

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas

AGG0669 - Métodos Potenciais

Parte 1:
Generalidades

Yára Regina Marangoni
2018

1 - Métodos Potenciais: Gravimetria e Magnetometria

Generalidades

Boa parte da discussão abaixo provém de material da Universidade de Oklahoma e do livro do Hinze et AL. (2013).

1.1 Vantagens

- fonte natural: campo gravimétrico e campo magnético;
- não invasivo;
- não é dos métodos mais caros;
- rápido;
- fácil obtenção de dados e redução;

- método passivo.

1.2 Desvantagens

- interpretação não é direta;
- resolução é baixa;
- ambigüidade;
- nem sempre é aplicável;
- os campos não podem ser modificados para se adequar a algum experimento.

Método	Vantagens	Desvantagens	Razão de custo
Magnético	Muito rápido e muito barato	Resolução pobre, nem sempre aplicável	1
Gravimétrico	Rápido e barato	Resolução pobre	10
Sísmico	Grande detalhe e boa correlação com a geologia	Extremamente custoso	100

Atualmente muitos dados são coletados de forma aérea ou por satélite. Embora isso possa aumentar o custo, vários métodos podem ser combinados na mesma aeronave e vôo, resultando em um custo menor e grande volume de dados.

Uma discussão sobre o uso de métodos não-sísmicos em 2011 pela indústria de petróleo, mineração, meio ambiente, geotecnia e academia pode ser vista no boletim SBGf, 5.2011 (boletim5-2011.pdf). Veja alguns dos comentários sobre métodos sísmicos e não-sísmicos publicados nesse Boletim:

“Na prospecção de petróleo muitas empresas não têm equipes de interpretação especializadas em métodos não-sísmicos e, portanto, estes dados acabam negligenciados. A exceção é a Petrobras, cujo trabalho na área de métodos não-sísmicos contribui enormemente para o conhecimento privilegiado que a empresa tem das bacias sedimentares do Brasil e do mundo” - Renato Cordani, Reconsult.

“A correlação dos dados adquiridos por métodos não-sísmicos com os sísmicos pode ser um processo

extremamente difícil por requerer um conhecimento profundo de ambos. Para interpretação de gravimetria gradiométrica (GG), por exemplo, existem softwares que permitem correlacionar interpretações sísmicas e GG em tempo real” - Rodolfo Miranda, Prospectors.

“Não devemos dar ênfase apenas na aquisição de dados novos de métodos não-sísmicos, mas na capacitação de mais geofísicos. Do ponto de vista da interpretação, muito temos que desenvolver na área de algoritmos de modelagem e inversão integrados à sísmica. A indústria de O&G tem gradativamente reconhecido a importância dos métodos não-sísmicos, pois a integração de informações geofísicas para a interpretação de uma área promissora para prospecção de hidrocarbonetos se torna uma boa oportunidade de contribuição dos métodos não-sísmicos, especialmente em poços que atingiram o pré-sal” – Marco Polo Buonora, Petrobras.

“Os métodos potenciais são essenciais para redução do risco na exploração de O&G. Eles possibilitam a identificação dos principais elementos estruturais da área objeto de exploração e, nas bacias sedimentares com geologia complexa os métodos sísmicos prescindem de informações sobre os parâmetros físicos do terreno para o correto processamento do sinal” - Jorge Hildenbrand, Fugro-Lasa-Geomag.

“Devido aos custos dos levantamentos sísmicos, estes deveriam ser obrigatoriamente precedidos por levantamentos aerogeofísicos magnetométricos e gravimétricos e a partir daí se definiriam os alvos. A meu ver esta é a forma economicamente correta” - Divino Barbosa, Microsurvey.

1.3 Quando usar gravimetria e magnetometria

O método gravimétrico envolve medidas de variações muito pequenas do campo gravitacional da Terra, da ordem de algumas partes por milhão ou menos, causadas pela variação lateral na densidade.

Gravimetria é útil sempre que as formações de interesse têm **densidades** diferentes daquelas das formações do entorno.

Alguns exemplos:

- mapeamento de bacias sedimentares, quando as rochas sedimentares apresentam valores mais baixos de densidade do que as rochas do embasamento;
- corpos de sal, devido à baixa densidade do sal;
- estudos de água subterrânea;
- cavernas e câmaras em estruturas arqueológicas.

