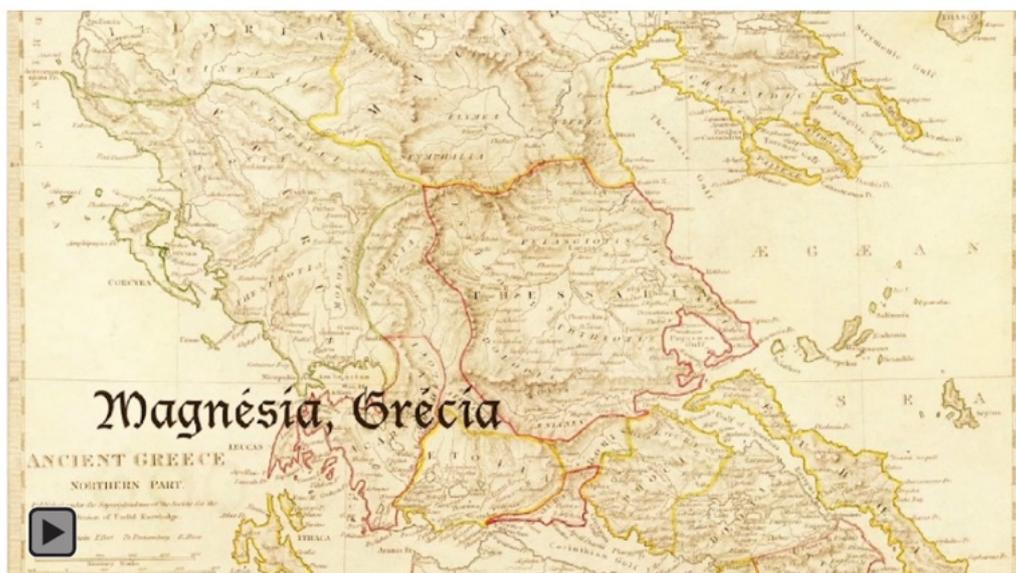


Observatório Magnético de VASSOURAS

100 anos

de pesquisa e serviços prestados à ciência





O ÍMÃ DA TERRA: 2,5 MIL ANOS DE HISTÓRIA EM UM MINUTO

Em seu centenário de fundação, o Observatório Magnético de Vassouras, ligado ao Observatório Nacional, presenteia você com esse breve panorama da história do magnetismo terrestre, apresentando, da Grécia Antiga à atualidade, os principais fatos e personagens que contribuíram para a compreensão de que nosso planeta é dotado de um campo magnético que varia no tempo e no espaço.



Observatório Magnético de VASSOURAS

100 anos

de pesquisa e serviços prestados à ciência

Observatório Nacional

Rio de Janeiro, 2015



MINISTRO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Celso Pansera

SECRETÁRIA EXECUTIVA

Emília Ribeiro

SECRETÁRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA PARA INCLUSÃO SOCIAL

Eron Bezerra

SUBSECRETÁRIO DE COORDENAÇÃO DAS UNIDADES DE PESQUISA

Adalberto Fazzio

DIRETOR DO DEPARTAMENTO DE POPULARIZAÇÃO E DIFUSÃO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Douglas Falcão

DIRETOR DO OBSERVATÓRIO NACIONAL

João Carlos Costa dos Anjos

COORDENAÇÃO DO PROJETO

Alba Livia Tallon Bozi / Observatório Nacional

EDIÇÃO DE TEXTO

Cássio Leite Vieira

Henrique Kugler

PROJETO GRÁFICO E DIAGRAMAÇÃO

Ampersand Comunicação Gráfica

O14 Observatório Magnético de Vassouras: 100 anos de pesquisa e serviços prestados à ciência./Alba Livia Tallon Bozi, Cássio Leite Vieira e Henrique Kugler, organizadores.- Rio de Janeiro:Observatório Nacional, 2015.

93p.:il. 28cm

ISBN: 978-85-99926-05-5

Inclui bibliografia e índice

1.Ciências da Terra.I. Bozi, Alba Livia Tallon.II.Vieira, Cássio Leite.III.Kugler, Henrique.

CDU 550



Ministério da
Ciência, Tecnologia
e Inovação



APRESENTAÇÃO

É COM GRANDE SATISFAÇÃO QUE PUBLICAMOS este livro em homenagem aos 100 anos do Observatório Magnético de Vassouras (OMV). Nele, não só contamos a história desse observatório – criado por Henrique Morize, em 1915 –, mas também mostramos, em uma linguagem acessível ao grande público, a ciência que ali se faz, de grande importância para o país.

Veremos como o OMV dedica-se à medida de grandezas fundamentais, como o campo magnético terrestre – base para nossa orientação durante séculos e um importante “escudo” que protege a Terra da radiação solar – e a aceleração da gravidade, essencial para localizar jazidas minerais, determinar altitudes e medir viscosidade, peso, massa, densidade e outras grandezas mecânicas afins de diversos materiais, informações vitais à indústria.

Gostaríamos de agradecer o trabalho dos autores e dos editores, que, em parceria, souberam transformar a linguagem científica – naturalmente rigorosa – em textos agradáveis e de fácil leitura – tarefa nem sempre simples. Agradecemos também a parceria com o Museu de Astronomia e Ciências Afins (MAST), que nos ajudou a reconstituir a história da fundação do OMV, publicada neste livro, e a preparar a exposição “100 anos de pesquisas no Observatório Magnético de Vassouras”, abordando os temas aí estudados e mostrando o acervo de instrumentos científicos usados no observatório para as medições ao longo do tempo.

Agradecemos ainda à Secretaria de Inclusão Social do MCTI – em especial, ao Secretário Eron Bezerra, bem como ao Diretor do Departamento de Popularização e Difusão da Ciência e Tecnologia, Douglas Falcão – o apoio recebido não só para a confecção deste livro, mas também para a criação, nas dependências do OMV, do Centro de Visitantes Henrique Morize, que, a partir de agora, integrará o circuito cultural, turístico e educacional da cidade de Vassouras (RJ) e de toda a região.

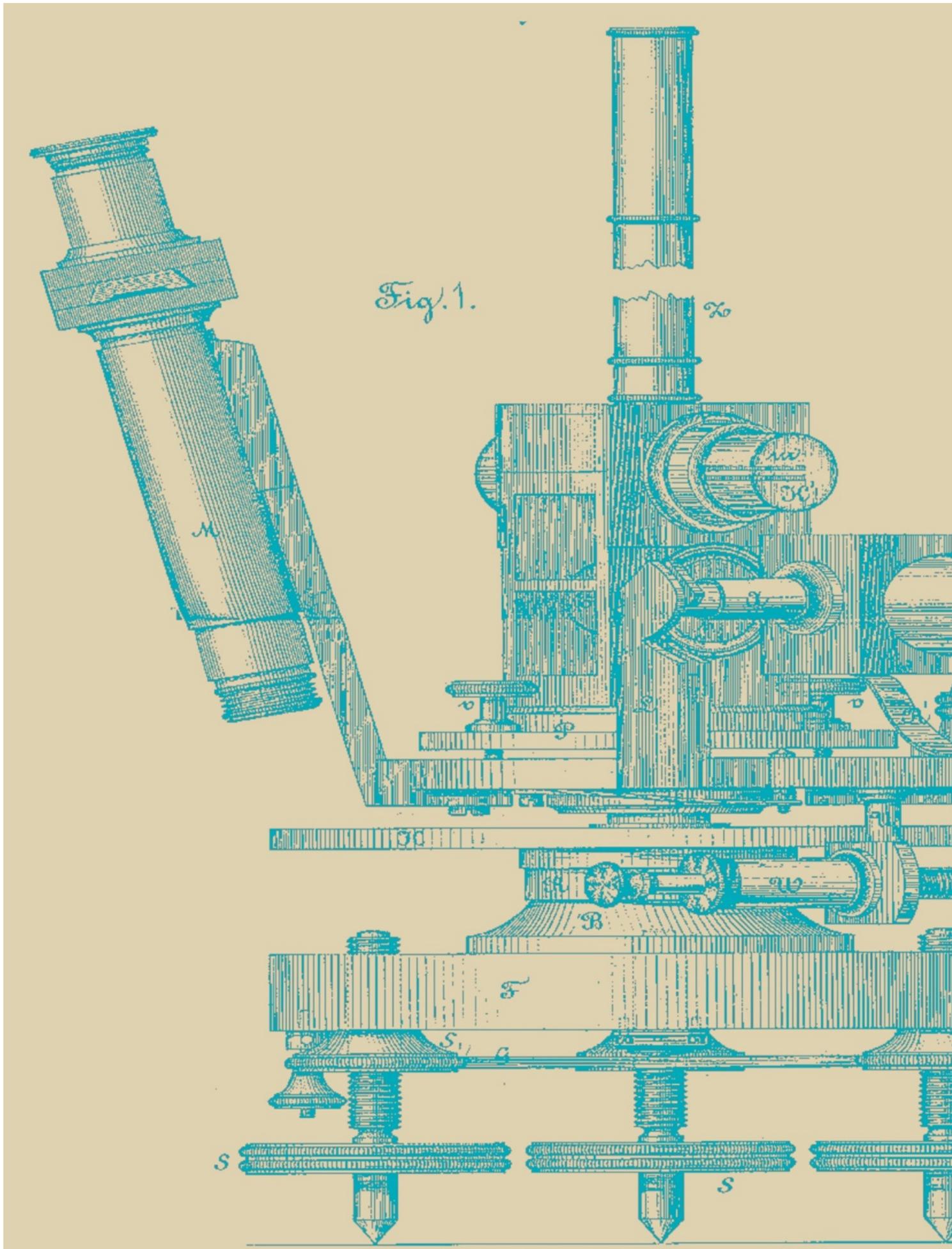
Também agradecemos à Prefeitura de Vassouras, ao prefeito Renan Vinícius de Oliveira, bem como às Secretarias de Obras e Serviços Públicos, de Turismo e Desenvolvimento Econômico, de Educação e de Cultura da cidade, pelo apoio inestimável no trabalho de recuperação e adequação dos espaços para a criação do Centro de Visitantes Henrique Morize.

Por fim, esperamos despertar com este livro o interesse dos leitores para os temas fascinantes aqui tratados, contribuindo, assim, para a disseminação do conhecimento científico em nosso país.

João dos Anjos

Diretor / Observatório Nacional





UM OBSERVATÓRIO MAGNÉTICO NO VALE DO PARAÍBA 9

Pedro Eduardo Marinho

Laura Roberta Fontana

*Coordenação de História da Ciência,
Museu de Astronomia e Ciências Afins (MAST)*

PRIMEIRAS OBSERVAÇÕES MAGNÉTICAS NO BRASIL 21

Oscar T. Matsuura

*Museu de Astronomia e Ciências Afins (MAST)
e Programa de História das Ciências
e das Técnicas e Epistemologia (HCTE),
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)*

O REGISTRO DO CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE NO PASSADO 39

Gelvam André Hartmann

Daniel Ribeiro Franco

*Coordenação de Geofísica,
Observatório Nacional*

INVESTIGANDO O CAMPO MAGNÉTICO DA TERRA 51

Katia J. Pinheiro

*Coordenação de Geofísica,
Observatório Nacional*

UMA BREVE HISTÓRIA DO GEOMAGNETISMO 63

Elder Yokoyama

*Instituto de Geociências,
Universidade de Brasília*

OBSERVATÓRIO MAGNÉTICO DE VASSOURAS: UM SÉCULO DE PESQUISAS 75

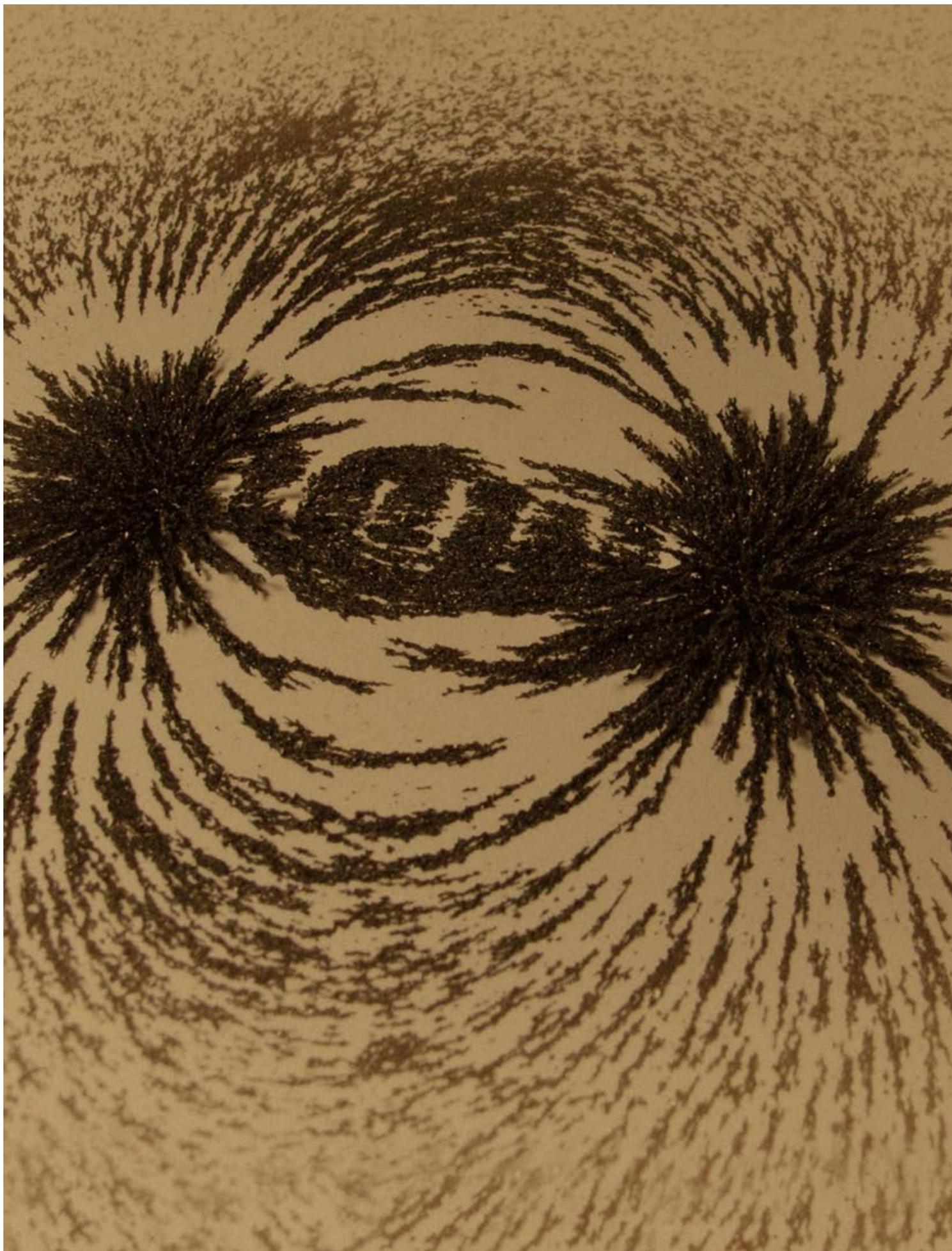
Cosme Ferreira da Ponte Neto

*Divisão de Atividades Educacionais,
Observatório Nacional*

MEDINDO A GRAVIDADE TERRESTRE 85

Mauro Andrade de Sousa

*Laboratório de Gravimetria,
Coordenação de Geofísica,
Observatório Nacional*

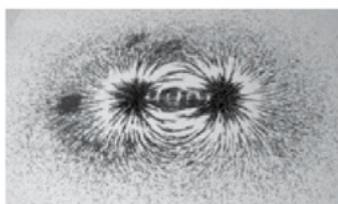


UM OBSERVATÓRIO MAGNÉTICO NO VALE DO PARAÍBA

Pedro Eduardo Marinho
Laura Roberta Fontana

*Coordenação de
História da Ciência,
Museu de Astronomia
e Ciências Afins (MAST)*

Há 100 anos, no estado do Rio de Janeiro, entrava oficialmente em funcionamento o Observatório Magnético de Vassouras (OMV) – espaço de fundamental importância científica para o país. Mas algumas perguntas são pertinentes: por que Vassouras (RJ) foi o município escolhido? Além de questões técnicas, haveria motivos locais a influenciar tal escolha? É importante lembrar, por exemplo, que a proximidade em relação à Estrada de Ferro Central do Brasil foi um dos fatores levados em consideração para a escolha dessa localidade, afinal, isso facilitaria o transporte de instrumentos científicos. Além disso, não foi por acaso a aproximação temporal entre estes dois eventos distintos: a inauguração da Estação Férrea de Vassouras e a instalação de um observatório magnético na mesma cidade. Na realidade, ambas as construções se inseriam em um contexto de estratégias do poder público local, que procurava dar um aspecto moderno à ‘princesinha do café’ – antigo apelido do município – em tempos de declínio cafeeiro no Vale do Paraíba.



As primeiras observações magnéticas realizadas de forma constante e sistemática, em terras que hoje formam o Brasil, foram conduzidas pelo astrônomo português Bento Sanches Dorta (1739-1794). Ele foi enviado à colônia (ver 'De Portugal ao Brasil') para demarcar os limites territoriais previstos nos termos do Tratado de Santo Ildefonso, um acordo assinado em 1777 entre Portugal e Espanha – com o objetivo de ajustar limites geopolíticos em terras sul-americanas.

DE PORTUGAL AO BRASIL • Astrônomo português, Bento Sanches Dorta é hoje visto como alguém que prestou importantes contribuições científicas para o Brasil. Em 1781, foi para o Rio de Janeiro, onde montou uma estação de observações astronômicas, meteorológicas e magnéticas. Com os dados astronômicos que conseguiu coletar, determinou a longitude e latitude da capital carioca. Em seus registros, Sanches Dorta informou cada um dos instrumentos que usou; e informou também os pormenores da metodologia que seguiu em suas análises. Em 1788, ele se mudou para a capital paulista, onde, com os mesmos instrumentos e métodos usados no Rio de Janeiro, determinou também a longitude e latitude de São Paulo (SP). As primeiras observações astronômicas documentadas a partir dessa cidade, aliás, foram feitas por ele.

Sanches Dorta iria a São Paulo (SP), onde realizaria os trabalhos demarcatórios. Mas, antes de sua ida à capital paulista, permaneceu no Rio de Janeiro (RJ) entre os anos de 1781 e 1788, nas imediações do Morro do Castelo, local que, posteriormente, abrigaria o Imperial Observatório do Rio de Janeiro (IORJ) (figura 1).

A partir de então, seguiram-se importantes passos que dariam sequência à história das observações magnéticas no país. Destacaram-se,



Figura 1. Igreja dos jesuítas no Morro do Castelo, onde, no século 18, foram realizadas observações astronômicas

BIBLIOTECA NACIONAL - BN DIGITAL

ao longo do século 19, os trabalhos de alguns militares da Marinha, como Albin-Reine Roussin (1781-1854) e Amédée Mouchez (1821-1892). E, em especial, os trabalhos do astrônomo francês Emmanuel Liais (1826-1900), do Observatório de Paris.

Liáis veio ao Brasil para observar um eclipse e participar de expedições custeadas pelo governo brasileiro (ver 'Pioneirismo à moda francesa'). Em 1870, foi convidado para dirigir o Imperial Observatório, função que exerceu até 1881. Conta-se que, já por aqueles anos, ele sugeriu a instalação de um observatório magnético no estado do Rio de Janeiro – que teria sido o primeiro observatório do gênero da América Latina. Mas sua tentativa não logrou êxito, e Liáis retornou à França. O primeiro local onde foram realizadas observações magnéticas em terras brasileiras mais sistematicamente só foi criado em 1882, no próprio Morro do Castelo. A data era significativa: se tratava, afinal, do Primeiro Ano Polar Internacional.

Outro personagem merece destaque na história do geomagnetismo em nosso país: é o holandês Elie Van Rijkevorsel (1845-1928), que esteve no Brasil entre 1881 e 1885. Cientista, viajante, aventureiro e colecionador de artefatos etnográficos (ver 'Um aventureiro nos trópicos'), ele percorreu o país e fez diversas medições, estabelecendo um conjunto de estações magnéticas fixas que poderiam ser periodicamente visitadas para fins de pesquisa. Foi assim que ele realizou, naquele período, o primeiro grande levantamento magnético do território brasileiro.

Mais tarde, entre 1903 e 1904, mais um levantamento foi feito por um órgão do Ministério da Marinha, com objetivos relacionados a demarcações territoriais, principalmente.

Entre 1910 e 1911, o astrônomo brasileiro Domingos Fernandes da Costa (1882-1956) empreendeu o que chamou de Levantamento Magnético do Vale do rio São Francisco (ver 'Importante legado'). Sua ideia era refazer o itinerário que Van Rijkevorsel

PIONEIRISMO À MODA FRANCESA • Os estudos do francês Emmanuel Liáis formaram as bases da previsão do tempo. Seus trabalhos também foram importantes no processo de determinação de latitudes e longitudes. Liáis fundou a Sociedade de Ciências Naturais e Matemáticas de Cherburgo, na França, e, em 1858, foi enviado ao Brasil no âmbito de uma missão científica para observação de um eclipse solar. Os resultados, elogiados pela comunidade científica, motivaram o imperador Dom Pedro II a solicitar ao governo francês sua permanência no Brasil. Liáis então explorou a costa de Pernambuco, assim como o rio das Velhas e o rio São Francisco – produzindo trabalhos de cartografia para o estudo de melhoramentos dos portos de Recife e Tamandaré. Mas o pesquisador não deixou de lado a astronomia. Em 1870, foi nomeado para remodelar o Imperial Observatório. Porém, acabou por se envolver em disputas políticas com funcionários da instituição, o que resultou em uma crise amplamente divulgada pelos jornais da época. Liáis, à época ocupando um cargo de direção, defendeu insistentemente os pedidos de aumento de verba para o observatório; para a contratação de pessoal; e para a transferência das instalações para um local mais apropriado. Isso gerou atritos e desgastes. E, em 1881, o cientista retorna à França.

UM AVENTUREIRO NOS TRÓPICOS • Além de suas diversas jornadas exploratórias, Elie Van Rijkevorsel, nascido em Roterdã (Holanda), também estudou métodos para determinar o coeficiente de condutividade de calor em metais. Em seguida, partiu para as Índias Orientais Holandesas, onde dedicou-se a observações meteorológicas. Além de ter reunido valiosos dados científicos, coletou uma grande coleção de roupas indianas, tecidos preciosos e armas. Após suas viagens e aventuras, ele se concentrou em questões sociais e culturais, e o material que coletara acabou formando o acervo do antigo Museu de Etnologia, hoje conhecido como Museu do Mundo, na Holanda. Rijkevorsel também participou da criação da Fundação Erasmus, em Roterdã, com o objetivo de promover as artes, a educação e a ciência.

IMPORTANTE LEGADO • Diretor interino do Observatório Nacional por um mês, em 1951, o astrônomo Domingos Fernandes da Costa legou importantes contribuições à ciência de seu tempo. Em 1910, ele se dedicou à observação de diversos cometas, entre eles o Halley. Estudou também o posicionamento dos cometas Reid e Ensor, tendo seus trabalhos muito elogiados na comunidade científica. Além disso, esses estudos foram considerados importante contribuição do Observatório Nacional para o campo da astronomia.

percorreria no Brasil. Costa sabia que algumas correções nos dados seriam necessárias, mas não pode realizá-las dadas as condições do Imperial Observatório. As observações magnéticas realizadas no Morro do Castelo apresentavam grandes problemas – graças à quantidade de massa de ferro espalhada naquele observatório. Os

prejuízos que isso ocasionava às pesquisas, assim como as péssimas condições das instalações, determinaram a transferência das atividades para outras localidades. Por isso, em 1913 uma nova sede do Observatório Nacional (ON) começa a ser construída. O novo local seria o Morro de São Januário, em São Cristóvão (RJ).

A transferência da sede do Observatório Nacional do Morro do Castelo para o Morro de São Januário gerou grandes expectativas. Um dos motivos para a escolha da nova sede foi o fato de que o sinal da hora, importante responsabilidade da instituição, teria que ser visível para os navios a partir da zona portuária da capital carioca. Esse detalhe favoreceu significativamente a escolha do Morro de São Januário. Porém, assim como no local anterior, as condições para observações magnéticas ainda não eram ideais.

Enquanto isso, Costa finalmente publicou, em 1914, seu Levantamento Magnético do Vale do rio São Francisco. Nele, o pesquisador comenta em detalhes suas observações magnéticas, e lamenta não ter conseguido dados mais confiáveis por conta das linhas de bonde que circulavam no Morro do Castelo. Ele ainda relata que as instalações de instrumentos de vulto poderiam, agora, ser feitas em Vassouras. E foi lá mesmo que, nesse período, iniciou-se a construção de um novo observatório – dedicado exclusivamente às variações do campo magnético terrestre.

PEÇA FUNDAMENTAL • Naturalizado brasileiro em 1884, o astrônomo HENRIQUE CHARLES MORIZE concluiu, em 1890, o curso de engenharia industrial na Escola Politécnica do Rio de Janeiro. Foi cate-drático de física experimental na mesma instituição entre 1898 e 1925. Após ingressar no Observatório Nacional, em 1891, no cargo de físico as-trônomo, ele se tornou diretor da instituição em 1908, cargo ocupado até 1928. Morize participou da fundação da Sociedade Brasileira de Ciências e da Academia Brasileira de Ciências, instituição da qual foi o primeiro presidente. Sua carreira foi marcada por uma série de feitos importantí-simos: foi precursor dos estudos dos raios X e de climatologia no Brasil; participou da Comissão Exploradora do Planalto Central, em 1892; e da Comissão Demar-cadora de Limites do Brasil com a Argentina, em 1902. Além dis-so, Morize integrou um grupo de cientistas e intelectuais que, no início do século 20, tinha como propósito a valorização da pes-quisa básica.



ACERVO ON

A INSTALAÇÃO

O grande idealizador do Observatório Magnético de Vassouras foi o engenheiro e astrônomo francês naturalizado brasileiro Henrique Charles Morize (1860-1930) (ver ‘Peça fundamental’),

em parceria com o astrônomo Alix Correa Lemos (1877-1957) (ver 'Fiel assistente'). Conta-se que naqueles anos – com a política científica dominante característica do início do século passado – Morize quase que se desculpava pela preocupação em desenvolver um setor que não teria aplicação prática imediata, principalmente para aqueles que, embora sem conhecimento especializado, decidiam os rumos dos investimentos científicos.

No novo observatório, foi Lemos – homem de confiança de Morize – quem ficou responsável pela organização do serviço geomagnético. Ele também atuou como diretor interino em momentos nos quais Morize teve de se afastar da direção. Após sua saída definitiva, o francês desejou que seu cargo fosse ocupado pelo próprio Lemos. Mas, graças a um atrito entre este e o então ministro da Agricultura, a vontade de Morize não se concretizou. De qualquer modo, a importância de Lemos para o OMV é inegável.

Entre outras questões de natureza técnica, a proximidade entre o terreno escolhido no município de Vassouras e a Estrada de Ferro Central do Brasil foi fundamental para o estabelecimento de um observatório magnético naquela localidade – detalhe que está claramente expresso em documentos. O ponto mais apropriado, afinal, seria aquele em que não houvesse possibilidades de estabelecimento de bondes elétricos. Esses meios de transporte impossibilitavam por completo as observações magnéticas na capital federal, que, à época, era o Rio de Janeiro. Além disso, a relativa proximidade do terreno em Vassouras com a estrada de ferro facilitava o transporte de instrumentos e viabilizava sua instalação.

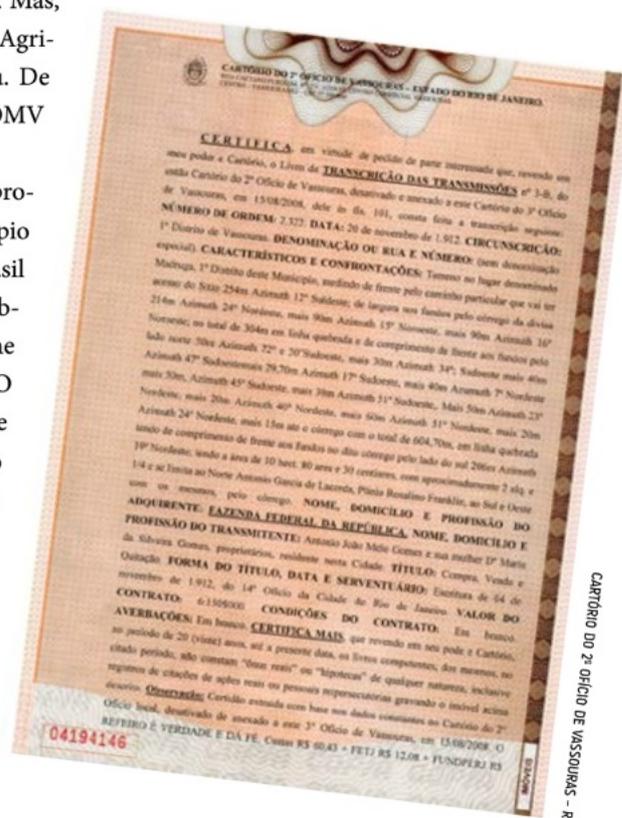
A propósito, esses dois fatores – a proximidade à estrada de ferro e a não existência de bondes elétricos – foram argumentos usados por Morize nos momentos em que ele mesmo afirmou que a cidade de Vassouras era, realmente, um ponto favorável para o novo observatório.

É claro que o terreno não era assim tão perfeito. Em ofício ao diretor da Repartição Geral dos Telégrafos, em novembro de 1912, Morize relata

FIEL ASSISTENTE • Integrante do grupo de cientistas que criou a Sociedade Brasileira de Ciências, em maio de 1916, ALIX CORREA LEMOS foi assistente chefe no Observatório Nacional (ON) e chegou a dirigir a instituição entre 1929 e 1930, após o adoecimento de Henrique Charles Morize, então diretor. Membro da Sociedade Sismológica da América, foi responsável pela área de sismologia do ON. Sua carreira foi marcada principalmente pela dedicação ao estudo das marés.



ACERVO ON



Cartório do 2º Ofício de Vassouras - RJ

Figura 2. Certidão de compra e venda do terreno para instalação do Observatório Magnético de Vassouras

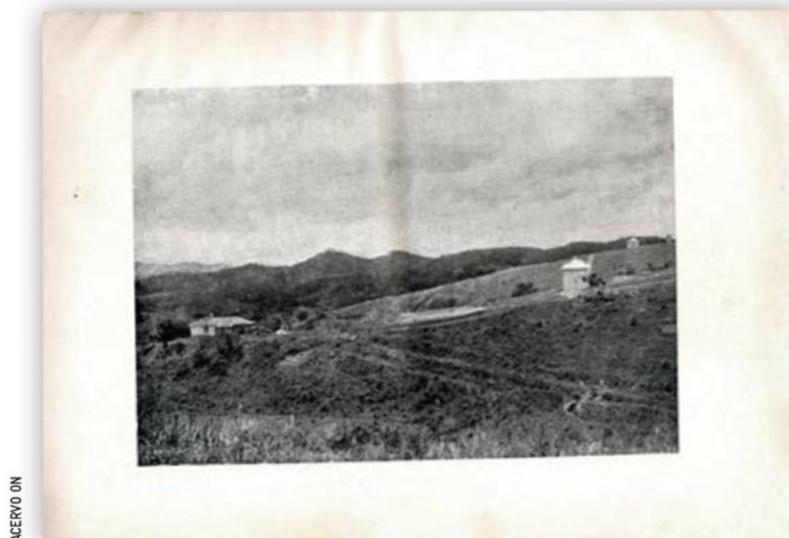


Figura 4. Vista geral do Observatório Magnético de Vassouras

foi construído com a intenção de medir os valores relativos e absolutos do magnetismo terrestre, além de determinar os valores de seus distintos componentes com instrumentos e métodos desempenhados por observatórios homólogos na Europa.

No início do século 20, grande parte da atenção do mundo científico era dispensada à meteorologia. Porém, o setor de magnetismo terrestre também experimentou grande desenvolvimento, e se iniciou uma fase de pesquisas sistemáticas nessa área. A propósito, é interessante ressaltar que o que hoje chamamos de magnetismo terrestre – ou geomagnetismo – estava anteriormente incluído nas atividades da meteorologia.

