

O Observatório Geomagnético Português, localizado em Coimbra, iniciou a sua atividade em 1866, possuindo atualmente séries de dados correspondentes a medições realizadas ao longo de 150 anos. Atualmente os modelos geomagnéticos e os mapas mundiais correspondentes aos vários parâmetros que caracterizam o campo magnético da Terra são atualizados de cinco em cinco anos, tendo sido realizada a última atualização em 2015.

## O campo magnético da Terra

A Figura 1 mostra o mapa da intensidade do campo magnético da Terra relativo a 2015, feito por instituições dos Estados Unidos da América e do Reino Unido [1].

Analisando o mapa referido, verificamos que a intensidade do campo não é uniforme. Na realidade, as linhas de campo são aproximadamente idênticas às originadas por uma barra magnética tendo numa extremidade o polo norte e na outra extremidade o polo sul. O campo magnético da Terra corresponde, em cerca de 90 %, ao campo magnético gerado por um dipolo magnético localizado no centro da Terra e tendo uma inclinação de cerca de  $11,5^\circ$  em relação ao seu eixo de rotação. A variação de um campo deste tipo pode ser definida através da variação do momento do dipolo magnético e da localização dos polos magnéticos. A Figura 2 mostra os valores do momento do dipolo geomagnético obtidos num intervalo de 180 anos [2].

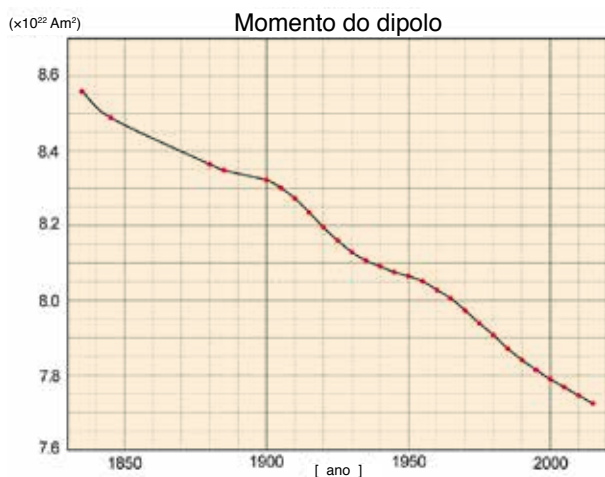


Fig. 2 – Variação do momento do dipolo magnético num intervalo de 180 anos. (wdc.kugi.kyoto)

Como podemos ver, os valores têm vindo a diminuir, facto que traduz uma diminuição da intensidade do campo.

A alteração da posição dos polos magnéticos ao longo dos anos, geralmente designada por “deriva dos polos magnéticos”, tem suscitado a atenção de

muitos cientistas. James Ross localizou o Polo Norte, pela primeira vez, em 1831, depois de uma viagem desgastante durante a qual o seu navio ficou preso no gelo durante quatro anos. Em 1904, Roald Amundsen encontrou o poste indicando o local registado em 1831, tendo verificado que o polo se havia movido, pelo menos uns 50 km, desde a medição de Ross. A trajetória traçada para os polos não possui simetria e a sua velocidade tem sofrido alterações ao longo dos anos [2]

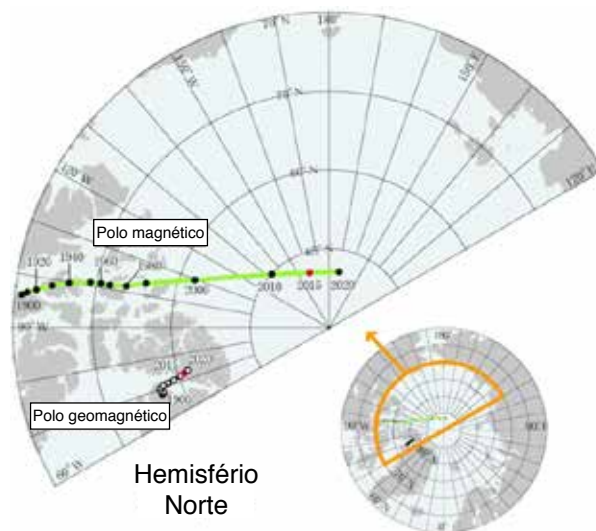


Fig. 3 – Variação da posição do polo magnético Norte nos últimos anos. (wdc.kugi.kyoto)

