

Em 1822, durante uma aula experimental, o professor de física dinamarquês Hans Christian Oersted descobriu que uma corrente elétrica passando por um fio deslocava a agulha de uma bússola que estava por perto. Essa foi uma das mais importantes descobertas da eletricidade, possibilitando, a seguir, a construção de motores e geradores que fazem parte essencial da vida moderna.

CAMPO MAGNÉTICO

Assim como uma barra de plástico carregada produz um campo elétrico \mathbf{E} em todos os pontos do espaço ao seu redor, um ímã produz um campo magnético \mathbf{B} em todos os pontos ao seu redor.

Uma bobina é um tipo familiar de ímã produzido a partir do enrolamento de um fio ao redor de um núcleo de ferro. Uma corrente é enviada através da bobina, e determina a intensidade do campo magnético. Tais cargas são chamadas de fato, de monopólos magnéticos, porém sua existência nunca foi confirmada.

Comparativamente ao estudo das cargas elétricas, espera-se que uma carga magnética crie um campo magnético ao seu redor capaz de afetar outras cargas magnéticas. Porém, como são criados os campos magnéticos ?

1 -) Partículas carregadas eletricamente em movimento \rightarrow corrente em um fio criam campos magnéticos.

2 -) Partículas elementares tais como o elétron possuem um campo magnético intrínseco ao seu redor.

Quando uma partícula carregada se move através de um campo magnético, uma força devida ao campo pode atuar sobre a partícula

Definição de \mathbf{B}

Determinamos o campo elétrico \mathbf{E} em um ponto colocando uma partícula teste de carga q em repouso neste ponto e medimos a força elétrica que atua sobre a partícula. Assim, definimos $\mathbf{E} = \mathbf{F} / q$.

Se houvesse um monopólo magnético poderíamos definir \mathbf{B} da mesma maneira. Como não temos, vamos defini-lo de outra forma, em termos da força magnética exercida sobre uma partícula teste eletricamente carregada de carga q em movimento com uma velocidade \mathbf{v} .

Suponha que uma partícula carregada q seja disparada em várias direções num ponto no qual \mathbf{B} deve ser definido.

A força \mathbf{F} é proporcional à q , a \mathbf{v} , e é perpendicular ao campo magnético \mathbf{B} e à velocidade \mathbf{v} . \mathbf{F} é proporcional a $\sin \theta$.

- é nula se a carga é zero ou se a partícula estiver estacionária, ou ainda, se \mathbf{v} e \mathbf{B} forem paralelos ($\phi = 0^\circ$) ou antiparalelos ($\phi = 180^\circ$);
- atingirá um máximo quando \mathbf{v} e \mathbf{B} forem perpendiculares um ao outro.

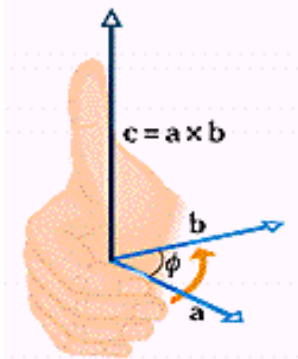
CAMPO MAGNÉTICO

Podemos resumir esses resultados na equação vetorial

$$\vec{F}_B = q \vec{v} \times \vec{B}; \quad F_B = |q| v B \sin \phi.$$

Sabemos que o produto vetorial $\vec{v} \times \vec{B}$ é um vetor perpendicular aos dois vetores, \vec{v} e \vec{B} , que pode ser obtido através da regra da mão direita. Logo, além da magnitude da força, é possível conhecer a direção e o sentido da força, usando corretamente a regra da mão-direita.

A direção do vetor \vec{c} obtido através do produto vetorial é sempre perpendicular ao plano formado pelos vetores \vec{a} e \vec{b} e seu **sentido é dado pela regra da mão direita**. Nesta regra deve-se apontar os dedos da mão direita na direção de \vec{a} e curvar na direção do vetor \vec{b} **pelo menor ângulo possível entre eles**. Mantendo o polegar estendido; **o polegar apontará no sentido do produto vetorial** $\vec{a} \times \vec{b}$.



A regra da mão direita diz que o dedo polegar da mão direita aponta na direção $\vec{v} \times \vec{B}$ quando os outros dedos giram \vec{v} fazendo-o coincidir com \vec{B} .

