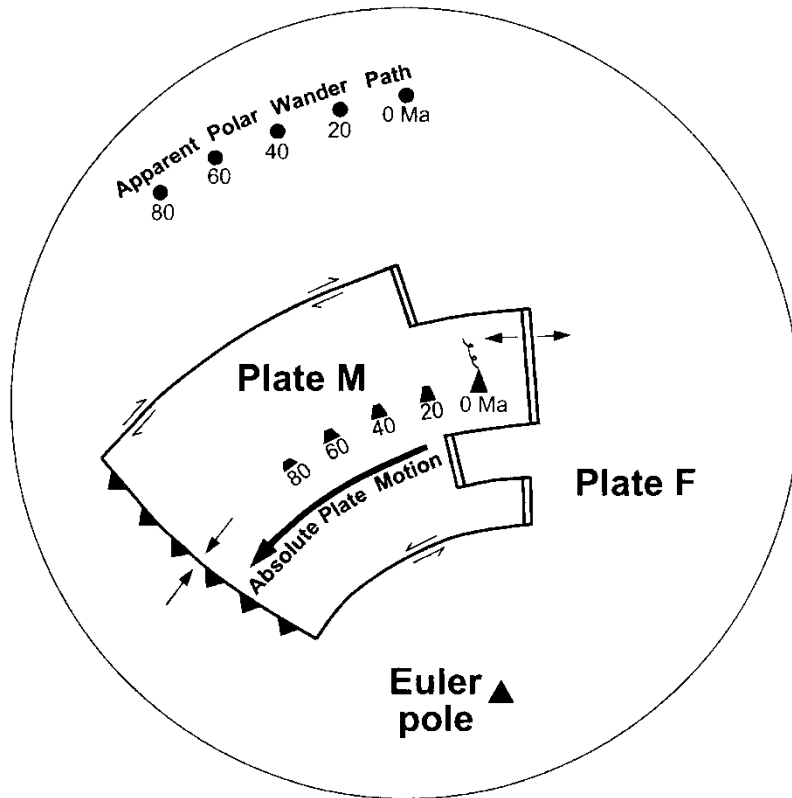
Eoceno – figuras (c) e (d)

Note que a posição da América do Norte em relação ao pólo paleomagnético (a, c) é a mesma em relação ao pólo geográfico, após a reconstrução (b, d)

Curva de deriva polar aparente

- Ao invés de representarmos a posição do continente através do tempo, utilizando pólos paleomagnéticos para as reconstruções paleogeográficas, é comum a construção de uma curva de deriva polar aparente (Apparent Polar Wander (APW) path, em inglês), a qual pode ser representada mais facilmente.
- Na realidade não é o pólo que se movimenta, e sim o continente, por isto, o nome de curva de deriva polar **aparente**.

Curva de deriva polar aparente



Esta figura mostra uma placa (M) em movimento em torno de um pólo de rotação (pólo de Euler).

Note que o pólo paleomagnético, o qual define uma curva de deriva polar aparente, apresenta o mesmo movimento em relação ao pólo de Euler.

Figure 10.7 Paleomagnetic Euler pole model of apparent polar wander paths. The geographic grid is shown centered on the present rotation axis; Plate F is fixed, while Plate M is rotating about an Euler pole that is fixed in position (with respect to Plate F and the underlying mantle); the direction of absolute motion of Plate M is shown by the bold arrow; directions of relative plate motion along plate boundaries are shown by small arrows; ridge boundaries are shown by double lines; transform fault boundaries are shown by single lines; the convergent plate boundary is shown by the thrust fault symbol with teeth on the overriding plate; a hotspot under the active seamount labeled 0 Ma is fixed to the mantle and produces a seamount chain (hotspot track) with ages indicated; the recent paleomagnetic pole for Plate M is located at the rotation axis, while older paleomagnetic poles fall on the APW path with ages of poles indicated; the APW path, transform faults, and hotspot track all lie on circles of latitude (small circles) centered on the Euler pole. Modified from Gordon et al. (1984) with permission from the American Geophysical Union.

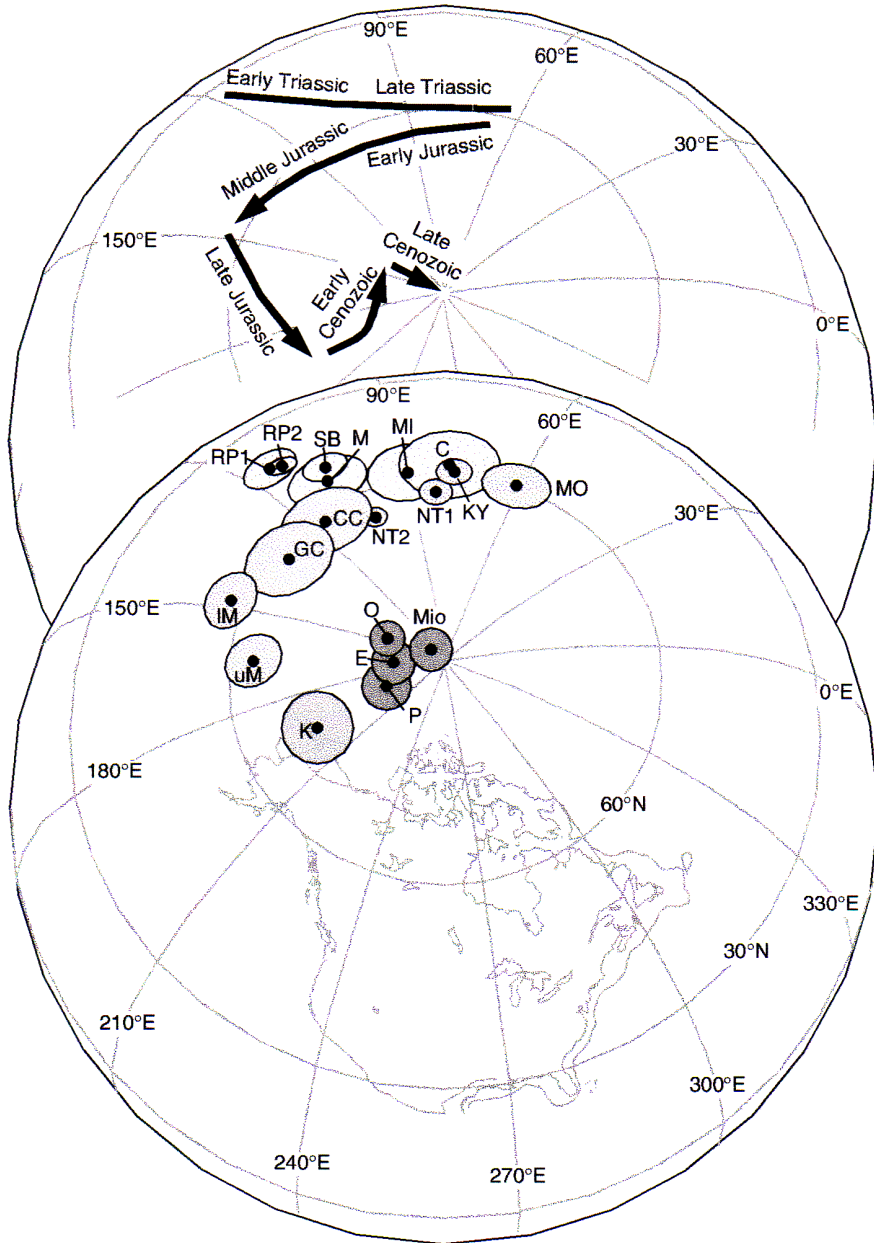
Utilização de pólos de referência

Este método utiliza somente os pólos de maior confiabilidade.

A Figura mostra a curva de deriva polar aparente definida para a América do Norte desde o Triássico Inferior até hoje.