Desde o ano 2000 até 2015, a direção da deriva dos polos sofreu alteração súbita, tendo-se verificado um aumento da velocidade da deriva. A partir de 2013 verificou-se nova alteração na direção da deriva. Esta alteração, não prevista, do movimento do polo trouxe algumas preocupações (no início do século XXI o Polo Norte magnético parecia estar a mover-se em direção à cidade de Londres) tendo atraído a atenção de especialistas de outras áreas do conhecimento.

## Anomalias gravíticas

Chama-se anomalia gravítica à diferença entre o valor da aceleração da gravidade, observada / medida num dado local, e o valor teórico da aceleração da gravidade obtido com um modelo (valor de referência). As anomalias gravíticas aparecem devido à existência de materiais com densidades (massas volúmicas) diferentes. Anomalias positivas indicam corpos com excesso de massa (densidade elevada), em relação ao modelo.

A missão GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), tendo como objetivo estudar as variações de massa associadas a fusão e/ou movimentação de gelos nas latitudes mais elevadas do nosso planeta, com base no estudo de variações de anomalias gravíticas detetadas através de satélites, permitiu a obtenção de dados relativos a alterações de massa, em regiões relativamente extensas da superfície terrestre, incluindo locais onde não se verifica fusão de gelos. Esta alteração fez com que a localização

do centro de massa da Terra sofresse alteração e, conseqüentemente, a localização do eixo de rotação da Terra também sofreu alteração.

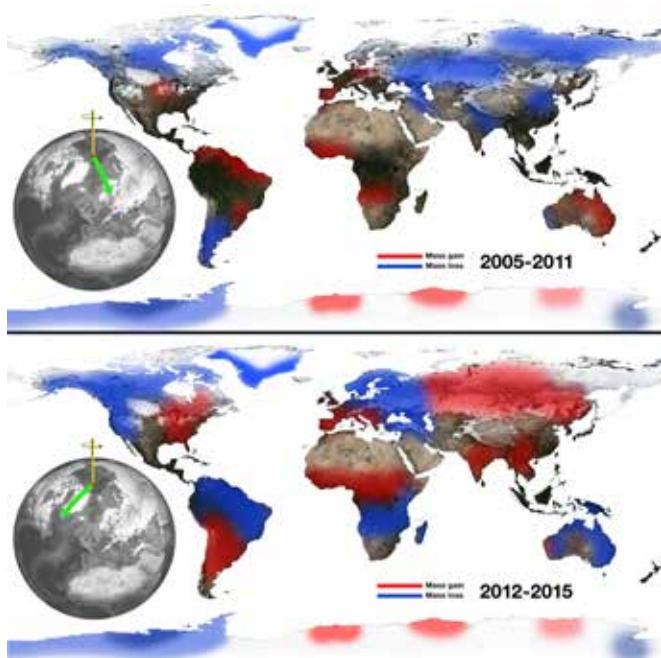


Fig. 4 – Relação entre variações de massa e inclinação do eixo de rotação da Terra. À esquerda está representada a direção e sentido do movimento do polo Norte magnético no período mencionado. (NASA/JPL-Caltech)

A Figura 4 mostra os resultados obtidos pela equipa do JPL (Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology) relativamente a variações de massa perto da superfície do planeta, obtidas com os dados referidos (missão GRACE). Podemos verificar que, para além de haver alterações em regiões como a Sibéria, o Norte do Canadá e a Antártida (associadas a fusão de gelo), se verificam também alterações importantes na América do Sul, algumas regiões de África (aumento significativo em regiões próximas do equador e diminuição significativa na parte Este do continente) e na Austrália. Na Península Ibérica o estudo mostra um aumento de massa durante todo o período em estudo.

### Relação com alteração do clima

As alterações na distribuição de massa perto da superfície do planeta podem ser originadas por processos naturais ou por atividade humana. A equipa referida anteriormente considerou que as alterações de massa se devem exclusivamente a alteração do conteúdo de água (provocado por processos naturais e/ou por atividade humana). A relação entre a inclinação do eixo da Terra e variações climáticas é um facto conhecido [3]. Trabalhos posteriores ao referido [4,5] incluem modelos estudando os efeitos (incluindo alterações de clima e variações do nível do mar) provocados pela deriva dos polos magnéticos.