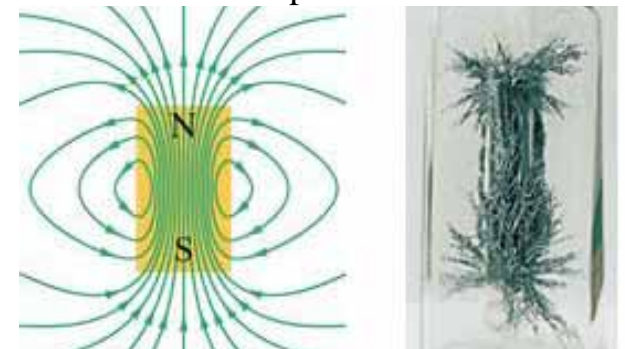
\vec{F}_B nunca possui uma componente paralela a \vec{v} , por isso nunca consegue alterar a velocidade escalar da partícula, mas pode alterar a direção de \vec{v} , podendo com isto, acelerar a partícula. Unidades no SI:

$$1 \text{ tesla} = 1 \text{ T} = 1 \frac{\text{newton}}{(\text{coulomb})(\text{meter / second})} = 1 \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}.$$

Uma unidade mais antiga ainda em uso: $1 \text{ tesla} = 10^4 \text{ gauss}$.

Linhas de campo magnético

Podemos representar campos magnéticos com linhas de campo. (1) A direção da tangente a uma linha de campo magnético em qualquer ponto fornece a direção de \vec{B} nesse ponto; (2) o espaçamento entre as linhas representa a intensidade do campo.



Pólos magnéticos iguais se repelem, e contrários se atraem.

As linhas de campo entram por uma extremidade do imã (pólo sul) e saem pela outra extremidade (pólo norte).

CAMPO MAGNÉTICO

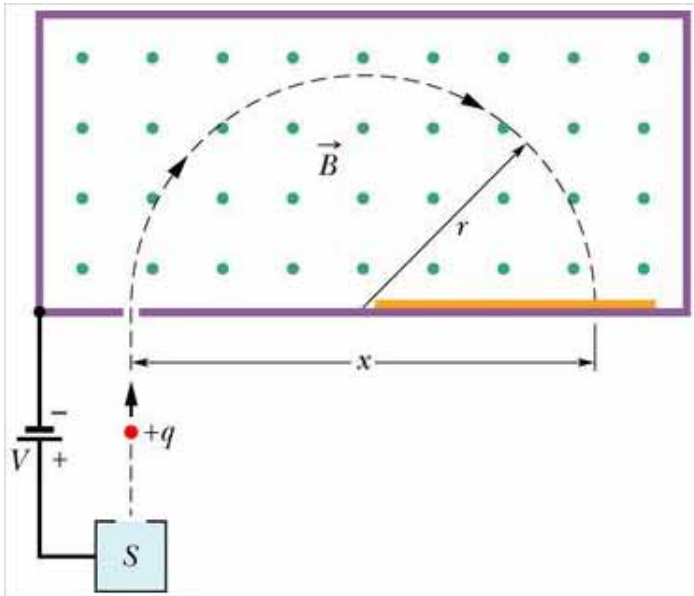
Partícula carregada descrevendo círculo

Uma partícula carregada com massa m e carga q se movendo com velocidade v perpendicular a um campo magnético uniforme B desenvolve uma trajetória circular. Aplicando a segunda lei de Newton ao movimento circular tem-se,

$$F = m \frac{v^2}{r}, \quad qvB = \frac{mv^2}{r}.$$

Podemos determinar o raio do círculo: $r = \frac{mv}{qB}$

Uma aplicação importante: o espectômetro de massa



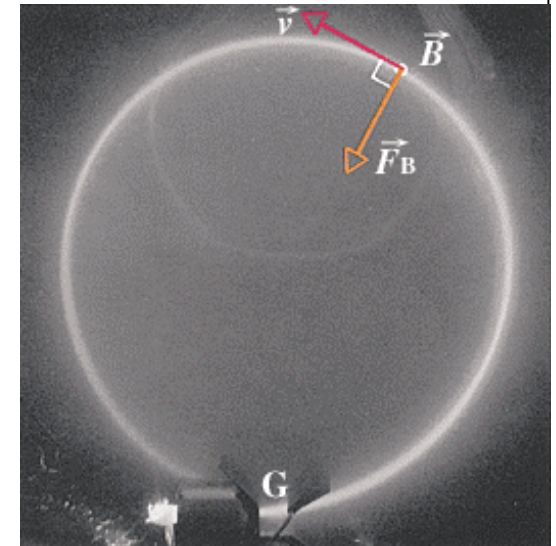
A frequência de revolução f , a frequência angular e o período T são dados por

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}.$$

A figura abaixo mostra um feixe de elétrons projetado para dentro de uma câmara por uma pistola de elétrons G .