Magnetometria é útil sempre que o objeto de investigação apresenta contraste de **suscetibilidade** ou **magnetização remanente**.

Alguns exemplos:

- mapeamento de estruturas no embasamento;
- mapeamento de bacias sedimentares;
- localização de corpos mineralizados com magnetita.

1.4 Similaridades entre gravimetria e magnetometria

- força é proporcional às massas ou cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância

$$\vec{F} \propto \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r};$$

- campos potenciais são conservativos e obedecem à equação de Laplace;

- métodos de fontes naturais;
- não invasivos;
- as anomalias são pequenas em um campo de magnitude muito grande;
- variam no tempo e espaço;
- usadas como ferramentas de reconhecimento na exploração.

1.5 Diferenças entre gravimetria (**g**) e magnetometria (**B**)

- massa é monopolar, magnetismo é dipolar;
- toda matéria tem massa e, portanto contribui para o valor de **g**; a fonte do campo magnético principal está no núcleo, sendo este alterado pela crosta superior;
- as medidas de **g** são verticais e medimos apenas o módulo de **g** $|\vec{g}|$ enquanto \vec{B} é um vetor;
- **g** requer precisão de 0,1 ppm, **B** requer precisão > 10 ppm;
- gravímetros usados em prospecção são instrumentos relativos, os magnetômetros são absolutos;
- densidade varia de 1 a 4, susceptibilidade varia de algumas ordens de magnitude;
- **g** normalmente tem anomalias suaves e regionais, **B** tem anomalias mais irregulares e locais;
- efeito das marés, o único efeito externo em **g**, pode ser corrigido, efeito das tempestades magnéticas não pode ser removido das medidas de **B**;
- correções em **g**: deriva do equipamento, equipamento em movimento, maré, posição (latitude/ gravidade teórica), altura (ar-livre), massa (Bouguer), terreno, etc.; correções em **B**: deriva do equipamento (às vezes), diurna, IGRF;
- levantamentos de **g** são vagarosos e caros; os levantamentos de **B** são mais rápidos e custam 1/10 do custo de **g**.
- o campo magnético varia inversamente com a distância à fonte, porém decai com uma ordem de grandeza a mais que o gravimétrico, o que o torna mais sensível à profundidade.

1.6 Erros

Medidas de forças e campos são sujeitas a incertezas como resultado de uma variedade de erros. Erros ou ruídos são a diferença entre a verdade e a medida e portanto são comparáveis às anomalias, que são o ponto crucial da maior parte dos trabalhos de geofísica. Erros podem originar do sistema de instrumentação e do observador, da redução e processamento dos dados, e da interpretação geofísica. Erros ou ruídos também podem ser causados pelo geofísico analista, mas em alguns casos a fonte de ruído é desconhecida e/ou inevitável.

Erros podem ser de dois tipos básicos: sistemáticos e aleatórios.

Erros sistemáticos são desvios consistentes dentro de um sistema de medida. P. ex., erro de calibração de um equipamento, interpretação errônea da posição de leitura de um equipamento. As conclusões de estudos que apresentam erros sistemáticos podem ser consistentes dentro das suas premissas e precisas, mas sem acurácia dentro de uma base absoluta. Erros sistemáticos podem ser difíceis de serem detectados, pois eles não serão perceptíveis usando-se o mesmo equipamento de medida e o mesmo modo de leitura. Só podem ser percebidos com equipamentos e procedimentos de medidas (processamento de dados, esquemas interpretativos) diferentes.

Erros aleatórios são desvios da verdade que ocorrem por acaso, são imprevisíveis e sujeitos às leis da probabilidade. São observados em medidas repetidas. Não apresentam correlação com atributos dos equipamentos de medida ou fonte do campo medido e também não são relacionados com outras medidas feitas pelo sistema. Aparecem de inconsistência das fontes, instabilidade dos instrumentos e erros não sistemáticos do observador/analista. Erros aleatórios apresentam distribuição normal (Gaussiana). Observações repetidas assumirão a forma de uma Gaussiana distribuída ao redor de um valor central, a média aritmética do conjunto de números.