### Conclusões

Este trabalho vem-nos mostrar a importância de analisar dados obtidos por métodos diferentes, de modo a podermos estudar fenómenos importantes para todos, tradicio-

nalmente estudados por especialistas de outras áreas. A concretizar-se o resultado apresentado, será possível, no futuro, obter informações sobre variações de clima no passado, através do estudo e análise da deriva dos polos magnéticos. Um outro parâmetro relacionado com este fenómeno será a alteração da espessura e do nível da superfície da água oceânica em algumas regiões do planeta, bem como os intervalos de tempo em que elas ocorreram.

### Referências

1. NOAA, "The World Magnetic Model" (<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM>)
2. K. Kyoto, "Magnetic North, geomagnetic and Magnetic Poles". <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>
3. R. Naime, "Mudanças nos eixos terrestres e clima". <https://www.ecodebate.com.br/2016/03/09>
4. S. Adhikari e E. R. Ivins, "Climate-driven polar motion: 2013-2015", *Science Advances* 12(4), e1501693 (2016).
5. S. Adhikari, E. R. Ivins e E. Larour, "ISSM-SESAW v1.0: mesh-based computation of gravitationally consistente sea-level and geodetic signatures caused by cryosphere and climate driven mass change", *Geosci. Model Dev.* 9, 1087-1109 (2016).



### Maria Rosa Alves

**Duque** é licenciada em Física pela FCUL, tendo feito o seu doutoramento em Física/Geofísica na Univ. Évora. Pertence ao corpo docente do Dep.

Física da Univ. Évora, tendo tido, no passado, papel ativo na formação de professores de Física e Química. Com o encerramento do curso referido, continuou o trabalho desenvolvido desde o início da sua atividade com alunos de cursos que não tinham a Física como disciplina nuclear. Paralelamente tem lecionado disciplinas diretamente relacionadas com a sua área de especialização (Física da Terra, Geotermia, etc.). Faz parte do grupo que iniciou, em Portugal, os trabalhos relativos à determinação do fluxo de calor de origem geotérmica. Para além de trabalhar em assuntos relacionados com o tema referido, interessa-se por temas como energia geotérmica, energias renováveis (problemas associados) e questões relacionadas com o ensino.

# Localizar epicentros à mesa

Luis Matias

Instituto Dom Luiz, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Campo Grande, Edifício C8, 1749-016 Lisboa

lmatias@fc.ul.pt

## Resumo

A Sismologia é um domínio das Ciências da Terra que se presta de forma natural à multidisciplinaridade. A localização de epicentros é um tema abordado na Geologia. Para esse efeito, são usadas ondas e é necessário conhecer a sua velocidade de propagação nos meios materiais, temas estudados em Física. Nos oceanos onde vivem mamíferos marinhos, muitos deles em perigo ou mesmo em vias de extinção, são usados métodos acústicos passivos para a sua monitorização, uma atividade da Biologia. Neste artigo, apresentamos um dispositivo experimental simples, que pode ser realizado em laboratório, para estudar a localização de fontes sonoras. Ele replica um procedimento que é usado em Biologia Marinha, sendo a localização da fonte obtida pela interseção de hipérbolas que podem ser desenhadas com recurso a uma régua e um cordel.

## Introdução

Um sismo ocorre quando há uma rotura brusca numa falha sujeita a tensão. O foco sísmico é o ponto onde a rotura se inicia e o epicentro é a projeção desse ponto à superfície. A localização do epicentro (e foco) dum sismo é feita usualmente recorrendo às ondas de volume que são geradas durante a rotura. Em meios sólidos, geram-se ondas P (longitudinais) e ondas S (transversais). Conhecendo-se a velocidade de propagação das ondas P e S no meio atravessado (as curvas tempo-distância), é possível converter a diferença dos tempos de chegada das duas ondas a um sensor (o sismómetro) numa distância epicentral. Conhecendo a distância, podemos traçar uma circunferência em torno do sensor que assinala as localizações possíveis para o epicentro. Se tivermos mais duas estações nas quais possamos fazer a mesma operação e que estejam distri-