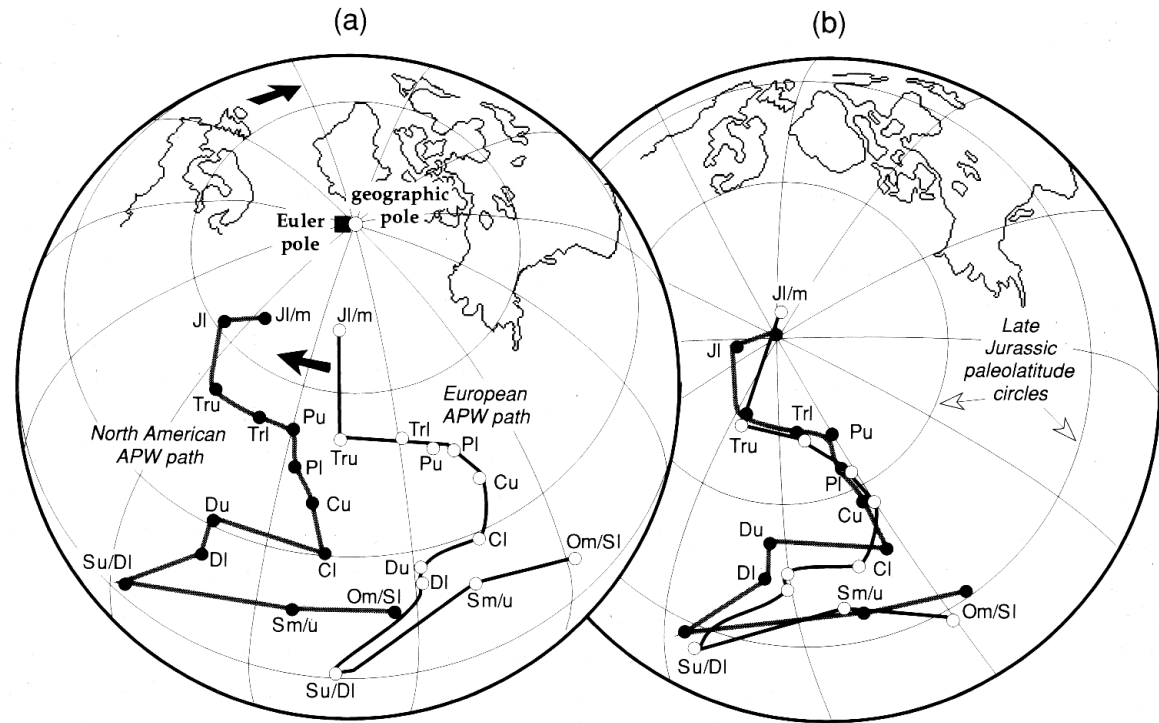
Os círculos indicam o erro associado (α_{95}) a cada pólo médio.

O método permite ver variações rápidas e a formação de cotovelos na curva.



Reconstrução paleogeográfica

Fig. 5.67 (a) The Ordovician to Jurassic segments of the North American and European APW paths. (b) The same APW paths after rotating Europe by 38° clockwise about the Euler rotation pole at 88.5°N 27.7°E, marked by the square symbol in (a) (after Van der Voo, 1990).



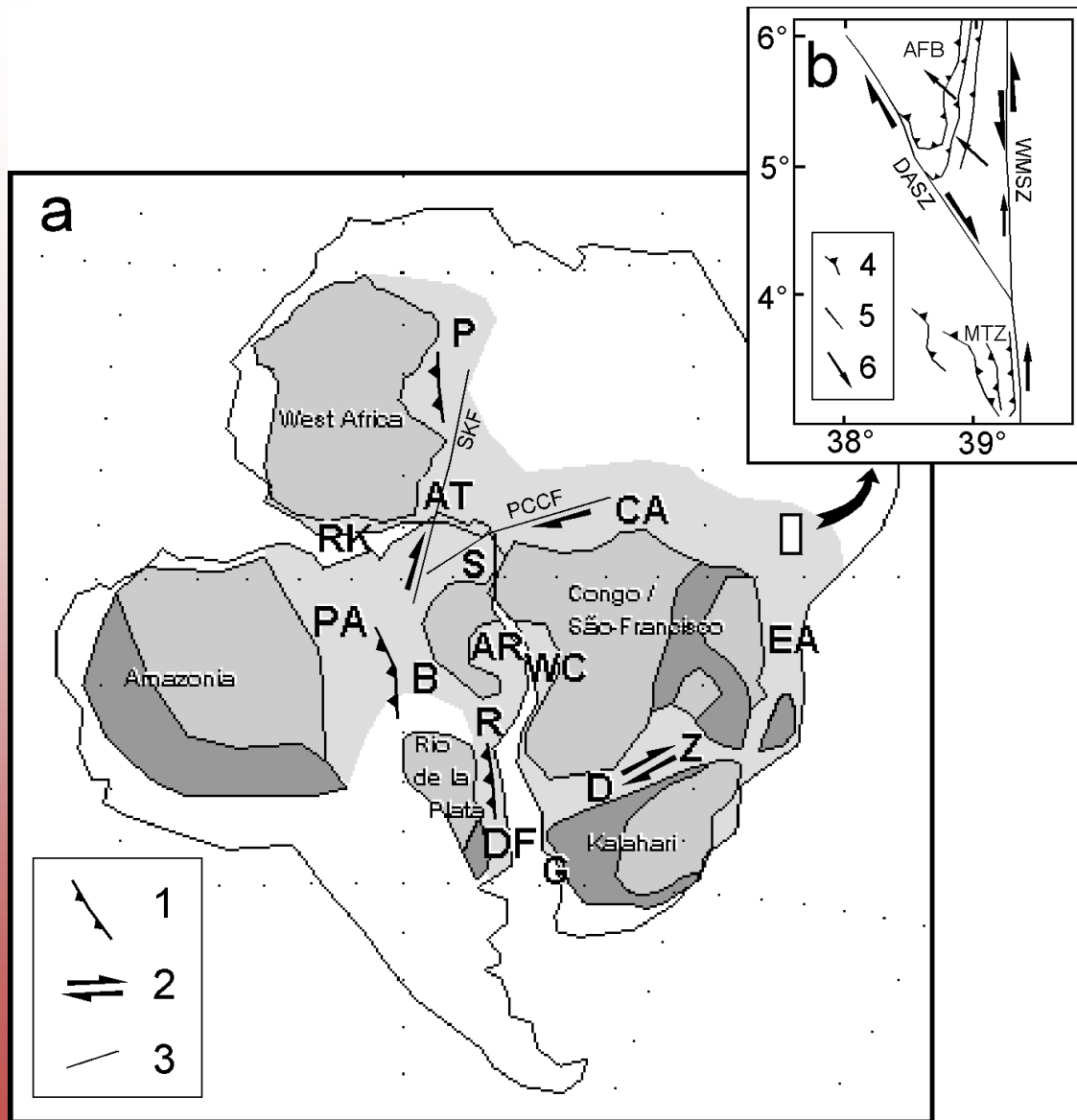
Reconstrução paleogeográfica utilizando as curvas de deriva polar aparente construídas desde o Ordoviciano Médio até o Jurássico para a Europa e América do Norte.

Obtém-se a mesma curva de deriva polar para os dois continentes, quando a curva de deriva da Europa é rotacionada de 38° no sentido horário em torno do pólo de Euler (88,6 °N, 27,7 °E). Note que o mesmo movimento da Europa em torno do mesmo pólo de Euler, fecha o Oceano Atlântico Norte. Os dois continentes permaneceram juntos neste período de tempo (Om – J).

Craton Amazônico

- Craton representa uma região que se manteve estável (mais antiga) em relação ao desenvolvimento de um cinturão orogênico.
- A América do Sul pode ser dividida em regiões cratônicas (mais antigas) em relação ao desenvolvimento dos Cinturões Brasileiros (600-520 Ma).
- Durante esta época foi formado o supercontinente Gondwana.