Para erros aleatórios normalmente usa-se a média aritmética de um número grande de dados, e o erro é o desvio padrão.

Sejam n observações com valores $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ e \bar{x} . O desvio padrão desse conjunto será dado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

A maior parte das medidas geofísicas requer alguma manipulação matemática ou processamento de dados antes de serem utilizadas para interpretação. Normalmente, alguns procedimentos matemáticos envolvem múltiplas medidas e parâmetros, cada um com o seu erro expresso como desvio padrão. Isso resultará em propagação de erros através dos procedimentos matemáticos. As regras para o cálculo do erro total assume o máximo erro.

Considere dois conjuntos de dados com médias N_1 e N_2 e respectivos desvios padrão σ_1 e σ_2 . Para as diversas operações matemáticas tem-se:

soma:

$$(N_1 \pm \sigma_1) + (N_2 \pm \sigma_2) = (N_1 + N_2) \pm (\sigma_1 + \sigma_2)$$

subtração:

$$(N_1 \pm \sigma_1) - (N_2 \pm \sigma_2) = (N_1 - N_2) \pm (\sigma_1 + \sigma_2)$$

multiplicação:

$$(N_1 \pm \sigma_1) \cdot (N_2 \pm \sigma_2) = (N_1 N_2) \left[1 \pm \left(\frac{\sigma_1}{N_1} + \frac{\sigma_2}{N_2} \right) \right]$$

divisão:

$$\frac{(N_1 \pm \sigma_1)}{(N_2 \pm \sigma_2)} = \frac{N_1}{N_2} \left[1 \pm \left(\frac{\sigma_1}{N_1} + \frac{\sigma_2}{N_2} \right) \right]$$

1.7 Fases de um programa de exploração em métodos potenciais

1 - fase de planejamento:

"The planning phase is perhaps the most important step in the geophysical approach because it is in this stage that fundamental

decisions are made regarding the nature and procedures of the program. Appropriate planning requires collecting and using all available geological and geophysical data and interpretations, and establishing strong communication links among the interested parties regardless of their particular expertise. Plans should only be finalized after all parties have had the opportunity to interact." (Hinze et al., 2013).

Esta fase envolve dois segmentos: seleção do método apropriado e o desenho da pesquisa, processamento e interpretação. Pode-se resumir as etapas em: colocação do problema ou seja os objetivos do estudo; definição do intervalo de modelos em subsuperfície, extensão lateral (que define boa parte dos custos) e principalmente profundidade, pelo contratante; coleta de toda informação geológica disponível; coleta de dados geofísicos disponíveis; compilação de propriedades físicas; cálculo do intervalo de resposta geofísica dos modelos; estimativa do intervalo de anomalias regionais, residuais, ruídos (de observação, de redução, geológicos); seleção dos métodos a serem empregados, desenho dos procedimentos de aquisição dos dados, redução e interpretação, este deve priorizar o menor tempo e o custo mais baixo possível sem comprometer a qualidade do levantamento.

2 - fase de aquisição: obtenção de dados pré-existentes; coleta de dados de campo; coleta de informações auxiliares (posicionamento geográfico, elevação, data, hora, altitude de voo, batimetria).

3 - fase de processamento de dados: processamento de dados para calibração e determinação de erros de observação, seleção da melhor anomalia; cálculo do modelo teórico conceitual e comparação com as observações, implica em definição das anomalias; isolamento ou realce de anomalias para aumentar a percepção delas, usualmente através de filtros para eliminar ruídos e grandes comprimentos de ondas (regional).

4 - fase de interpretação: identificar e isolar as possíveis anomalias e suas potenciais fontes; calcular modelos simples para determinar parâmetros aproximados das fontes, contrastes de propriedade física, limites; realizar modelos diretos e inversos usando vínculos geológicos e geofísicos para definir as fontes

em subsuperfície.; estabelecer os modelos físicos que possam ser possíveis fontes dos sinais geofísicos; converter o modelo geofísico em modelo geológico.