buídas de forma a rodear o epicentro, então podemos traçar mais duas circunferências à superfície do globo, estando o epicentro no ponto de interseção (aproximado) das três circunferências (Figura 1). Este raciocínio é válido quando o foco é superficial. No caso de o foco ser profundo, teremos de escolher por tentativa e erro o conjunto de curvas tempo-distância que melhor se ajustam aos dados. Este procedimento é feito rotineiramente em todos os observatórios sismológicos do planeta, recorrendo a programas de cálculo automático. No entanto, o procedimento gráfico, pela sua simplicidade, é utilizado habitualmente para ilustrar o processo de cálculo do epicentro de um sismo.

Existem inúmeras referências na Internet que apresentam procedimentos para a localização de epicentros usando sismogramas reais e o método das circunferências [1]. No entanto, deve-se assinalar que a solução gráfica para a localização dum epicentro numa representação plana da Terra (mapa) apenas é válida para pequenas distâncias, tipicamente inferiores a 500 km.

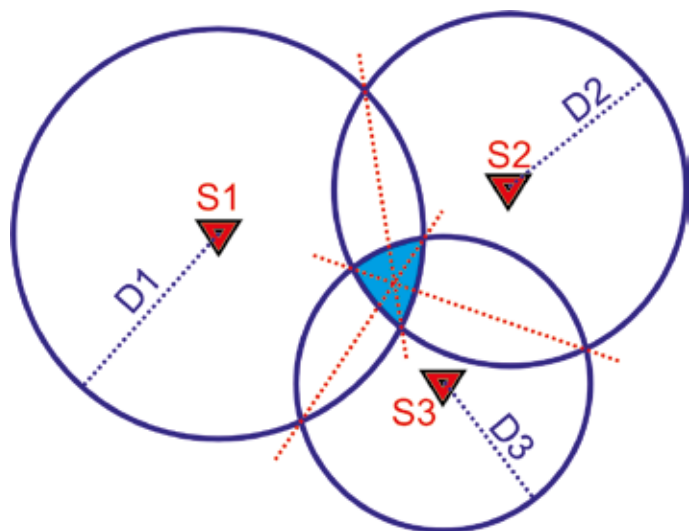


Fig. 1 – Localização do epicentro dum sismo pelo método convencional.

Gerar um sismo numa mesa é muito simples, basta dar uma pancada com um martelo. Uma mesa também oferece outra simplificação, pois não nos temos de preocupar com a profundidade do foco e reduzimos o problema a duas dimensões apenas. No entanto, uma pancada apenas gera ondas P diretamente e, por isso, não podemos usar no laboratório escolar o método convencional das circunferências descrito anteriormente. Existem alguns procedimentos propostos para a localização de pancadas numa mesa ou no chão que são ou demasiado simples e irrealistas [2] ou demasiado complexos e de difícil execução [3].

Neste artigo, começaremos por apresentar uma situação em que é importante a localização de fontes sonoras em meios fluidos onde não se propagam ondas S. De seguida, apresentamos o método que permite a localização de fontes nesse tipo de meios. Veremos que a solução envolve o traçado de hipérbolas. As hipérbolas podem ser traçadas manualmente, com recurso a uma régua e um fio. No final, apresentamos um exemplo prático do procedimento experimental indicado.

### Monitorização acústica passiva de cetáceos

Os cetáceos (baleias, golfinhos e toninhas) são mamíferos marinhos que, apesar de respirarem ar, se adaptaram a

viver de forma permanente nos mares e oceanos. Muitos deles são hoje considerados como espécies em perigo ou mesmo em vias de extinção. É por isso fundamental o seu estudo que, para além do estrito interesse científico, deve dar um contributo para as políticas de conservação e proteção.

Os cetáceos são habitualmente estudados por técnicas de observação visual. No entanto, o seu comportamento sob a superfície está inacessível, para além do que muitas das espécies de interesse vivem no oceano aberto, tornando as campanhas de observação custosas e de difícil execução. A observação visual apenas pode ocorrer de dia e em boas condições atmosféricas e oceânicas.