Figura 5: Observatório Nacional, em São Cristóvão



Desde a inauguração do OMV, os trabalhos da instituição não passaram despercebidos. No boletim magnético de 1914 a 1925, editado em 1926 por Lemos, o geofísico norte-americano John Lindsay é citado: ele havia elogiado as observações feitas no novo observatório brasileiro pelo geólogo por formação e astrônomo por profissão Claudio Chaves Imbuzeiro, então responsável pela atividade. Lindsey apontara que as medidas aferidas em Vassouras não precisariam ser refeitas pelo Instituto Carnegie, nos Estados Unidos, instituição que, à época, já era uma das principais referências mundiais em diversas áreas científicas, incluindo a geofísica. Afinal, o elevado padrão e o alto nível de confiabilidade dos dados coletados no OMV colocavam esse observatório entre os melhores do mundo. Foi esse padrão que levou, anos mais tarde, já em 1987, a Associação Internacional de Geomagnetismo e Aeronomia a conferir ao OMV, pelos serviços prestados, uma medalha de ouro.

A FERROVIA

A relação entre a estrada de ferro e a escolha de Vassouras como local de instalação de um observatório magnético, acreditamos, ultrapassa a mera questão da praticidade logística. Ao que tudo indica, tal implementação aconteceu em sintonia com interesses locais.

Com as construções das primeiras estradas de ferro no Brasil, a partir da segunda metade do século 19, se desenhou uma forte interação entre os interesses de investidores particulares e da iniciativa governamental. Governos locais, por meio de concessões, cediam áreas a empresas que se propunham a empreender as obras necessárias ao desenvolvimento de diferentes regiões do país. Essas concessões eram acompanhadas de uma série de regras para a desapropriação dos terrenos marginais às linhas; para a fixação de taxas de juros; para a isenção de impostos; entre outras determinações. E essa relação social entre a esfera pública e a esfera privada se tornou tão importante quanto os próprios conhecimentos técnicos dos engenheiros envolvidos nas obras.

Um detalhe: as obras de infraestrutura eram executadas pela aquisição de capital por meio de empréstimos ao mercado exterior garantidos pelo Governo Federal. Nesse contexto, vale lembrar que se uma empresa fosse vitimada por algum tipo de crise econômica, ela era então encampada pelo governo. Isso significa que, de diferentes formas, o empreendimento ferroviário recebeu boa parcela de investimentos do orçamento governamental.

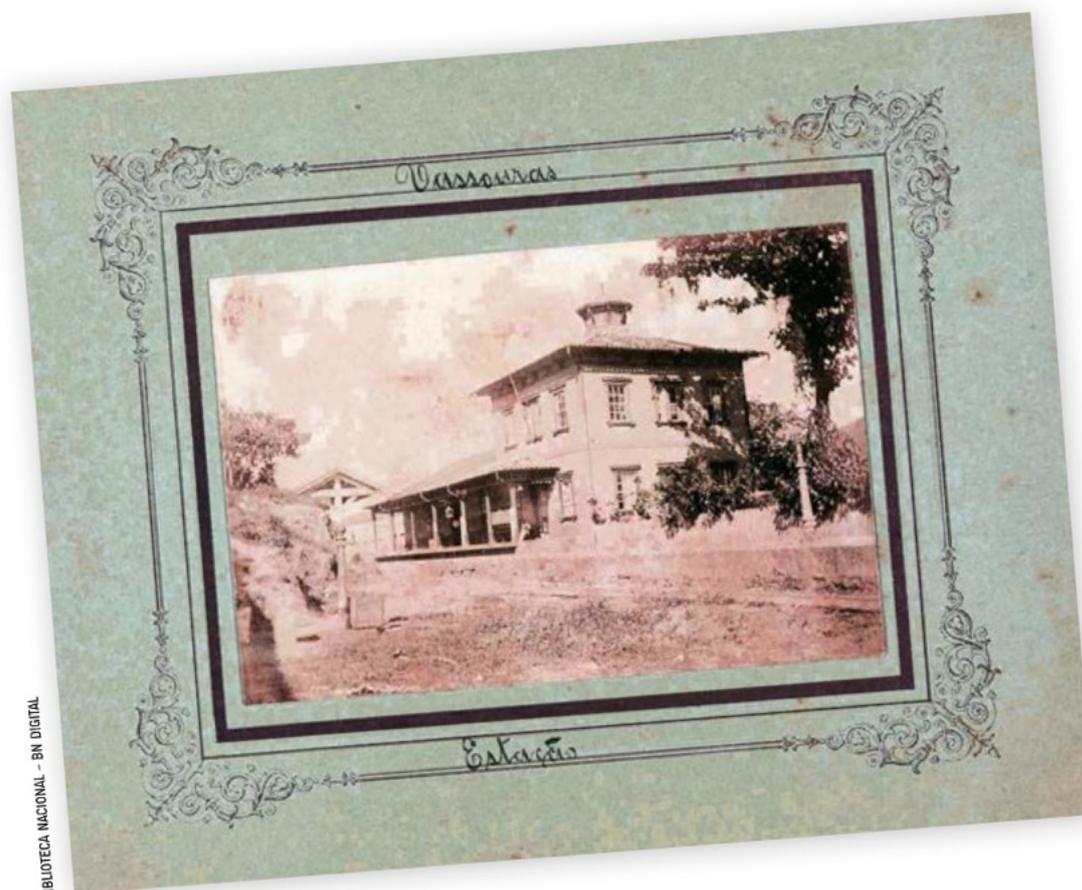
Em meio ao apogeu da cultura cafeeira no Vale do Paraíba, se fez necessária a instalação de trilhos ferroviários para que a produção escoasse até as margens do rio Paraíba do Sul. E, de lá, os caminhos se desdobrariam em direções opostas – para alcançar as províncias dos estados de São Paulo e Minas Gerais. Para a execução desse projeto nasceu, não sem conflitos, a Companhia Estrada de Ferro Dom Pedro II (CEFDPII).



Em nossa análise, entendemos que, embora a Estrada de Ferro Dom Pedro II (EFDPII) não tenha sido a primeira ferrovia do Brasil, ela foi o resultado possível e muito importante de um processo de embates entre sociedade e governo, iniciado em 1835. Pois foi das tensões em torno do caminho de ferro que atravessaria a serra do Mar que se formaram as bases para a implantação de ferrovias em todo o Brasil. Explica-se: as ferrovias eram parte da agenda das políticas públicas de infraestrutura, ou, como se dizia no linguajar da época, de melhorias materiais. Elas, assim como outros melhoramentos de infraestrutura que já vinham sendo pensados, começavam a sair do papel. Ou, melhor, esses projetos foram retomados a partir de 1848 – em grande medida a partir de uma linha política conservadora e modernizante, que reorganizou a concessão de linhas férreas para integrar a Corte, a região do Vale do Paraíba e as províncias de São Paulo e Minas Gerais pela da serra do Mar.

Replica-se constantemente na historiografia que o traçado da EFDPII colocou em lados opostos dos trilhos as famílias Darrigue Faro e Teixeira Leite. Conflitos travados em torno de questões técnicas e científicas evidenciaram fraturas entre essas duas importantes famílias da classe senhorial – muito influentes nas regiões de Vassouras, Pirai e Valença. Mas saíram vitoriosos os Darrigue Faro, do município de Barra do Pirai (RJ), que alegaram que o traçado da estrada de ferro, se passasse por tal localidade,

Figura 6. Antiga fotografia da Estação Férrea, que atendia Vassouras antes de 1914, ano em que foi construída a nova estação. A foto é de 1905



seria mais viável economicamente, dadas as características geográficas da região. Sabemos, porém, que diversas questões políticas também os favoreceram. E a reflexão acerca desse conflito pode evidenciar até que ponto certo discurso nacional poderia se confrontar com interesses locais. Assim, em um primeiro momento, ainda no século 19, Vassouras não conseguiu sua estação graças aos Darrigue Faro, que conseguiram fazer com que o traçado da estrada os favorecesse diretamente.

O médio Vale do Paraíba foi uma região pioneira na produção de café em larga escala. Essas terras – separadas geofisicamente da Baixada Fluminense, e também da praça de negócios do Rio de Janeiro e da Corte pela serra do Mar – eram irrigadas por um denso conjunto de caminhos e rotas percorridos por tropas de mulas. Mas esse sistema de transporte limitava, de certo modo, a expansão da cultura cafeeira para áreas mais distantes. Essa logística antiga também impunha limites às modificações no sistema produtivo do café. A construção de ferrovias se tornou algo interessante nesse contexto, pois diminuiria as possíveis perdas no transporte.

Os trilhos passaram a conectar novas regiões do Império. Com eles, as chamadas plantations – grandes extensões de terra destinadas, em geral, ao cultivo de uma só cultura – também passaram a ser abastecidas com mão de obra escrava. Nesses novos lugares, houve então a possibilidade de organizar o trabalho escravo com novos equipamentos, permitindo a modernidade e a civilização. Aquelas localidades, ainda que com produtividade já declinante, continuavam a apresentar perspectivas de bons negócios. Se para alguns fazendeiros a solução era expandir

Figura 7. Inauguração da Estação de Vassouras em 1914



A ILUSTRACÃO BRASILEIRA: 1 DE JUNHO DE 1914.

suas unidades produtivas para outras áreas, para outros a saída poderia ser investir em novos ramos de atividade. É nesse pensamento de futuro que entram em cena os debates em torno do traçado da EFDPII – e não em torno de objetivos imediatos, como tantos já afirmaram.

Nesse contexto, já na metade do século 19, as ferrovias se tornaram um importante ramo de investimento. Mas Vassouras, a princípio, não conseguiu o traçado que beneficiaria o município de maneira mais direta – isto é, com uma estação ferroviária que ligasse a cidade diretamente à capital (lembrando que o município, por aqueles tempos, incluía diversos distritos hoje emancipados: é o caso de Miguel Pereira; Paty do Alferes; Mendes; Paulo de Frontin; e parte de Paracambi, que tinha uma extensão bem maior do que a atual) (figura 6).

Agora, retomando o raciocínio, podemos entender o motivo pelo qual o OMV foi construído em Vassouras aproximadamente no mesmo período em que a cidade ganhou sua Estação Férrea (figura 7). A inauguração da estação acontece em 1914, enquanto o OMV entra oficialmente em funcionamento em 1915. Ambas as conquistas parecem dialogar com um contexto de investimentos em melhorias locais. Tudo indica que era uma tentativa de dar à cidade uma face moderna, ligada ao progresso – e transporte e ciência parecem ser bons aliados nessa intenção. Considerando esse panorama, portanto, nos parece que a instalação do OMV se justificou tanto por questões científicas quanto pelo diálogo com a perspectiva característica da época, que valorizava os investimentos ditos ‘modernos’.

É muito comum pensarmos nas cidades do Vale do Paraíba, no início do século passado, como decadentes. Eram, nas palavras do escritor Monteiro Lobato (1882-1948), cidades mortas. Isso porque aquele momento foi marcado pela transferência de grande parte da produção cafeeira para o oeste paulista e também para o norte do Paraná.

Porém, no período pós-café, cidades como Vassouras passaram por um processo de industrialização. E a principal estratégia do poder público era interligar os distritos à sede por vias rodoviárias e ferroviárias, além de investir em tudo aquilo que desse ao município um caráter progressista. Não foi à toa que, já em 1914, foram criadas a Companhia de Laticínios Vassourense e a Companhia Têxtil São Luiz. A ideia de progresso, afinal, estava bastante vinculada a inovações tecnológicas e industriais. A noção de ciência também era face evidente do progresso, e o OMV de alguma maneira acabava por coroar todos esses anseios de modernidade. Por mais que o geomagnetismo não fosse algo de notável presença em debates públicos, não há dúvidas de que um observatório daria à cidade uma perspectiva moderna e científica.

O OMV de fato precisava de uma cidade. Mas, ao que parece, também a cidade precisava de uma instituição que coroasse sua noção de desenvolvimento e progresso.

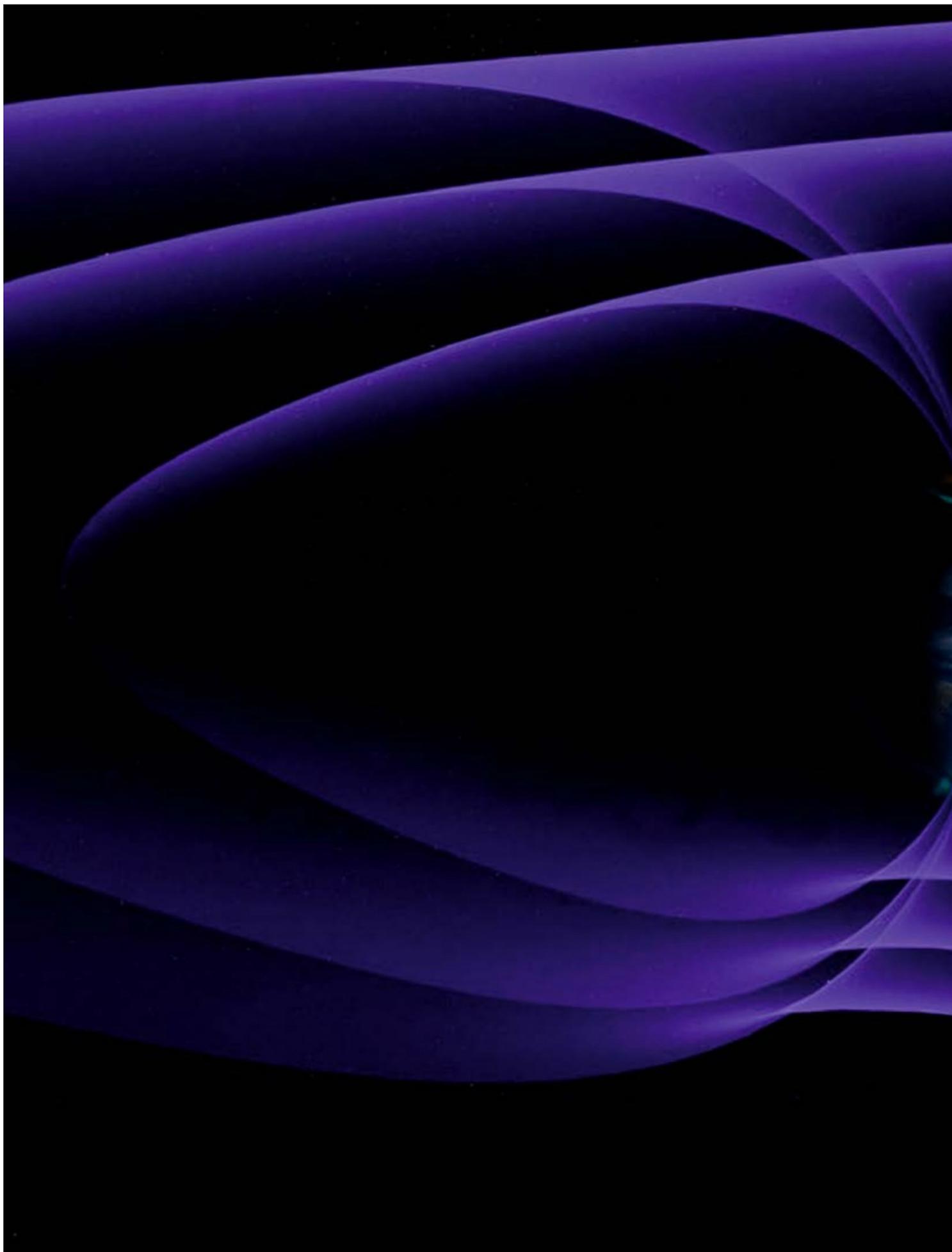
SUGESTÕES PARA LEITURA

BARRETO, Luiz Muniz. *Observatório Nacional: 160 anos de História*. Rio de Janeiro: Observatório Nacional/CNPq/MCT, 1987.

MORIZE, Henrique. *Observatório Astronômico – um século de história (1827-1927)*. Rio de Janeiro: MAST/Salamandra, 1987.

VIDEIRA, Antônio Augusto Passos. *‘História do Observatório Nacional: a persistente construção de uma identidade científica’*. Rio de Janeiro: Observatório Nacional, 2007.



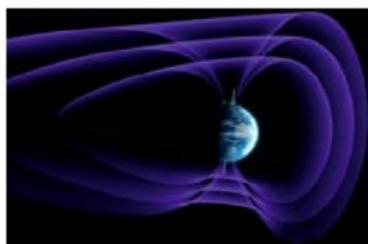


PRIMEIRAS OBSERVAÇÕES MAGNÉTICAS NO BRASIL

Oscar T. Matsuura

*Museu de Astronomia e Ciências Afins (MAST)
e Programa de História das Ciências
e das Técnicas e Epistemologia (HCTE),
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)*

Desde início do século 13, navegadores do Mediterrâneo se orientavam por representações cartográficas que hoje chamamos de cartas-portulano. Eram mapas primitivos – seus traçados eram orientados segundo a direção indicada pela agulha da bússola. Os portugueses, por exemplo, usaram essa forma de representação para explorar a costa ocidental da África na primeira metade do século 15. Porém, em qualquer localidade da superfície da Terra, o Norte magnético – isto é, a direção indicada pela agulha da bússola – quase nunca coincide com o Norte geográfico – isto é, a direção que usualmente chamamos de Norte. Esse fenômeno intrigou navegadores, exploradores e cientistas durante muito tempo, e o desvio entre essas duas direções ficou conhecido como declinação magnética. Por que isso acontece? Como evoluíram e se expandiram os estudos desse fenômeno? E quais foram as contribuições do Brasil na investigação desse interessante campo de pesquisa?



Ao observarmos o movimento diário dos astros, notamos que eles transitam de Leste para Oeste. É que a Terra gira no espaço no sentido contrário, e a partir dessa rotação podemos definir o Norte e o Sul geográficos. O eixo de rotação do planeta ‘fura’ sua superfície como uma haste imaginária que interliga o polo Norte geográfico ao polo Sul geográfico. Se caminhamos na superfície da Terra em direção ao Norte geográfico, chegaremos ao polo Norte. E, se caminhamos em direção ao Sul geográfico, chegaremos ao polo Sul.

Enquanto o Norte e o Sul geográficos são consequência do movimento da rotação terrestre, o Norte e o Sul magnéticos são resultado do campo magnético do nosso planeta – provocado pela dinâmica de uma imensa massa de metal líquido presente no interior da Terra. É esse campo que orienta o funcionamento das bússolas (figura 1). Acontece que o Norte magnético quase nunca coincide com o Norte geográfico (figura 10).

A declinação magnética (que, a partir de agora, chamaremos simplesmente de declinação) não era conhecida no mundo ocidental até o final do século 15. Quando observada, essa diferença era atribuída a algum defeito na bússola; ou à presença de alguma montanha magnética nas proximidades. Talvez o primeiro registro de declinação seja do navegador genovês Cristóvão Colombo (1451-1506), em sua viagem de 1492 às Índias Orientais.

Quanto ao Brasil, datam provavelmente do século 16 as primeiras observações referentes à declinação. O cartógrafo português João de Castro (1500-1548), futuro vice-rei da Índia Portuguesa, fez observações da direção apontada pela bússola enquanto cruzava o Atlântico Sul. Ele registrou essas medidas em seu *Roteiro de Lisboa a Goa*, de 1538. Castro se aproximou do litoral Nordeste do Brasil e visitou Porto Seguro. Infelizmente, a carta-portulano que ele usou nesse trajeto não foi preservada. Mas era, na verdade, uma versão rudimen-

tar de uma carta isogônica – um mapa geográfico em que são sobrepostas curvas que indicam locais onde a declinação é constante. Assim como as curvas de nível indicam locais de mesma altitude em uma carta topográfica, as curvas de uma carta isogônica indicam os locais com as mesmas medidas de declinação (figura 2-A).

Já na transição do século 14 para o 15, quando navegadores portugueses retornavam de suas viagens à África, eles usualmente passavam pelas proximidades das ilhas Canárias. Nesse trajeto, enfrentavam grandes dificuldades impostas pelos ventos contrários e pelas correntes marítimas. Mas tais desafios podiam ser superados, concluíram

Figura 1. Bússola náutica
L. Casella & Companhia
José Maria dos Reis



ACERVO MAST / FOTO: JAIME ACIOLI

eles, caso se afastassem da costa até a altura dos Açores, seguindo, então, de lá para Lisboa. Isso deu lugar à chamada navegação astronômica: sem poder enxergar as costas, os navegadores passaram a analisar a posição dos astros para determinar a latitude. Assim surgiu a cartografia náutica das cartas de latitude, em que os paralelos do globo eram representados por linhas retas orientadas na direção Leste-Oeste. Mas, de forma incoerente, geralmente o Norte continuava sendo o magnético!

Foram nessas cartas que apareceram as primeiras representações do Brasil e da África. Uma delas é o *Planisfério de Cantino* (figura 2-B), de autor português anônimo, preservado na Biblioteca Estense, em Modena, na Itália, para onde teria sido contrabandeado em 1502.

Compilando cartas de latitude da época do descobrimento, o engenheiro brasileiro Guilherme Wendel reconstituiu *A declinação magnética no Brasil na época da descoberta* (publicada pelo Instituto Astronomico e Geophysico de São Paulo, em 1933) com base no ‘torcimento (*sic*) da linha costeira nos primeiros mapas’. Esse ‘torcimento’ – ou deformação – da linha costeira era causado pela diferença entre o Norte geográfico e o Norte magnético.

NAVEGAR E MEDIR

Além das variações da declinação de um local para outro, em 1634 foi anunciado que ocorriam também variações temporais. De fato, o campo magnético da Terra apresenta variações em várias escalas de tempo: desde as mais lentas, observadas ao longo dos séculos; até as mais rápidas, correspondentes até mesmo à fração do segundo.

Figura 2-A. Carta isogônica do Atlântico Sul, de Halley
Figura 2-B. Colagem dos pergaminhos do Planisfério de Cantino. A costa nordeste do Brasil aparece à esquerda, cortada pela linha do Tratado de Tordesilhas

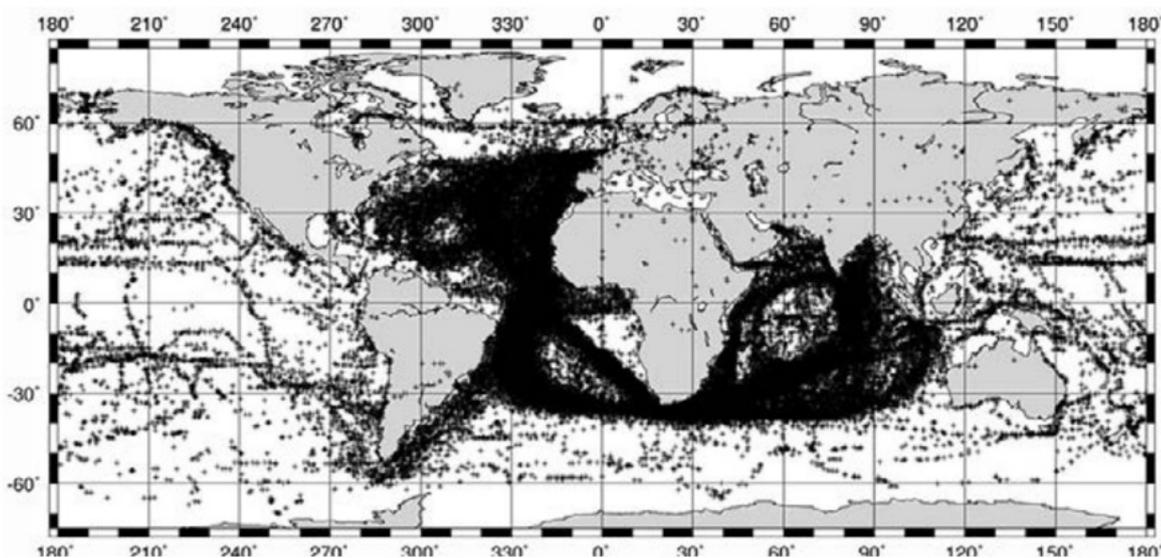


Diante das várias questões que esse novo conhecimento trazia à tona, coletar medidas magnéticas costeiras e em alto-mar acabou se tornando uma tradição entre navegadores. Tanto embarcações mercantes quanto navios de guerra passaram a anotar esses dados em diferentes regiões do globo, com o objetivo de aprimorar as cartas, os instrumentos e os métodos de navegação. Também era de interesse monitorar a variação secular da declinação. A prática só terminou nas primeiras décadas do século 20, com o advento das bússolas giroscópicas. São instrumentos que, baseados na rotação de um disco que interage com a rotação da Terra, indicam o Norte geográfico.

Um minucioso e extenso levantamento, realizado em diários de bordo de viagens marítimas entre 1510 e 1930, apurou 151 mil medições de declinação; 19 mil de inclinação (ângulo que a agulha magnética, livremente suspensa pelo seu centro de gravidade, forma com o plano horizontal); e 16 mil de intensidade relativa (figura 3). Com efeito, o campo magnético da Terra é uma grandeza vetorial. Isso significa que, além da intensidade, ele também atua em uma certa direção (ver 'O campo magnético na cidade do Rio de Janeiro'). Os primeiros magnetômetros, que são instrumentos usados para medir a direção e a intensidade do campo magnético, só forneciam a intensidade relativa – isto é, a intensidade de acordo com as medidas aferidas por algum instrumento adotado como padrão.

Como já mencionamos, hoje se sabe que o campo magnético da Terra é gerado principalmente pelos movimentos do fluido presente no núcleo externo do planeta. Esse fluido é composto, basicamente, por ferro e níquel no estado líquido – tais elementos ficam submetidos a temperaturas da ordem de 7.000°C. Mas ainda não sabemos, por exem-

Figura 3. Distribuição geográfica de 68.076 dados de declinação obtidos entre 1700 e 1799



plo, por que longos períodos de aparente estabilidade desse campo sofrem ocasionais inversões de polaridade: o norte magnético se torna sul magnético, e vice-versa.

Já há, no entanto, teoria e modelos matemáticos bem desenvolvidos, assim como recursos computacionais para a simulação do campo magnético terrestre presente, passado e futuro. Para aprimorar esse conhecimento, pesquisadores que estudam o magnetismo terrestre – ou geomagnetismo – demonstram grande interesse pela coleta de dados históricos.

HALLEY E PRIMEIRAS OBSERVAÇÕES NO RIO DE JANEIRO

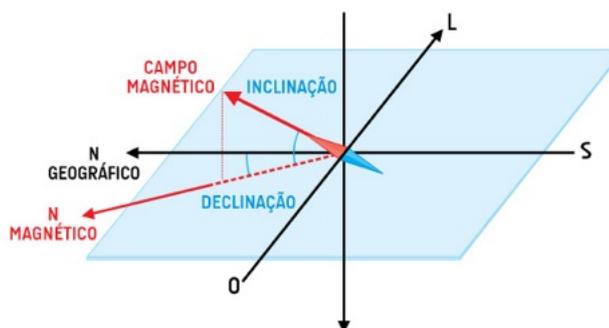
Em 1700, o inglês Edmond Halley (1656-1742), que deu

seu nome ao famoso cometa, apresentou em uma reunião da *Royal Society*, em Londres, a versão preliminar da sua carta magnética do Atlântico (figura 2-A). Foi a primeira carta isogônica publicada que sobreviveu aos dias de hoje. Halley tinha feito três viagens ao Atlântico, entre 1698 e 1701. Ele fora como capitão da HMS *Paramore*, primeira embarcação construída especificamente para pesquisa científica. O objetivo de Halley era conhecer melhor a idade, o interior, a origem e a evolução do nosso planeta. Por isso, o propósito de suas medições magnéticas transcendia o mero uso para navegação.

Cerca de oito décadas mais tarde, agora em solo brasileiro, o astrônomo real da coroa portuguesa, Bento Sanches Dorta (1739-1795), inaugurou a prática de observações sistemáticas em astronomia, meteorologia e magnetismo em local fixo no Brasil. Ele ficou alojado em um observatório criado em 1730, pelos jesuítas, em um convento no Morro do Castelo, na cidade do Rio de Janeiro (RJ). Seu país de origem, Portugal, já estava de certo modo imerso na atmosfera do Iluminismo e adotava práticas científicas modernizantes, não só em seu próprio território, como também no Brasil. Uma dessas práticas avançadas era o uso da geodésia. Enquanto a topografia lida com regiões limitadas da

O CAMPO MAGNÉTICO NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

• Na Física, o campo magnético é considerado uma grandeza vetorial porque, além da intensidade (ou magnitude), ele tem também uma direção. Graficamente, um vetor é representado por uma seta cujo comprimento indica a intensidade e cuja orientação indica a direção. Uma agulha magnética, quando suspensa pelo seu centro de gravidade, indica a direção do campo magnético da Terra. O ângulo formado entre o Norte geográfico e o Norte magnético é o que chamamos declinação magnética. Atualmente, no Rio de Janeiro, essa medida é de aproximadamente 22° a Oeste do Norte geográfico. Já o ângulo que o vetor campo magnético forma com o plano horizontal é chamado inclinação magnética. No Rio de Janeiro, esse ângulo é de cerca de 39°.



A componente horizontal do campo magnético se projeta no plano horizontal, levemente sombreado. O ângulo nesse plano entre o Norte geográfico e o Norte magnético é chamado declinação magnética. Atualmente, no Rio de Janeiro, esse ângulo é de aproximadamente 22° a Oeste do Norte geográfico

superfície da Terra, que admitem a aproximação plana, a geodésia lida com grandes extensões em que a forma aproximadamente esférica do planeta já não pode ser ignorada. A principal missão de Sanches Dorta no Brasil era demarcar fronteiras, nos termos do Tratado de Santo Ildefonso, de 1777.

Por problemas burocráticos, entretanto, Sanches Dorta não pode partir para realizar sua missão e acabou ficando no Rio de Janeiro. Assim, ele realizou lá uma série de observações sobre a declinação e sua variação – dentro de um programa contínuo e sistemático de observações meteorológicas, entre 1781 e 1788, considerado o primeiro da América do Sul.

Foram aproximadamente 20 mil medições magnéticas: cerca de 7 por dia, feitas a cada 2 horas do período diurno. Antes de 1830, somente em poucos locais fixos medições magnéticas tinham sido feitas durante longos períodos de tempo – Londres, Edimburgo, Paris, Roma. Essas observações de Sanches Dorta, provavelmente não programadas e muito anteriores à criação do primeiro observatório magnético português na Universidade de Coimbra, em 1866, nos autorizam incluir a cidade do Rio de Janeiro nessa seleta lista.

Figura 4. Bússola topográfica G. Adams



As medidas foram obtidas com uma agulha magnética de 15cm e 12g – instrumento que, apesar de simples, tinha boa qualidade de fabricação, manufaturado pelo construtor inglês George Adams (c.1709-1773), na Inglaterra (figura 4).

QUEDA DE NAPOLEÃO

A abertura dos portos brasileiros às nações amigas, após a vinda da família real em 1808, atraiu viajantes naturalistas e missões estrangeiras para reconhecer o território, a natureza e as riquezas do país. Dentre as ações que expressavam a aliança entre a França real e o Brasil antibonapartista, podemos citar a Missão Artística Francesa, de 1816. Nesse contexto, diversas observações magnéticas foram feitas em nosso território pelo contra-almirante Albin-Reine Roussin (1781-1854), da Marinha da França, no levantamento hidrográfico ordenado pelo rei Luís XVIII. Esse levantamento foi realizado entre 1819 e 1820 – e os resultados foram publicados no livro *Le Pilote du Brésil* (obra sem tradução para o portu-

ACERVO MAST. FOTO: JANKE ACIQU

guês), em 1845. Em dez meses, essa missão visitou 800 locais, desde Santa Catarina até o Maranhão, e a declinação foi determinada para 51 diferentes lugares.

A descrição do instrumento magnético usado por Roussin é lacônica: uma bússola de grande diâmetro com a qual era medida a declinação da agulha magnética. Já os instrumentos astronômicos eram sofisticados e os métodos utilizados foram descritos com detalhe.

A invenção do cronômetro náutico (figura 5), pelo inglês John Harrison (1693-1776), por volta de 1760, possibilitou pela primeira vez um método confiável para a determinação da longitude em alto-mar (método cronométrico). Determinar a longitude, até então, era um problema que se arrastava há dois séculos. Conseqüentemente, na navegação, as medições magnéticas cederam importância às medições astronômicas, assim como aos instrumentos e métodos usados nessa tarefa.