"The procedures involved in interpretation of the force field measurements into the nature and distribution of sub- surface materials or associated processes relevant to the objectives of the investigation are highly varied depending on the goals and scope of the survey and the experience and skills of the interpreter. Successful interpretation commonly involves intangible qualities of the interpreter such as experience, observational powers, ability to visualize in three dimensions, and the intellectual capacity to organize and integrate a variety of often disparate types of information. As such, it is viewed in some quarters as an art, but most interpretation follows an orderly logical process, often called scientific methodology, using the methods of deduction or induction to proceed from processed data to a successful conclusion" (Hinze et al., 2013).

5 - fase de relatório: preparação de um relatório que descreva os procedimentos usados no estudo e que apresente as soluções ótimas e possíveis e o limite de validade dos resultados

6 - fase de arquivamento: arquivar dados, metadados e documentação do estudo.

Metadados referem-se aos dados obtidos em campo, sejam eles uma única observação ou um conjunto repetido de observações, requerem anotações para descrever a pesquisa, o local específico de medidas, características dos instrumentos, processamento aplicado e em muitos casos, condições ambientais das medidas. Todas essas informações permitem qualificar (no sentido de estabelecer se os dados são bons ou ruins).

"Quality assurance has long been important to geophysical investigators, but as a formal process it has been recognized only in recent decades. It has become particularly important in geophysical studies related to engineering problems such as the siting of critical structures. The potential impact of failure of these structures as a result of incorrect conclusions drawn from faulty investigations, with the resulting effect on humans and the environment, has encouraged regulatory and licensing agencies of the government as well as private industry to insure that the studies are conducted at the highest possible level of quality. As a result, quality assurance has become a

required element in the acquisition and processing of geophysical data in many types of both commercial and governmental geophysical surveys. This is intended to insure the integrity of the studies and the quality of the data and

resulting data processing and interpretation." (Hinze et al., 2013).

1.8 Um pouco da história dos métodos

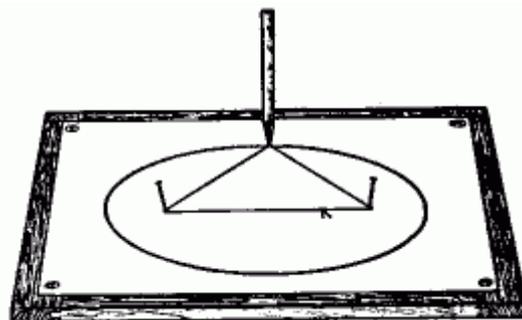
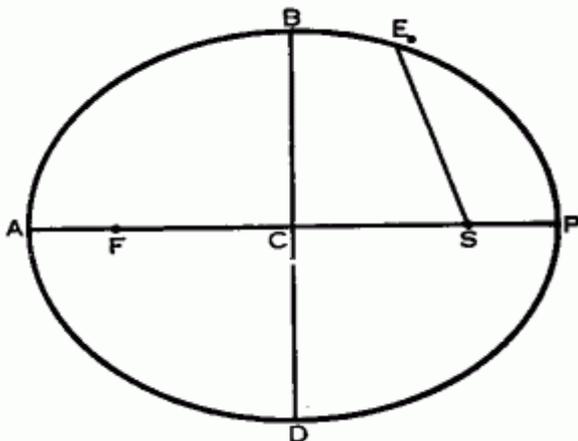
History of Gravity Method

from GravMag - Univeristy of Oklahoma

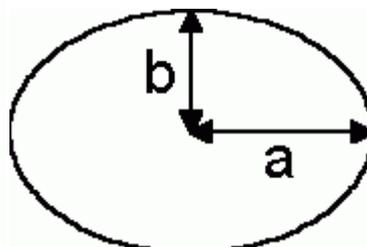
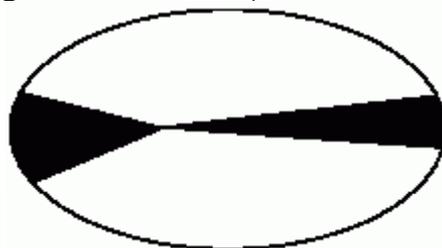
- Man has always recognized its force: fear of falling; up & down
- Galileo, 1590: pendulum period; force on body proportional to weight; acceleration of g independent of mass; $gal = 1 \text{ cm/s}^2$
- After sun recognized as center of universe, Tycho Brahe (1546-1601) made extensive measurements of the "peculiar motion" of planets
- Johannes Kepler (1571-1630): Kepler's Laws history
 1. The planets move in elliptical orbits with the sun at one focus

$$\frac{(x + ae)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

where a (distance CA below) and b (distance CB below) are the major and minor semiaxes. The eccentricity, e, is given by c/a , where c is the distance from the center of the ellipse to one of the foci, and x and y represent coordinates of points on orbit. (examples: Earth = 0.01673; Mercury = 0.2056; Pluto = 0.250)