Os elétrons entram no plano da tela com velocidade escalar v e depois se deslocam em uma região de campo magnético B , dirigido para fora deste plano. Uma força magnética deflete continuamente os elétrons, fazendo-os seguir uma trajetória circular.

A trajetória dos elétrons é o círculo reluzente, e é visível porque os átomos de gás na câmara emitem luz quando alguns dos elétrons circulando colidem com eles.



CAMPO MAGNÉTICO

Força magnética sobre um fio conduzindo corrente

Um campo magnético exerce uma força lateral sobre elétrons que se movem em um fio. Esta força deve ser transmitida ao próprio fio, pois os elétrons de condução não conseguem escapar para fora do fio. Esta força é

$$F_B = |q| v B \sin \phi,$$

Supondo que existam N elétrons no segmento L do fio (seção reta A), tem-se que a densidade eletrônica será

$$n = N / LA$$

Sabemos que $J = nev$, logo, $J = \frac{i}{A} \Rightarrow v = \frac{iL}{Ne}$

A partir desses resultados, a força sobre um elétron resulta

$$F = \frac{iL}{N} B$$

e a força sobre o segmento de fio é dada por

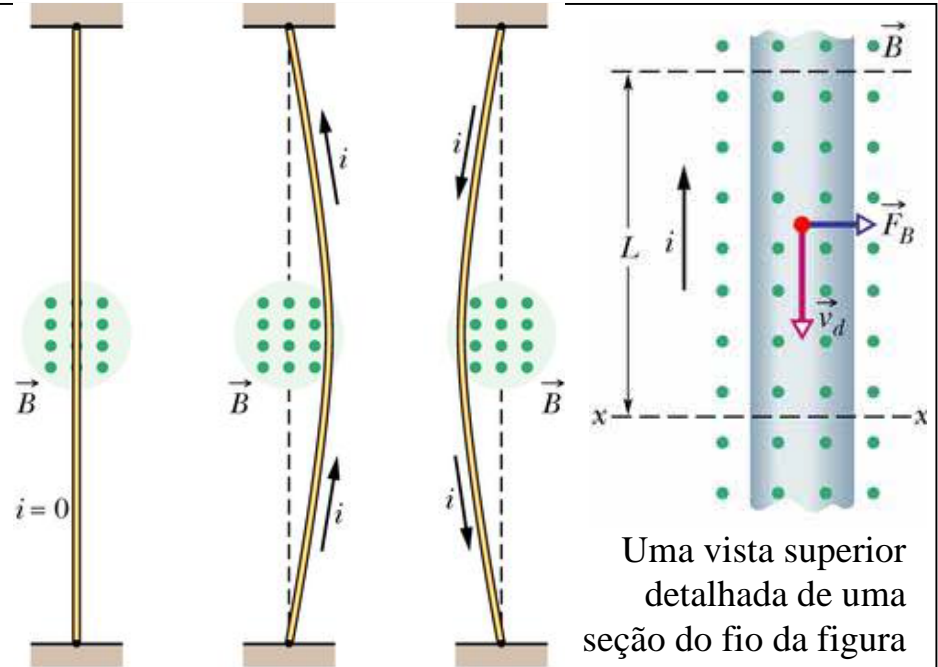
$$F_{\text{fio}} = N F_{\text{elétron}} = iLB$$

A expressão geral é dada por $\vec{F} = i \vec{L} \times \vec{B}$

No limite diferencial podemos escrever

$$d\vec{F}_B = i d\vec{L} \times \vec{B},$$

L é um vetor comprimento que possui intensidade L e aponta no sentido da corrente.