Roussin tinha um instrumento chamado círculo repetidor de Lenoir, com duas lunetas (figura 6), para medir distâncias zenitais: é o ângulo entre um astro e o zênite, complementar à altura do astro acima do horizonte (lembrando que zênite é o ponto imaginário, no céu, interceptado por um eixo vertical traçado a partir da cabeça de um observador localizado sobre a superfície terrestre). Com esse instrumento, o princípio de repetição da medição era engenhosamente aplicado para melhorar a precisão das medidas. Roussin tinha, ainda, uma luneta Carrochez, que media com precisão o ângulo de separação entre dois objetos no horizonte; e círculos de reflexão (figura 7), semelhantes a sextantes náuticos (figura 8); além de horizontes artificiais (figura 9) para simular o horizonte quando ele não podia ser visto por conta do mau tempo ou em noites sem Lua; cronômetros náuticos de precisão; entre tantos outros equipamentos.

Outro importante personagem da história das medições magnéticas no Brasil foi o almirante e astrônomo francês Amédée Mouchez (1821-1892). Dentre as várias missões marítimas de que foi incumbido, realizou uma extensa e detalhada campanha hidrográfica no litoral do Brasil, do Uruguai e da Argentina entre 1856 e 1866. Em 1878, ele se tornaria diretor do Observatório de Paris. Entre 1864 e 1874, Mouchez publicou em várias partes a obra *Les côtes du Brésil* (também sem tradução para o português).



Figura 5. Um cronômetro náutico de Berthoud

Figura 6. Círculo repetidor de Lenoir com duas lunetas Brunner Frères





Figura 7. Círculo de reflexão
Pistor & Martins

Figura 8. Sextante Etienne
Lorieux, A. Hurliman. Foi usado
em 1892 por astrônomos do
Observatório do Rio de Janeiro
na determinação da nossa futura
capital, Brasília

não só as coordenadas geográficas de várias localidades do litoral e do interior alcançáveis por rios, como também a descrição física, os recursos naturais, a população, as atividades comerciais e a história – tudo com impressionante grau de detalhe. A publicação trazia também mapas e diversos desenhos de paisagens. Quanto às medidas magnéticas registradas, elas são apenas de declinação. Após comparar seus dados com os de Roussin, Mouchez estimou em $6'15''$ (6 minutos e 15 segundos) para Oeste a variação anual da declinação no Nordeste brasileiro.

Outro mérito de Mouchez foi ter conseguido alta precisão na determinação da longitude em terras brasileiras. Para isso, ele usou o método cronométrico e uma luneta meridiana portátil.

Essa luneta, em montagem que pode girar em torno de um eixo orientado na direção Leste-Oeste, pode ser apontada para astros quando, em seu movimento diário de Leste para Oeste, cruzam o meridiano (círculo vertical que passa no horizonte pelos pontos cardeais Norte e Sul).



HUMBOLDT E GAUSS

No século 19, um importante passo foi dado para o desenvolvimento observacional e teórico do geomagnetismo – essa área do conhecimento, afinal, estava entre os vários



Figura 9. Horizonte artificial L. Casella. Foi usado por astrônomos do Imperial Observatório do Rio de Janeiro na ilha de Saint Thomas, Antilhas, no trânsito de Vênus de 1882

interesses científicos do nobre prussiano Alexander von Humboldt (1769-1859). Na viagem de exploração que fez em 1799 à América Central e à América do Sul, fez observações da inclinação e da intensidade relativa do campo magnético. Ele usou um magnetômetro desenhado e construído em 1766 pelo físico e navegador francês Jean-Charles de Borda (1733-1799). O princípio desse equipamento era que a intensidade do campo magnético é proporcional ao inverso do quadrado do período de oscilação da agulha magnética nesse campo. E, viajando do hemisfério norte rumo ao sul, Humboldt notou que a intensidade e a inclinação decresciam. Porém, a agulha magnética só ficou perfeitamente horizontal a cerca de 7° ao sul do equador. Tratava-se de uma observação científica da maior importância: foi assim que Humboldt descobriu o equador magnético – que não coincide com o equador geográfico, assim como também não coincidem os polos magnéticos e geográficos da Terra (figura 10).

Entre 1806 e 1807, perto de Berlim, Humboldt continuou medindo as variações do campo magnético. Ele se interessou pelas variações irregulares de curto período, denominadas tempestades magnéticas. Estão geralmente associadas a auroras – fenômenos luminosos observados em altas latitudes, perto dos polos magnéticos, causados por cargas elétricas lançadas em explosões solares. Essas variações, diferentemente daquelas já então conhecidas, que ocorriam de acordo com a hora do dia de cada localidade, ocorriam simultaneamente em diferentes localidades do globo. Isso inspirou Humboldt a criar uma rede mundial de observatórios magnéticos fixos. Por problemas políticos, entretanto, ele teve que deixar a Alemanha. Foi para Paris, de onde só voltaria em 1829 para retomar suas observações magnéticas e o projeto da rede de observatórios. Sob sua influência, foi estabelecida uma rede de observatórios

ACERVO MAST; FOTOS: JAIME ADOLU

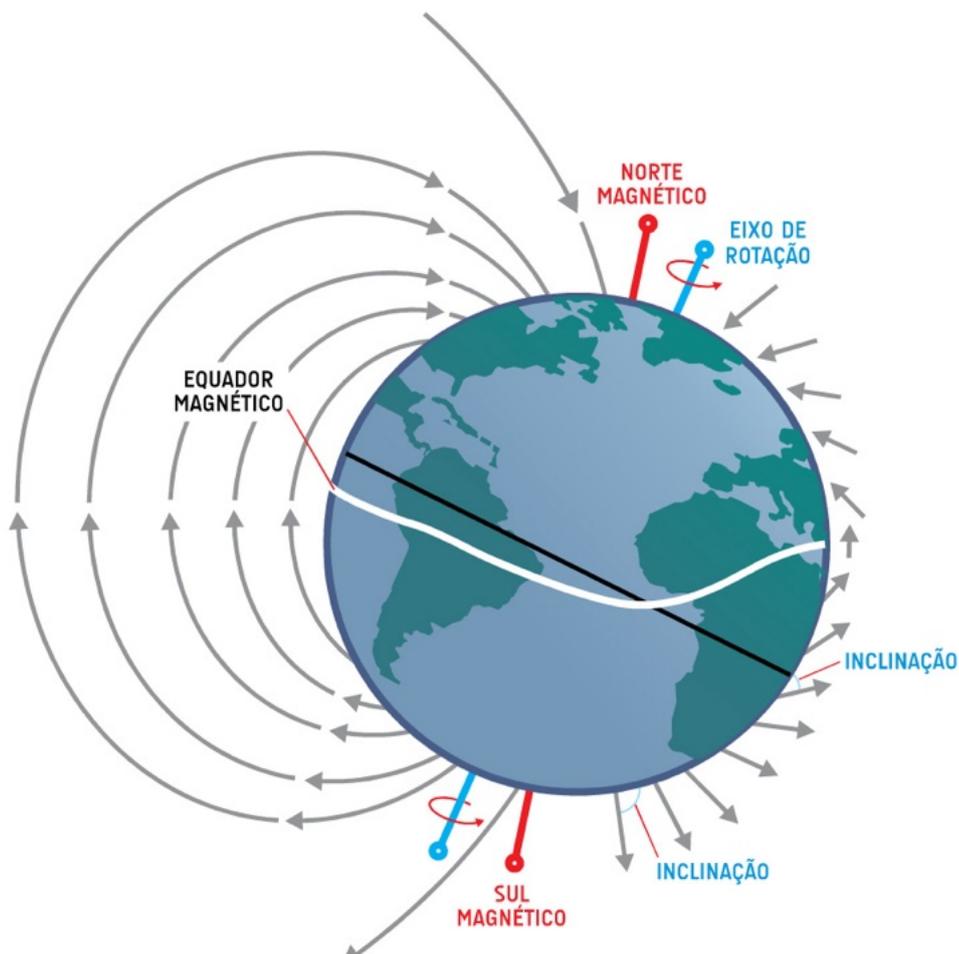


Figura 10. Polos e equador magnético da Terra

magnéticos em Berlim (Alemanha), Freiberg (Alemanha), Greenwich (Inglaterra), Paris (França), Cazã (Rússia) e São Petersburgo (Rússia). Em seguida, foram também instalados observatórios em possessões inglesas: Santa Helena, Cabo da Boa Esperança, Tasmânia, Nova Zelândia, ilhas Falkland, Toronto, Cingapura e Índia.

Também foi Humboldt o responsável por despertar no notável matemático alemão Johann Carl Friedrich Gauss (1777-1855) o interesse pelo geomagnetismo. Em 1832, Gauss concebeu e construiu, no Observatório de Göttingen (Alemanha), um magnetômetro que media a declinação e a intensidade, desta vez absoluta, da componente horizontal do campo magnético da Terra. Sendo um vetor, o campo magnético pode ser decomposto em três componentes perpendiculares entre si. A componente horizontal, como o nome sugere, é aquela que se projeta sobre o plano horizontal (ver 'O campo magnético na cidade do Rio de Janeiro'). Um magnetômetro de intensidade absoluta fornece medidas que permitem sua comparação direta com qualquer medida de outro magnetômetro de intensidade absoluta. Para que isso fosse possível, Gauss utilizou uma agulha magnética de maior massa, de vários quilogramas, suspensa pelo centro de gravidade por uma fibra. A agulha tinha um espelho preso na extremidade. Esse espelho, observado a vários metros por um telescópio, refletia uma escala fixada no pedestal do

telescópio e permitia medir pequenas oscilações com grande precisão. O instrumento era robusto e preciso, adequado para ser instalado numa ampla sala de um observatório e operar ininterruptamente.

Mas como se fazia cada vez mais necessário coletar medidas em diferentes localidades do globo, a serem visitadas periodicamente por expedições científicas, se percebeu que seria necessário o desenvolvimento de instrumentos mais práticos e portáteis. Surgiram então modelos de equipamentos acompanhados de manuais que estabeleciam padrões de procedimentos, como o *Kew pattern* (ou padrão *Kew*), do famoso observatório magnético de mesmo nome, em Londres, fundado pelo rei Jorge III (1738-1820).

Tendo também lidado com grande volume de dados magnéticos quando se encarregou de compilar e publicar os dados que recebia da rede de observatórios, Gauss se preocupou em criar uma codificação precisa e elegante para descrever o campo global da Terra e possibilitar a análise da sua variação espacial e temporal. Assim, em 1839 ele criou o famoso método dos harmônicos esféricos. Decompondo o campo magnético da Terra em componentes de diferentes escalas temporais e espaciais, reconheceu que a componente de dipolo, como a de um ímã permanente, era a mais importante (80% a 90%). Sua origem é que é atribuída ao núcleo externo da Terra.

NO INTERIOR DO PAÍS

Como consequência do desenvolvimento teórico, instrumental e observacional do magnetismo terrestre, agora encarado como fenômeno global, o geomagnetismo começou a ganhar autonomia como disciplina científica. Com interesses menos utilitários e mais científicos, houve no Brasil um surto de expedições magnéticas a partir das últimas décadas do século 19. No período de transição da Monarquia para a República, foram realizados três levantamentos, abrangendo desta vez o interior do país.

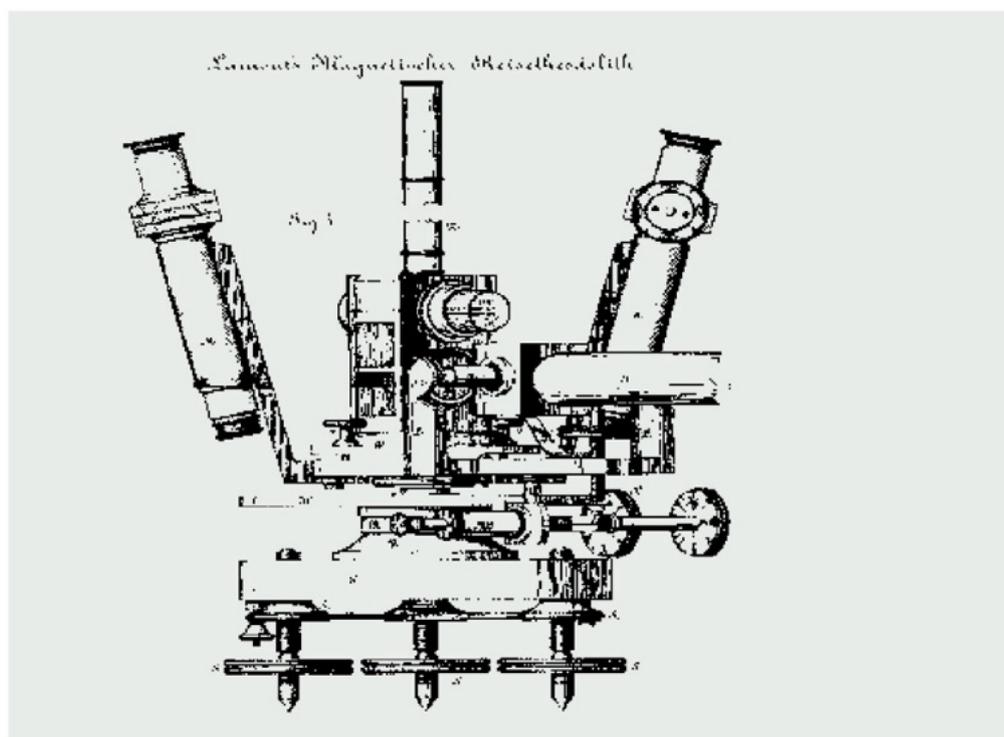
O primeiro deles foi feito pelo holandês Elie Van Rijckevorsel (1845-1928). Em uma época quando a atividade científica começava a se profissionalizar na próspera Holanda do século 19, Van Rijckevorsel era um aristocrata rico e com titulação acadêmica. Por meio de bons relacionamentos pessoais, gozava do beneplácito da academia e do patrocínio do governo para concretizar seus próprios projetos científicos. O desenvolvimento da ciência desinteressada angariava prestígio nacional perante outras potências da época. E era também prezado pela burguesia local. Van Rijckevorsel já tinha feito um levantamento magnético no arquipélago malaio, nas Índias Orientais Holandesas, na região de Batávia (atual Jacarta), atual Indonésia. Isso lhe rendera experiência prévia em coleta de medidas magnéticas e, além disso, o explorador se familiarizou com as dificuldades próprias do clima tropical.

CRÉDITO: SOFFEL, H., JOHANN VON LAMONT (1805-1879): A PIONEER IN GEOMAGNETISM, THE IR QUARTERLY, WINTER 2004-5, 34, 4, 1-31, 2005

Chegando aqui, em dezembro de 1880, Van Rijckevorsel recebeu apoio pessoal do então imperador Dom Pedro II para os deslocamentos por trem ou vapor. Na primeira parte da missão, prejudicada por uma prolongada estação de chuvas, obteve algumas medições na costa oriental do Brasil e em Fernando de Noronha. Na sequência, sofreu revezes – como o naufrágio do vapor da Marinha Imperial no litoral do Maranhão. E seu assistente veio a morrer por uma febre que havia contraído em Belém (PA). O pesquisador holandês ainda teve sérios problemas com seus equipamentos: houve o rompimento do retículo da ocular de telescópios; a explosão de níveis de bolha contendo álcool; a oxidação de agulhas magnéticas e espelhos. O próprio Van Rijckevorsel contraiu malária, sua velha ‘amiga’ desde os tempos de exploração no Sudeste Asiático.

Apesar de tantas dificuldades, Van Rijckevorsel fez medições no Maranhão e no Piauí – não só em localidades costeiras, mas também penetrando no interior através de rios importantes. De volta a Belém, conheceu o assistente substituto enviado da Holanda, que lá permaneceu por cerca de um ano fazendo medições, já que Belém, assim como Niterói, abrigaria um observatório fixo para a obtenção contínua, por cerca de um ano, de medidas da variação diária e anual do campo magnético. Todos os outros locais seriam estações em que as medições seriam feitas só durante visitas de poucos dias. Mas Van Rijckevorsel teve

Figura 11. Magnetômetro de Lamont



que retornar para a Holanda entre maio de 1882 e junho de 1883 – ele precisava se convalescer. Depois, de volta ao Brasil, deu sequência à sua missão. Fez medições no interior do Pará e na ilha de Marajó. Em dezembro de 1883, depois de ter feito observações em 54 localidades, seguiu com seu assistente para o Rio de Janeiro.

Enquanto o assistente permaneceu no observatório fixo montando em Niterói, Van Rijckevorsel iniciou sua expedição pelo rio São Francisco em março de 1884, em Carandaí (MG), a partir do então último ponto servido por trem e telégrafo. O telégrafo era um recurso de ponta na época, e possibilitava a mais precisa determinação da longitude. Sem telégrafo, a hora era determinada por cronômetros, mas, como a regularidade de sua marcha era prejudicada por choques ocasionais durante o transporte, era necessário contar com uma bateria de cronômetros cuja marcha era continuamente monitorada para a escolha de um cronômetro mais confiável. Em Sabará (MG), às margens do rio das Velhas, foi construído um bote quadrado deselegante, mas que resistiu a corredeiras e chegou até as cataratas de Paulo Afonso, de onde a expedição seguiu um pequeno trecho por ferrovia, chegando a Penedo (AL), em um vapor de passageiros. Depois de realizar medidas em 50 localidades, Van Rijckevorsel estava de volta ao Rio de Janeiro em outubro daquele mesmo ano. De Niterói, os dois exploradores fizeram uma expedição final pelas redondezas para tomar medidas em mais 5 localidades fluminenses.



Figura 12. Teodolito astronômico de Bamberg. Este, de número 11.424, foi utilizado por Domingos da Costa. Fornecedor: Janowitzzer Vuit & Cia., rua da Candelária 11, Rio de Janeiro

ACERVO MAST. FOTO: JAIME ACIOLI

Os observatórios fixos eram casinhas construídas sem pregos – pois o metal poderia interferir no funcionamento dos aparelhos. Essas pequenas casas abrigavam um magnetômetro de Lamont (figura 11), instrumento criado pelo escocês Johann Von Lamont (1805-1879), diretor do Observatório Geomagnético de Munique. E abrigavam também um teodolito portátil (figura 12), acoplado a um magnetômetro capaz de medir inclinação, declinação e intensidade horizontal do campo magnético.

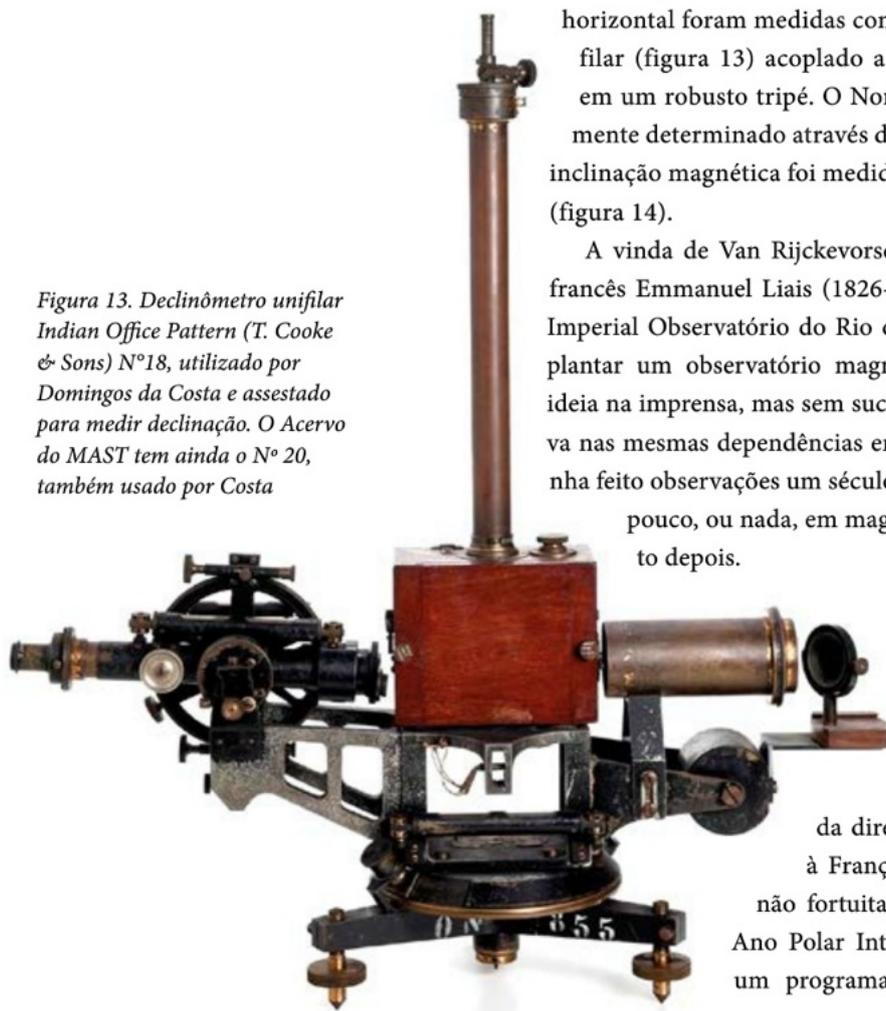
Na apresentação do resultado final da expedição de Van Rijckevorsel, o mapa do Brasil foi dividido em três partes. Todas as medições foram tratadas matematicamente como se tivessem sido obtidas numa mesma data e horário de referência (às 10h de 1° de janeiro de 1883). Para o norte da latitude 8° Sul, a redução foi feita com base nas observações de Belém; para o sul da latitude 15° Sul, nas de Niterói; e, para a região intermediária, foi usada a média aritmética. Por falta de dados próprios, a correção para a variação secular foi feita com base nas observações anteriores de outros autores.

Nas estações visitadas, a declinação e a intensidade horizontal foram medidas com um declinômetro unifilar (figura 13) acoplado a um teodolito montado em um robusto tripé. O Norte geográfico era geralmente determinado através da observação do Sol. E a inclinação magnética foi medida com um inclinômetro (figura 14).

A vinda de Van Rijckevorsel ao Brasil estimulou o francês Emmanuel Liais (1826-1900), então diretor do Imperial Observatório do Rio de Janeiro (IORJ), a implantar um observatório magnético. Liais alardeou a ideia na imprensa, mas sem sucesso. O IORJ ainda estava nas mesmas dependências em que Sanches Dorta tinha feito observações um século antes, sendo que muito pouco, ou nada, em magnetismo tivesse sido feito depois.

O primeiro observatório magnético só viria a ser criado em 1882, um ano após Liais se demitir da direção do IORJ e retornar à França. Isso coincidiu, talvez não fortuitamente, com o Primeiro Ano Polar Internacional (1882-1883), um programa científico que incluía

Figura 13. Declinômetro unifilar Indian Office Pattern (T. Cooke & Sons) N°18, utilizado por Domingos da Costa e assestado para medir declinação. O Acervo do MAST tem ainda o N° 20, também usado por Costa



observações geomagnéticas e de auroras nos polos. Por ser dispendioso, foi organizado um programa de colaboração internacional do qual o Brasil não participou, apesar de todos os observatórios do mundo terem sido convidados a fazer observações conjuntas.

Em 1888, um decreto imperial criou no Ministério da Marinha a Repartição Central Meteorológica para, dentre outras atribuições, centralizar as observações meteorológicas e magnéticas em âmbito nacional e produzir “uma perfeita e minuciosa carta meteorológica e magnética do Imperio (*sic*)”. Não passa despercebida, nesse decreto, a íntima ligação entre meteorologia e magnetismo – talvez porque observações magnéticas e meteorológicas tinham, em comum, a necessidade de serem feitas em diferentes localidades do território nacional, diferentemente das observações astronômicas. De fato, desde 1862 navios hidrográficos da Marinha começaram a fazer observações meteorológicas no litoral e em bacias hidrográficas. A partir de 1886, a Repartição dos Telégrafos também estabeleceu e manteve uma rede de postos meteorológicos pelo país. O fato é que, com o decreto imperial, os trabalhos meteorológicos, que eram efetivamente realizados pelo IORJ, assim como os magnéticos, caso houvesse, deveriam ser subordinados à Marinha.

NACIONALISMO REPUBLICANO

Os dois próximos levantamentos seriam realizados no Brasil republicano por filhos da terra. No pano de fundo, estavam as velhas dicotomias entre republicanos e monarquistas; positivistas militares e uma ala dos professores civis da Escola Politécnica do Rio de Janeiro; partidários da ciência utilitária e defensores da pesquisa pura e da ciência desinteressada.

Entre 1903 e 1904, o capitão-tenente Américo Brazílio Silvado, então diretor de meteorologia da Marinha e chefe da 1ª Comissão Magnética Brasileira, realizou um amplo levantamento magnético pelo país, apresentado como se tivesse sido o primeiro. Para Silvado, Van Rijckevorsel teria desistido dos trabalhos após o naufrágio perto do Maranhão.

O capitão-tenente propunha que o levantamento fosse repetido a cada 5 anos para o melhor conhecimento da variação secular da declinação. Como nacionalista republicano, criticou o Império por ter apoiado estrangeiros como Mouchez e Van Rijckevorsel, dispensando a eles atenção que não era dada a brasileiros. Silvado defendeu que esses estudos fossem feitos por brasileiros – militares, como ele, com ajuda de engenheiros civis. A finalidade da missão era obter elementos positivos (na acepção positivista) para regular as questões de propriedade territorial, para a navegação segura e para o estudo do solo e das águas territoriais, além do estudo físico da Terra. Delegando os serviços cronométricos a um ajudante, Silvado se encarregou das observações magnéticas. Ele se classificava como um autodidata.



Figura 14. Inclinômetro Kew Pattern H. Barrow & E. W. Creak



Figura 15. Variômetro de Eschenhagen

Em sua primeira viagem, Rio de Janeiro (RJ)-Manaus (AM)-Rio de Janeiro (06/08/1903 a 21/01/1904), as observações foram feitas em locais litorâneos. A segunda viagem, Rio de Janeiro-Cuiabá (MT) -Rio de Janeiro (17/05/1904 a 10/11/1904), foi feita de barco, destacando-se nesse trecho a determinação da hora em Cuiabá por meio de conexão telegráfica com o Rio de Janeiro e Aquidauana (MS), e a passagem por cidades fora do Brasil como Assunção, Corrientes e Montevideo. A terceira viagem, Rio de Janeiro-Caravelas (BA)-Rio de Janeiro (22/11/04 a 03/12/1904), foi feita em vapor. E a quarta e última, Rio de Janeiro-Uberaba (MG)-Rio de Janeiro (14/12/1904 a 29/12/1904), foi ferroviária. Ao todo, medidas magnéticas foram obtidas em 28 localidades.

Os instrumentos magnéticos eram um declinômetro e um inclinômetro – similares aos usados por Van Rijckevorsel. E os instrumentos astronômicos eram um teodolito, dois sextantes, três cronômetros náuticos, entre outros equipamentos.

LEVANTAMENTO DO ON

Em 1890, já na República, o IORJ passou a se chamar Observatório do Rio de Janeiro – e voltou a se subordinar ao Ministério da Guerra. Mas em 1909 o Observatório do Rio de Janeiro passou a se chamar Observatório Nacional (ON)– e ficou subordinado à Diretoria de Meteorologia e Astronomia, do Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio.

Nesse *status* institucional, entre 1910 e 1911 Domingos Fernandes da Costa (1882-1956), astrônomo e assistente de primeira classe dessa Diretoria, realizou um novo levantamento no vale do São Francisco. Ele revisitou, na medida do possível, os locais por onde tinha passado Van Rijckevorsel. Perto do rio das Velhas, vários locais não puderam ser alcançados por terem ficado longe da estrada de ferro. A justificativa para o levantamento era que a expedição de Van Rijckevorsel ao São Francisco teve muita importância geográfica e magnética, mas ainda a estrada de ferro e o telégrafo ficavam longe desse rio. Conseqüentemente, as longitudes tinham sido determinadas por transporte cronométrico em condições desfavoráveis, merecendo, portanto, uma revisão 30 anos depois. Isso permitiria, também, conhecer melhor a variação secular. Os trabalhos começaram em Barra do Pirai (RJ), em outubro de 1910, e só terminariam no fim de setembro de 1911.

Antes da expedição, usando o método teleográfico, funcionários do ON já tinham determinado a longitude de Barra do Pirai, Entre-Rios (MG), Palmyra (atual Santos Dumont MG), Barbacena (MG), Lafaiete (MG) e Curvelo (MG). Graças à ampliação da rede telegráfica, as longitudes puderam ser determinadas pela transmissão telegráfica da hora do ON em Sabará (MG), Sete Lagoas (MG), Januária (MG), Carinhanha (BA), Juazeiro (BA) e Penedo (AL). Nas localidades intermediárias, as longitudes foram determinadas pelo transporte cronométrico da hora. A navegação no rio das Velhas, desde Sabará até encontrar o São Francisco, que na época dos holandeses podia ser feita a vapor,

agora só podia ser feita em pequenas canoas. No São Francisco, de Pirapora (MG) até Juazeiro, a viagem foi em uma lancha a gasolina que rebocava duas canoas com os equipamentos. Em Januária, Costa contraiu paludismo – e a doença deixaria sequelas para o resto de sua vida. De Juazeiro, a viagem prosseguiu em uma pequena embarcação que passou por cachoeiras e corredeiras, tendo ocorrido um acidente. De Jatobá, atual Petrolândia (PE), até Piranhas (AL), a viagem foi por estrada de ferro. E de Piranhas a Penedo, em uma grande canoa. De lá, Costa seguiu para a Bahia, de onde tomou um vapor para voltar ao Rio de Janeiro.

Observações comparativas foram feitas no Rio de Janeiro antes e após a expedição, em Magé (RJ), no fundo da Baía da Guanabara, pois era impossível fazer qualquer medição magnética no observatório no Morro do Castelo por causa do ruído gerado pelos bondes elétricos introduzidos em 1892, e da presença de massas de ferro distribuídas no escasso espaço da construção e por seus arredores. Pela mesma razão, o variômetro de Eschenhagen – instrumento de alta sensibilidade que registrava continuamente a variação de todos os parâmetros magnéticos (figura 15) – não pode ser operado no observatório durante a expedição, de modo que as observações não puderam ser corrigidas para uma mesma hora. O relatório desse trabalho já mencionava a intenção de se transferir o observatório magnético do Rio de Janeiro para Vassouras, RJ.

Os dados magnéticos de 48 localidades foram convertidos para a época 1° de janeiro de 1911 usando correção só para a variação secular deduzida da comparação com as observações de Van Ryjckevorsel. Nenhuma correção foi feita para a variação diária e anual.

Nesse trabalho, o levantamento feito antes por Silvado sequer foi mencionado. Com efeito, havia uma velha disputa acerca do comando nacional da rede meteorológica entre Silvado e Henrique Charles Morize (1860-1930), diretor do ON e superior de Domingos Fernandes da Costa. Com a subordinação do ON em 1909, como vimos, à Diretoria de Meteorologia e Astronomia do Ministério da Agricultura, Indústria e Comércio, Morize levou a melhor – e o levantamento magnético pode ser feito por Costa. Porém, para o ON a organização de uma rede meteorológica nacional, que chegou a contar com 250 estações, e fornecia a previsão do tempo para agricultores e público em geral, foi um ônus bastante pesado. A instituição se viu compelida a assumir os serviços de hora, meteorologia, magnetismo terrestre, cartografia, sismologia e marés, tendo que deixar de lado sua vocação para a pesquisa e o desenvolvimento da ciência pura, algo tão caro para Morize.

Em 1921, a Diretoria de Meteorologia e Astronomia foi desmembrada na Diretoria de Meteorologia, que deu origem ao atual Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) e ao ON – este encarregado da astronomia, geofísica (aí incluído o geomagnetismo) e metrologia. O ON se desincumbiu dos serviços meteorológicos, mas vem mantendo até hoje a tradição de pesquisa em geomagnetismo.

SUGESTÕES PARA LEITURA

COSTA, D. F. Levantamento Magnético do Valle do Rio S. Francisco, Relatório e Resumo dos Resultados, Observatorio Nacional do Rio de Janeiro, L'Édition d'Art Gaudio, Paris, 45, Rue de l'Echiquier, 1914.