Oeste do Gondwana



As regiões em tom de cinza mais escuro são chamados de crátons:

Amazônia;

Oeste África;

Congo-São Francisco;

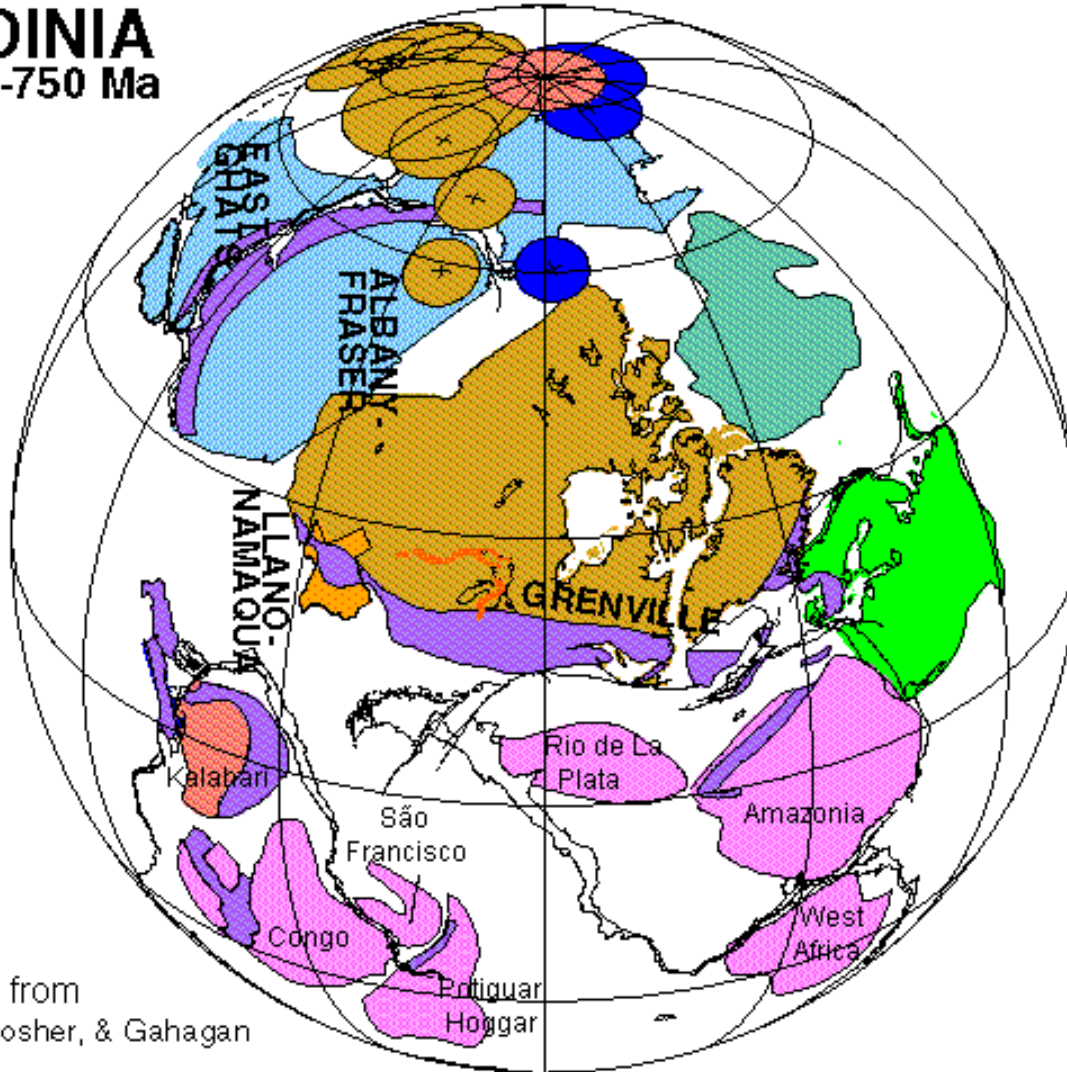
Kalahari;

Rio de la Plata.

As regiões em tom de cinza mais claro formam os cinturões orogênicos Brasilianos (lado do Brasil) e Pan-Africano (lado da África).

Rodinia

RODINIA
~1000-750 Ma



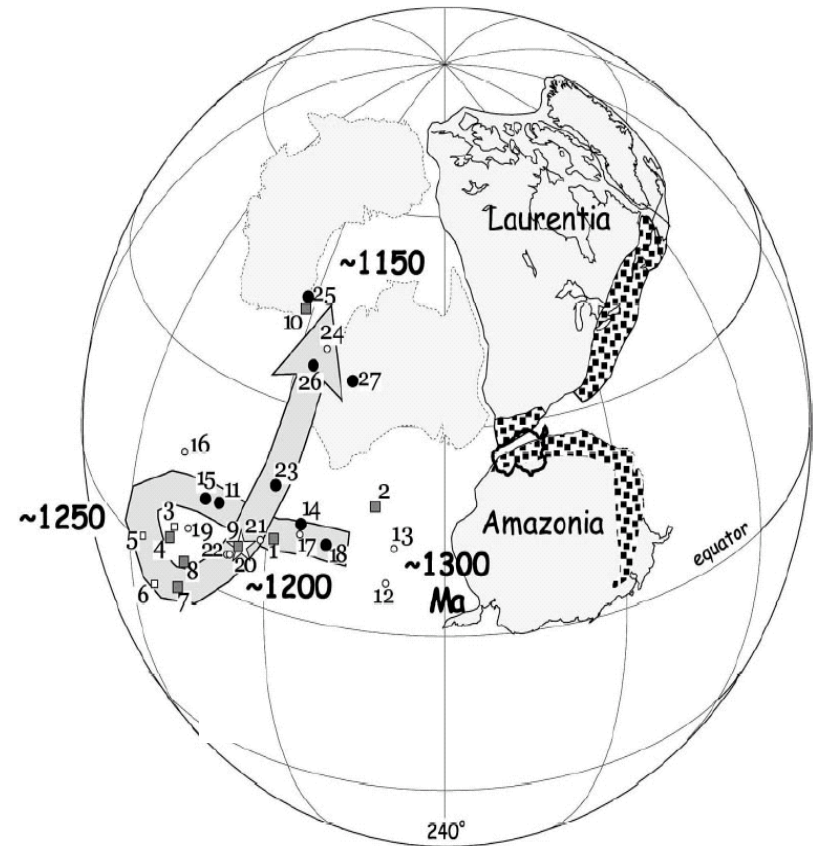
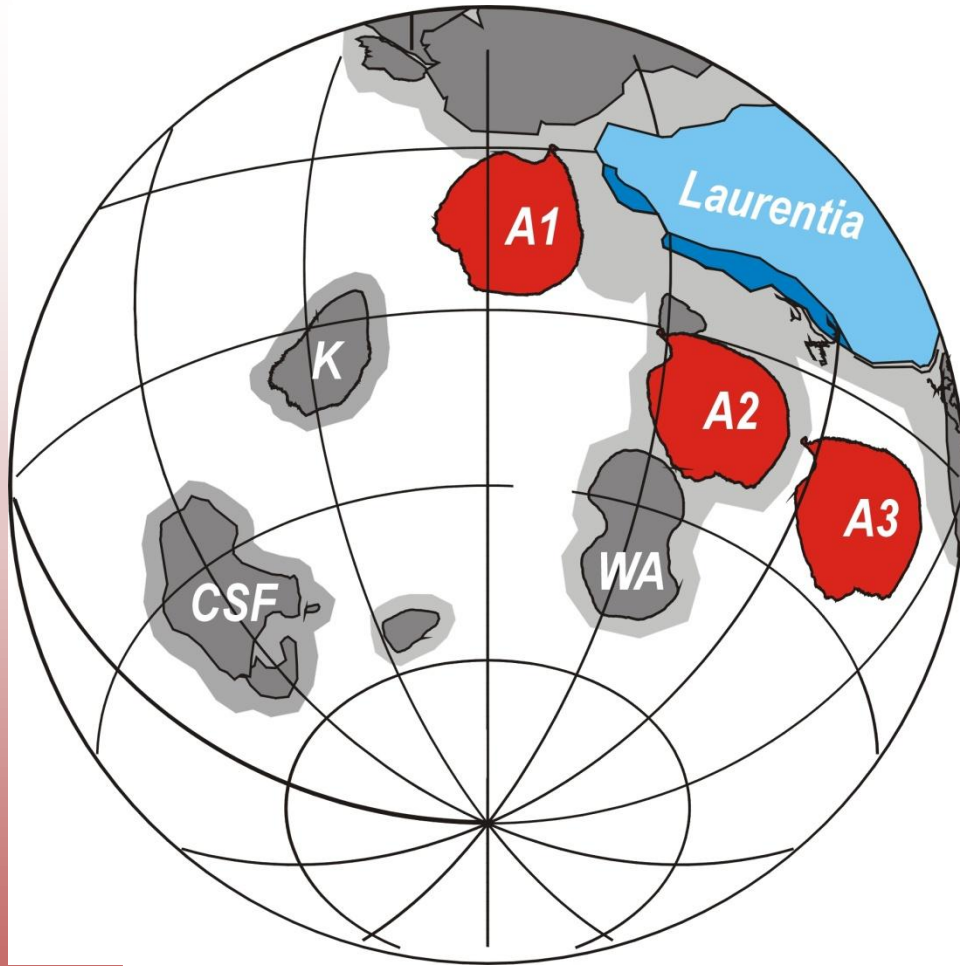
Modified from
Dalziel, Mosher, & Gahagan
2000

Hoffman (1990) propôs um supercontinente que se formou em ~1000 Ma atrás.