Para obviar estas múltiplas dificuldades, têm sido desenvolvidos métodos de investigação indiretos, a Monitorização Acústica Passiva (ou PAM na designação anglo-saxónica) que se baseia no estudo das vocalizações que os cetáceos realizam em ambiente marinho. Os sons emitidos podem ser capturados por sensores acústicos (os hidrofones) e os registos são então usados para obter a localização da sua fonte. Os métodos de localização de fontes sonoras no oceano estão adequados ao facto de apenas se poderem registar ondas de pressão (ondas longitudinais ou ondas P).

#### A equação algébrica duma hipérbole

Para simplificar as equações algébricas, vamos considerar que os focos da hipérbole se situam no plano sobre o eixo dos  $x$  a uma distância  $c$  da origem (Figura 3). Neste caso, a hipérbole tem os seus dois ramos simétricos em relação ao eixo dos  $y$ . A hipérbole intersesta o eixo dos  $x$  em dois pontos,  $V_1$  e  $V_2$ , designados por vértices da hipérbole. Na figura, considerando por exemplo o vértice  $V_2$ , é fácil deduzir que a diferença das distâncias desse ponto a cada um dos focos vale  $2a$ . Essa é a diferença de distâncias característica que se deve manter para todos os pontos da hipérbole. A dedução da equação algébrica da hipérbole fica agora simplificada: é o conjunto de todos os pontos  $P(x, y)$  cuja diferença de distâncias para os focos vale  $2a$ , ou seja,  $D_1 - D_2 = 2a$ ,

$$\sqrt{(x+c)^2 + y^2} - \sqrt{(x-c)^2 + y^2} = 2a \quad (1)$$

Definindo  $b$  como o número positivo tal que  $b^2 = c^2 - a^2$  obtemos, após alguma álgebra, a expressão da hipérbole simétrica em relação ao eixo  $y$ .

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (2)$$

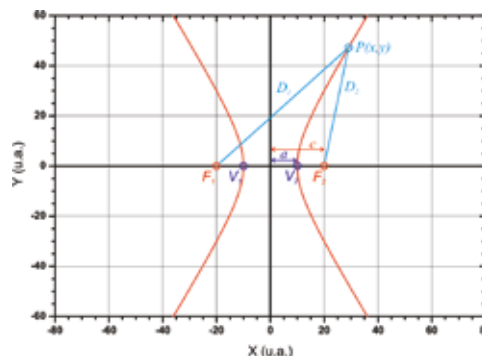


Fig. 3 – Representação duma hipérbole simétrica em torno do eixo Y.



## Localização de fontes sonoras no oceano

Por simplicidade, vamos admitir que a velocidade do som no oceano é constante, valendo  $s_w$ . Dispomos de dois sensores sincronizados (mesmo relógio ou base de tempo) que registam uma vocalização. Os sensores e a fonte sonora encontram-se à mesma profundidade e, por isso, trataremos da propagação do som apenas a duas dimensões, no plano. O tempo de chegada da onda acústica será (em geral) diferente para cada um dos sensores. Seja  $\Delta t$  a diferença de tempos entre os dois sensores, chegando o sinal primeiro ao sensor  $S_1$  e depois a  $S_2$ . Caso a situação se inverta, então consideraremos que  $\Delta t$  tem um valor negativo. Podemos então inferir que as possíveis localizações da fonte sonora (o epicentro) se encontram no lugar geométrico de todos os pontos do plano cuja diferença de distâncias a  $S_1$  e a  $S_2$  vale  $d = s_w \Delta t$ . Esta é precisamente a definição duma hipérbole em que  $S_1$  e  $S_2$  coincidem com os seus focos [4]. Se dispusermos de vários pares de sensores, então o epicentro, a fonte sonora, ir-se-á localizar no ponto de interseção das várias hipérbolas, como se mostra na Figura 2.