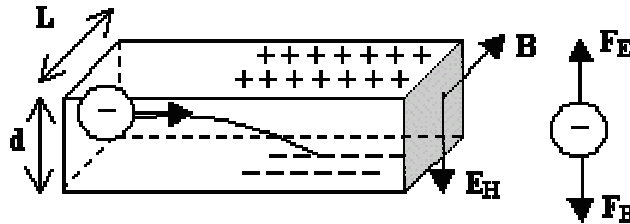
Um fio flexível passa entre as faces dos pólos de um ímã. Sem corrente no fio, o fio permanece reto. Por outro lado, com uma corrente para cima, o fio é defletido para a direita. Com uma corrente para baixo, a deflexão é para a esquerda.

Uma vista superior detalhada de uma seção do fio da figura ao lado. O sentido da corrente é para cima, o que significa que os elétrons são arrastados para baixo. Um campo magnético que emerge do plano da página faz com que os elétrons e o fio sejam defletidos para a direita.

EFEITO HALL

Um feixe de elétrons no vácuo pode ser defletido por um campo magnético. Em 1879, Edwin H. Hall descobriu que, os elétrons de condução à deriva num fio condutor também podem ser defletidos por um campo magnético. Este fenômeno ficou conhecido como efeito Hall, e nos permite descobrir se os portadores de carga de um condutor estão positiva ou negativamente carregados, além de nos fornecer o número de tais portadores por unidade de volume.

O efeito Hall é extremamente útil na indústria microeletrônica. A figura abaixo esquematiza o arranjo experimental para o estudo do efeito Hall. Considere uma fita condutora com seção reta $A (= L \cdot d)$ através da qual circula um feixe de elétrons com velocidade v .



Aplicando-se um campo magnético na direção horizontal, conforme indicado na figura acima, surge uma força magnética na direção perpendicular ao movimento eletrônico, no sentido de cima para baixo. Esta força faz com que o movimento dos elétrons seja desviado para baixo.

Com o tempo, cargas negativas acumulam-se na face inferior, e cargas positivas na face superior. O excesso de cargas positivas e negativas, funciona como um capacitor de placas paralelas, com um campo elétrico conhecido como campo Hall.

Quando a força Hall equilibra a força magnética, temos

$$eE = ev_d B.$$

Usando a equação $J = nqv$, e a definição da densidade de corrente, $J = i/A$, obtém-se $E_H = iB/nqA$.

Por outro lado, $E_H = V_H / d$. Resulta daí que ($A = Ld$)

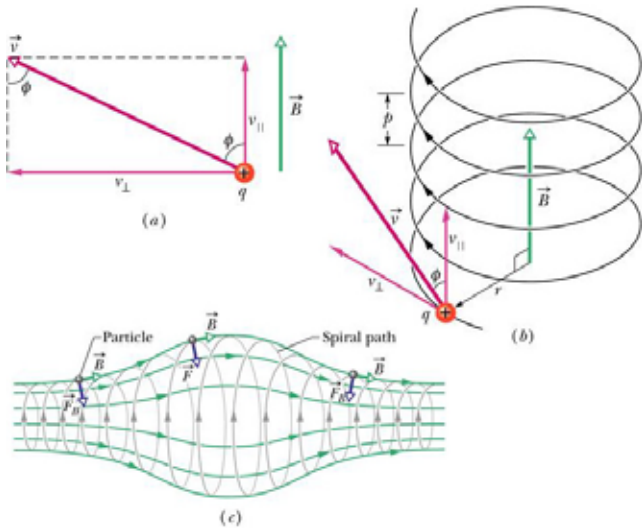
$$n = \frac{Bi}{V_H L e}, \quad (1)$$

O efeito Hall permite a obtenção de dois resultados importantes. Primeiramente, é possível determinar o sinal da carga dos portadores, bastando medir a diferença de potencial entre as superfícies superior e inferior. Em segundo lugar, a eq. (1) fornece o valor da densidade de portadores.

Esses dois resultados são de extrema importância na indústria eletrônica, pois permite a fabricação de dispositivos que dependem do tipo (elétrons ou lacunas) e da quantidade de portadores.