Este supercontinente foi chamado de Rodinia.

Nos últimos 16 anos, várias reconstruções do Rodinia têm sido propostas, sem se chegar ainda a uma definição sobre a sua paleogeografia.

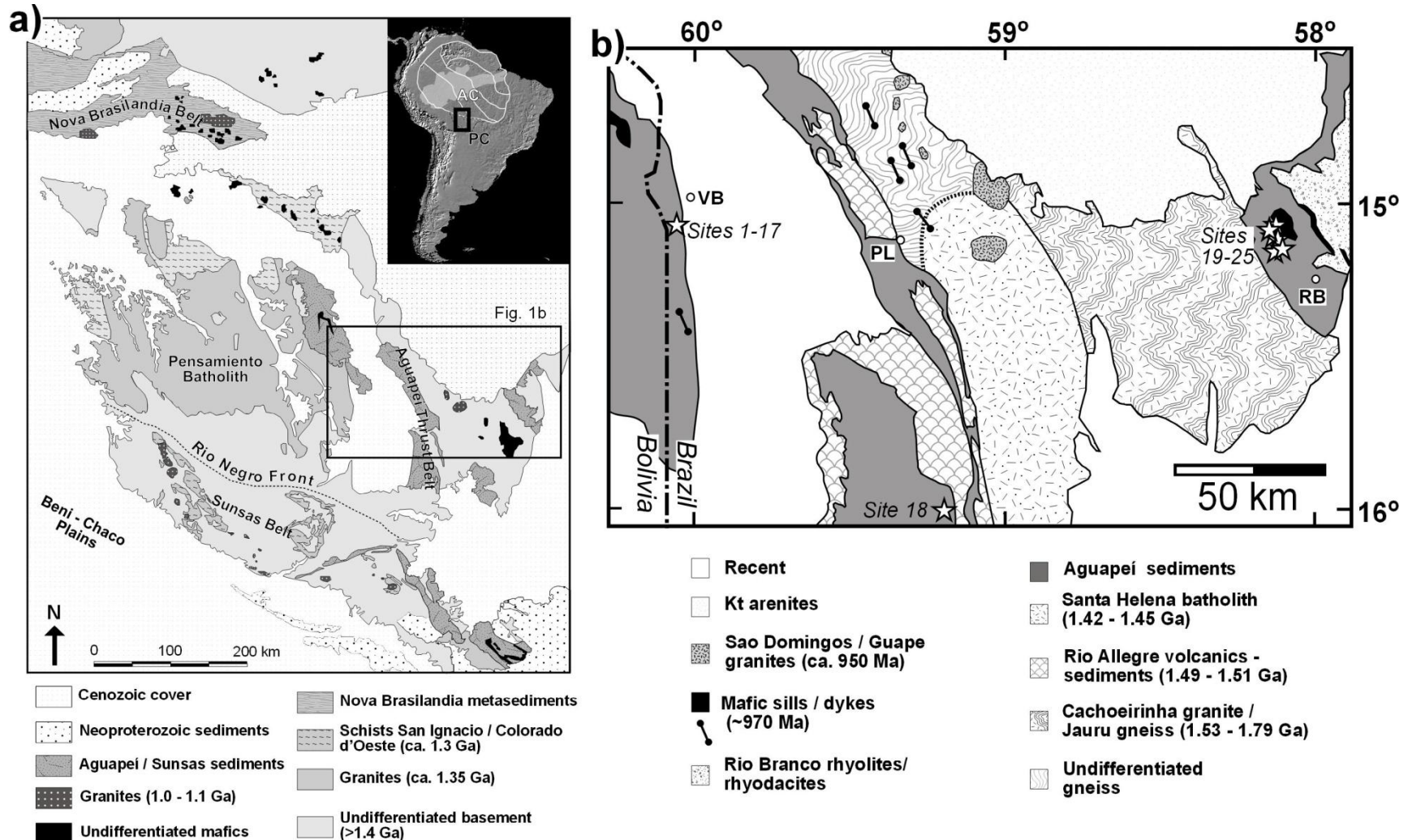
Craton Amazônico



Tohver et al., 2002
Sills Nova Floresta

Movimentos Transcorrentes entre o
Cráton Amazônico e a Laurentia.
Tohver et al., 2004.

Estudo paleomagnético do Grupo Aguapeí – 1.150 Ma



As estrelas indicam os locais estudados, representados por níveis horizontais do sedimento.

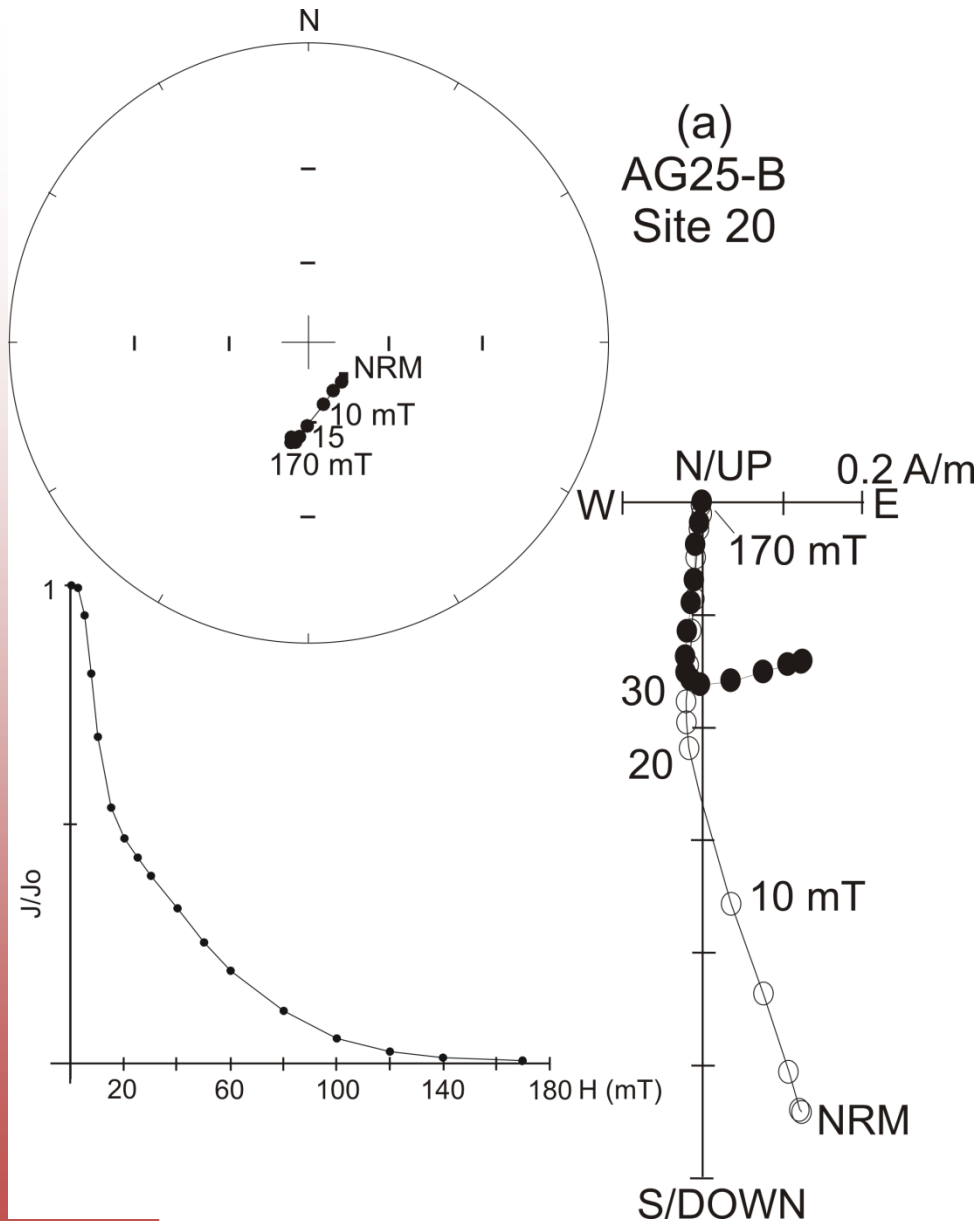
Afloramento estudado



Afloramento de sedimento (arenitos) do Grupo Aguapeí. Vários níveis do sedimento foram amostrados neste afloramento.