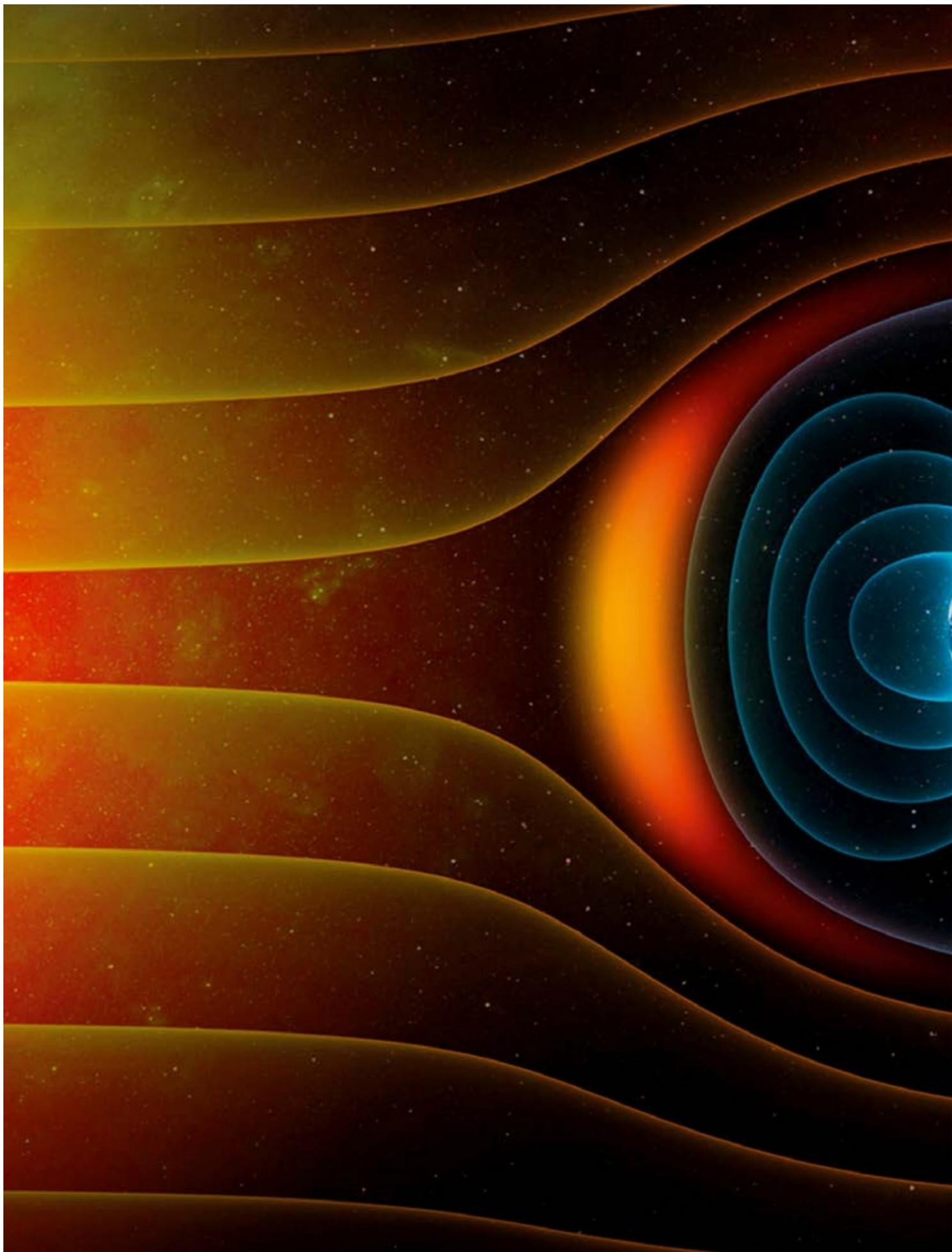
GASPAR, J. F. F. A. From the portolan chart of the Mediterranean to the latitude chart of the Atlantic. Cartometric analysis and modeling, Ph. D. Thesis, Universidade Nova de Lisboa, 2010.

JONKERS, A. R. T.; JACKSON, A. AND MURRAY A. Four centuries of geomagnetic data from historical records, *Reviews of Geophysics*, 41, 2, 2003.

ROUSSIN, A.-R. Le pilote du Brésil, Ministère de la Marine et des Colonies, Seconde Édition, Paris, Imprimerie Royale, 1845.

SILVADO, A. B. E CASTRO, C. A. Relatório Geral da Primeira Comissão Magnética Brasileira seguido de um annexo sobre o Serviço Chronométrico, Serviço Meteorológico Nacional, Imprensa Nacional, Rio de Janeiro, 1909.

VAN RIJCKEVORSEL AND ENGELENBURG, E. Magnetic Survey of the Eastern Part of Brazil, Amsterdam, Johannes Müller, 1890.

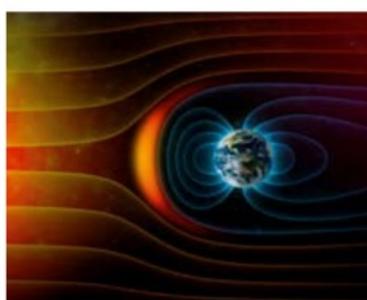


O REGISTRO DO CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE NO PASSADO

Gelvam André Hartmann
Daniel Ribeiro Franco

*Coordenação de Geofísica,
Observatório Nacional*

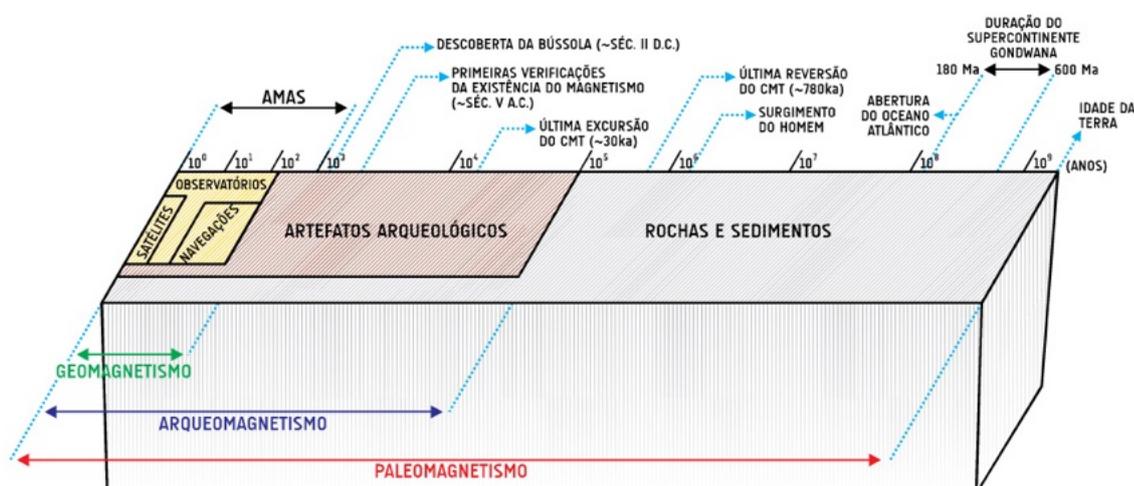
Desde tempos anteriores à invenção da bússola pelos chineses, o magnetismo chama a atenção do homem. É comum as pessoas se perguntarem sobre a origem do magnetismo e como conseguimos 'senti-lo'. Essas perguntas vêm sendo respondidas com medidas do campo magnético da Terra – são medidas aferidas na superfície do planeta ou acima dela. Os navegadores que desbravaram os mares entre os séculos 16 e 19 utilizavam a bússola para guiar suas rotas. As observações que eles faziam, a partir da experiência no uso desse instrumento, foram posteriormente usadas para entendermos que o campo magnético da Terra não é estático, mas apresenta grandes mudanças em direção e intensidade ao longo do tempo. E os observatórios magnéticos, espalhados por todo o globo, confirmaram que o campo magnético terrestre varia em diferentes escalas de tempo. Em meados do século 20, tais evidências estimularam pesquisadores a desenvolver técnicas experimentais para analisar o magnetismo do planeta em escalas de tempo que vão desde as últimas décadas até a Terra primitiva. As informações sobre o passado do campo magnético complementam aquelas determinadas pelos observatórios magnéticos, entre eles o Observatório Magnético de Vassouras (OMV). Tais dados são cruciais na busca de respostas para diferentes questões como, por exemplo, se o campo magnético atual está sofrendo um processo de inversão de polaridade.



As variações do campo magnético da Terra ocorrem em diferentes escalas de tempo e espaço. Uma tempestade solar pode desencadear mudanças rápidas do campo geomagnético em intervalos de tempo da ordem de milissegundos até dias. Essas variações do campo podem afetar, por exemplo, os sistemas de transmissão de energia e de ondas de rádio. O campo magnético produzido por essas pequenas alterações é chamado de campo magnético externo, uma vez que ele provém de fontes externas ao planeta, como, por exemplo, explosões solares e partículas vindas do espaço. Já as variações que são observadas em escalas de tempo de dias até, virtualmente, a idade da Terra, são variações de origem interna. Por essa razão, o campo magnético medido nessas escalas de tempo é chamado de campo magnético interno. Esse campo apresenta duas fontes distintas. Uma dessas fontes está nos materiais magnetizados da crosta, que é a camada sólida mais superficial do planeta. Como exemplo, temos as jazidas de minério de ferro ou as rochas ígneas formadas pelas lavas de vulcões. A outra fonte é mais profunda, produzida pelos movimentos de metais em estado líquido, entre eles o ferro e o níquel, que se encontram no núcleo externo, que é uma das camadas mais profundas do planeta. Esses movimentos geram um campo magnético, cujas variações produzem diferentes fenômenos espaciais, como as chamadas anomalias magnéticas e as inversões de polaridade.

Atualmente, as medidas do campo geomagnético são feitas diretamente com instrumentos denominados magnetômetros – eles são instalados em observatórios magnéticos e também em satélites. Os primeiros satélites lançados com o objetivo de medir o campo magnético da Terra datam da década de 1970, e operam em diferentes missões espaciais de maneira intermitente até os dias de hoje (figura 1). Esse método de coleta de dados proporciona uma excelente cobertura espa-

Figura 1. Escala de tempo de eventos de geomagnetismo, arqueomagnetismo e paleomagnetismo. Alguns eventos importantes são listados na figura e dão uma ideia dos intervalos de tempo associados



cial, e também assegura que o campo em diferentes regiões da Terra seja medido pelo mesmo instrumento – embora a técnica apresente algumas incertezas em determinados casos.

Já os observatórios magnéticos vêm sendo usados desde muito antes da era dos satélites. As medidas do campo magnético da Terra aferidas por esses observatórios começaram a ser feitas em meados do século 16 – eram dados de declinação e inclinação medidos pelos observatórios de Londres, Edimburgo, Paris e Roma. As medidas de intensidade do campo magnético, porém, só foram iniciadas, por esses mesmos observatórios, por volta de 1837 – graças ao desenvolvimento de um equipamento chamado magnetômetro absoluto, criado pelo cientista alemão Johann Carl Friedrich Gauss (1777-1855).

Nos dias de hoje, cerca de 150 observatórios magnéticos estão distribuídos pelo globo. Aqueles que atendem a rígidos critérios de controle fazem parte de um consórcio internacional de observatórios: o Intermagnet. Ao todo, esses registros alcançam não mais do que os últimos 500 anos de nossa história planetária (figura 1).

MAGNETISMO DO PASSADO

Mas seria possível medirmos o campo magnético da Terra para períodos de tempo ainda mais antigos? A resposta é sim. Um dos grandes avanços das ciências da Terra, no último século, foi a possibilidade de se recuperar a magnetização produzida pelo campo magnético do planeta em diferentes tipos de materiais. Isso viabilizou a coleta de informações preciosas: passou a ser possível, afinal, aferir informações sobre o campo magnético do passado em rochas e materiais feitos pelo homem.

Uma nova área de pesquisa surgiu então: o paleomagnetismo. Essa disciplina estuda o campo magnético registrado em rochas e sedimentos, e fornece respostas sobre importantes variações do campo, como, por exemplo, as inversões de polaridade. Tais informações também contribuem de maneira significativa para a compreensão da evolução tectônica do planeta – por meio das reconstruções paleogeográficas.

Já o estudo do registro magnético em materiais feitos pelo homem é chamado de arqueomagnetismo. Trata-se, na verdade, da junção entre três áreas do conhecimento: a arqueologia, o geomagnetismo e o magnetismo de materiais.

O arqueomagnetismo e o paleomagnetismo são, portanto, importantes campos do conhecimento que, de maneira complementar, permitem estender ao passado as séries históricas baseadas nas medidas atuais feitas pelos satélites e observatórios magnéticos. Essas técnicas permitem aos cientistas compreender as características do campo magnético em um amplo intervalo de tempo da história pretérita de nosso planeta.

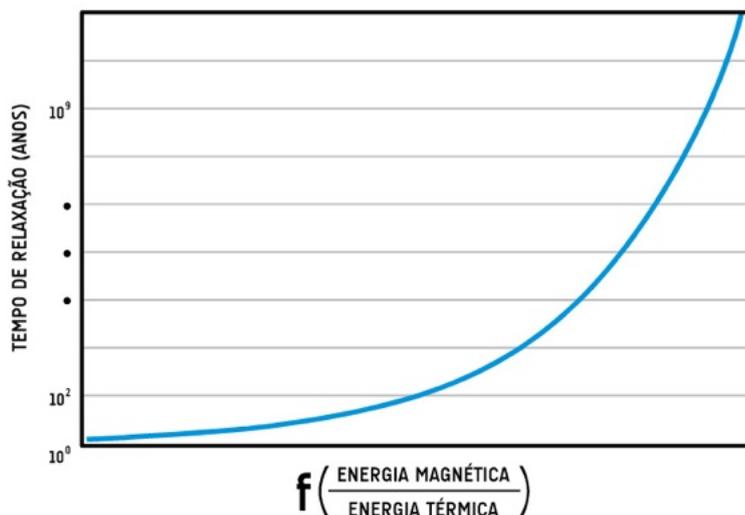
GRAVAÇÃO MAGNÉTICA

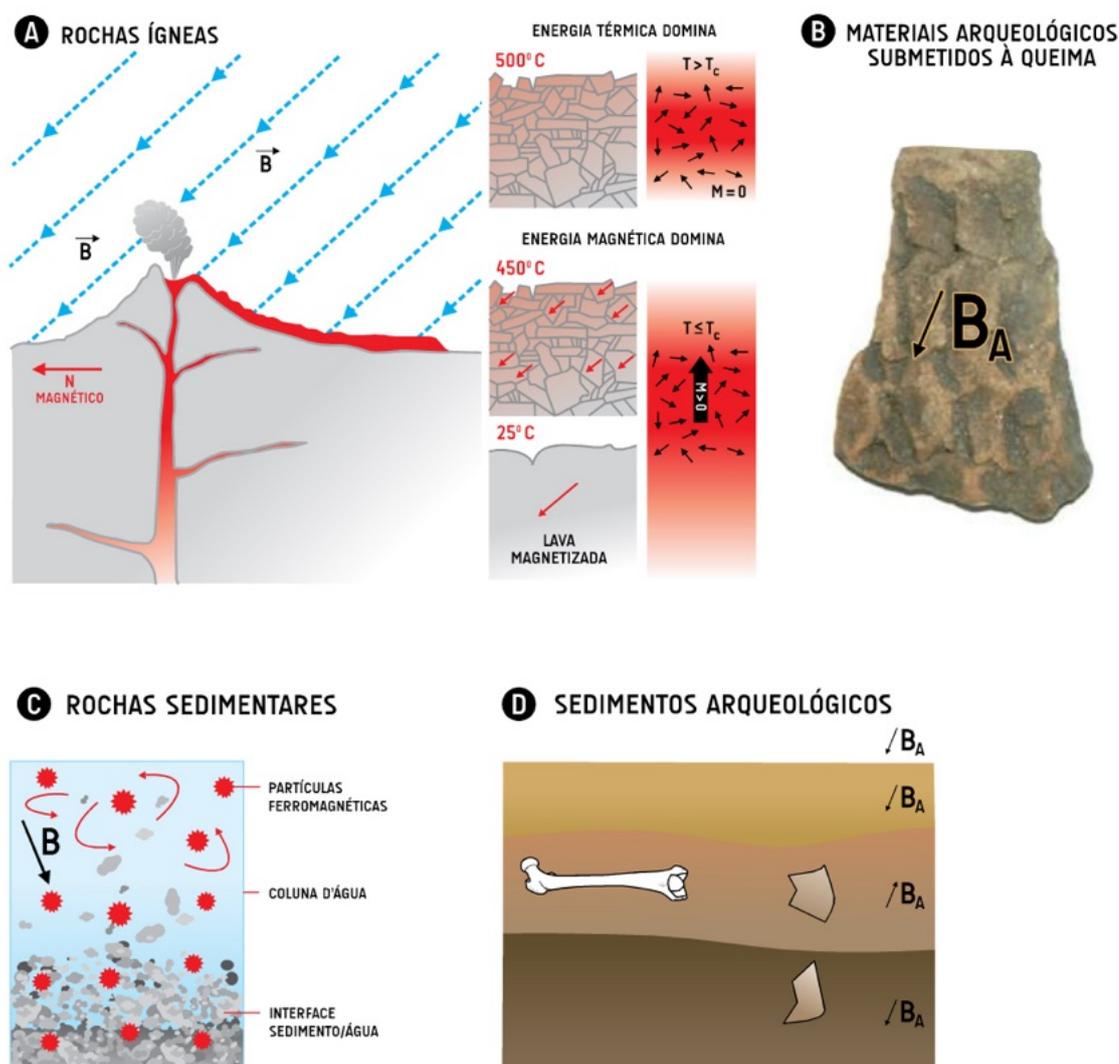
A gravação do campo em rochas, sedimentos e artefatos arqueológicos ocorre, sob determinadas condições, porque esses materiais podem se comportar como verdadeiras mídias magnéticas – algo semelhante ao que acontece com as antigas fitas K-7. O campo magnético do planeta deixa ‘marcas’ em alguns tipos de materiais. E, a partir dessas marcas, é possível resgatar a orientação espacial e a intensidade que o campo magnético da Terra teria em determinada época. Essa magnetização é chamada de magnetização remanente natural ou, simplesmente, magnetização remanente.

Para que essa magnetização de fato ocorra, entretanto, é necessário que certas condições sejam satisfeitas. Em primeiro lugar, o material investigado, seja uma rocha ou um artefato arqueológico qualquer, deve apresentar um conteúdo de minerais portadores de ferro, que se comportem como pequenos ímãs. Esses minerais são denominados minerais ferromagnéticos, e exemplos são a magnetita (Fe_3O_4) e a hematita (Fe_2O_3).

A segunda condição a ser satisfeita é que o conteúdo dos minerais ferromagnéticos presentes seja, ao menos em parte, capaz de manter a magnetização remanente por um intervalo de tempo longo o suficiente para que a informação resista até os dias de hoje. Tal intervalo, denominado tempo de relaxação, depende, de maneira geral, do balanço entre a energia magnética e a energia térmica dos minerais magnéticos presentes no material. A energia magnética é condicionada pelo tamanho do mineral magnético; pelo tipo de material; e pela sua capacidade em sustentar a remanência. A energia térmica, por sua vez, é condicionada pela temperatura do objeto em análise. É possível notar (figura 2) que este balanço possibilita, para um mesmo mineral, tempos de relaxação que vão desde poucos segundos até várias dezenas ou centenas de milhões de anos.

Figura 2. Representação esquemática do tempo de relaxação, relacionando as energias térmica e magnética. Note que os intervalos de tempo podem variar de alguns segundos até várias centenas de milhões de anos





E quais seriam os processos que viabilizam a aquisição da magnetização remanente portada pelas rochas e artefatos arqueológicos? Um exemplo: conforme o magma proveniente de erupções vulcânicas esfria, ocorre a cristalização de minerais ferromagnéticos, que tendem a se orientar na direção do campo magnético da Terra. Devido à intensa agitação térmica enquanto o material ainda se encontra muito quente, a energia térmica presente é muito maior que a energia magnética dos minerais ferromagnéticos e, portanto, a remanência magnética não é possível. No entanto, à medida que o magma resfria e atinge uma temperatura crítica, chamada de temperatura de Curie – a partir da qual a energia magnética consegue se sobrepôr à energia térmica –, os minerais ferromagnéticos conseguem preservar o alinhamento com o campo magnético ambiente (figura 3-A). Processo semelhante ocorre quando uma panela de argila, feita pelo homem, é queimada a altas temperatu-

Figura 3. Diferentes formas de registro do campo magnético em materiais. A imagem mostra o registro da magnetização remanente térmica em rochas ígneas (A) e em materiais arqueológicos (B). Mostra também o registro da magnetização remanente deposicional em sedimentos (C) e em sedimentos arqueológicos (D)

ras. Quando a panela é resfriada, ela grava a direção e a intensidade do campo à época da queima (figura 3-B).

No caso de rochas sedimentares, a magnetização remanente tende a acontecer com o alinhamento de grãos ferromagnéticos portados pelo processo de sedimentação. Por exemplo, se a sedimentação ocorrer em uma coluna d'água que não apresente grandes perturbações (figura 3-C), os minerais ferromagnéticos presentes, à medida que os sedimentos vão se depositando no fundo, tenderão a se alinhar com o campo ambiente enquanto caem na coluna d'água, até a sua completa deposição. Ao longo do tempo, o processo de sedimentação culmina na consolidação deste material. O resultado é que uma fração desses minerais ferromagnéticos acaba se orientando conforme a direção do campo magnético no período de sua deposição.

Da mesma forma, sedimentos que são depositados junto com artefatos arqueológicos podem registrar o campo magnético do momento

em que esses materiais foram soterrados (figura 3-D). A direção e intensidade do campo geomagnético podem, então, ser correlacionadas aos artefatos ali presentes. Há inclusive a possibilidade de se utilizar essas informações para datar os artefatos arqueológicos; esse tipo de datação é chamado de datação arqueomagnética (ver 'Como descobrir a idade de um artefato arqueológico?').

COMO DESCOBRIR A IDADE DE UM ARTEFATO ARQUEOLÓGICO?

• A datação arqueomagnética é, essencialmente, a comparação de um dado geomagnético obtido em um material arqueológico de idade desconhecida com os dados geomagnéticos existentes para uma determinada região do planeta. A partir dessa técnica foi possível datar, por exemplo, a Casa do Pelourinho número 27, da rua Monte Alverne, em Salvador (BA). Essa casa foi datada a partir dos dados de magnetização determinados em fragmentos de tijolos de sua base – informações que foram comparadas com os dados magnéticos obtidos de outras construções históricas da capital baiana, como o Farol da Barra e o Museu de Arte Sacra. Essa é uma das formas pelas quais os pesquisadores conseguem estimar a idade de um antigo objeto. Mas erros podem acontecer: eles dependerão das incertezas de medidas da magnetização remanente natural; e também das incertezas associadas aos dados magnéticos disponíveis para a região de estudo.

VARIAÇÕES DO CAMPO

As técnicas de medição desenvolvidas em meados do século 20 permitiram que pudéssemos 'ler' a magnetização remanente gravada em rochas, sedimentos e artefatos arqueológicos. E, a partir dessa leitura, podemos obter informações que nos auxiliam no entendimento da evolução espacial e temporal do campo magnético da Terra. Esses estudos também são de grande valia para compreendermos os processos geodinâmicos ao longo das eras geológicas.

Uma importantíssima descoberta científica relativa ao paleomagnetismo foi a de que é bastante comum rochas de diferentes idades apresentarem direções invertidas de magnetização. Pode parecer intrigante, mas esse fato é um forte indício de que o campo magnético da Terra apresentou, muitas vezes ao longo do tempo, situações de inversão dos polos magnéticos. Esses processos, denominados reversões de polari-



dade (figura 4-A), têm sido verificados como sendo globalmente correspondentes para rochas de mesma idade. Em geral, as mudanças de polaridade da Terra levam de alguns milhares a dezenas de milhares de anos para ocorrer. Os intervalos em que o campo apresenta apenas uma polaridade são denominados *chrons*, podendo ser do tipo normal – isto é, quando a configuração de polos magnéticos Norte e Sul é igual à observada atualmente (figura 4-A) – ou reversa – isto é, quando a configuração de polos magnéticos é ‘trocada’ em relação à polaridade normal (figura 4-B). A duração dos *chrons* é bastante variável. Elas podem se manter por milhares, ou mesmo por vários milhões de anos, antes de um novo processo de reversão ocorrer.

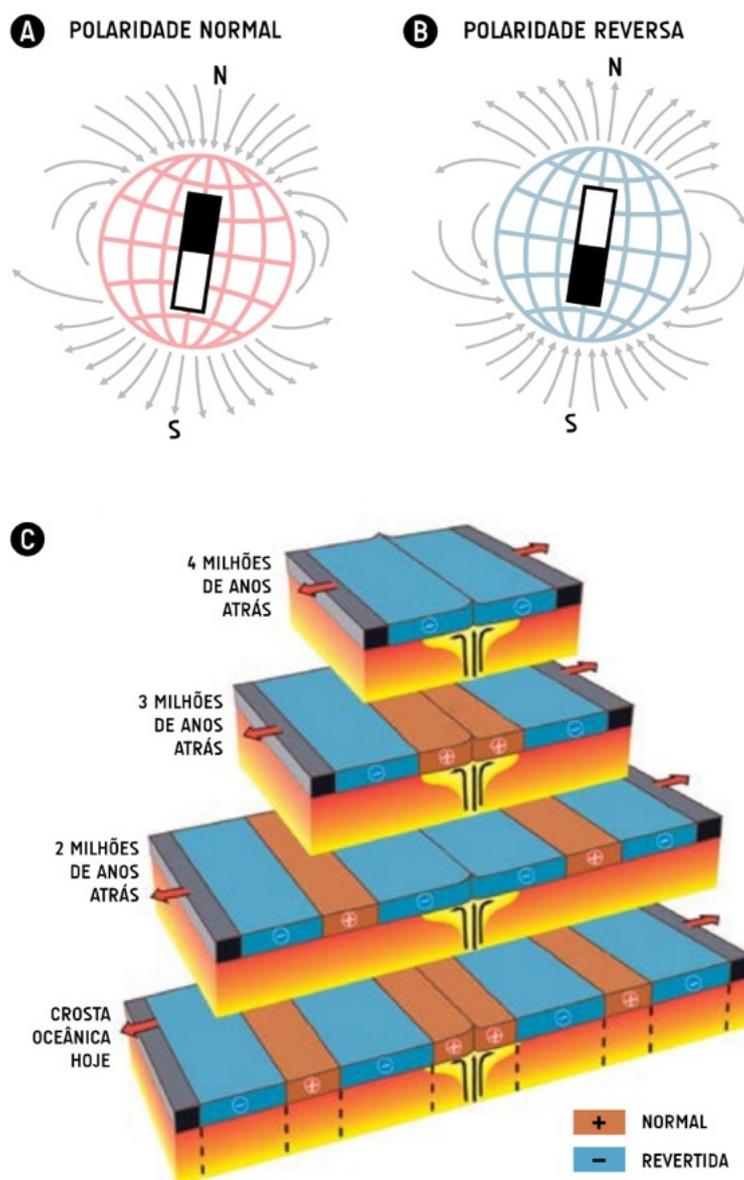


Figura 4. Reversões de polaridade magnética normal (A) e reversa (B); dorsal meso-oceânica e identificação dos chrons de polaridade ao longo do tempo (C)

Uma das mais notáveis constatações desses intervalos se deu a partir do início da década de 1960. Navios portando magnetômetros identificaram que o assoalho oceânico apresenta verdadeiras faixas de polaridade, que se alternam entre si e que se dispõem de maneira simétrica, tendo como centro, normalmente, as cadeias meso-oceânicas – são cadeias de montanhas submersas e simétricas em relação até o centro de espalhamento do assoalho oceânico; essas cadeias ocorrem em vários oceanos em todo o globo.

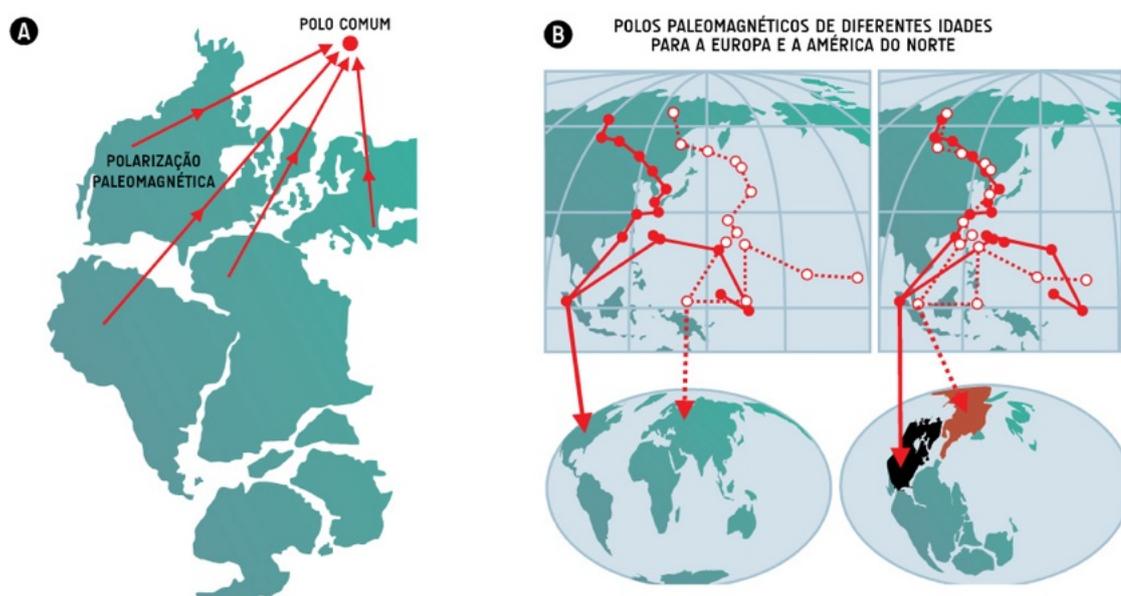
Essas faixas de polaridade sugerem que a crosta oceânica seria gerada a partir desse centro de expansão, e ela registraria a polaridade do campo à medida que se formasse. Tais padrões, denominados anomalias magnéticas oceânicas (figura 4-C), são observados como sincrônicos para crostas oceânicas de mesma idade, mas de proveniências distintas, dado o caráter global das reversões geomagnéticas. Essa característica viabilizou o estabelecimento de uma escala temporal baseada na duração dos *chrons* de polaridade: a escala serve como base para a identificação de eventos em sucessões geológicas. Estamos falando da escala temporal de polaridade geomagnética (ou GPTS, do inglês *Geomagnetic Polarity Time Scale*). Essa escala vem exercendo papel central na calibração do tempo geológico.

RECONSTRUÇÕES PALEOGEOGRÁFICAS

Nos progressos alcançados pelas ciências da Terra nas últimas décadas, houve ainda outro papel de destaque para o paleomagnetismo – que foi o estabelecimento das reconstruções paleogeográficas. Elas possibilitaram, entre outras coisas, a confirmação da Teoria da Deriva Continental, proposta pelo geógrafo e meteorologista alemão Alfred Lothar Wegener (1880-1930) na década de 1910.

Sob condições favoráveis, é possível determinar as antigas posições relativas de dois ou mais blocos continentais. Ou seja, para um dado período geológico, seria possível fazer uma espécie de mapeamento da Terra no passado. A reconstrução paleogeográfica proveniente de estudos paleomagnéticos é possível porque a magnetização remanente, quando adquirida ao mesmo tempo por um grupo de rochas – mesmo que estejam muito distantes entre si – deve indicar as mesmas direções dos polos magnéticos por ocasião do registro dessa magnetização (figura 5-A). Isto se explica pelo fato de que a melhor representação do campo magnético da Terra corresponde a um grande dipolo (ou ímã), ligeiramente inclinado em relação ao eixo de rotação do planeta (cerca de 11,5°, atualmente). Entretanto, o que se observa é que a direção da magnetização remanente recuperada para grupos de rochas de mesma idade, mas de continentes diferentes, sugere a ocorrência de outros polos – os chamados polos paleomagnéticos (figura 5-B).