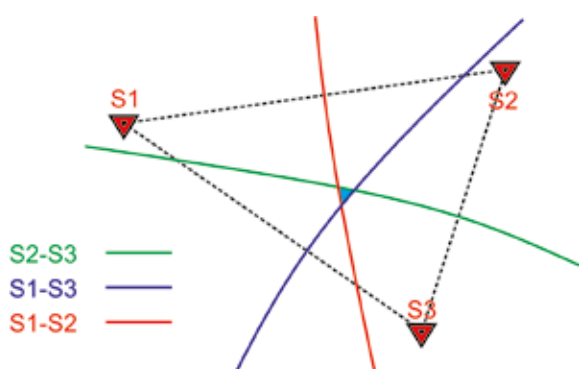


Fig. 2 – Localização do epicentro dum sismo pelo método das hipérbolas. Neste caso o sinal sonoro é registado por três sensores com os quais podemos estabelecer três pares, S1-S2, S1-S3 e S2-S3. Cada par de sensores permite definir um ramo de hipérbole no qual se deve encontrar o epicentro, identificado na figura pela sua cor. Três pares permitem traçar três ramos de hipérbole e o epicentro situa-se na região em que as hipérbolas se intersectam.

### Traçado manual duma hipérbole

Para traçar uma hipérbole, precisamos duma régua (ou barra comprida) e de um fio. Uma das extremidades do fio está fixa num dos extremos da régua (ponto A) e a outra extremidade fixa a um dos focos, neste caso o foco  $F_2$  como se mostra na Figura 3. A outra extremidade da régua deverá estar fixa no outro foco,  $F_1$  neste exemplo. A curva deve ser traçada com o fio esticado e com a caneta encostada à régua no ponto P. A distância ao foco  $F_1$  é dada pela régua e a distância ao foco  $F_2$  pelo fio esticado. É fácil de verificar que neste caso quando a caneta percorre a régua encostada a ela, a mesma quantidade é adicio-

nada ou subtraída a esses dois comprimentos pelo que se verifica a propriedade da hipérbole: a diferença entre as distâncias do ponto aos focos mantém-se constante.

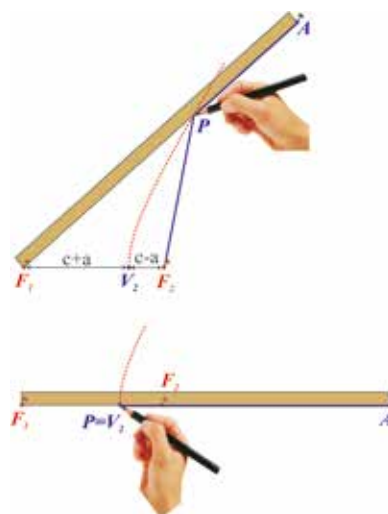


Fig. 4 – Indicações para o traçado manual duma hipérbole.

Para conhecer qual o comprimento do fio adequado, observamos agora a figura em que a régua coincide com a linha que une os dois focos (Figura 3). A caneta deverá então estar no vértice mais afastado de  $F_1$ , o vértice  $V_2$ . É fácil de ver que a distância entre a caneta e o foco mais distante vale então  $c + a$ , sendo a distância ao foco mais próximo  $c - a$ .

### Procedimento experimental

Convém ter à sua disposição uma mesa grande. Precisa também dum PC com entrada áudio (estéreo) e de um programa de análise de som. Neste trabalho, usámos o *Audacity* [5], um software de distribuição livre. A fonte sonora será a pancada dum martelo e, como sensores, podem-se usar captadores piezoelétricos.

Usando o procedimento indicado nas seções anteriores, um par de sensores apenas irá permitir traçar uma hipérbole. Para obtermos uma segunda hipérbole, usando apenas um conjunto PC + sensores, podemos efetuar uma segunda pancada com os sensores localizados numa posição diferente. Há que ter o cuidado de garantir que as hipérbolas que vierem a ser traçadas apenas se intersectem uma vez. Isso pode ser obtido com uma escolha criteriosa da localização dos sensores.

Para traçar as hipérbolas precisamos de conhecer dois parâmetros: (i)  $2c$  = distância entre os dois sensores, que define a posição dos focos da hipérbole; (ii)  $d = 2a$  a diferença de distâncias dos pontos da hipérbole para cada um dos focos. Fazendo a análise do som registado após uma pancada, podemos determinar a diferença entre os tempos de chegada das ondas acústicas aos sensores,  $\Delta t$ , e conhecer qual dos sensores está mais próximo do epicentro. Esta informação adicional é neces-