Observe os furos de amostras cilíndricas (2,5 cm de diâmetro) extraídas de um dos níveis, na foto acima.

Desmagnetização por campo alternado



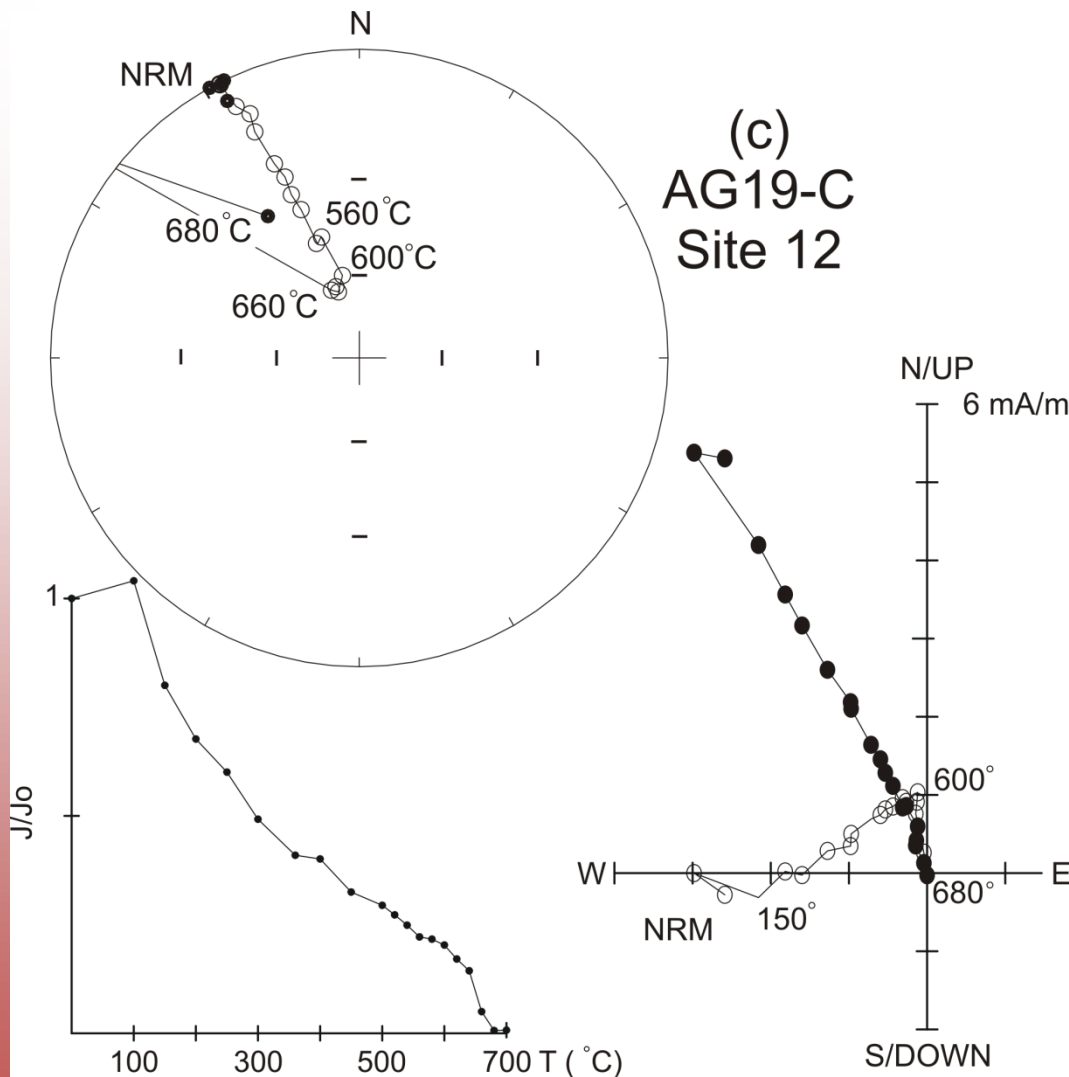
Exemplo de desmagnetização da amostra sedimentar AG25-B que apresentou direção reversa portada por magnetita.

Note que após a desmagnetização à 30 mT, uma única componente é definida, a qual caminha para o centro do sistema de referência na projeção ortogonal – símbolos cheios (vazios) indicam projeção horizontal (vertical).

Na projeção estereográfica, os pontos se acumulam em uma única posição após 30 mT (end point), indicando também uma única componente (símbolos cheios representam inclinações positivas).

A curva de intensidade relativa (J/J_0) em função do campo alternado também é mostrada (figura debaixo à esquerda)

Desmagnetização Térmica



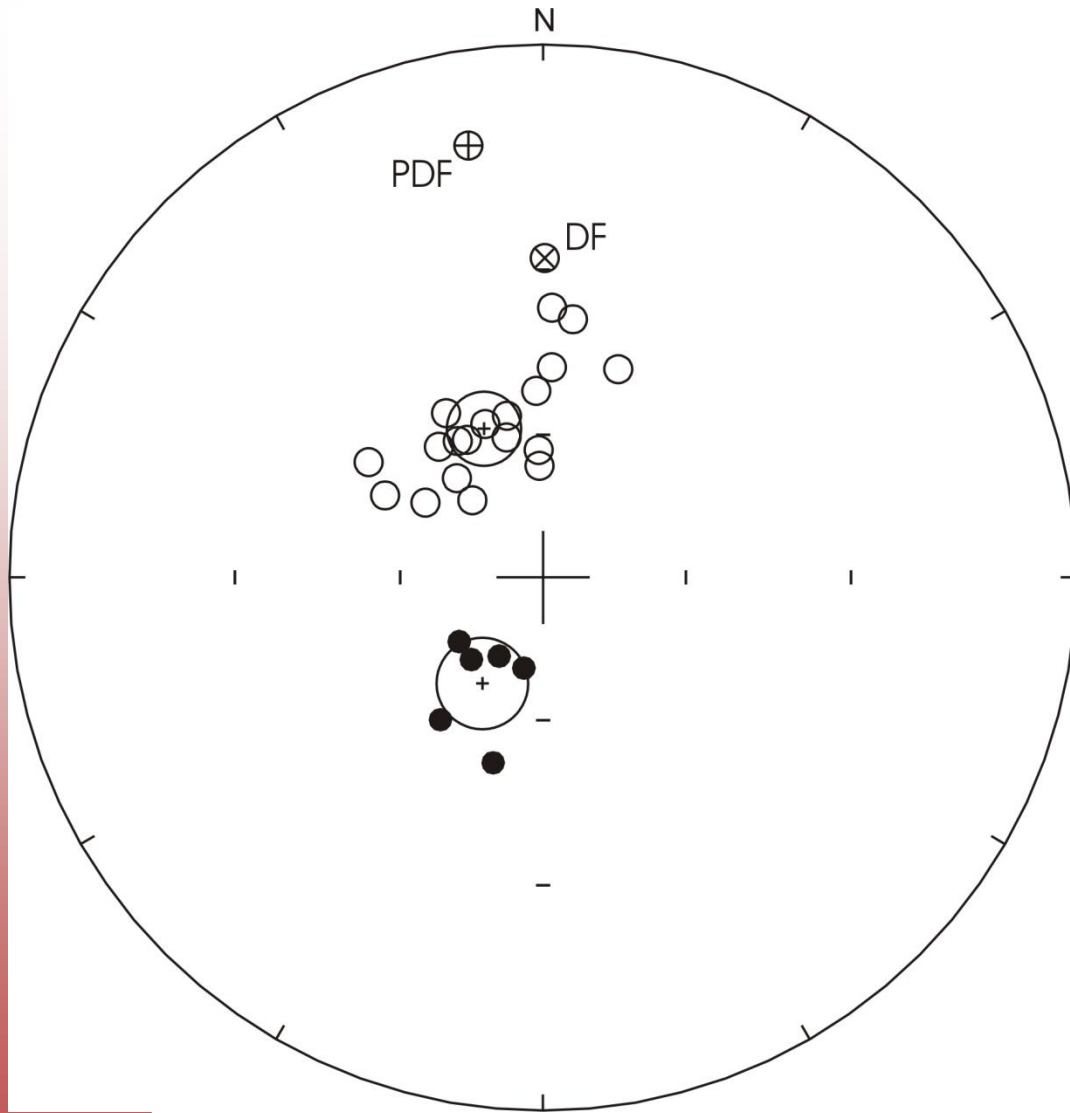
Exemplo de desmagnetização da amostra sedimentar AG19-C que apresentou direção normal portada por hematita ($T_c = 675 \text{ }^\circ\text{C}$).