Para que se satisfaça a condição de que a magnetização remanente



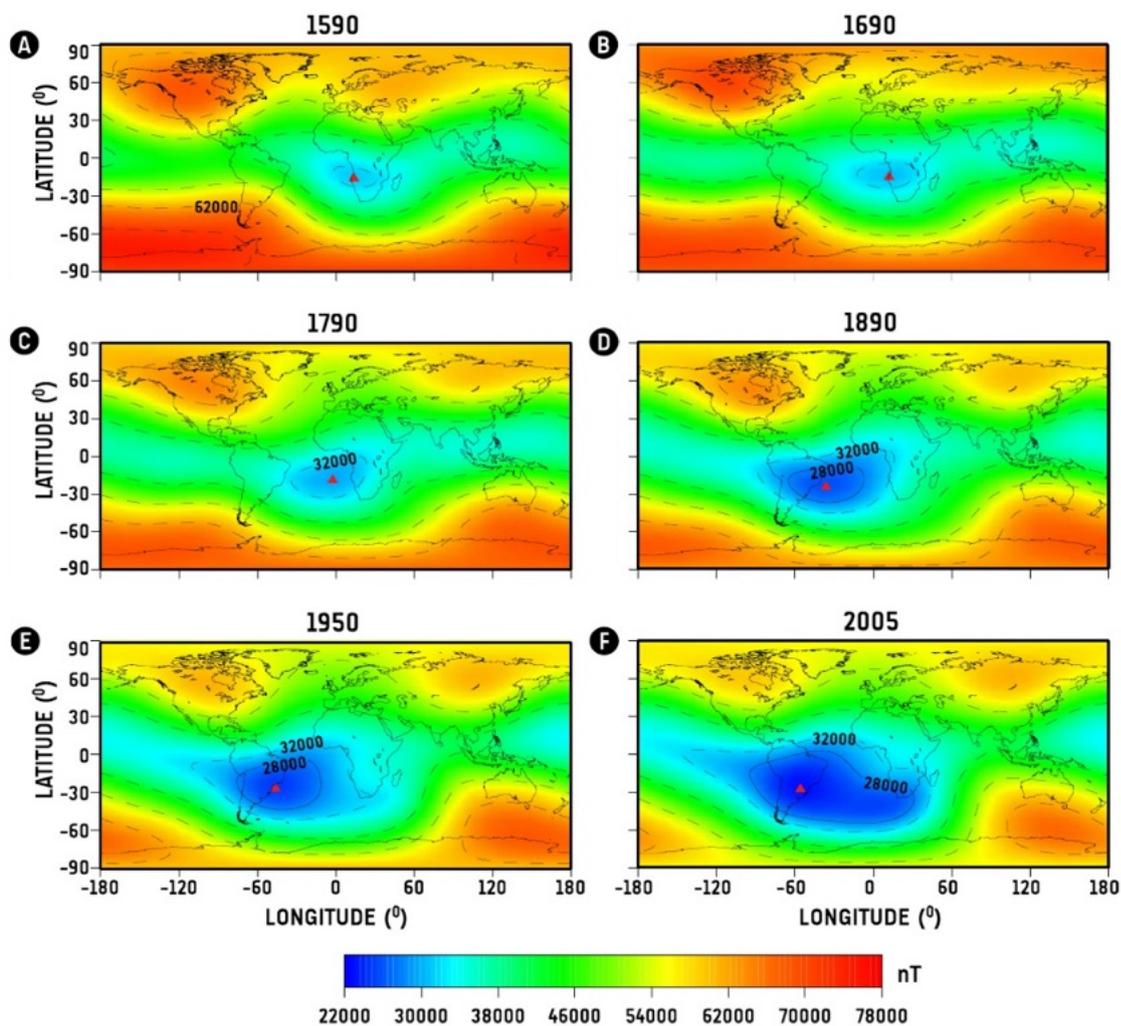
indica, de fato, a direção dos polos magnéticos, a explicação plausível para tal evidência é a de que, na verdade, foram os blocos continentais relacionados aos grupos de rochas que se moveram, desviando, assim, a direção esperada. Então, fazendo-se com que os polos paleomagnéticos referentes a uma mesma idade coincidam, o reposicionamento dos blocos continentais é possível.

ANOMALIA MAGNÉTICA

Grandes variações do campo magnético não se restringem somente ao passado profundo da Terra. Variações em escalas menores – de dezenas a milhares de anos – também são analisadas nos estudos de arqueomagnetismo (figura 1). Nessas escalas de tempo, uma das maiores feições do campo magnético da Terra é a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS). Sua característica principal é a baixa intensidade do campo observado em uma ampla região que alcança desde o Sul da África até a América do Sul, e que tem se deslocado ao longo do tempo (figura 6). Parte do território brasileiro, aliás, está dentro da área de abrangência da AMAS.

As baixas intensidades do campo magnético observado na região da AMAS são uma espécie de ‘janela’ para partículas vindas do espaço – como aquelas oriundas de explosões solares, e também partículas cósmicas. A interação dessas partículas com o campo geomagnético produz, como consequência, problemas nas comunicações e em satélites que atravessam a região da AMAS. Esse fenômeno magnético no Atlântico Sul tem atraído a atenção dos pesquisadores há décadas: ainda precisamos compreender melhor o que causa essa anomalia. Ao que tudo indica, a AMAS vem aumentando sua área de abrangência; e diminuindo os valores globais de intensidade do campo.

Figura 5. Polos paleomagnéticos e reconstrução paleogeográfica. Em (A), os polos magnéticos apontam para uma mesma direção, sugerindo que as massas continentais deveriam estar agrupadas no passado. Em (B), vemos os polos paleomagnéticos de diferentes idades para a América do Norte e Europa



HARTMANN E PACCA, 2009

Figura 6. Variação de intensidade total da AMAS de 1590 a 2005. O triângulo em vermelho indica o centro da anomalia. Os valores de intensidade são apresentados em nanotesla. Note que esses valores variaram ao longo tempo, bem como a posição do centro da AMAS

Existem várias hipóteses sobre as causas dessa anomalia. Duas delas têm sido amplamente debatidas pelos pesquisadores. A primeira trata da dinâmica de origem interna da AMAS – aquela produzida pelo núcleo externo da Terra. Segundo essa hipótese, as variações da AMAS que observamos na superfície, como seu deslocamento para Oeste e a queda nos valores das intensidades, estariam relacionadas aos processos da dinâmica do núcleo externo da Terra.

A segunda principal hipótese que tenta explicar a existência da AMAS é a seguinte: as baixas intensidades do campo na região poderiam estar associadas a um processo de reversão de polaridade magnética no planeta. Isso porque a intensidade do campo, que vem diminuindo cerca de 5% a cada século, desde meados do século 19, é um padrão de variação já observado em rochas durante outros processos de reversão de polaridade pelos quais a Terra já passou. No entanto, o intervalo de tempo das medidas diretas realizadas pelos observatórios ainda não é longo o suficiente para que possamos avaliar se o campo geomagnético se encontra, de fato, em um processo de reversão.

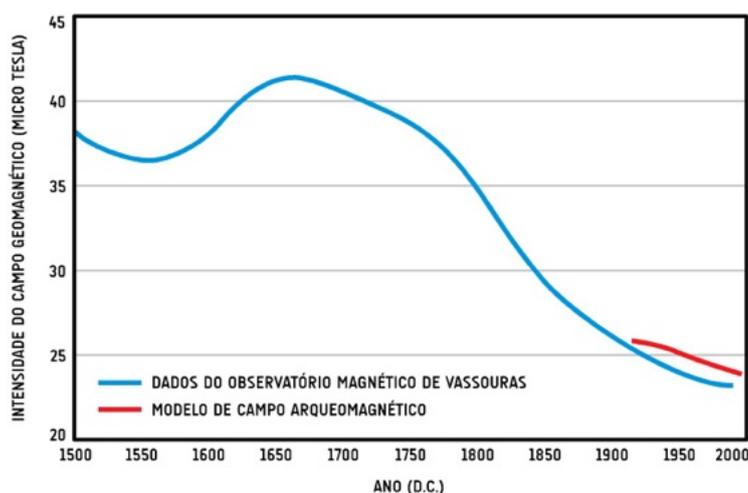


Figura 7. Variação da intensidade do campo geomagnético, em microtesla, para os últimos 500 anos. A curva em azul representa os modelos de campo arqueomagnético e a curva em vermelho representa as médias anuais de intensidade medidas pelo Observatório Magnético de Vassouras

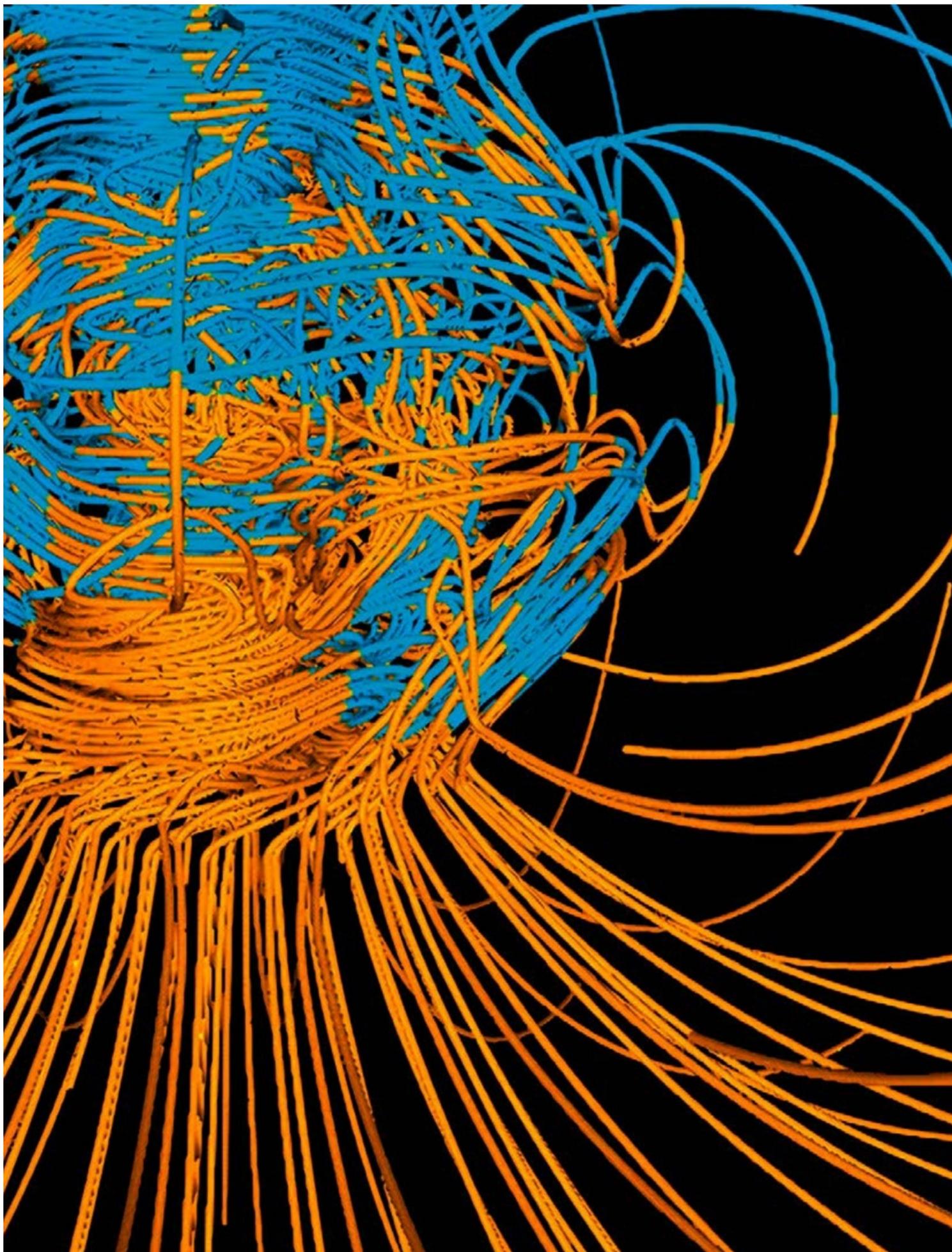
Uma alternativa para tentarmos desvendar esse problema é o estudo das variações do campo a partir de dados determinados no âmbito do arqueomagnetismo. Existem, por exemplo, valores de intensidade magnética (figura 7) determinados por modelos matemáticos do campo geomagnético e também pelos dados medidos no Observatório Magnético de Vassouras (OMV). Notemos que, apesar da queda contínua de intensidade desde que foram feitas as primeiras medidas, algumas flutuações do campo são observadas. Elas nos dão pistas de que uma fase de recuperação da intensidade pode acontecer no futuro. Os dados de Vassouras, portanto, devido à proximidade do observatório em relação à AMAS, são fundamentais para decifarmos essa importante questão do geomagnetismo do futuro (figuras 6 e 7).

A origem do campo geomagnético continua sendo um assunto amplamente estudado – principalmente a partir de modelagens numéricas e experimentais do núcleo externo do planeta. Com relação aos processos de reversão de polaridade, ainda não sabemos qual é o mecanismo físico responsável por ‘disparar’ a troca dos polos magnéticos. Por fim, a dinâmica do núcleo externo influencia vários processos internos da Terra que são percebidos apenas na superfície, como, por exemplo, o que causa a AMAS e se ela seria responsável por uma possível reversão de polaridade no futuro. Portanto, dados paleomagnéticos e arqueomagnéticos são de fundamental importância para podermos responder essas questões, que estão diretamente vinculadas ao futuro do nosso planeta.

O paleomagnetismo e o arqueomagnetismo são dois ramos do geomagnetismo que preenchem uma importante lacuna nas observações do campo magnético da Terra. Questões relacionadas à origem do campo; aos processos de reversão de polaridade; à paleogeografia em diferentes momentos da história da Terra; à dinâmica do núcleo externo de nosso planeta... São temas muito atuais. De fato, são discussões importantes que ainda estão no centro de diversos debates na literatura científica mundial.

SUGESTÕES PARA LEITURA

- BUTLER, Robert F. *Paleomagnetism: Magnetic domains to geological terranes*. Blackwell Scientific Publications, 1998.
- GLATZMAIER, Gary; OLSON, Peter. ‘Probing the geodynamo’. *Scientific American*, 292, 50-57, 2005.
- GROTZINGER, John, JORDAN, Tom. *Para entender a Terra*. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- TAUXE, Lisa; BUTLER, Robert F.; VAN DER VOO, Rob; BANERJEE, Subir K. *Essentials of Paleomagnetism*. University California Press, 1ª. ed., 512 p., 2010.
- TEIXEIRA, Wilson; FAIRCHILD, Thomas Rich; TOLEDO, Maria Cristina Motta de, TAIOLI, Fabio (org.). *Decifrando a Terra*. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2009.



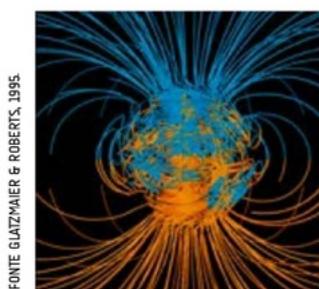


INVESTIGANDO O CAMPO MAGNÉTICO DA TERRA

Katia J. Pinheiro

*Departamento de Geofísica,
Observatório Nacional*

O campo magnético da Terra é gerado por diferentes fontes: desde a dinâmica do fluido existente no núcleo da Terra até variações magnéticas provenientes do Sol. Toda essa gama de fenômenos é registrada de forma precisa nos observatórios magnéticos. Os dados desses observatórios são analisados em diversos centros científicos ao redor do mundo – e os resultados dessas pesquisas vêm aperfeiçoando nosso conhecimento sobre o interior do nosso próprio planeta, ainda tão desconhecido. Tais estudos também incluem pesquisas direcionadas à análise dos efeitos, e possíveis consequências, das tempestades magnéticas para a humanidade. Cabe aos observatórios magnéticos a tarefa de vigiar esses fenômenos ininterruptamente e durante longos períodos. No Brasil, o Observatório Magnético de Vassouras (OMV), que completa um século de existência em 2015, coloca o país em destaque no cenário mundial do geomagnetismo.

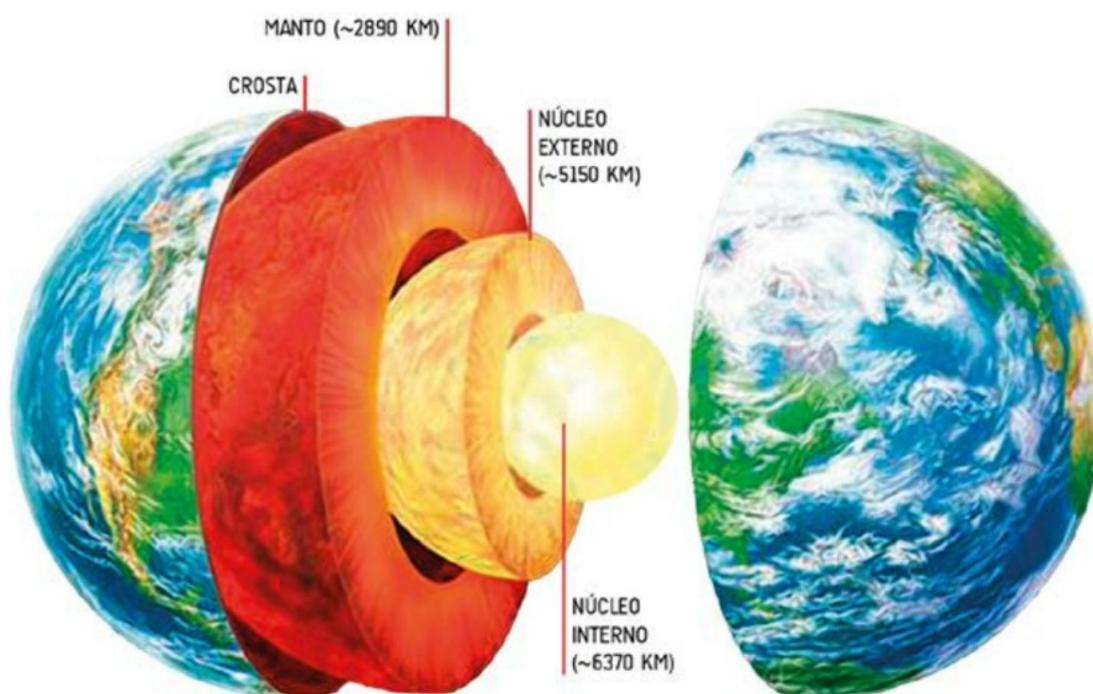


FORTE GLATZMAIER & ROBERTS, 1995.

O magnetismo da Terra é um fenômeno físico que já havia sido observado cerca de 600 anos antes de Cristo, quando o sábio grego Tales de Mileto (624 a.C-546 a.C.) fez o primeiro relato sobre objetos que apresentavam atração entre si. Durante uma viagem à Ásia, em uma região chamada de Magnésia, ele percebeu que a ponta de seu cajado de ferro era atraída por algumas rochas.

Já a descoberta de que a Terra possui um campo magnético próprio ocorreu bem mais tarde: foi em 1600, graças ao físico e médico inglês William Gilbert (1544-1603). Ele realizou um experimento que ficou conhecido como terrela. Trata-se de uma pequena esfera feita de material magnético, e, como o nome sugere, ela foi usada como modelo para representar a Terra. Ao redor dessa esfera, Gilbert colocou uma agulha magnética, que podia se mover livremente. Com isso, ele percebeu que aconteciam, na pequena esfera, os mesmos fenômenos relatados por estudiosos e navegadores que singravam os mares da Terra. Por exemplo, a agulha magnética permanecia na horizontal quando estava posicionada próxima ao equador magnético da terrela; e permanecia na vertical quando se movia nas proximidades dos polos. Assim, Gilbert concluiu que a Terra se comportava como um grande ímã, de forma similar ao que observara no experimento que desenvolveu.

Figura 1. Principais camadas da Terra: crosta, manto e núcleo (interno e externo)



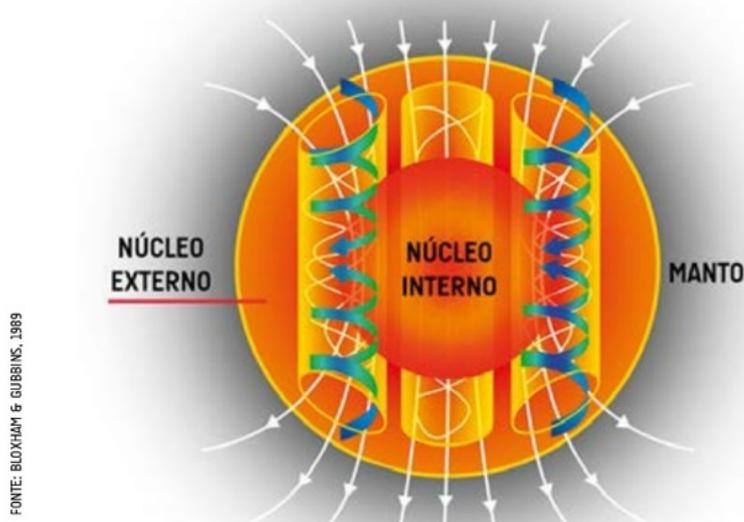
O estudo do campo magnético da Terra foi, desde o início, de notável importância histórica. Esse saber, afinal, era de grande valia para as navegações; e também para o próprio conhecimento sobre o nosso planeta. O magnetismo da Terra pode ser aproximado por um dipolo magnético – isto é, como um grande ímã. O eixo desse dipolo está localizado bem próximo ao eixo de rotação do planeta. Isso quer dizer que os polos magnéticos ficam, também, bastante próximos aos polos geográficos.

ORIGEM DO CAMPO

O interior da Terra possui quatro camadas principais: a crosta, o manto, o núcleo externo e o núcleo interno (figura 1). A crosta possui espessuras diferentes nos continentes e nos oceanos: algumas dezenas de quilômetros nos continentes; e menos do que dez quilômetros nos oceanos. Abaixo da crosta, existe o manto. Ele chega a uma profundidade de aproximadamente 2.890 km em direção ao interior do planeta. Já o núcleo externo – que é a única camada líquida da Terra – fica a uma profundidade de aproximados 5.150 km. O núcleo interno, por sua vez – que é sólido –, se estende até a profundidade de 6.370 km, que é a medida do próprio raio da Terra.

No núcleo externo, existe um fluido condutor de eletricidade. Esse fluido está em constante movimento e interage com o campo magnético da Terra (figura 2). Essa interação gera correntes elétricas – da mesma forma que um ímã, quando movido nas proximidades de um fio condutor, induz o surgimento de correntes elétricas por esse fio. Tal corrente gera então um campo magnético secundário, que pode reforçar ou diminuir o campo magnético original. O magnetismo da Terra funciona

Figura 2. Representação do geodínamo no núcleo externo da Terra: as setas em azul mostram o movimento do fluido e as linhas brancas correspondem às linhas do campo magnético



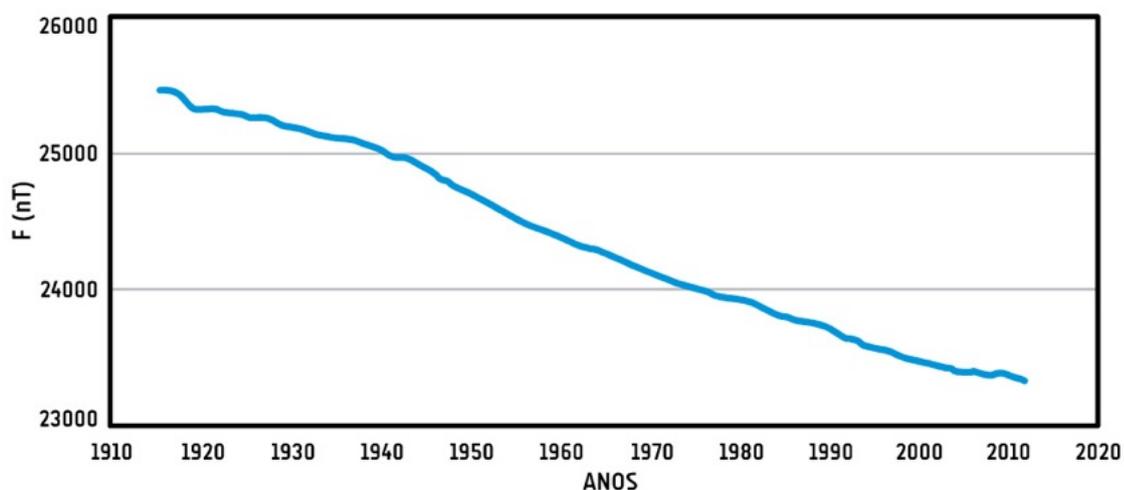
FONTE: BLOXHAM & GUBBINS, 1989

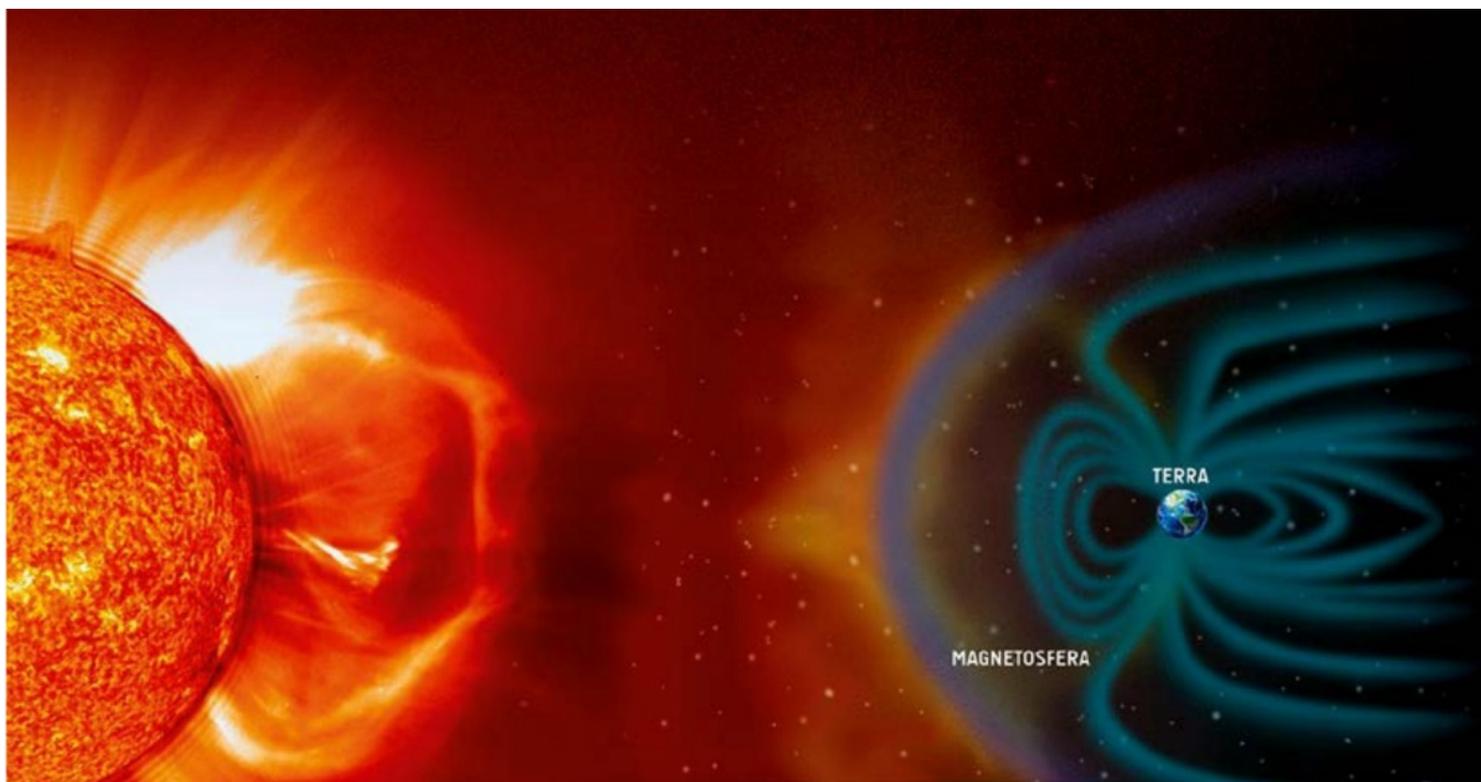
de modo análogo. O campo magnético inicial do planeta pode ser alterado por suas interações com o fluido condutor que está em movimento no núcleo externo. Essa dinâmica – que faz do planeta uma espécie de geodínamo – é responsável pela maior parte do campo magnético que medimos na superfície terrestre.

As variações geomagnéticas que acontecem ao decorrer de longos períodos, originadas pela dinâmica do núcleo externo, são chamadas de variação secular. Há diferentes formas de se registrar esse fenômeno: por observatórios magnéticos e satélites, podemos detectar mudanças que ocorrem em períodos de anos; já os registros históricos das navegações do passado nos permitem verificar as alterações que aconteceram ao longo dos séculos; e dados de arqueomagnetismo e paleomagnetismo possibilitam a compreensão de variações magnéticas em cenários que abrangem de milhares a milhões de anos.

Todos esses dados ajudam a melhor entender a origem e a ocorrência de diferentes fenômenos relacionados ao campo magnético gerado no núcleo da Terra. Um deles é a deriva do campo para Oeste, sugerida nos modelos que analisam o magnetismo terrestre a partir de uma perspectiva secular. Outro fenômeno de interesse é a diminuição da intensidade do dipolo magnético da Terra no decorrer de milhares de anos. Esse decaimento, ao que tudo indica, foi mais acentuado no último milênio. E, atualmente, o campo diminuiu sua intensidade em aproximadamente 1% a cada década (figura 3). Curiosidade: se ele continuasse a decair nessa mesma taxa, chegaria próximo à intensidade nula daqui a aproximadamente 1.500 anos, apenas. Essa previsão, no entanto, não é tão precisa. Afinal, a dinâmica do núcleo é muito complexa, e não se sabe ao certo se o dipolo continuará apresentando essa tendência de decaimento. Mesmo se sua intensidade continuar a diminuir, não é possível prever qual será a taxa dessa diminuição.

Figura 3. Decaimento da intensidade do campo geomagnético registrado no Observatório Magnético de Vassouras





FONTE: NASA/NSA/IMAGES.ORG

O campo geomagnético já reverteu sua polaridade centenas de vezes durante a história da Terra. Essas reversões não são periódicas – isto é, não ocorrem em períodos ou ciclos bem determinados. Até agora, calcula-se que o tempo médio entre as reversões tenha sido de aproximadamente 250.000 anos. Porém, a última mudança de polaridade ocorreu 780.000 anos atrás – ou seja, muito antes do que se esperaria considerando o tempo médio das reversões. Isso não quer dizer, entretanto, que uma nova reversão magnética ocorrerá em breve. Afinal, períodos muito maiores, nos quais que a mesma polaridade se sustentou por milhões de anos, já ocorreram na história do nosso planeta.

Figura 4. Esquema mostrando o efeito do vento solar no campo magnético da Terra

TEMPESTADES MAGNÉTICAS

A Terra e o Sol estão separados por cerca de 150 milhões de quilômetros. Entretanto, há uma forte conexão entre esses dois astros. Prova disso é o próprio fluxo de energia que sustenta a existência da vida na Terra. Nosso planeta tem também um campo magnético externo. Ele é gerado pela interação entre o vento solar e a magnetosfera terrestre – região ao redor da Terra onde o campo magnético se faz presente. O vento solar é composto por partículas energizadas e ionizadas. São, basicamente, elétrons e prótons que fluem do Sol para todas as direções. O campo geomagnético gerado no núcleo da Terra e, conseqüentemente, a magnetosfera se comportam como um escudo protetor. Esse escudo defende o planeta dessas partículas do espaço; e também dos raios cósmicos que se propagam no Universo e transitam em nossa direção (figura 4).