1. A line drawn from the sun to a planet will sweep out equal areas in equal times (conservation of angular momentum)



$$\frac{\Delta A}{\Delta t} = \text{constant}$$

2. The square of a planet's period of revolution is proportional to the cube of the length of the major semiaxis of the orbital ellipse (conservation of kinetic and potential energy)

$$T^2 \propto a^3$$

- Newton, 1687, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*: force of gravity is a property of all matter, Earth included

- Jean Richer, 1672: pendulum clock, accurate in Paris, lost a few minutes per day in Cayenne, French Guiana
Seen as tool to measure variation in geopotential. Newton correctly interpreted as due to oblateness. French believed otherwise; French Academy of Sciences sent two expeditions, one to high latitudes of Sweden, other to equatorial Ecuador (included Pierre Bouguer) to compare length of degree of arc at both sites.
- Pierre Simon, Marquis de Laplace: gravity obeys simple differential eq. (early to mid 1800s)
- Lord Cavendish, 1798, determined G, hence mass of Earth (estimate of G was 6.754×10^{-11})

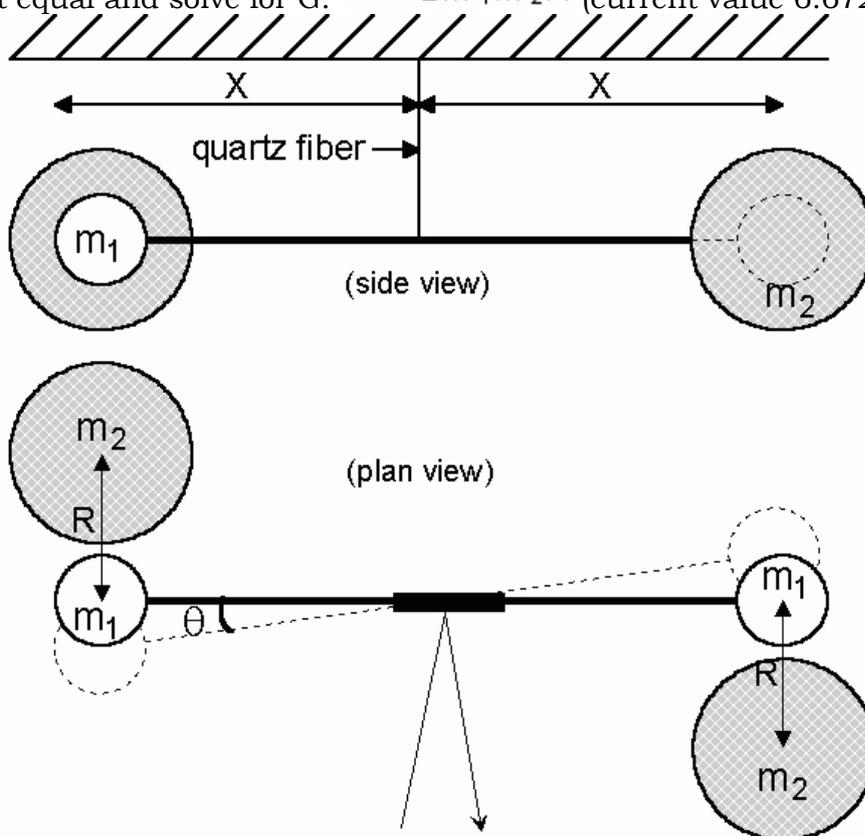
Torque required to twist quartz fiber: $L = k\theta$

$$L = FX = 2 \frac{Gm_1m_2}{R^2} X$$

Torque provided by gravity:

$$G = \frac{k\theta R^2}{2m_1m_2X}$$

Set equal and solve for G: (current value 6.6720×10^{-11} MKS)