Note que somente após a desmagnetização à 600°C , uma única componente é definida, a qual caminha para o centro do sistema de referência na projeção ortogonal – símbolos cheios (vazios) indicam projeção horizontal (vertical).

Na projeção estereográfica, os pontos se acumulam em uma única posição após 600°C (end point), indicando também uma única componente (símbolos vazios representam inclinações negativas).

A curva de intensidade relativa (J/J_0) em função da temperatura também é mostrada (figura debaixo à esquerda)

Direções médias por sítio



Após os processos de desmagnetização e separação das componentes de magnetização, foram feitas médias para cada sítio amostrado, através da estatística de Fisher.

Estas direções médias são mostradas na rede estereográfica da figura ao lado.

PDF e DF são as localizações das direções do campo geomagnético atual e do campo dipolar, respectivamente.

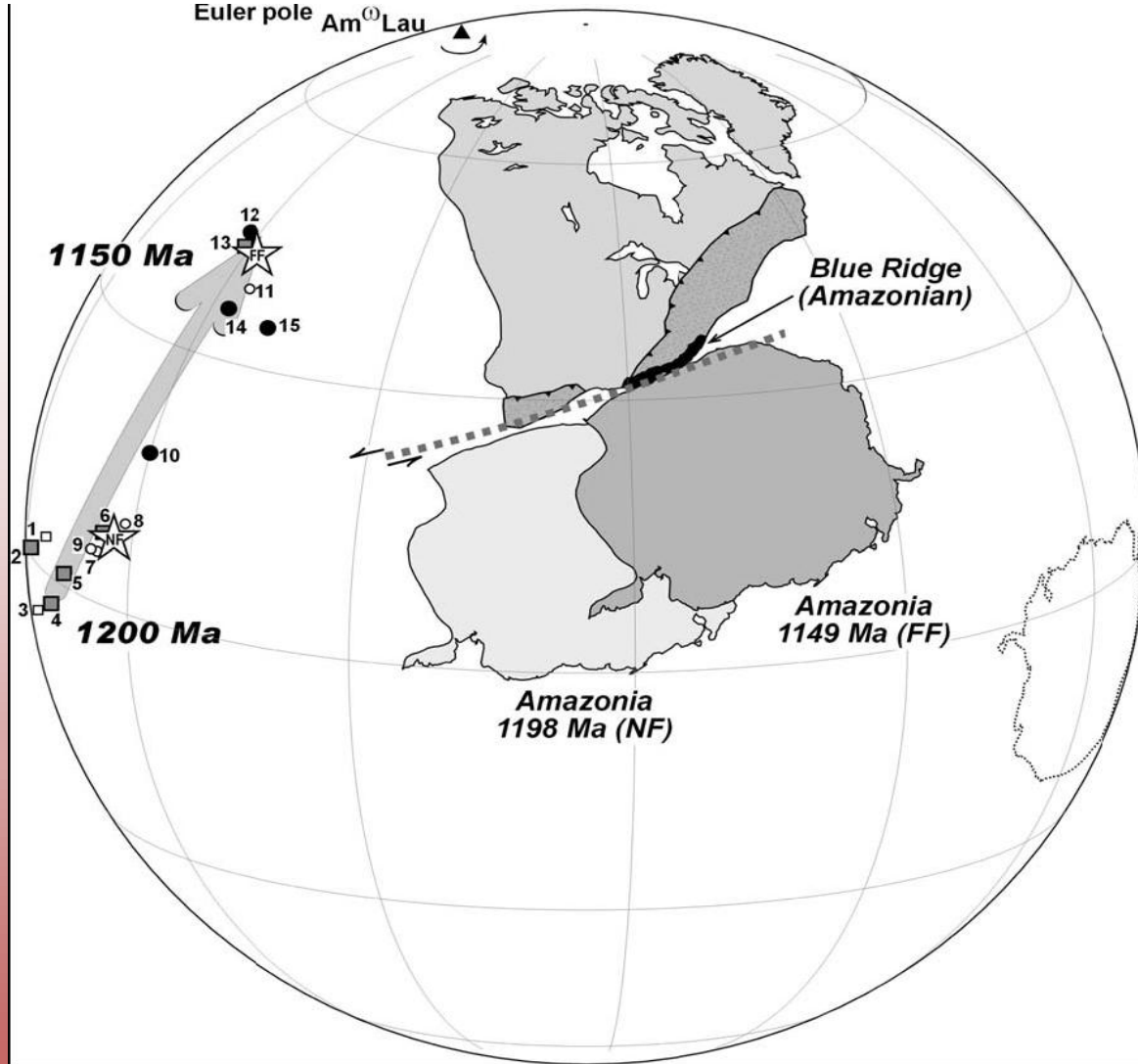
Pólos paleomagnéticos

- Com as direções médias pode-se determinar o pólo paleomagnético que será utilizado nas reconstruções paleogeográficas:
- Para estes sedimentos foram determinados dois pólos; um para as direções normais e outro para as direções reversas:
- Direções normais: **Plat = 59.8°N, Plon = 155.9°E, $\alpha_{95}=9.5^\circ$, K=14, 18 sítios**
- Direções reversas: **Plat = 49.5°N, Plon = 89.3°E, $\alpha_{95} = 12.5^\circ$, K=30, 6 sítios**

Idade do pólo

- No caso de sedimentos é difícil obter-se a idade da magnetização.
- Entretanto, existe uma nova técnica de datação (U-Pb) em intercrescimento de xenotima (YPO_4 – Fosfato de ítrio) em zircões detríticos durante a diagênese.
- Este método forneceu uma idade de 1.150 Ma para a diagênese e, em consequência, para a idade da hematita formada na mesma época. Assim, esta é a idade do pólo representado pelas direções normais.

Rodinina



Reconstrução paleogeográfica do craton Amazônico em relação à Laurentia para as épocas de 1200 Ma (C. Amazônico em cinza claro) e 1150 Ma (C. Amazônico em cinza escuro).

Sugere-se que o Craton Amazônico, após uma colisão inicial oblíqua com a Laurentia, em 1200 Ma, teve um movimento transcorrente até a posição de 1150 Ma.

Figura publicada na revista *Earth and Planetary Science Letters* (v. 267, p. 188-199, 2008), pelo grupo de paleomagnetismo.

Modelo de colisão oblíqua



1200 Ma – Nova Floresta pole;

1150 Ma – Fortuna Formation;

1040 Ma – Huanchaca sills;

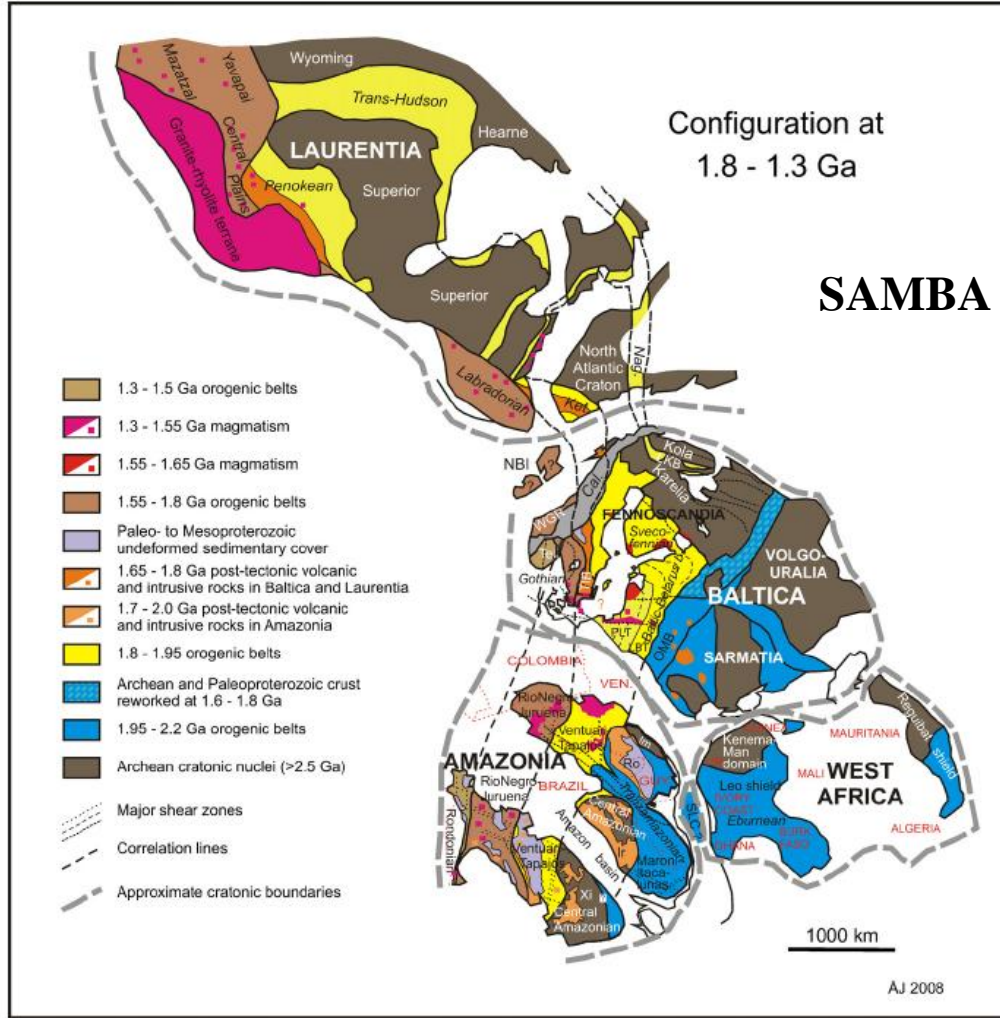
1000 Ma (Li et al., 2008)