A variação do campo magnético externo, quando medida no período de dias, é chamada de variação diurna. Ela pode ser categorizada como

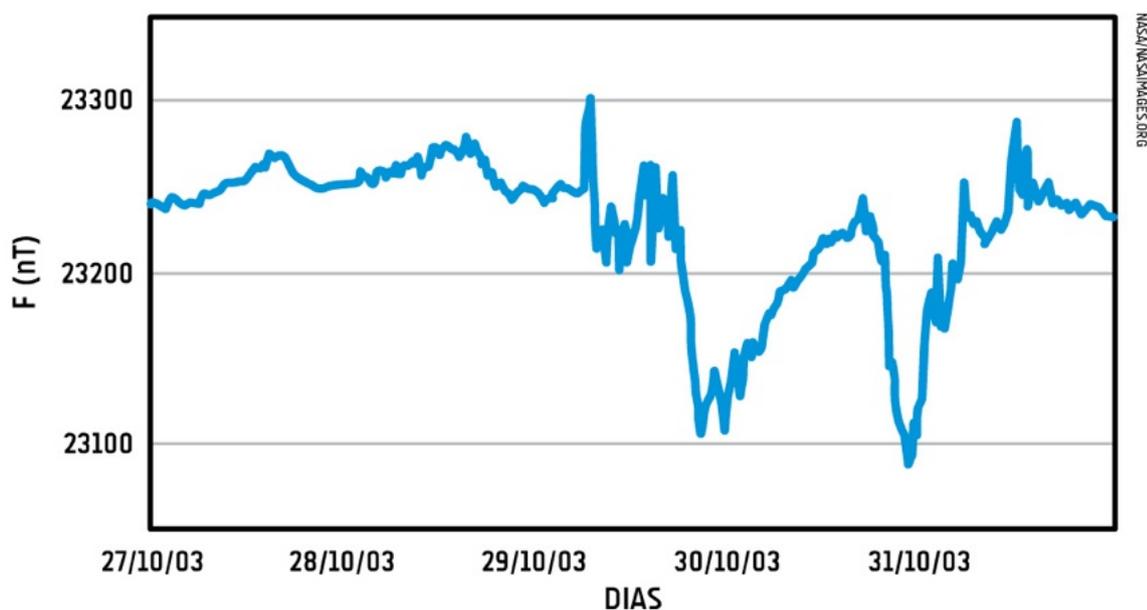


Figura 5. Tempestade magnética do Halloween, em 2003, registrada no Observatório Magnético de Vassouras

‘calma’ quando o campo magnético não é perturbado pela atividade solar. Mas, apesar de todos os benefícios que o Sol nos proporciona, ele também é capaz de causar prejuízos à humanidade. As tempestades magnéticas são um exemplo. Elas são causadas por ejeções abruptas, ou em alta velocidade, do plasma solar.

Um exemplo foi a tempestade magnética ocorrida em 2003. Ficou conhecida como tempestade magnética do Halloween e provocou interferências no funcionamento de aeronaves e satélites (figura 5). Diversos problemas em operações espaciais foram reportados, como a perda de dados devido a interferências nos sensores de satélites. Também houve considerável impacto nas comunicações de rádio de alta frequência, especialmente nas regiões polares. A propósito, alguns voos nessas regiões tiveram de ser redirecionados e seus sistemas de comunicação

falharam – tiveram de usar os sistemas de comunicação de reserva. Durante a mesma tempestade magnética, também foram observados problemas nas redes elétricas do norte da Europa e da África do Sul: houve, entre outros entraves, o superaquecimento de vários transformadores.

TESLA: A UNIDADE DO MAGNETISMO •

A intensidade do campo magnético é medida em uma unidade que chamamos de tesla (T), em homenagem ao engenheiro sérvio naturalizado estadunidense Nikola Tesla (1856-1943). Já o campo geomagnético é expresso em nanotesla (nT). Temos, portanto, que 1T é igual a 10^9 nT. Para termos uma ideia concreta, a intensidade do campo magnético na superfície da Terra é da ordem de 70.000 nT nas imediações dos polos. Tal intensidade, porém, chega a cerca de metade desse valor quando medida nas proximidades da linha do equador.

OBSERVATÓRIOS MAGNÉTICOS

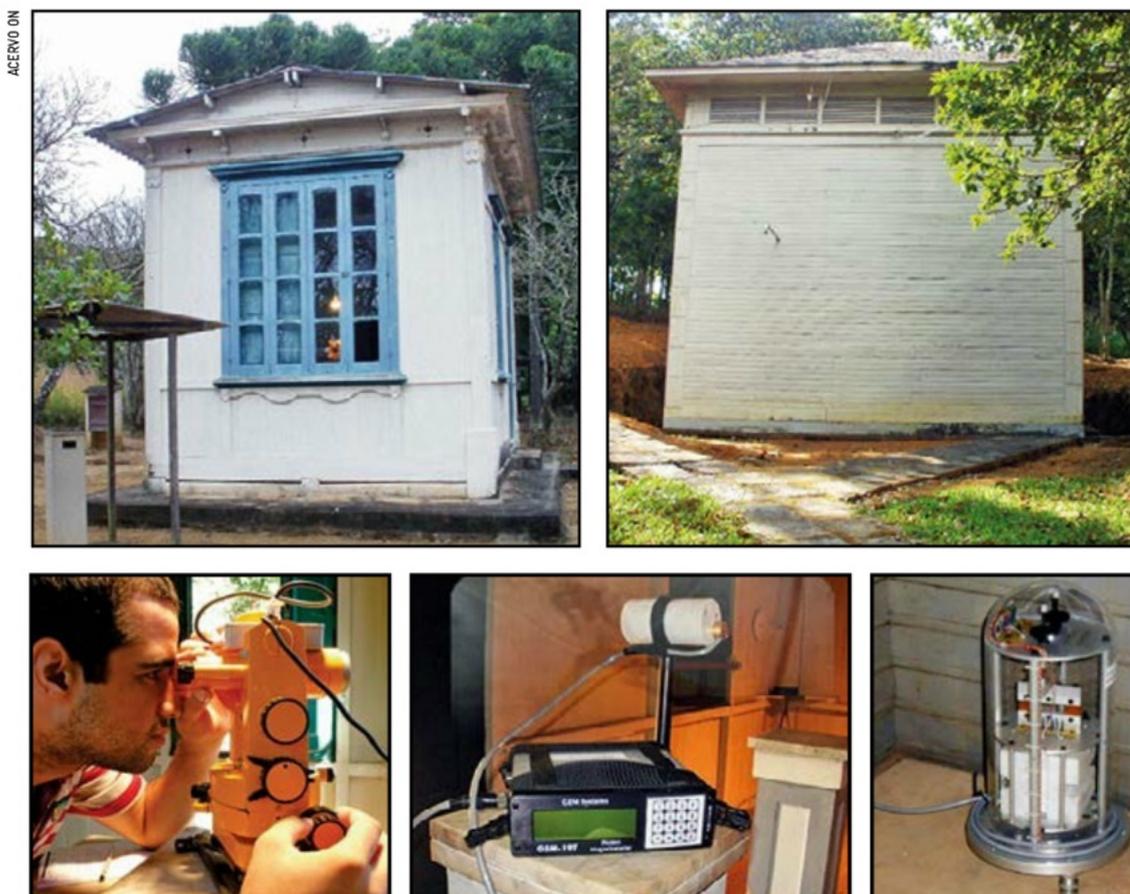
Os observatórios magnéticos são locais fixos na superfície da Terra onde o campo é medido continuamente (ver ‘Tesla: a unidade do magnetismo’). Eles medem variações temporais do campo magnético da Terra que vão de décimos de segundos até cente-

nas de anos. Como mencionamos anteriormente, as variações mais rápidas (de décimos de segundos até dezenas de anos) são em geral oriundas do campo externo, e podem ser usadas para monitoramento do clima espacial. Já as variações de anos até centenas de anos são causadas pela dinâmica do fluido condutor existente no núcleo externo. Uma grande vantagem dos dados aferidos em observatórios é a possibilidade de separação entre essas duas diferentes fontes: podemos medir o magnetismo proveniente tanto das fontes internas (do núcleo e crosta); como das fontes externas (magnetosfera e ionosfera).

Somente em observatórios podemos garantir um registro de grande precisão. Os dados são essenciais para descrevermos a variação secular do magnetismo e assim construirmos modelos globais para simular o campo geomagnético variando no tempo. Além disso, os observatórios funcionam como uma forma de calibração para os satélites designados a medir o campo magnético da Terra.

A estrutura de um observatório magnético inclui duas casas: (i) a casa do variômetro, na qual são registrados automática e continuamente os componentes do campo, normalmente a cada meio segundo; e (ii) a casa das medidas absolutas, na qual são realizadas medições absolutas

Figura 6. Casa das medidas absolutas (à esquerda) e do variômetro (à direita), no Observatório Magnético de Vassouras. Abaixo, alguns instrumentos usados na medição do campo geomagnético

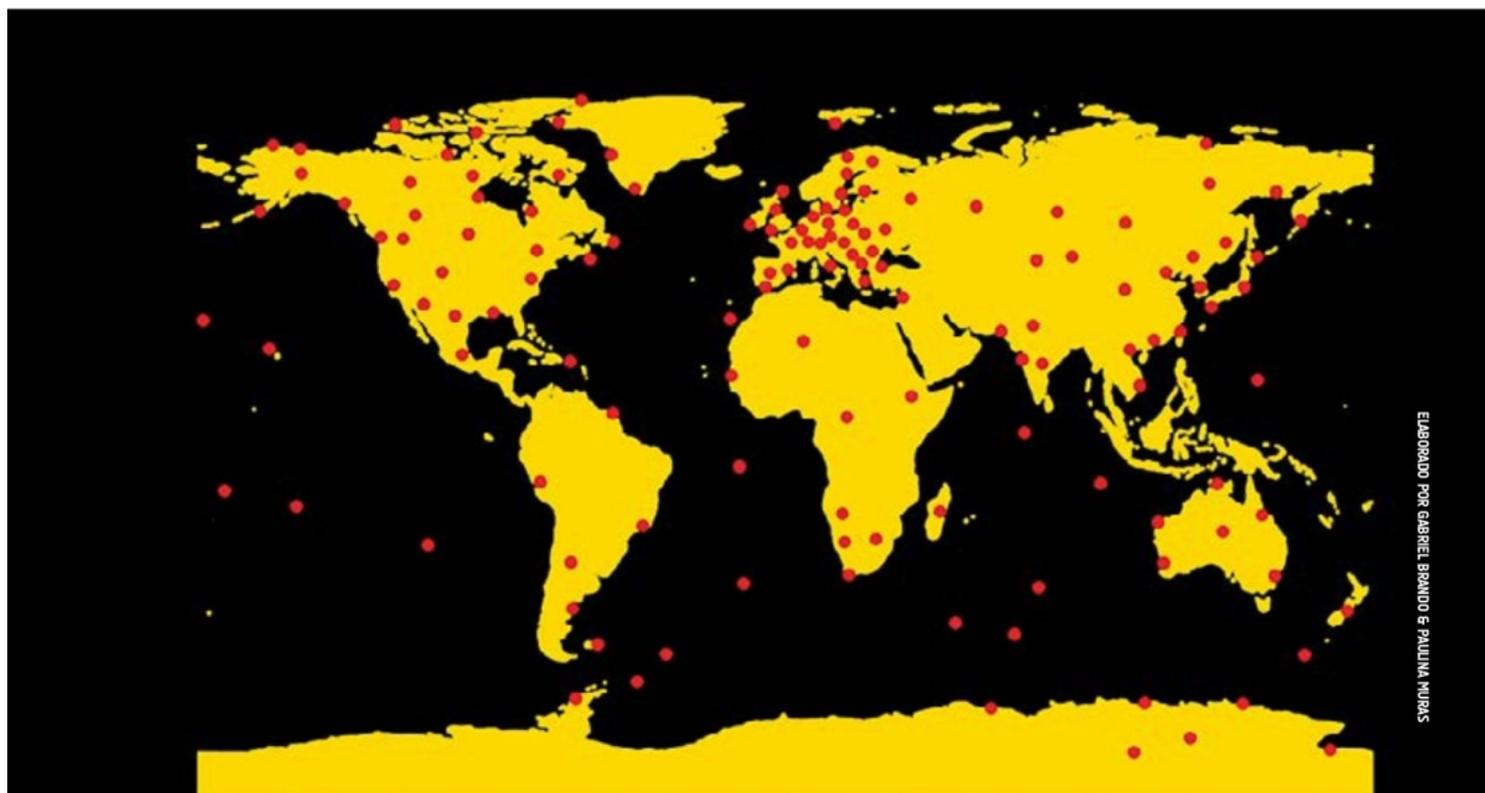


da declinação magnética, da inclinação magnética e do campo magnético total, duas vezes por semana (figura 6).

Foi em 1828 que o geógrafo prussiano Alexander Von Humboldt (1769-1859) organizou a primeira cooperação internacional em geomagnetismo: ele conseguiu que várias estações da Europa e Ásia realizassem medições magnéticas periódicas e simultâneas. Em 1834, o matemático Johann Carl Friedrich Gauss (1777-1855) e o físico Wilhelm Weber (1804-1891), ambos também nascidos na atual Alemanha, se juntaram a essa causa – expandindo para 50 o número de observatórios magnéticos a trabalhar em cooperação.

Hoje, existem no mundo cerca de 150 observatórios magnéticos com alto padrão de qualidade. Entretanto, a distribuição global desses estabelecimentos (figura 7) é extremamente desigual – especialmente nos oceanos e no Hemisfério Sul, onde existem poucos observatórios (ver ‘Satélites: complementando os dados dos observatórios’). As atividades de todas essas instalações são coordenadas pela Associação Internacional de Geomagnetismo e Aeronomia (IAGA) e pela Rede Internacional de Observatórios Magnéticos em Tempo-real (Intermagnet). Tais entidades definem padrões de qualidade; normatizam os formatos para transmissão de dados e aconselhamento acerca de temas referentes à instrumentação.

Figura 7. Distribuição dos observatórios magnéticos pertencentes à rede Intermagnet



ELABORADO POR GABRIEL BRANDO E PAULINA NUNES

NO BRASIL

O monitoramento do campo geomagnético no Brasil é de grande importância, já que relevantes fenômenos magnéticos ocorrem em nosso território. Um deles é o chamado Eletrojato Equatorial (EE). É uma intensa corrente elétrica que percorre a ionosfera – camada localizada nos estratos superiores da atmosfera a uma altitude de cerca de 100 km. O EE ocupa uma faixa de cerca de 600 km de largura, centrada ao longo do equador magnético. Em 2015, esse fenômeno passou pela cidade de São Luís (MA).

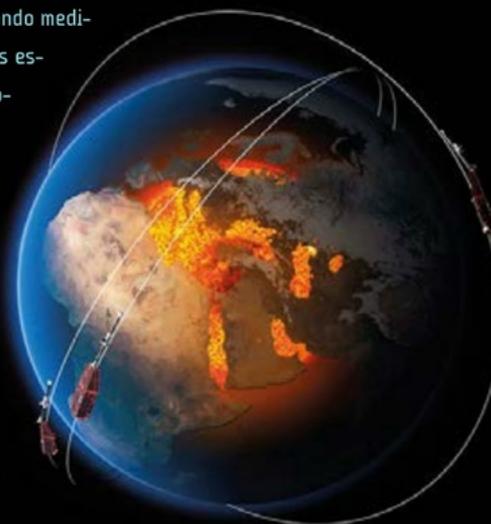
Outro fenômeno geomagnético de grande interesse para o Brasil é a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS). Trata-se de uma região – localizada entre a África e a América do Sul – onde o campo magnético possui as menores intensidades registradas em todo o globo (figura 9). Pesquisadores mostraram que esse fenômeno é resultado de processos dinâmicos no núcleo terrestre.

Como mencionamos anteriormente, as observações sugerem que a intensidade do campo magnético global tem diminuído ao longo das últimas décadas. Mas esse decréscimo não é igual em todas as regiões do globo. Especialmente na região da AMAS, tal diminuição tem ocorrido a passos mais acelerados. Acredita-se que a AMAS está relacionada a um aumento de fluxo magnético na direção oposta ao campo regional

Figura 8. Ilustração da missão SWARM, mostrando os três satélites e a trajetória que realizam em torno da Terra

SATÉLITES: COMPLEMENTANDO OS DADOS DOS OBSERVATÓRIOS

A desigual distribuição dos observatórios no mundo é complementada pelos dados coletados por satélites. Há uma grande vantagem quando medimos o campo magnético com o auxílio desses equipamentos espaciais: eles conseguem proporcionar uma distribuição global de dados. No entanto, há algumas desvantagens. Uma delas é que os satélites têm uma vida útil menor do que a de um observatório. Ainda, costuma ser mais complexa a tarefa de tratar e processar os dados adquiridos por satélites. Em 2013, a Agência Espacial Europeia lançou a missão SWARM, incluindo pela primeira vez três satélites para o estudo do campo geomagnético (figura 8). A missão SWARM tornará possível muitos avanços em geomagnetismo, como melhor compreensão sobre a variação temporal do campo geomagnético e aprimoramento de um mapa global do campo magnético das rochas.



ESA/ATG MEDIALAB

na fronteira entre o manto e o núcleo da Terra. O estudo dessa anomalia, portanto, é uma grande oportunidade para entendermos melhor o decaimento do campo magnético global.

Outra consequência da presença da AMAS nessa região do planeta é que, em sua área de abrangência, as funções de proteção exercidas pelo campo magnético se tornam mais fracas. As influências magnéticas do espaço, portanto, podem interferir com mais intensidade sobre esse território. Como vimos, isso pode gerar dificuldades e prejuízos para telecomunicações e atividades aeroespaciais, por exemplo.

O Brasil possui três observatórios magnéticos: o de Vassouras, no Rio de Janeiro, fundado em 1915; o de Tatuoca, no Pará, fundado em 1957; e o do Pantanal, em Mato Grosso, inaugurado em outubro de 2012. Todos eles funcionam sob os auspícios do Observatório Nacional (ON). As observações realizadas pelo ON, assim como as pesquisas científicas lá desenvolvidas, colocam a instituição em patamar de destaque na comunidade científica mundial.

Além de sua importância histórica para o Brasil, o observatório de Vassouras, notadamente, é de grande relevância global. Ele integra a rede Intermagnet, que reúne apenas os observatórios de alto padrão de qualidade no mundo. A limitada quantidade de bons observatórios na América do Sul, aliás, é outro ponto que dá ao OMV especial importância. Ele contribui significativamente para a coleta de dados nessa área – que ainda carece de melhor estrutura em pesquisa geomagnética. Há praticamente um século, as informações obtidas pelo OMV são usadas por pesquisadores de todo o mundo na realização de diversas investigações em geomagnetismo.

Figura 9. Mapa do campo magnético em 2005 calculado por um modelo internacional de referência do campo geomagnético (IGRF). A seta mostra onde a Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS) está localizada

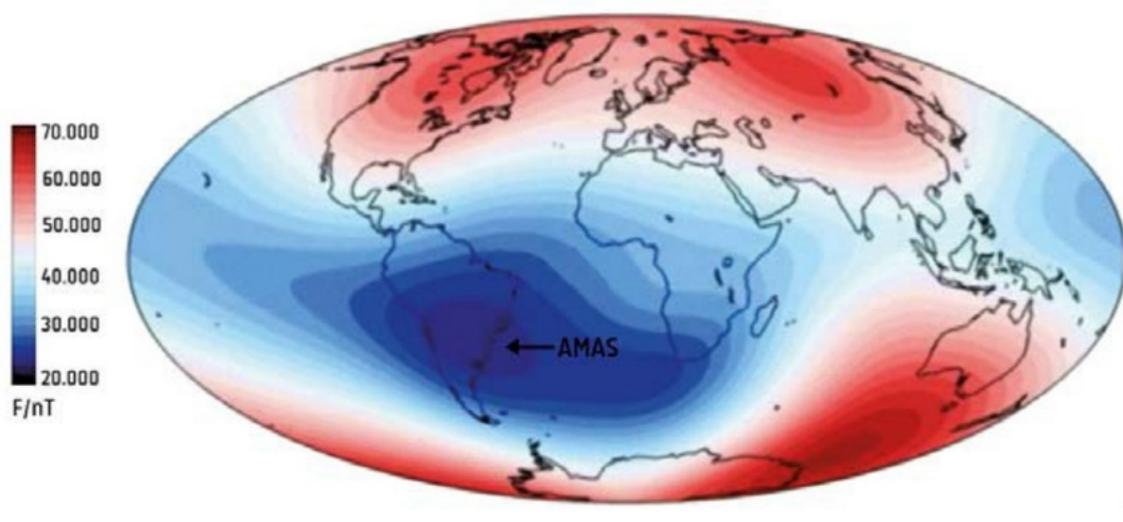




Figura 10. Em vermelho, observatórios magnéticos existentes no Brasil estabelecidos pelo Observatório Nacional: Vassouras (VSS), Tatuoca (TTB) e Pantanal (PNL). Em amarelo, observatório em construção: Tefé (TEF). Na cor branca, observatórios planejados: Praia do Forte (FOR), Jalapão (JAL), Fernando de Noronha (NOR) e São Martinho da Serra (SMS)

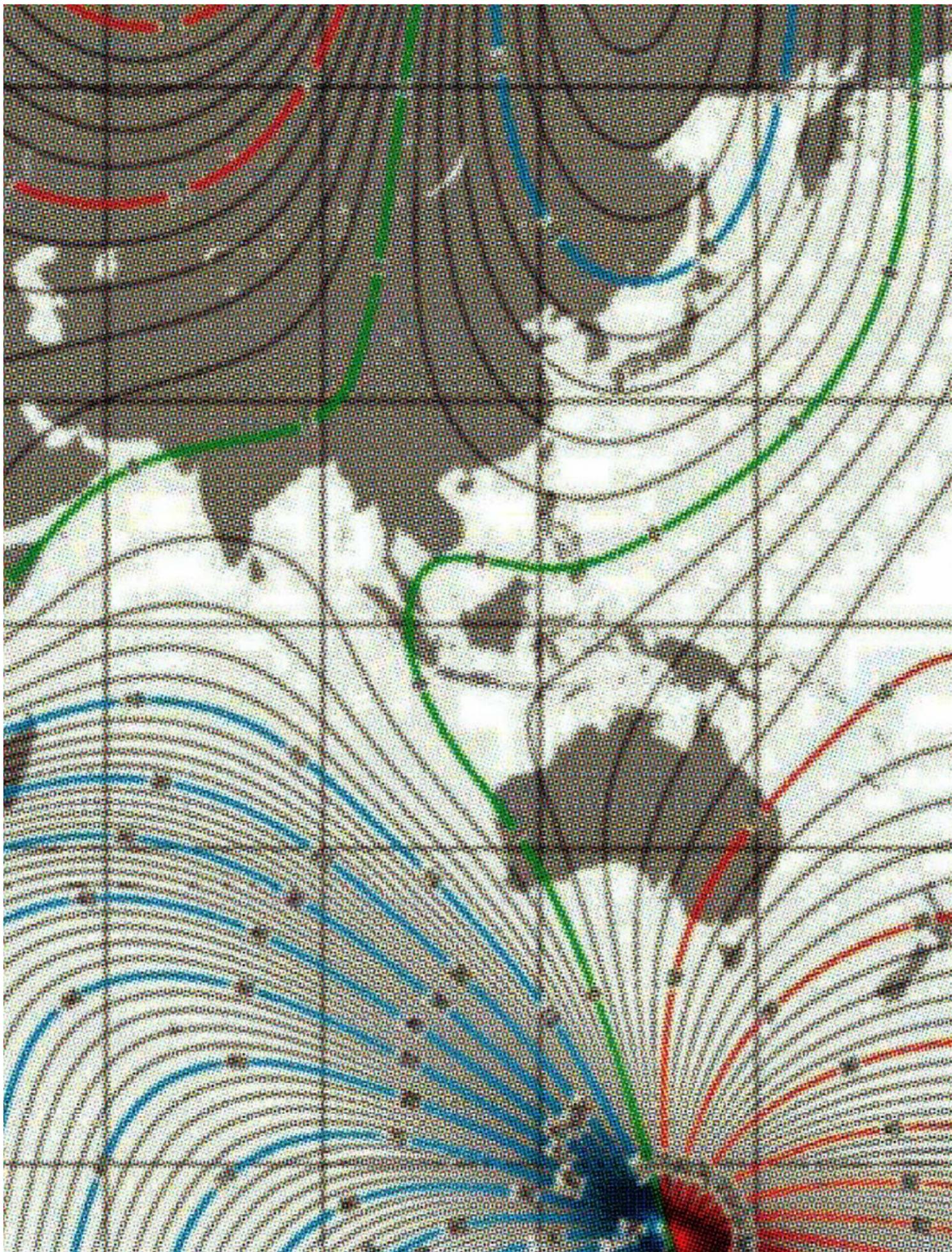
Com a instalação do novo Observatório Magnético do Pantanal, em 2012, são cada vez mais promissores os horizontes para a pesquisa geomagnética no Brasil. Esse observatório é resultado da cooperação entre três instituições: o ON, o SESC-Pantanal e o Centro Alemão de Pesquisa em Geociências (GFZ-Postdam). O Observatório Magnético do Pantanal contribuirá ativamente para a análise dos dados da missão espacial SWARM (ver 'Satélites: complementando os dados dos observatórios'). Será também uma peça-chave para a compreensão de fenômenos magnéticos ainda desconhecidos que ocorrem no Brasil e no mundo.

Para o futuro, o ON tem em sua agenda um grande desafio: a instalação de cinco novos observatórios magnéticos no Brasil (figura 10). Há algumas dificuldades que devem ser superadas na implementação desse projeto. Uma delas é a seleção das regiões mais adequadas, distantes de quaisquer influências magnéticas que possam interferir no funcionamento dos instrumentos. Outra dificuldade é o estabelecimento de cooperações nacionais que permitam o treinamento de equipes locais para a realização das medições – e também para a manutenção dos observatórios. Há, ainda, a necessidade de se estabelecer redes internacionais de cooperação para o desenvolvimento de pesquisas de ponta.

Hoje, um novo observatório magnético já está em fase de instalação. Fica na cidade de Tefé (AM). É uma colaboração com o Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá e com o GFZ-Postdam.

SUGESTÕES PARA LEITURA

- JANKOWSKI, J; SUCKSDORFF, C. IAGA Guide for magnetic measurements and observatory practice. International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Warsaw, 1996
- LEAN, J., 2005. 'Living with a variable Sun'. *Physics Today*. June, 2005.
- LOVE, J. J. 'Magnetic monitoring of Earth and space'. *Physics Today*, 2008.
- MERRIL, R. T.; MCELHINNY, M. W.; McFADDEN, P. L. (1996). *The Magnetic Field of the Earth - Paleomagnetism, the core and the deep mantle*. Academic Press. Volume 63.



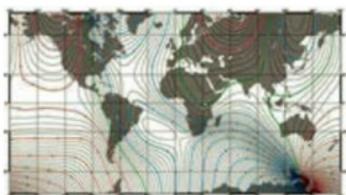


UMA BREVE HISTÓRIA DO GEOMAGNETISMO

Elder Yokoyama

*Instituto de Geociências,
Universidade de Brasília*

Assim como a gravidade, o magnetismo é uma característica fundamental de nosso planeta. Ele é, apesar de nem sempre nos darmos conta disso, essencial à nossa própria existência. Acontece que os efeitos da força da gravidade são muito mais facilmente percebidos do que os efeitos do magnetismo e do geomagnetismo. Provavelmente por esse motivo, o conhecimento sobre esses fenômenos foi adquirido de forma muito mais lenta e gradual ao longo dos séculos. A atração de objetos de ferro por alguns materiais naturais é conhecida desde tempos muito antigos, o que torna as origens desse estudo incertas ou repletas de lendas e mitos. Quem foram os povos que desenvolveram as primeiras hipóteses acerca desse fenômeno natural? Que motivações eles tinham? E como foi o início das primeiras tecnologias – como a bússola – que nos permitiram dar os primeiros passos rumo ao entendimento dos fenômenos magnéticos?



Conta-se que o magnetismo foi descoberto por acaso na Grécia antiga – por um pastor de ovelhas que teve suas sandálias, confeccionadas com tiras de ferro, presas ao solo devido à presença de grande quantidade de minerais magnéticos. Os gregos daquela época – estamos em aproximadamente 500 a.C. – já sabiam que esses minerais ocorriam em alguns locais próximos à cidade de Magnésia, na Ásia Menor, atual Turquia. É por isso que hoje muitos historiadores acreditam que o termo ‘magnetismo’ é oriundo da ocorrência do fenômeno nessa antiga cidade.

No Ocidente, as primeiras descobertas sobre o magnetismo aconteceram na Grécia. Mas, no Oriente, a China é considerada o verdadeiro berço desse conhecimento. Lá, as referências a esse fenômeno remontam mais de 4 mil anos. E, da mesma forma como no Ocidente, as histórias acerca das primeiras observações são repletas de lendas e incertezas. Uma dessas histórias se passa no ano 2630 a.C., quando tropas de um império lutavam uma batalha sob densa neblina. Sendo a visibilidade tão baixa, é dito que o exército era guiado por uma carruagem que possuía uma espécie de bússola rudimentar na forma de uma figura feminina.

Deixando as lendas e mitos de lado, tanto os gregos quanto os chineses possuem importantes registros históricos sobre o magnetismo e o geomagnetismo. Na verdade, o primeiro registro que nos chegou acerca desse fenômeno é atribuído ao filósofo e matemático grego Tales de Mileto (624 a.C-546 a.C.). Ele é mais conhecido por seus tratados matemáticos do que por seus trabalhos com magnetismo. Mas nessa área ele também legou importantes observações – notadamente sobre o que hoje chamamos de eletricidade estática e, além disso, sobre a origem do magnetismo nos materiais. A partir de observações em rochas magnéticas, Tales foi o primeiro a propor que o efeito de atração não possuía origem externa. Ele descreve que a atração é de origem interna, fruto da própria ‘alma’ da rocha. O trabalho de Tales foi mencionado em textos de filósofos e historiadores como Platão (428-348 a.C.) e Plutarco (45-120).

Entretanto, os primeiros registros históricos sobre o uso prático do magnetismo vêm da China: dados mostram que os chineses já fabricavam bússolas entre 300 e 200 a.C.. Essas bússolas, denominadas *Si Nan*, eram utilizadas para ‘harmonizar’ as construções com as forças naturais da Terra – e eram constituídas por uma prancha na qual repousava uma agulha em forma de colher (figura 1). O instrumento era eficaz na localização da estrela Polar Norte, usada para orientação. Embora essas bússolas tenham sido confeccionadas desde 300 a.C., o primeiro registro do seu uso em uma navegação marítima se dá apenas em 1170, quando o escritor chinês *Chu Yu* relata o uso do aparelho





para orientar navios chineses quando as condições climáticas eram desfavoráveis. A esse escritor é atribuído o primeiro registro formal sobre a bússola chinesa.

Figura 1. Bússola chinesa, conhecida como Si Nan, do século 1.

É a mais antiga do mundo

BÚSSOLA E EPÍSTOLA

O uso da bússola pelos chineses foi difundido, a partir do século 11, por boa parte do Oriente. Porém, como essa tecnologia chegou ao continente europeu ainda é algo incerto; o tema continua sendo motivo para debates historiográficos.

Alguns poucos relatos dos séculos 12 e 13 sugerem que a bússola poderia ter chegado à Europa pelas mãos de mercadores árabes que percorriam a famosa rota da seda. O primeiro registro sobre a bússola no velho continente foi descrito em um importante documento histórico: a epístola de Petrus Peregrinus de Maricourt (1211-1269). Trata-se de uma obra com 14 capítulos, dividida em duas partes. Na primeira, Petrus, seu autor, menciona experimentos com a magnetita: ele demonstra a existência da dipolaridade dos magnetos, que chamamos de imãs; e menciona o efeito da atração de polos opostos e a repulsão de polos iguais. Na segunda parte da obra, o estudioso fala sobre o uso da bússola e sua confecção.

Pouco se sabe sobre Petrus Peregrinus – também conhecido como Pierre Pelerin de Maricourt. Ele foi possivelmente um engenheiro militar de origem francesa, nascido na região de Picardy. Recebeu o sobrenome ou apelido de Pelerin, que significa ‘peregrino’, devido a sua participação em uma das cruzadas à Terra Santa, Jerusalém, no período medieval. Petrus estava a serviço do rei Charlie de Anjou (1226-1285). Após essa peregrinação, o estudioso participou do cerco

à cidade de Lucena, na Itália, no ano de 1269. Durante esse período, ele tentou desenvolver diversos aparatos de guerra que se utilizavam de efeitos magnéticos.

Petrus documentou os avanços que conseguiu e as teorias que desenvolveu sobre magnetismo. Tais registros foram escritos em forma de cartas, que haviam sido enviadas a um conhecido seu que vivia em sua cidade natal. A epístola ficara no esquecimento por quase três séculos – até que foi mencionada pelo físico e médico inglês William Gilbert (1544-1603) em seu famoso livro *De magnete*, importante obra da história da ciência (da qual voltaremos a falar mais adiante). Muitos historiadores, porém, consideram a epístola de Petrus Peregrinus um marco científico tão ou mais importante que o próprio *De Magnete*.