MOVIMENTO DE PARTÍCULAS CARREGADAS EM CAMPOS MAGNÉTICOS

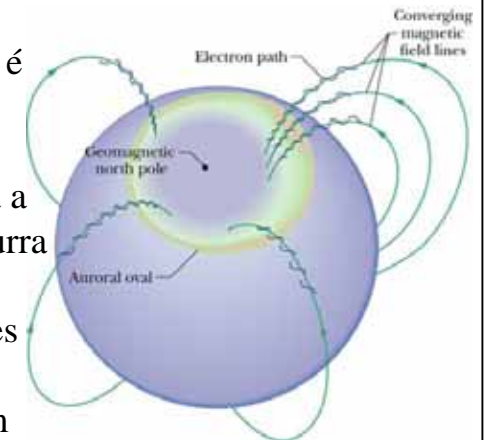
Trajétorias Helicoidais - Suponha que uma partícula carregada entre num campo magnético uniforme com uma velocidade que não é perpendicular a \mathbf{B} . A Fig. (a) mostra o vetor velocidade de uma partícula decomposto em duas componentes, uma paralela à \mathbf{B} e outra perpendicular à \mathbf{B} . A componente paralela determina o passo p da hélice. A componente perpendicular determina o raio da hélice, Fig. (b).



A Fig. (c) mostra uma partícula carregada movendo-se em espiral em um campo magnético não-uniforme. As linhas de campo com menor espaçamento nos lados direito

e esquerdo indicam que o campo magnético é mais intenso nessas regiões. A partícula pode ficar confinada, movendo-se em espiral de um lado para outro entre as regiões de campo forte, em ambas as extremidades.

Garrafa magnética - quando uma partícula carregada se move entre os extremos do campo magnético mostrado na figura (c), que é intenso nas extremidades e fraco na região central, a partícula fica confinada e se move para frente e para trás, espiralando em torno das linhas de campo. Fenômeno semelhante é o da oscilação de íons entre o pólo norte e pólo sul da Terra, nos cinturões de Van Allen. Elétrons e prótons estão desta maneira aprisionados pelo campo magnético terrestre; as partículas aprisionadas formam os cinturões de Van Allen, que se deslocam em laços bem acima da atmosfera terrestre entre os pólos geomagnéticos da norte e sul da Terra. Quando uma grande erupção solar lança prótons e elétrons adicionais de alta energia para dentro dos cinturões, um campo elétrico é produzido na região onde os elétrons normalmente se refletem. Este campo elimina a reflexão e em vez disso empurra os elétrons para baixo, para dentro da atmosfera, onde eles colidem com átomos e moléculas de ar, fazendo com que esse ar emita luz.



AURORA AUSTRAL E BOREAL

A palavra 'aurora' tem, pelo menos, dois significados distintos: um é a claridade da iluminação solar indireta que precede o despontar do Sol no horizonte; o outro é o clarão com formas e cores variadas, observado no céu das regiões polares. A aurora austral refere-se ao segundo significado e representa o fenômeno observado em região próxima ao pólo Sul da Terra.

Aurora austral e aurora boreal consistem no mesmo fenômeno físico, apenas ocorrem na proximidade de pólos geográficos opostos. A Terra possui um campo magnético global. É a esse campo que as bússolas respondem. Por outro lado, o Sol emite partículas o tempo todo na forma de vento solar e mais intensamente durante as explosões solares. Ao se aproximarem da Terra, pelo fato de serem eletricamente carregadas, essas partículas se deixam aprisionar no campo magnético da Terra como que em uma 'garrafa magnética'. Partículas provenientes de explosões solares podem ser canalizadas verticalmente em ambos os pólos magnéticos. Ao colidirem com átomos de oxigênio e moléculas de nitrogênio e oxigênio da atmosfera terrestre entre 100 km e 1.000 km de altitude, esses átomos e moléculas podem ser energizados. Mas, em seguida, eles se desfazem da energia adicional emitindo luz, fazendo as



auroras aparentarem cortinas de várias cores e tons, agitadas pelo vento. A ocorrência de auroras aumenta a cada 11 anos quando o Sol fica mais ativo, isto é, com mais manchas na sua superfície.

As auroras também geram ondas de rádio que podem ser detectadas. Ocorrem também em outros planetas do Sistema Solar que tenham campo magnético.