SUPERCONTINENTE COLUMBIA (NUNA)

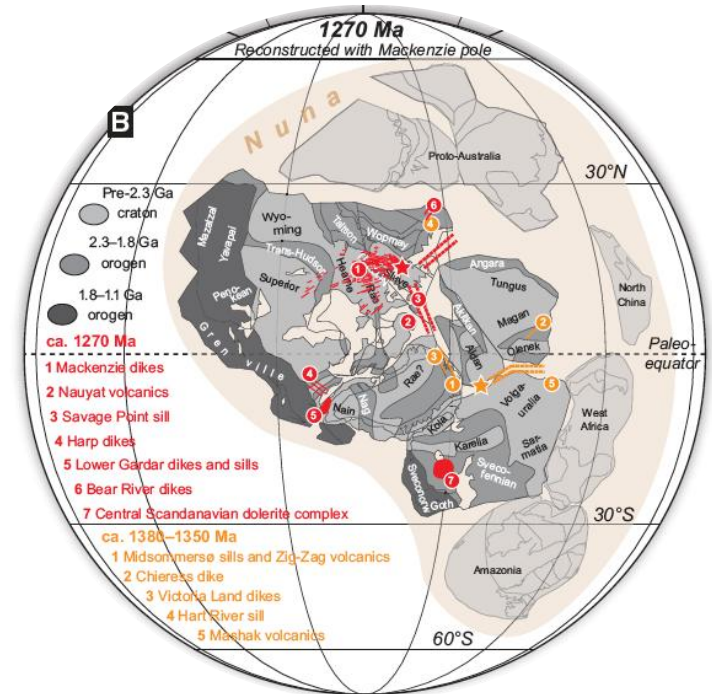
Johansson 2009, Prec. Res.

222

Å. Johansson / Precambrian Research 175 (2009) 221–234



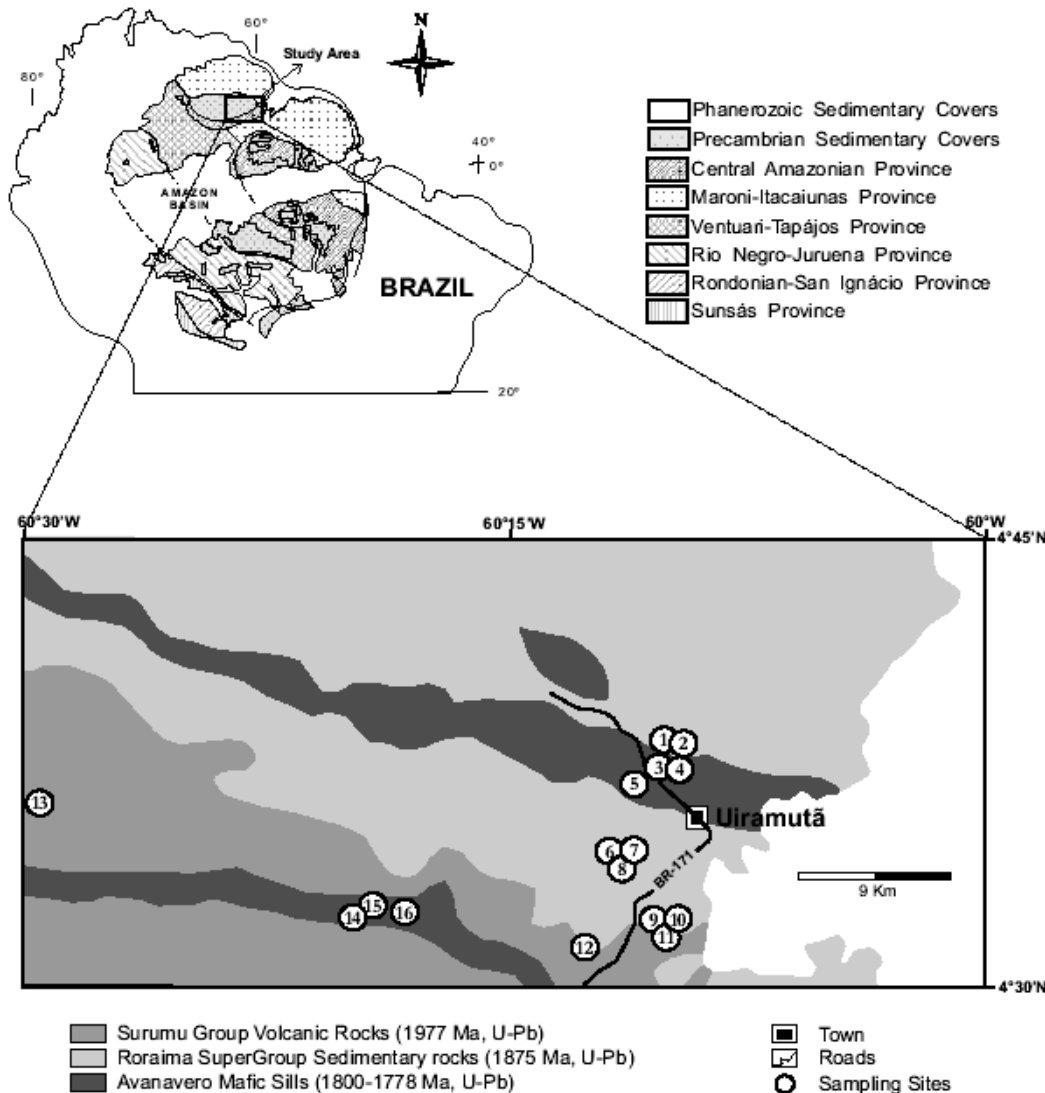
Evans and Mitchell 2011, Geology



Com base em dados Paleomagnéticos

Com base em dados geológicos

Supercontinente Columbia

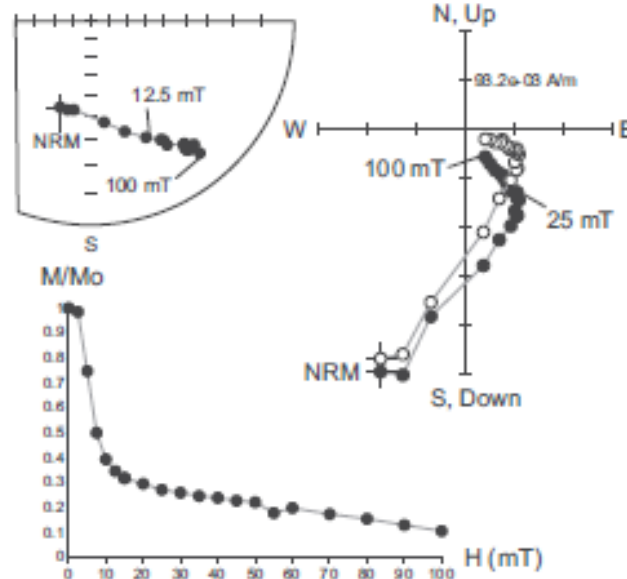


Sills máficos
pertencentes ao
evento Avanavero.