DECLINAÇÃO E INCLINAÇÃO

Embora as descobertas de Petrus Peregrinus tenham caído no esquecimento por quase 300 anos, o uso da bússola na Europa cresceu e evoluiu bastante nesse período. Entre os séculos que separam as vidas de Petrus e Gilbert, o uso da bússola passou a ser relativamente comum na Europa. Foi nesse período que os europeus descobriram a declinação magnética – que é a diferença de direção existente entre o Norte geográfico e o Norte magnético do planeta. Curiosidade: registros antigos mostram que os chineses já sabiam disso em 720.

No final do século 14, muitas bússolas começam a ser produzidas na cidade de Nuremberg, na Alemanha. Mas foi apenas no século seguinte que apareceram os primeiros escritos europeus sobre a declinação do campo magnético terrestre. Um dos primeiros registros foi uma carta do engenheiro e astrônomo alemão Georg Hartmann (1489-1564), em 1544. Ele relata que registrou os valores da declinação magnética no ano de 1510, na cidade de Roma (figura 2). Nesse experimento, Hartmann notou que havia uma diferença de 4 graus para Leste em relação à cidade de Nuremberg – ou seja, ele notou que havia uma variação da declinação de uma cidade para outra. A busca pelos valores de declina-

Figura 2. Bússola com declinações feitas por Georg Hartmann em 1562



VICTORIA AND ALBERT MUSEUM, LONDON

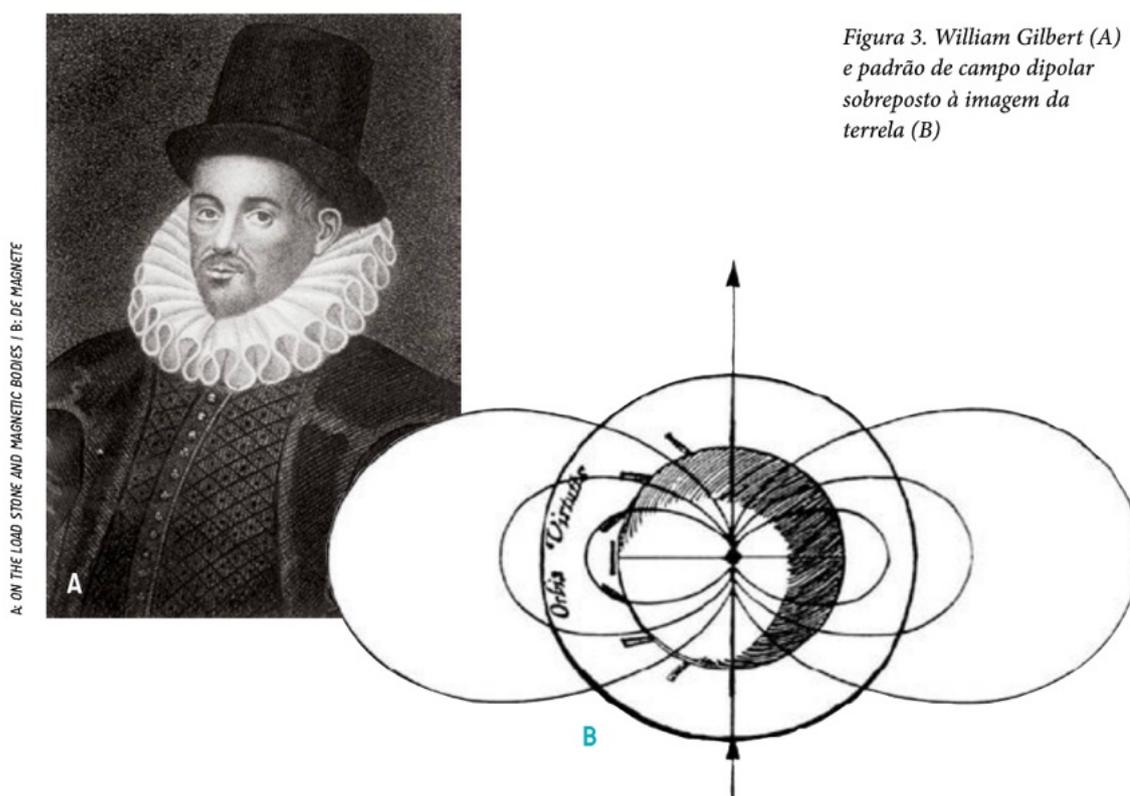


Figura 3. William Gilbert (A) e padrão de campo dipolar sobreposto à imagem da terrela (B)

A: ON THE LOAD STONE AND MAGNETIC BODIES / B: DE MAGNETE

ção foi, possivelmente, a mais importante evolução dos estudos em geomagnetismo daquele período.

É importante lembrar que esse momento histórico foi marcado pelas Grandes Navegações, principalmente portuguesas e espanholas. Dentro desse contexto, vale citar o trabalho do navegador português João de Castro (1500-1548). Muito mais que um navegador, ele foi cartógrafo e governador do Estado Português da Índia. Seus estudos sobre declinação foram feitos durante sua viagem à Ásia em 1538. Nessa jornada, levou uma bússola e pode medir a declinação em várias localidades, como em Moçambique e no golfo de Bombaim, na Índia.

Além da declinação, outra característica do campo magnético descrita no mesmo período foi a inclinação – que é uma medida dada pelo ângulo de inclinação da agulha da bússola em relação ao plano horizontal.

DE MAGNETE

Em 1600, Gilbert reuniu em um mesmo texto séculos de conhecimento sobre o magnetismo e o geomagnetismo. Assim, nesse mesmo ano, publicou *De magnete*, um de seus mais célebres livros. Além de compilar todo o conhecimento disponível na época, o autor conduziu e descreveu detalhadamente seus próprios experimentos com a chamada terrela – uma esfera metálica que simula o comportamento do campo magnético da Terra (figura 3). Esse livro é considerado por muitos historiadores o primeiro tratado de física moderna.

Em seus estudos sobre magnetismo, Gilbert confirmou as principais propriedades magnéticas descritas por Peregrinus, como a existência de polos magnéticos; a indução magnética em metais (como o ferro) provocada por ímãs; a perda e aquisição de magnetização por objetos de ferro devido a sucessivos aquecimentos e resfriamentos... Foi provavelmente Gilbert, em seus experimentos com a terrela, o primeiro a propor que a Terra se comporta como um grande ímã.

Alguns historiadores, porém, questionam se foi mesmo Gilbert o primeiro a propor tal ideia. Trabalhos anteriores do matemático inglês Henry Briggs (1561-1630), da Universidade de Oxford, na Inglaterra, já mostravam que existem relações geométricas no campo magnético da Terra, vinculadas aos valores de inclinação e às latitudes.

Com base nos trabalhos de Briggs, um estudante de Gilbert chamado Mark Ridley (1560–1624) propôs, em 1613, uma possível origem interna do campo magnético terrestre. Assim como Ridley, outro estudioso do magnetismo, aproximadamente na mesma época, focou seus esforços em entender o fenômeno. Era Guillaume Le Nautonier (1560-1620), um teólogo e geógrafo francês pouco conhecido. Foi em 1601 que ele publicou seus estudos sobre o magnetismo terrestre. Em seu livro *Leymant, Nautonier (sem tradução para o português)* propõe um modelo geométrico detalhado do campo magnético. Tal modelo, aliás, possibilitou a confecção de cartas de declinação magnética em ambos os hemisférios, o que foi muito útil aos navegadores.

A partir dessas publicações do início do século 17, o mapeamento de declinações magnéticas passa ser cada vez mais comum. Os matemáticos ingleses Edmund Gunter (1581-1626) e seu sucessor Henry Gellibrand (1597-1637), por exemplo, notaram uma variação temporal nos valores de declinação para um mesmo lugar. Seus trabalhos, publicados entre 1620 e 1625, cunharam o que hoje chamamos de variação secular – que é o deslocamento de feições do campo magnético terrestre ao longo dos anos, como mudanças de polos ou anomalias. Os estudos e descobertas do século 17 criaram um cenário favorável ao desenvolvimento de novos conhecimentos sobre o magnetismo e o geomagnetismo no século seguinte.

VARIAÇÃO DIURNA

Como vimos, o século 17 foi marcado por grande progresso no campo do magnetismo e do geomagnetismo – e também no campo da eletricidade. Nesse período, surgiram conhecidos cientistas dos quais ouvimos falar até os dias atuais. Edmond Halley (1656-1742), por exemplo, que ficou famoso pelo cometa que leva seu nome, foi quem produziu a primeira carta global com linhas de declinação magnética baseadas em medições. Essa carta foi publicada em 1702, após o retorno de Halley de sua viagem ao redor do mundo (figura 4).





As descobertas sobre a variação da declinação ao longo do tempo, feitas no século anterior, impulsionaram a confecção de instrumentos mais precisos para aferir medidas. Um desses instrumentos foi construído em 1722 pelo relojoeiro inglês George Graham (1673-1751). Era uma bússola de maior precisão. Com esse aparato, Graham descobriu que a declinação do campo magnético sofria pequenas variações ao longo do dia. Foi, então, nesse instante que surgiu o conceito de variação diurna do campo magnético terrestre. Hoje, sabemos que essas alterações estão ligadas à ação do campo magnético do Sol.

É importante destacar o trabalho do matemático suíço Leonhard Euler (1707-1783). Em 1757, ele observou uma assimetria no modelo de

Figura 4. Mapa de correção da variação da declinação magnética feito a partir de informações colhidas por Edmond Halley em sua viagem ao redor do globo entre os anos de 1698 e 1700

Figura 5. Quadro do pintor austríaco Eduard Ender (1822-1883) mostra Alexander Von Humboldt durante sua viagem ao redor do mundo



ARQUIVO DA ACADEMIA DE CIÊNCIAS E HUMANIDADES DE BERLIM-BRANDENBURG

dipolo. Essa assimetria poderia, segundo ele, explicar algumas feições observadas no campo magnético terrestre, como a diferença espacial da declinação. Ainda nesse mesmo século, devemos ressaltar os trabalhos do físico francês Charles Augustin Coulomb (1736-1806). Em 1777, ele desenvolveu um equipamento conhecido como balança de torção, capaz de medir com precisão a variação diurna do campo magnético. Todas essas descobertas e inovações foram possíveis graças ao grande melhoramento instrumental, metodológico e teórico da época.

MODELOS DE CAMPO

O século 19 foi marcado pelo entendimento da variação espacial do campo magnético terrestre; pela criação de observatórios magnéticos; pela criação de modelos geomagnéticos; e pelo surgimento dos primeiros conceitos sobre paleomagnetismo.

Antes de enumerar os avanços do conhecimento magnético daquele século, entretanto, é preciso voltar ao final do século 18 – quando o entusiasmo, a versatilidade e a inteligência do jovem naturalista Alexander Von Humboldt (figura 5) trariam uma nova perspectiva aos estudos do magnetismo no mundo. Humboldt, um naturalista e explorador prussiano, iniciou em 1797 expedições a várias partes do mundo para coletar diversas informações, dentre elas a variação anômala do campo magnético terrestre. Em decorrência dessas viagens, Humboldt desenvolveu o conceito de isovalores de campo magnético. Ele percebeu que em determinadas regiões os valores de intensidade ou direção do campo possuíam distribuição igual. A essa distribuição ele associou linhas de contorno de mesmo valor, semelhante ao que vemos em curvas de nível nos mapas topográficos.

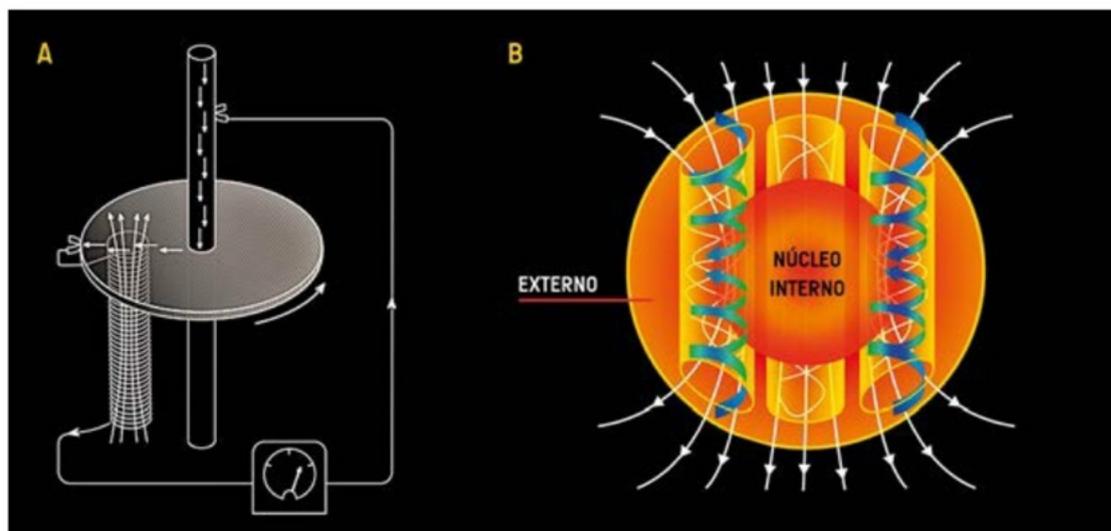
Ao retornar à Alemanha, no começo do século 19, Humboldt começou a desenvolver a ideia da criação de um observatório magnético. Munido das informações das suas viagens e apoiado pelo francês François Arago (1786-1853), naturalista e amigo íntimo, Humboldt construiu um pequeno observatório em Berlim, realizando lá mais de 5 mil medidas. Contudo, seu trabalho mais marcante desse período foi realizado na Itália, em 1807, em parceria com o químico e físico francês Louis Joseph Gay-Lussac (1778-1850), mais conhecido por sua lei dos gases. Nesse trabalho, a dupla de pesquisadores conseguiu, pela primeira vez, traçar linhas de isovalores com base em medidas reais. Foi um notável avanço científico para a época.

Nessa primeira metade do século 19, além Humboldt e Gay-Lussac, outros importantes estudiosos contribuíram para o entendimento da geofísica e, em especial, do magnetismo. Nesse contexto, ressaltamos os trabalhos do físico e químico dinamarquês Hans Christian Ørsted (1777-1851), que em 1820 observou a resposta magnética provocada por uma corrente elétrica; e também os escritos do físico, matemático e filósofo francês André-Marie Ampère (1775-1836), que explicou, pouco tempo depois, esse fenômeno como resultado da indução magnética.

Esse cenário dinâmico e cientificamente rico atraiu a atenção de muitos outros estudiosos. Aproveitando-se desse momento, Humboldt entrou em contato com outros pesquisadores e sociedades científicas, incentivando todos a criar novos observatórios magnéticos. Entre esses contatos, estão o físico alemão Wilhelm Weber (1804-1891) e seu assistente Johann Carl Friedrich Gauss (1777-1855). Em 1832, a dupla começou a construir um observatório magnético na cidade de Göttingen, na Alemanha. A ideia era que essa nova instalação pudesse medir não só as componentes direcionais do campo, mas também sua intensidade.

Em 1834, Weber e Gauss aceitam o convite para participar de uma nova rede de observatórios magnéticos idealizada por Humboldt. Com o tempo, essa rede se expande e novos observatórios magnéticos são construídos no Canadá, no Atlântico Sul, na Tasmânia e na Índia. Enorme quantidade de dados pode ser obtida com esses novos empreendimentos – levando o estudo do campo magnético do planeta a outro patamar.

Gauss, que era assistente de Weber, foi um dos mais notáveis matemáticos da história. Impulsionado por seu tutor e incentivado por Humboldt, ele se utilizou de seus próprios meios matemáticos para investigar a geometria e a origem do campo magnético terrestre. Gauss conclui, por exemplo, que 99% do campo terrestre têm sua origem interna e que, para polos opostos, a intensidade do campo decai com o inverso do cubo da distância. Essa última conclusão, porém, não foi ideia exclusiva de Gauss. Ao mesmo tempo em que ele desenvolvia sua matemática para explicar o campo magnético terrestre, outro importante matemático também o fazia. Era o francês Siméon Denis Poisson



FONTE: BLOKHMAN & GUBBINS, 1989

Figura 6. À esquerda (A), um dínamo autoexcitado. O disco de cobre gira em um eixo eletricamente condutor. A corrente elétrica é indicada pelas setas grossas; e o campo magnético gerado pela bobina sob o disco é indicada pelas setas finas. À direita (B), representação do geodínamo no núcleo externo da Terra. As setas em azul mostram o movimento do fluido; e as linhas brancas correspondem às linhas do campo magnético

(1781-1840). Ele desenvolveu, em 1825, a matemática que resolveria o decaimento do campo magnético na maior parte dos casos – há alguns casos em que esse tipo de cálculo não se aplica.

Ainda estamos no início do século 19. Nessa época, um renomado físico também contribuiu, ainda que indiretamente, para a melhor compreensão do campo magnético terrestre. Estamos falando do inglês Michael Faraday (1791-1867). Em 1821, logo após Ørsted descobrir a relação entre eletricidade e magnetismo, Faraday publicou um artigo científico que chamou de *Rotação eletromagnética*, no qual explorou os princípios de funcionamento do dínamo elétrico.

Já na segunda metade do século 19, esses dois campos do conhecimento – o magnetismo e a eletricidade – tiveram suas propriedades devidamente organizadas e associadas através do trabalho do físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879). Ele ficou conhecido por ter dado forma final à teoria moderna do eletromagnetismo. Essa teoria une, enfim, a eletricidade, o magnetismo e a óptica. Todo o conhecimento reunido e sistematizado ao longo do século 19 abriu os precedentes necessários para que, no século seguinte, houvesse o desenvolvimento de uma teoria sólida que explicasse a origem do campo magnético da Terra: a teoria do geodínamo.

TEORIA DO GEODÍNAMO

O estudo do campo magnético terrestre continuou a prosperar no século 20. E novos observatórios foram instalados nos Estados Unidos, na Rússia e no Japão. Em 1904, geofísico e astrônomo norte-americano Louis Agricola Bauer (1865-1932), do Instituto Carnegie, nos Estados Unidos, criou o Departamento de Pesquisa Internacional de Magnetismo Terrestre. Esse departamento empregava, para pesquisas geomagnéticas oceânicas, duas embarcações: o cargueiro *Galileia* e o navio não magnético *Carnegie*.

Com o passar dos anos, novas tecnologias foram surgindo, o que possibilitou aos observatórios magnéticos terrestres registrar o campo em termos vetoriais – isto é, considerando valores tanto de direção quanto de intensidade, e considerando componentes ortogonais nos eixos X, Y e Z. Além dos observatórios e dos navios, a evolução tecnológica permitiu que, a partir de 1980, medidas de campo magnético fossem feitas por aeronaves. E, a partir de 2000, por satélites. Com todos esses avanços no domínio prático-experimental, houve um aumento exponencial na quantidade e distribuição dos dados magnéticos, o que impulsionou o desenvolvimento e aprimoramento das teorias geomagnéticas.

Um dos grandes desafios da área, no início século 20, foi a tentativa de encontrar a fonte do campo magnético de nosso planeta. Surge, no período, um grande número de diferentes teorias. Uma das hipóteses consideradas por vários estudiosos teve como base o trabalho do físico inglês Patrick Maynard Stuart Blackett (1897-1974). Em seu trabalho, ele postulou que o campo magnético da Terra teria como fonte a própria rotação do planeta. Dois alunos dele exploraram essa ideia: Edward Bullard (1907-1980) sugeriu que tal fonte faria com que o campo se tornasse mais fraco com o aumento da profundidade; ao passo que Stanley Keith Runcorn (1922-1995), por meio de pesquisas de laboratório amparadas por medições reais feitas em minas profundas, mostrava o contrário.

Uma hipótese diferente, concordante com um crescente número de evidências sismológicas, se originou a partir do trabalho do físico e matemático irlandês Joseph Larmor (1857-1942). Em 1919, ele propôs que o campo magnético do Sol operaria como um dínamo auto-excitado. A teoria de Larmor parecia muito atrativa – uma vez que o núcleo externo líquido se assemelharia muito fisicamente com o Sol, que se comporta como um fluido gasoso.

Em 1939, o físico norte americano Walter Elsasser (1904-1991) publicou *A origem dos campos magnéticos*. Nessa obra, ele argumentava que movimentos convectivos turbulentos no núcleo externo líquido e metálico da Terra dariam origem às correntes termelétricas. E, conseqüentemente, gerariam campos magnéticos. Nascia aí a teoria do geodínamo (figura 6). Apesar do ceticismo inicial, essa teoria acabou ganhando, com o passar dos anos, aceitação universal.

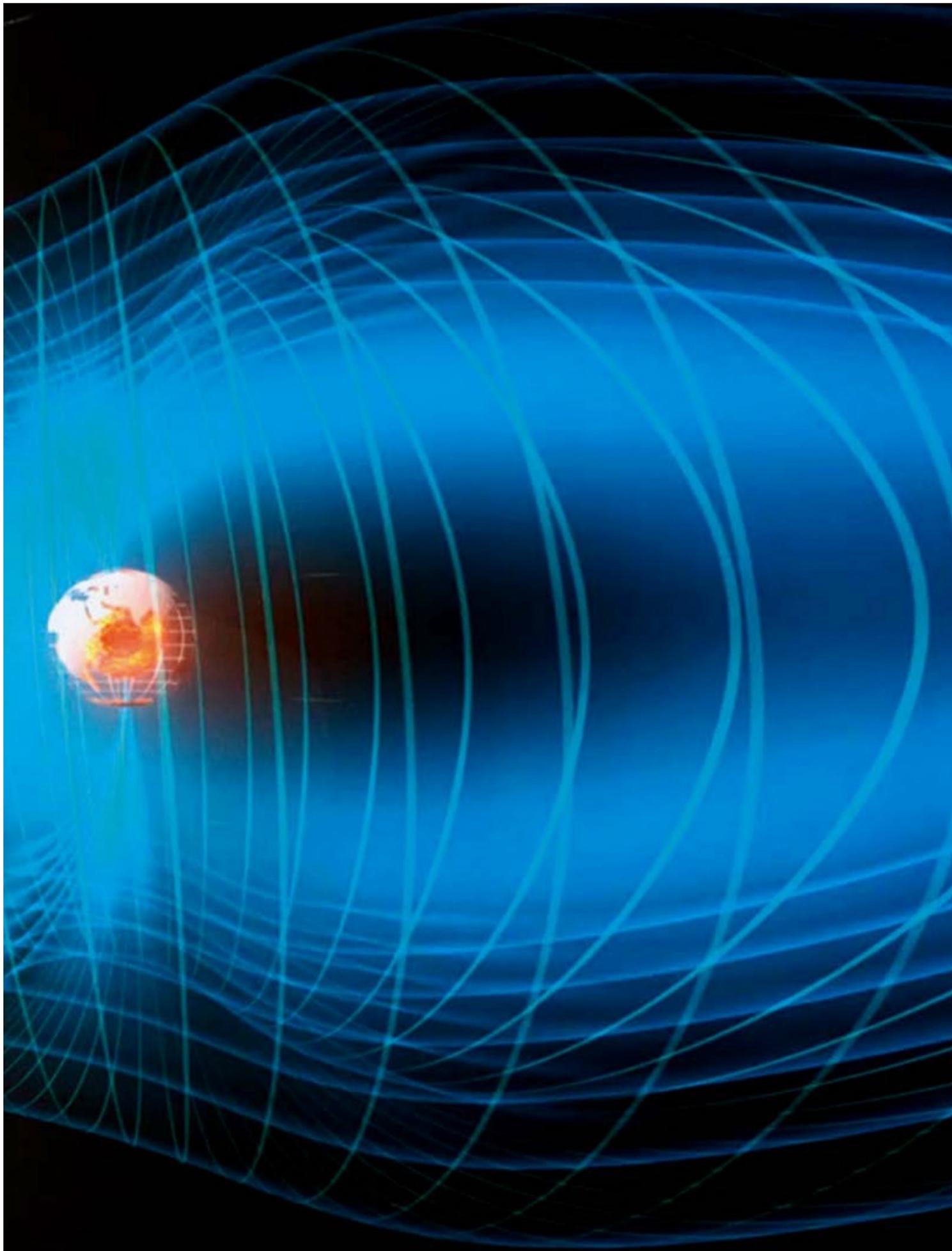
Foi notável o progresso dos estudos geomagnéticos ao longo das últimas décadas. Entretanto, questões sobre as mudanças do geodínamo, assim como suas implicações na forma do campo magnético terrestre, ainda permanecem em aberto. Os avanços matemáticos, instrumentais e computacionais abriram novos e vastos horizontes, que devem ser explorados durante esse novo século.

SUGESTÕES PARA LEITURA

GROTZINGER, John; TOM, Jordan. *Para entender a Terra*. Porto Alegre: Editora Bookman, 2013.

ROONEY, A. *A história da física*, 1ª edição, Editora Mbooks, 2013.



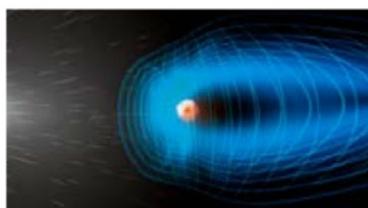


OBSERVATÓRIO MAGNÉTICO DE VASSOURAS: UM SÉCULO DE PESQUISAS

Cosme Ferreira da Ponte Neto

*Divisão de Atividades Educacionais,
Observatório Nacional*

Por muitos séculos, o uso da bússola foi fundamental para a orientação de navegadores, exploradores e estudiosos que se aventuravam pelas mais remotas latitudes da Terra. Mas hoje, com o avanço das tecnologias de posicionamento via satélite, esse importante instrumento cedeu espaço para sistemas mais avançados de navegação. Entretanto, o princípio básico por trás do funcionamento das bússolas continua sendo de grande importância para a ciência. Afinal, estudos sobre o magnetismo terrestre podem revelar informações preciosas acerca do interior de nosso planeta, das dinâmicas internas que geram o campo magnético que nos circunda, sobre diferentes níveis de interação entre a Terra e o Sol, e, também, esse conhecimento ganha importância econômica ímpar uma vez que pode ser empregado em processos estratégicos de prospecção mineral. A história do geomagnetismo remonta séculos. E o Observatório Magnético de Vassouras (OMV) é parte dessa interessante jornada científica que vem desafiando pesquisadores de várias épocas em diferentes lugares do mundo.



O estudo sistemático do campo geomagnético da Terra começou em meados do século 18. Foi com os trabalhos do cientista alemão Johann Carl Friedrich Gauss (1777-1855) que se iniciaram os avanços mais significativos nessa área do conhecimento. As medidas geomagnéticas, antes de Gauss, eram aferidas essencialmente para determinar a declinação magnética com vistas à elaboração de cartas isogônicas – são mapas que indicam o valor da declinação magnética em uma determinada região durante uma determinada data (ver ‘O que é declinação magnética’). Essas cartas eram fundamentais para os trabalhos de cartografia, navegação e geodésia na época de Gauss (ver ‘Da matemática ao geomagnetismo’).

O modelo matemático que ele desenvolveu para a representação do campo geomagnético foi um grande avanço científico. Tal modelo permite, afinal, a determinação das características desse campo em todo o globo. Mas a precisão para esse tipo de cálculo depende do número de observatórios geomagnéticos nas proximidades do local a ser analisado: quanto mais observações, maior a precisão do modelo matemático. Isso impulsionou a instalação de observatórios geomagnéticos em todo o planeta – possibilitando a determinação cada vez mais precisa do campo geomagnético da Terra.

NO BRASIL

No Brasil, os dados geomagnéticos entre 1500 e 1883 se limitavam basicamente a determinações da declinação magnética nos portos e ao longo do litoral. Essas medidas eram tomadas por técnicos em navegação e pilotos de navios comerciais.

Já entre 1883 e 1900, foi realizada uma série de medidas pelo explorador holandês Elie Van Rijckevorsel (1845-1928). Ele fez medidas nas quais foram determinadas a declinação magnética, a componente horizontal e a inclinação do campo geomagnético no interior do Brasil. Mas foi a partir de 1914 que o Observatório Nacional (ON) passou a monitorar continuamente e sistematicamente todos os elementos do campo geomagnético – tanto no recém-criado OMV quanto em estações distribuídas pelo território nacional. O ON passou também a publicar esses dados de maneira sistemática; e a elaborar modelos matemáticos e cartas para a representação do campo geomagnético em nosso país.

O QUE É DECLINAÇÃO MAGNÉTICA?

• O campo magnético da Terra é muito semelhante ao campo magnético gerado por uma esfera magnetizada. Existem, porém, algumas distorções que fazem esse campo não ser perfeitamente simétrico em relação ao eixo de rotação da Terra. Isso quer dizer que os polos geomagnéticos não coincidem com os polos geográficos. Essa assimetria é um dos fatores que fazem com que a bússola, quando usada na maioria dos locais da Terra, não aponte exatamente para o polo geográfico. A diferença angular entre a direção do polo geográfico e a direção indicada pela bússola recebe o nome de declinação magnética. Essa declinação muda de acordo com o local onde estamos na superfície do planeta. E seu valor também se altera ao longo do tempo. Essa variação temporal é denominada variação secular.

GEOMAGNETISMO E NAVEGAÇÃO

Antes da década de 1960, quando ainda não eram comuns as tecnologias baseadas no uso de satélites, a declinação magnética e a medida de tempo, aferida por cronômetros calibrados, eram informações indispensáveis para a navegação aérea e marítima. Essa foi, aliás, uma das razões que motivaram a criação do ON, em 1827, e, posteriormente, do OMV, em 1915.

Para a navegação, duas questões sempre foram centrais. A primeira é o posicionamento – o objetivo é saber as coordenadas geográficas, isto é, a latitude e a longitude do local onde estamos. E a segunda é o rumo – o objetivo é saber em que direção devemos navegar para chegar a nosso destino.

DA MATEMÁTICA AO GEOMAGNETISMO • Johann Carl

Friedrich Gauss (1777-1855) fez trabalhos muito importantes nas áreas de matemática, física, astronomia e geofísica. No estudo do geomagnetismo, ele deu início ao monitoramento contínuo e sistemático do campo geomagnético. Gauss estruturou a primeira rede de observatórios geomagnéticos e criou o modelo matemático de representação do campo, em escala global, através do que os especialistas chamam de harmônicos esféricos – método que é usado até os dias de hoje. Os trabalhos de Gauss, portanto, foram fundamentais para o estabelecimento das bases do geomagnetismo moderno.

WIKIMEDIA COMMONS



Carl Friedrich Gauss, pelo pintor alemão Gottlieb Biermann (1824-1908)

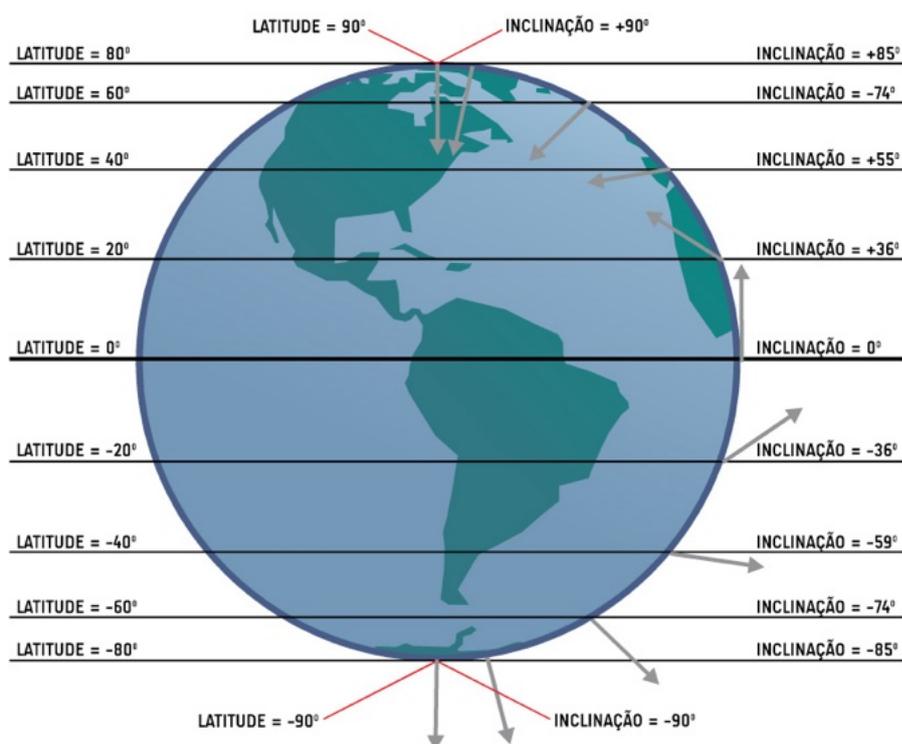


Figura 1. Variação da inclinação magnética conforme a latitude

Como a inclinação magnética pode auxiliar na determinação da latitude (figura 1), ela é uma informação muito importante para aferirmos nosso posicionamento enquanto navegamos (ver 'O que é inclinação magnética'). Contudo, a inclinação passou a ser menos relevante porque, a partir de certo momento, métodos astronômicos passaram a ser mais precisos na determinação da latitude. Já para a determinação da longitude, era fundamental saber a hora legal em um meridiano de referência.