- [Cavendish experiment](#) leads to mass, bulk density of Earth:

$$F = \frac{GMm}{R^2}, \text{ and since } F = ma, a = \frac{F}{m} = \frac{GM}{R^2}$$

When mass causing acceleration, M, is Earth, we use g to represent acceleration

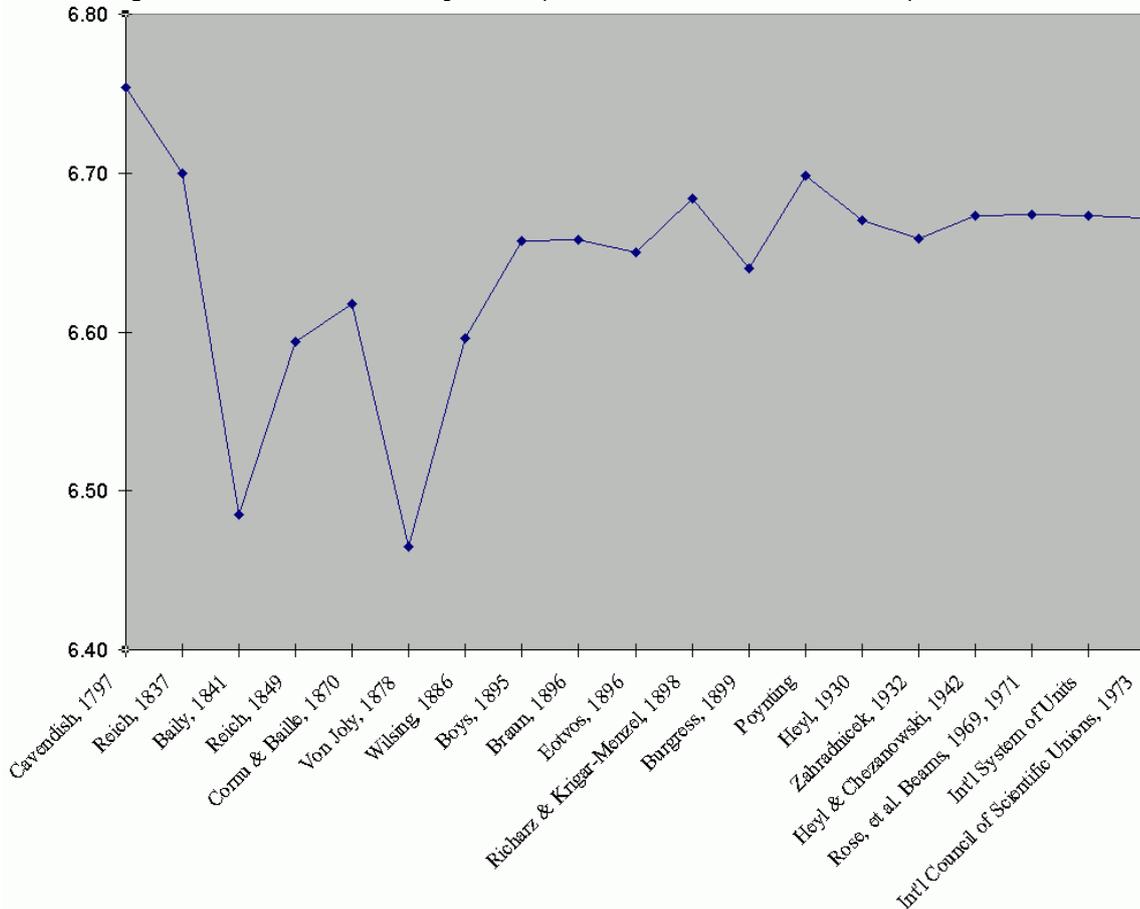
$$g = \frac{GM}{R^2}, \text{ or } M = \frac{gR^2}{G}$$

We know $R = 6371 \text{ km}$ (how?), $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ MKS}$ (what are the units?), so $M = 6.0 \times 10^{24} \text{ kg}$

$$\bar{\rho} = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} = 5500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Bulk density:

- [But how was the Newton defined?](#)
- Improvement in accuracy of G (and hence mass of Earth) over time:



Gravity as Geophysical Tool

- Kater, 1818, reversible pendulum: absolute g
- Earliest efforts to locate oil-bearing structures involved gravity: just before 1900, Baron Roland von Eötvös, Hungary
 - torsion, or Eötvös balance
 - measures distortion in g field from buried bodies
 - slow, cumbersome to operate
- 1915/16 torsion balance survey at 1-well oil field at Egbeil, now in Czechoslovakia; highly successful
- 1917 Schweider: salt dome in Germany
- 1922 Shell: Horgada field in Egypt
- 1922 Spindletop field in Texas - salt structure
- Vening Meinesz, 1928, shipborne pendulum
- 1930s - Gulf Research & Development, 1st gravimeter (direct readings of g differences; oil boom, LaCoste-Romberg, Worden meters patented)

Um histórico sobre o desenvolvimento do método gravimétrico pode ser visto em Nabighian et al. (2005a).

History of the Magnetic Method

from GravMag - Univeristy of Oklahoma

China

- used for navigation as early as several centuries B.C.
- recognized Earth's field by 11th century

Europe

- magnetic compass developed by the end of 12th century
- 1540: regular observations of magnetic field made since 1540 at London, later Paris (figure from McElhenny)

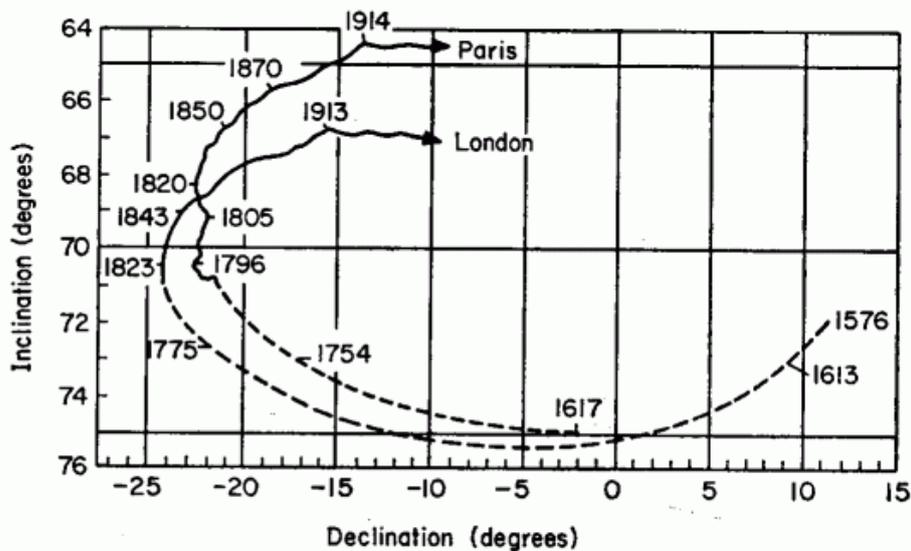


FIGURE 4 Variation of declination and inclination at London and Paris from observational measurements. After Gaiber-Puertas (1953), *Observ. del. Elso*, Memo. No. 11.

- 1600: [Gilbert, *De Magnete*](#), carved sphere from lodestone, found field similar to Earth's
- 1634: Gellibrand noted variation in declination with time
- 1640: Sweden, used magnetic field for prospecting for iron ore
- 1843: Von Wrede used magnetics to locate iron ore
- 1879: Thalen examined iron ore deposits with magnetics

Um histórico sobre o desenvolvimento do método magnetométrico pode ser visto em Nabighian et al. (2005b).

Referências de interesse:

Hinze et al., 2013 - Gravity and magnetic exploration, Principles, practices and applications, Cambridge U.P

Nabighian, M.N., Ander, M.E., Grauch, V.J.S., Hansen, R.O., LaFehr, T.R., Li, Y., Pearson, W.C., Peirce, J.W., Phillips, J.D., Ruder, M.E., 2005a. The historical development of the gravity method in exploration Geophysics, 70(6): 63ND–89ND.

Nabighian, M.N., Grauch, V.J.S., Hansen, R.O., LaFehr, T.R., Li, Y., Peirce, J.W., Phillips, J.D., Ruder, M.E., 2005b. The historical development of the magnetic method in exploration Geophysics, 70(6): 33ND–61ND.