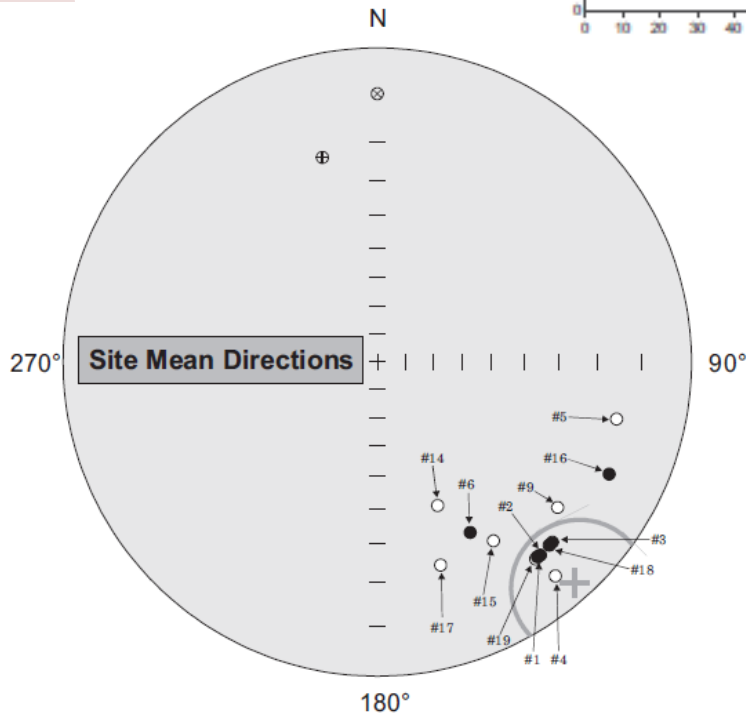
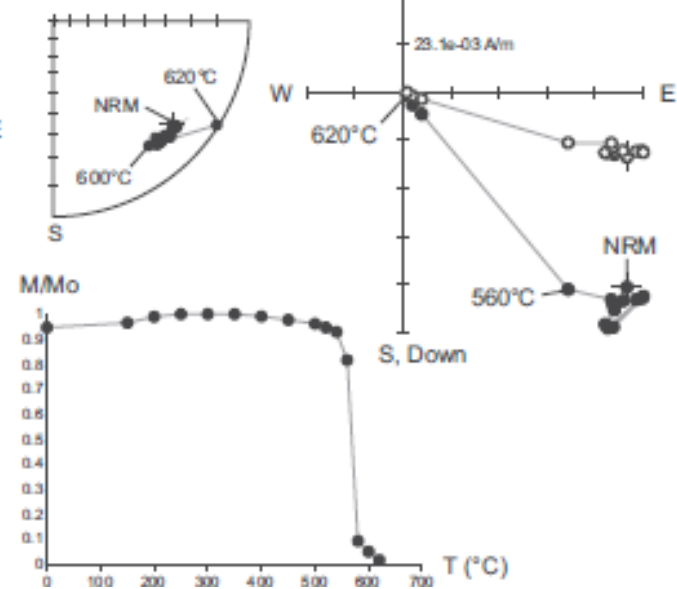
1780 Ma

Avanavero

a) FR1-C3 (Site 1)



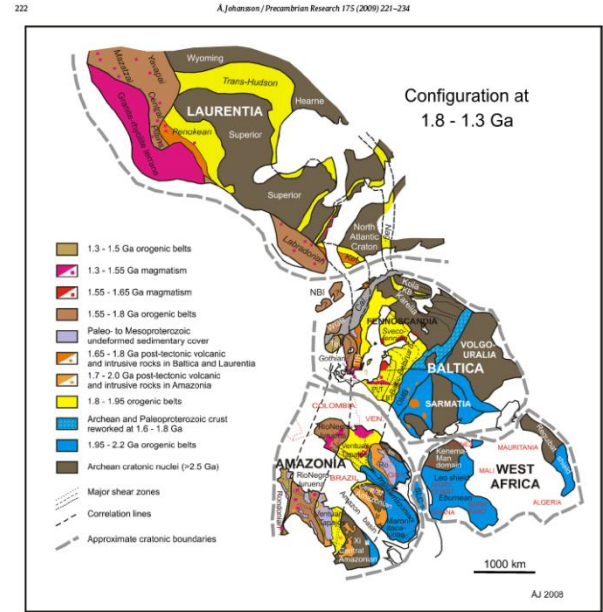
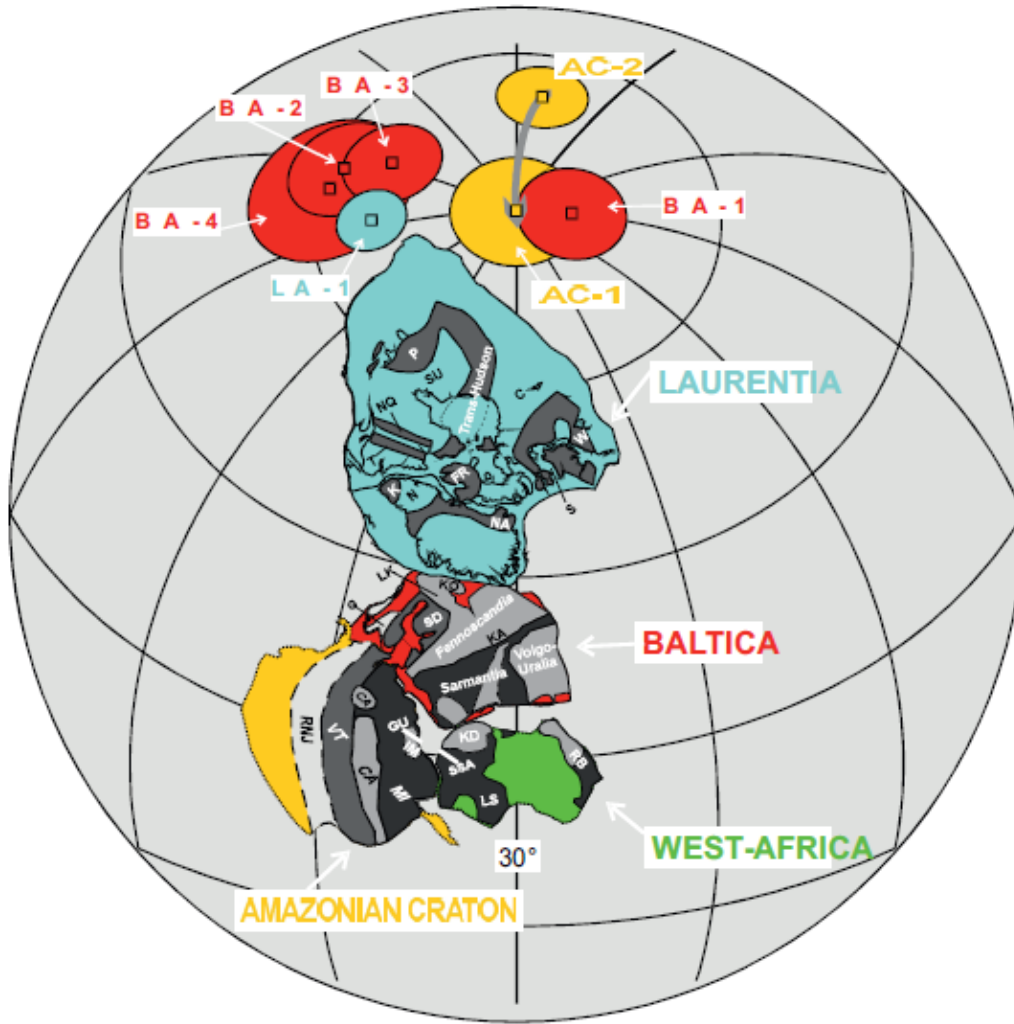
b) FR3-D2 (Site 3)



$$D_m = 138.2^\circ, I_m = -3.4^\circ (N = 13, \alpha_{95} = 13.0^\circ)$$

$$(AV \text{ pole}) \text{ at } 27.9^\circ E, 48.4^\circ S (A_{95} = 9.6^\circ)$$

Supercontinente Columbia



Reconstrução
 Amazônia-Baltica.
 SAMBA
 Johansson (2009).

Bispo-Santos et al., (2014)
 Precambrian Research 244, 139-155.



FIM