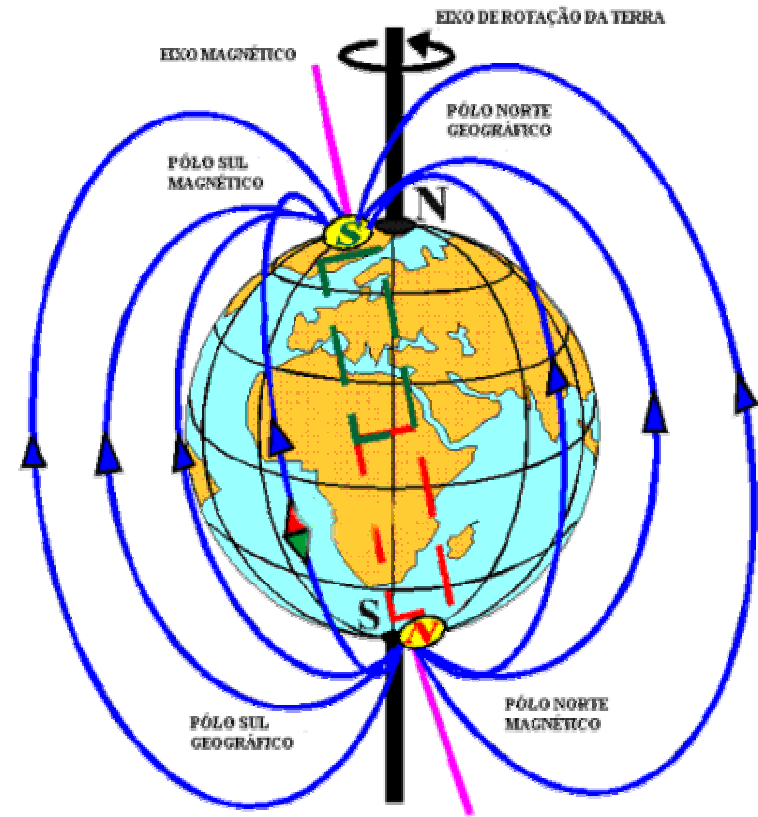
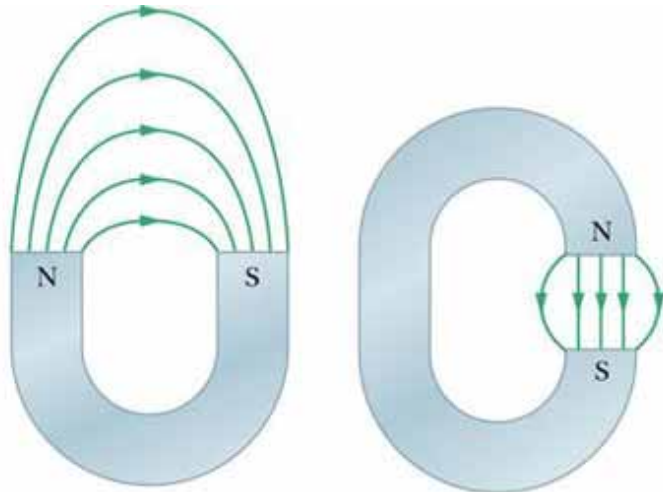
As miragens de deserto consistem em fenômeno distinto das auroras. Quando há uma variação sensível da temperatura entre duas camadas de ar, estas atuam como uma superfície refletora da luz ou espelho que produz uma imagem invertida da paisagem. Quanto à influência da localização geográfica sobre o fenômeno, as auroras são observadas nas regiões polares porque os pólos magnéticos se encontram perto dos pólos geográficos.

O MAGNETISMO DA TERRA

A Terra pode ser considerada um ímã gigantesco. O magnetismo terrestre é atribuído a enormes correntes elétricas que circulam no núcleo do planeta, constituído de ferro e níquel no estado líquido, devido às altas temperaturas.

Podemos detectar o campo magnético da Terra com uma bússola, que é uma barra fina imantada apoiada sobre um pivô com atrito reduzido.

Por convenção, chamamos de *pólo norte da agulha de uma bússola*, aquele que aponta para o *pólo norte geográfico*. Entretanto, como sabemos, pólos de mesmo nome se repelem e de nomes contrários se atraem. Então podemos concluir que:



- 1 -) se a agulha aponta para o *pólo norte geográfico*, então nessa região existe um *pólo sul magnético*;
- 2 -) se a agulha aponta para o *pólo sul geográfico*, então nessa região existe um *pólo norte magnético*.