Para a determinação do rumo, porém, a declinação magnética era de fato um dos dados mais importantes. Afinal, a declinação é a correção angular que devemos fazer na direção indicada pela bússola para que possamos determinar o rumo com precisão (figura 2).

Além de sua importância na navegação, o conhecimento da declinação magnética também era importante para a engenharia civil em projetos de estradas; para a orientação de edificações com vistas ao aproveitamento da iluminação do Sol; para a agrimensura; para a topografia; e também para questões de natureza legal, como definição de limites das propriedades e delimitação de fronteiras entre estados, municípios e mesmo países.

IMPACTO DA TECNOLOGIA

O ano de 1957, com o lançamento do satélite *Sputnik I*, pelos russos, marcou o início de uma nova era: a da pesquisa aeroespacial com a utilização de satélites para o posicionamento geodésico. Essa tecnologia evoluiu rapidamente. Em 1958, os norte-americanos lançaram o saté-

lite *Vanguard*, marcando o início do desenvolvimento do sistema *Navstar* (sigla, em inglês, para Navegação por Satélite com Padrão de Tempo). Além disso, em 1967, foi liberado para uso civil o sistema denominado NNSS (sigla, em inglês, para Sistema da Marinha de Navegação por Satélite), também chamado de *Transit*. E foi em 1973 que se iniciou o desenvolvimento da tecnologia GPS (sigla inglesa para Sistema de Posicionamento Global). Projetado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, o objetivo era oferecer a posição instantânea, bem como a velocidade e o horário de um ponto qualquer sobre a superfície terrestre.

O sistema GPS entrou em operação em 1991. Mas foi só em 1993 que a constelação de satélites utilizados pelo sistema foi concluída. O GPS foi projetado de forma que em qualquer lugar do mundo, e a qualquer momento, existam, pelo menos, quatro satélites acima do plano horizontal do observador – permitindo um posicionamento geodésico preciso e rápido.

A partir desses avanços tecnológicos, o uso da bússola como instrumento fundamental para a navegação foi sistematicamente perdendo importância. Ela foi enfim substituída. Hoje, já são de uso corrente os sistemas de posicionamento por satélite. A bússola, porém, ainda é um equipamento obrigatório para navegação marítima e aérea – por motivos de segurança. Em uma eventual pane elétrica, ou caso o sistema de satélites deixe de operar por qualquer razão, esse instrumento continua plenamente operacional, já que depende apenas do campo geomagnético para funcionar.

Nesse contexto, as prioridades do Observatório Magnético de Vassouras – assim como de vários outros observatórios magnéticos ao redor do mundo – também mudaram. O grande desenvolvimento tecnológico que aconteceu a partir de 1960 levou o OMV a se modernizar. Em 1992, o ON passou a participar da Rede Internacional de Observatórios Magnéticos em Tempo Real (Intermagnet), que é uma rede mundial de observatórios geomagnéticos. Nessa ocasião foram instalados equipamentos de alta tecnologia no Observatório de Vassouras e, assim, o local passou a integrar projetos de abrangência internacional.

NOVAS FRONTEIRAS

Quando o geomagnetismo deixou de ser importante para a navegação e para o posicionamento geodésico, ele se redirecionou para estudos de geofísica global e aplicada. Mas, por irônico que pareça, a mesma tecnologia aeroespacial que deixou a bússola obsoleta permitiu que satélites

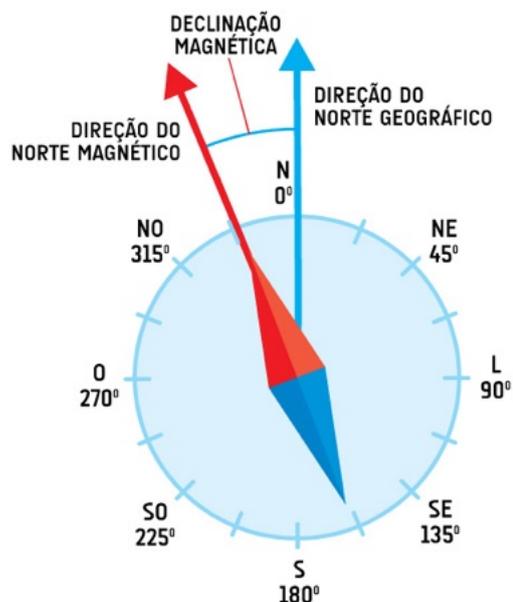
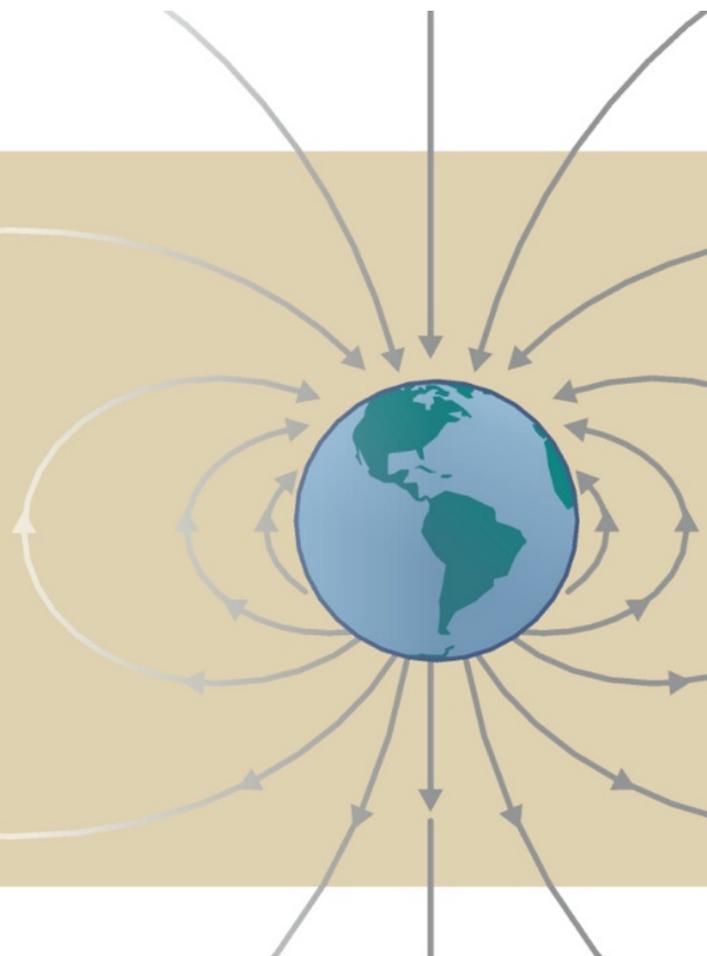


Figura 2. Declinação magnética é a diferença angular entre o Norte geográfico e o Norte magnético

O QUE É INCLINAÇÃO MAGNÉTICA?

- A Terra é circundada por um campo magnético usualmente representado por linhas de força (figura 3). Esse campo é gerado no núcleo externo do planeta, e as linhas de força ficam em posições inclinadas em relação ao plano horizontal da superfície. Essa inclinação muda com a latitude segundo uma lei matemática conhecida. Por esse motivo, a medida da inclinação do campo geomagnético permite que se faça uma boa aproximação da latitude no local da medida (figura 1). Esse dado, portanto, pode ser de vital importância para fins de orientação geográfica. A inclinação magnética pode ser medida por um instrumento chamado bússola de inclinação (figura 4).



de pesquisa levassem consigo magnetômetros. Isso possibilitou a realização de medidas do campo geomagnético em escala planetária. Essas medidas melhoraram muito os modelos matemáticos de representação do campo geomagnético. Abriam, de fato, uma nova fronteira para o estudo do interior da Terra e da interação Terra-Sol.

A instrumentação científica também teve grande impulso com o desenvolvimento da eletrônica de semicondutores, dos circuitos integrados e, mais recentemente, da eletrônica digital. Nesse contexto, as atividades do OMV se diversificaram. Passaram a interagir e cooperar com outras áreas correlatas ao geomagnetismo – como as áreas de geofísica espacial, clima espacial, geodinâmica, paleomagnetismo, arqueomagnetismo, paleoclimatologia, entre outras.

RELEVÂNCIA DOS DADOS

As características do campo geomagnético no passado, em vários intervalos de tempo, são de grande interesse para a geofísica. Essas informações podem contribuir para a compreensão de processos importantes da dinâmica interna da Terra. Alguns exemplos são os movimentos do manto e da crosta terrestres; a temperatura e o resfriamento das várias camadas do planeta, além de fenômenos relacionados ao campo externo, como a blindagem magnética de partículas carregadas provenientes do espaço. Além disso, há diversos processos atmosféricos que, de alguma maneira, se relacionam com o campo magnético.

Figura 3. Esquema gráfico do campo geomagnético

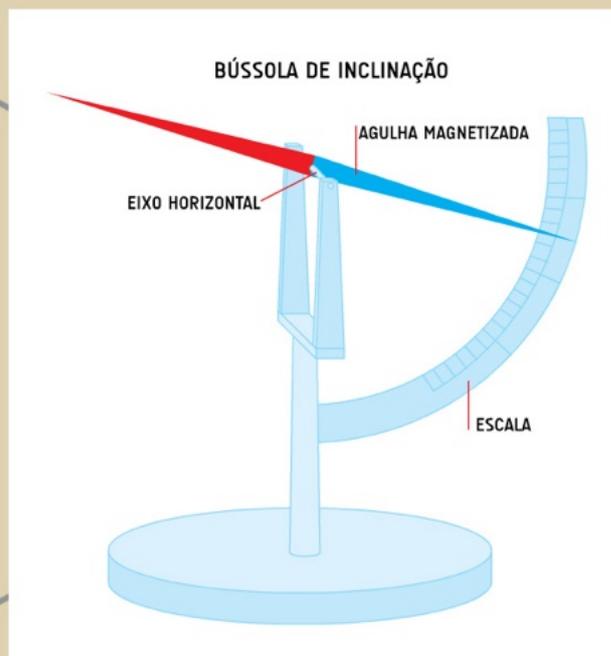
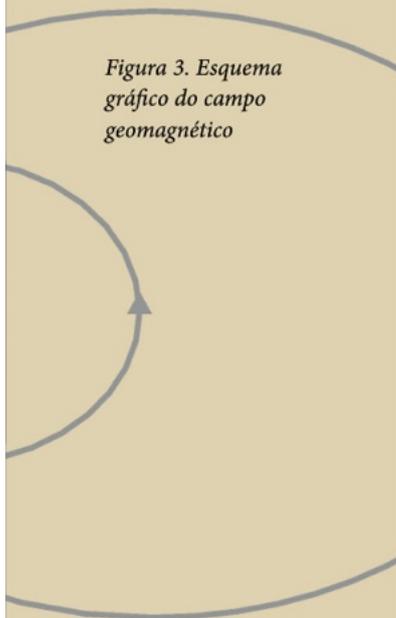


Figura 4. Bússola de inclinação, equipamento com o qual é possível medir a inclinação magnética, que é a grandeza determinada pelo ângulo que a agulha magnetizada forma com o plano horizontal

Muitas são as fontes de dados para se estudar o campo geomagnético do passado. As principais são as informações paleomagnéticas. São registros magnéticos remanescentes nas rochas – elas podem, por incrível que pareça, fornecer preciosas informações sobre o campo magnético de tempos remotos. Outra fonte importante de dados sobre o magnetismo pretérito são os documentos técnicos relacionados à navegação, à engenharia civil, à agrimensura, e mesmo documentos jurídicos. Alguns desses registros trazem informações precisas sobre o campo geomagnético da época em que foram redigidos. É a partir de tais fontes que os cientistas podem compreender o magnetismo do passado e, assim, desvendar processos importantes da evolução espaço-temporal de nosso planeta.

PROSPECÇÃO MINERAL

Alguns métodos da geofísica podem ser aplicados na prospecção mineral. Um deles é a magnetometria. Esse método se baseia na medição detalhada do campo magnético sobre uma área de interesse para prospecção. Normalmente, essas medidas são feitas com magnetômetros especiais instalados em aeronaves. Mas quando a área de interesse é pequena, o levantamento pode ser terrestre. Em geral, as medidas são realizadas sobre uma grade regular – seguindo um padrão semelhante às linhas de um tabuleiro de xadrez.

O campo magnético medido nesses levantamentos é resultado da soma de três campos magnéticos distintos: o campo 1, ou campo

NIÓBIO: MINERAL ESTRATÉGICO • O nióbio

(Nb) é o elemento químico de número atômico 41. Um de seus importantes usos é na composição de ligas especiais de aço. A presença do elemento químico nessas ligas confere a elas grande resistência mecânica. O Brasil é o maior produtor mundial de nióbio – é responsável por 75% da produção global do elemento, que vem sendo considerado de grande valor estratégico pela indústria siderúrgica (figura 5). Na natureza, o minério de nióbio geralmente está associado aos óxidos de ferro e titânio. Isso acontece porque há afinidade química entre esses compostos. E a presença de tais óxidos junto ao minério de nióbio permite sua detecção pelo método magnetométrico.

magnético principal (gerado no núcleo externo da Terra); o campo 2, ou campo externo da Terra (gerado pela interação do vento solar com a magnetosfera); e o campo 3, que é o próprio campo magnético gerado pelas rochas da crosta terrestre. Esse é o campo que nos interessa quando queremos localizar possíveis jazidas minerais em alguma localidade.

Caso exista algum minério magnético na jazida, esse minério irá gerar um campo magnético que será detectado pelo magnetômetro. Contudo, para que se possa avaliar corretamente as características dessa jazida é necessário subtrair das medidas a influência do campo 1 e do campo 2.

É nesse ponto que os dados de observatórios como o OMV são de vital importância. Afinal, os observatórios geomagnéticos fazem um monitoramento contínuo dos campos 1 e 2 e fornecem esses dados para as empresas de prospecção. Com essas informações em mãos, elas podem estudar as devidas correções nos dados coletados nos levantamentos e assim avaliar corretamente as características das jazidas. Sem os valores dos campos 1 e 2, esse trabalho se torna inviável.

Outro trabalho de notável relevância conduzido nos observatórios magnéticos é o monitoramento da atividade solar. Quando ocorrem

Figura 5. Foto aérea de uma jazida de nióbio na cidade de Catalão, no estado de Goiás, sendo explorada comercialmente



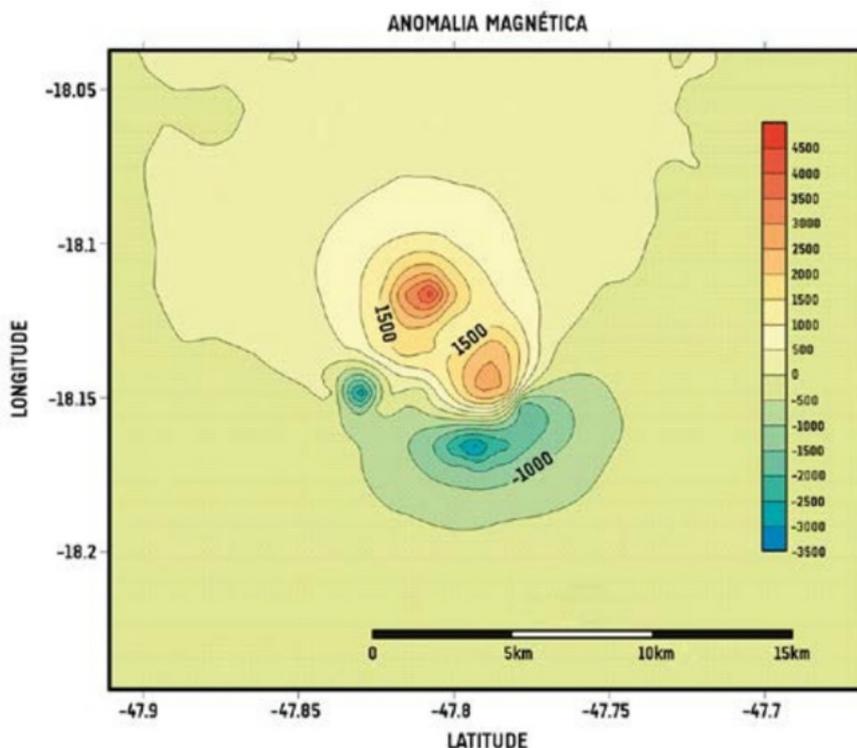


Figura 6. Anomalia magnética medida sobre uma área onde se localiza uma grande jazida de óxido de nióbio, no estado de Goiás

tempestades solares – explosões no Sol que geram grandes perturbações no campo 2 – os levantamentos magnetométricos devem ser suspensos. Motivo: os dados ficam muito ruidosos, impossibilitando sua interpretação. Os observatórios magnéticos podem detectar essas tempestades e informar às empresas de levantamento geofísico quais são os períodos nos quais os trabalhos devem ser interrompidos. Tal alerta pode proporcionar economias que facilmente atingem os milhares de dólares ao dia.

Agora, voltando ao tema da prospecção: aos dados devidamente processados e corrigidos, após análise dos campos 1, 2 e 3, damos o nome de anomalia magnética. Podemos ver, por exemplo (figura 6), uma notável anomalia magnética medida sobre uma área onde se localiza uma grande jazida de óxido de nióbio, a cerca de 20 km da cidade de Catalão (GO). Essa jazida tem uma reserva lavrável de 7,3 milhões de toneladas do mineral (ver 'Nióbio: mineral estratégico'). O mapa mostra as coordenadas geográficas da região e a escala de cores indica o valor da anomalia magnética medida em um levantamento aeromagnético realizado a uma altitude de aproximadamente 1 km.

Informações como essa revelam a grande potencialidade desse método geofísico. Isso nos faz entender por que os estudos de geomagnetismo são tão importantes para – entre uma infinidade de outras aplicações – calcularmos estimativas sobre o tamanho, a forma e a profundidade de uma determinada jazida mineral.

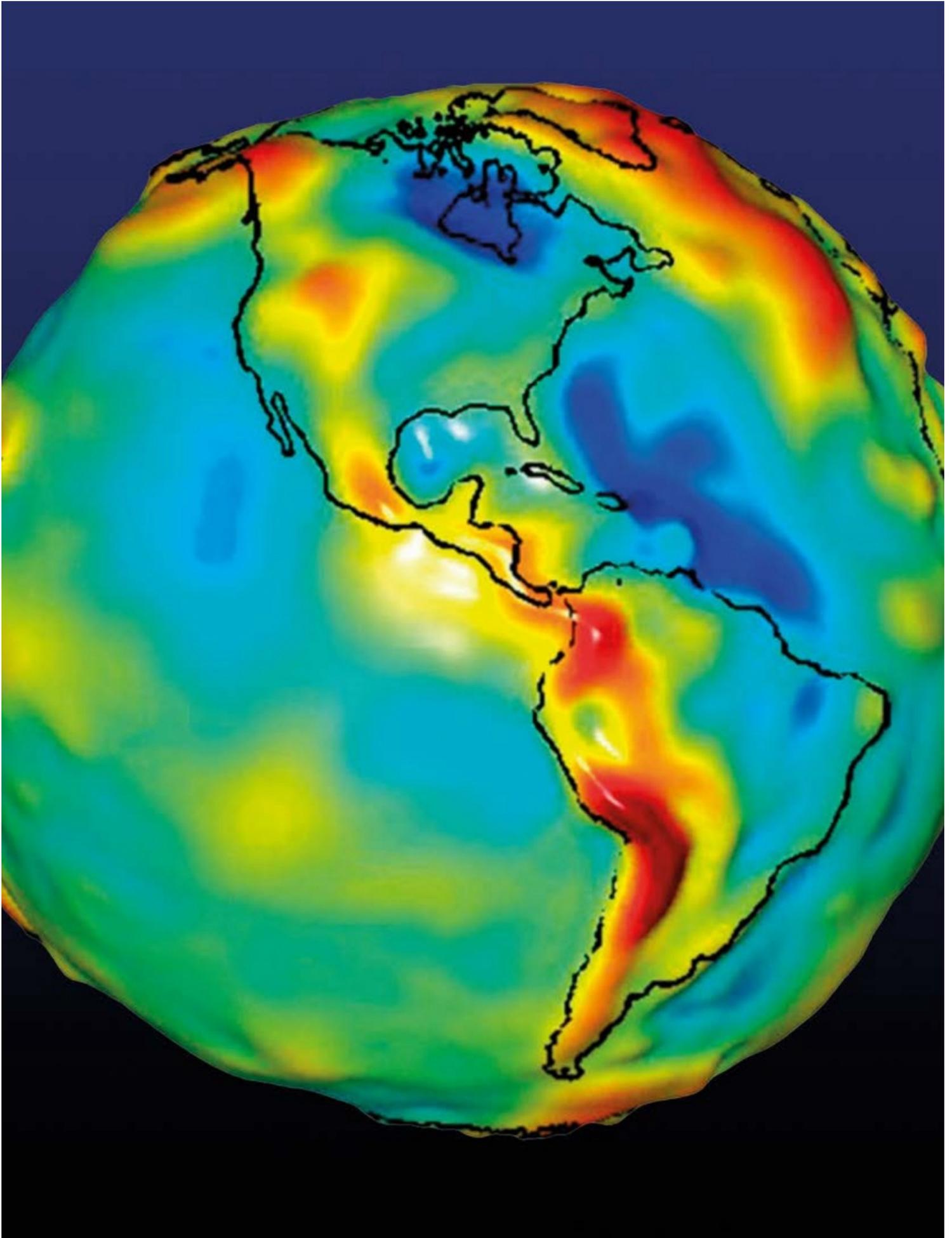
SUGESTÕES DE LEITURA

TEIXEIRA, Wilson et al (orgs.). *Decifrando a Terra*. São Paulo: Editora Oficina de textos, 2000.

KEAREY, Philip; BROOKS, Michael; HILL, Ian. *Geofísica de exploração*. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2009.

GROTZINGER, John; TOM, Jordan. *Para entender a Terra*. Porto Alegre: Editora Bookman, 2013.

SITES PARA CONSULTA
Programa Intermagnet:
<http://www.intermagnet.org>

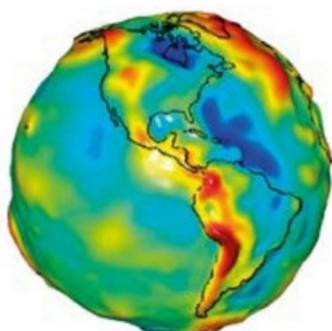


MEDINDO A GRAVIDADE TERRESTRE

Mauro Andrade de Sousa

*Laboratório de Gravimetria,
Coordenação de Geofísica,
Observatório Nacional*

O interesse científico pelo conhecimento da gravidade terrestre existe há centenas de anos. Desde as épocas de Galileu Galilei (1564-1642) e Isaac Newton (1643-1727), cientistas vêm se esforçando para conseguir uma descrição quantitativa cada vez mais detalhada dessa grandeza. O estudo da gravidade, em um primeiro momento, ficou restrito às fronteiras da física. Mas logo foram incorporados também conhecimentos da astronomia, da geodésia e, mais tarde, da metrologia. Assim, foram surgindo descrições teóricas cada vez mais precisas sobre o campo gravitacional terrestre. O Observatório Nacional (ON) iniciou a coleta de medições gravimétricas de forma sistemática, em 1955, e posteriormente uma estação de referência para essa atividade foi implantada em Vassouras, no campus do Observatório Magnético. Em maio de 2004 foi construído o Laboratório de Gravimetria, vinculado à Coordenação de Geofísica do ON. É nesse laboratório que funcionam, atualmente, os únicos gravímetros absolutos da América do Sul. Esses equipamentos fornecem os padrões primários de referência para as medições da gravidade no país. Mas por que, afinal, é tão importante estudarmos essa grandeza? E quais são as principais aplicações, em nosso país, que demandam o conhecimento exato e preciso da aceleração da gravidade?



A presença da gravidade terrestre é algo que nos toca intimamente em quase todos os aspectos de nossas vidas. Na literatura científica, essa força é normalmente expressa pela letra g , e tal grandeza indica a magnitude do campo da gravidade terrestre em um determinado ponto. Esse valor não é constante: em diferentes locais da Terra, teremos diferentes valores para a gravidade local. E mais: em um mesmo local, essa medida pode variar em função do tempo.

Há diversas explicações para o fato de que a gravidade sofre variações conforme o tempo e o espaço. Uma delas é que os próprios movimentos de nosso planeta – como, por exemplo, rotação, translação, precessão, entre outros – sofrem alterações ou irregularidades ao longo de certos períodos. E variações na gravidade terrestre também acontecem em função de dinâmicas envolvendo o Sol e a Lua, astros que exercem grande influência gravitacional sobre nós.

Ainda, é preciso considerar que a Terra não é um corpo exatamente esférico. De fato, sua forma apresenta um achatamento polar: seu raio equatorial médio é um pouco maior do que seus raios polares médios. Isso quer dizer que há forte dependência da gravidade terrestre em relação à latitude do ponto de medição. E há uma dependência ainda mais forte entre a gravidade e a altitude do local onde queremos aferir a intensidade dessa força. Considerando tantas variáveis, constatamos facilmente a ocorrência de muitas variações na gravidade terrestre, de diferentes amplitudes, em escala local, regional e global (figura 1).

As variações da gravidade também estão associadas às diferenças na densidade da subsuperfície terrestre. E tais variações interessam de perto à geofísica e à geodésia – afinal, parte do estudo dessas ciências depende do conhecimento detalhado de informações acerca da distribuição e da densidade de corpos, terrenos e estruturas geológicas em diferentes escalas, extensões e profundidades.

Mapas gravimétricos – isto é, mapas que espacializam os valores da gravidade em uma determinada área – são, portanto, ferramentas de grande relevância para a identificação de locais de interesse para a geotécnica e, por consequência, para a identificação de locais apro-

IMAGEM CEDIDA PELO AUTOR

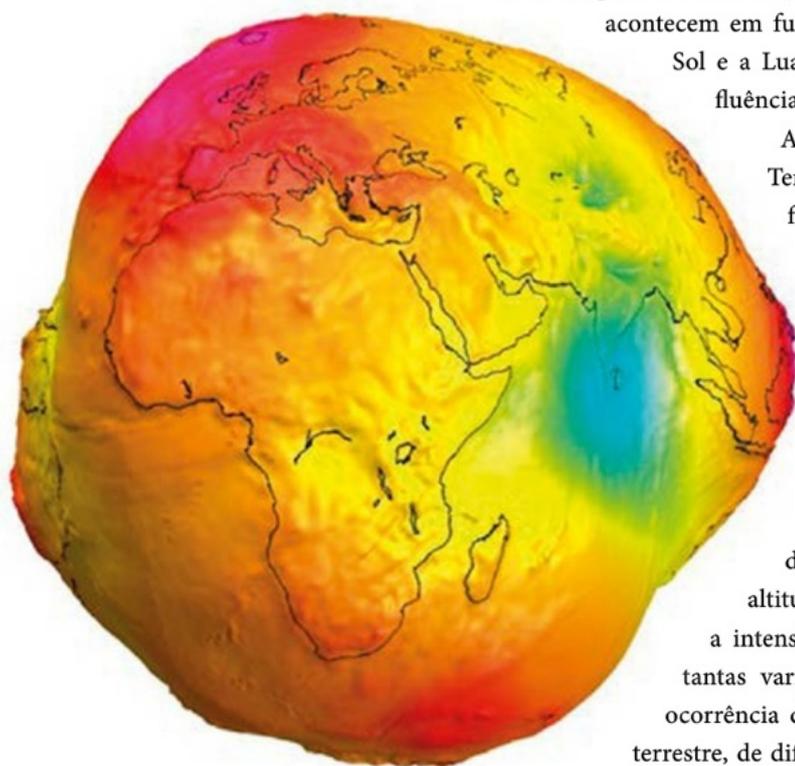


Figura 1. Modelo de variação da intensidade do campo da gravidade terrestre. Em verde-azulado, as discrepâncias negativas. E, em laranja-avermelhado, as positivas. Tais variações ocorrem tanto nas placas continentais como sobre as bacias oceânicas, indistintamente

priados para a montagem de grandes infraestruturas. Pontes, represas, usinas nucleares e instalações militares são alguns exemplos. Medições da aceleração da gravidade permitem também modelar a distribuição e densidade de rochas localizadas abaixo da superfície da Terra. No Brasil, o setor privado se vale dessa possibilidade para reunir informações que permitam explorar jazidas minerais e de hidrocarbonetos. E, além dessas aplicações de imediato interesse socioeconômico, os mapas gravimétricos também auxiliam pesquisadores no estudo de estruturas profundas na crosta e litosfera terrestres.

Note que existe uma diferença entre a gravidade terrestre e a atração gravitacional da Terra. A interação gravitacional é aquela relação matemática descrita por Isaac Newton (1643-1727): ele concluiu que a interação gravitacional entre duas massas quaisquer é diretamente proporcional ao produto dessas massas e inversamente proporcional à distância que as separa. Entretanto, há que se levar em conta o seguinte fato: o movimento de rotação da Terra provoca uma aceleração centrífuga – isto é, dirigida para fora – em todos os corpos situados em sua superfície. Portanto, essa aceleração centrífuga se opõe à aceleração puramente gravitacional, ou newtoniana. Isso quer dizer que o peso – ou melhor, a força peso – de qualquer objeto sobre a superfície da Terra é dada pela soma da atração gravitacional pura entre a massa da Terra e do objeto diminuída da força centrífuga, isto é, do produto da massa do objeto pela aceleração centrífuga. É, portanto, a composição dessas duas acelerações – gravitacional e centrífuga – que define a aceleração da gravidade local.

MEDIDAS DE PRECISÃO

Todos esses estudos acerca das variáveis gravitacionais demandam o conhecimento da gravidade terrestre em uma exatidão impressionante: estamos falando de números cuja ordem de precisão necessita ser, muitas vezes, de uma parte em um milhão ou, em certos casos, mesmo de uma parte em cem milhões. Existe também uma técnica conhecida como monitoramento gravimétrico 4D. Trata-se de um mapeamento do campo da gravidade em uma determinada região a intervalos regulares de tempo. Essas informações permitem monitorar atividades vulcânicas e acompanhar, de forma precisa, a movimentação de reservatórios de hidrocarbonetos como gás e petróleo. Além disso, monitoramentos gravimétricos 4D permitem analisar o grau de subsidência ou de soerguimento em regiões tectonicamente ativas. Em outras palavras, é possível verificar de que maneira o terreno em tais regiões vem se comportando – exemplos de regiões tectonicamente ativas são os Andes, na América do Sul, e a Fenoscândia, na Europa Setentrional (região localizada ao norte da Europa, incluindo a Escandinávia e o extremo norte da Rússia). Nesses estudos, é necessário conhecer a morfologia do campo da

gravidade com precisão de até algumas partes em um bilhão. Esse é, na verdade, o limite tecnológico atual para a construção de gravímetros terrestres relativos e absolutos – equipamentos empregados na aferição dos valores da força da gravidade em um determinado local. São aparelhos usados rotineiramente por instituições acadêmicas e por empresas de prospecção geofísica.

Nos últimos anos, com o advento de equipamentos portáteis para a medição do campo de gravidade, as bases de dados tem sido aperfeiçoadas. Um dos resultados desse avanço é que importantes movimentos verticais da crosta e litosfera terrestres podem ser agora detectados e monitorados com maior acurácia. Isso permite, entre outras coisas, um melhor monitoramento da cinemática das placas tectônicas; da variação do nível médio dos oceanos; e uma melhor verificação dos modelos de aquecimento global. No Brasil, o ON, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a Universidade Federal do Paraná (UFPR), a Universidade de São Paulo (USP), a Universidade do Estado de São Paulo (Unesp) e a Universidade de Brasília (UNB) são exemplos de instituições que têm dedicado esforços nesse sentido.

Os gravímetros relativos e absolutos disponíveis no Laboratório de Gravimetria do ON, em Vassouras, e seus respectivos softwares de processamento de dados atendem na totalidade qualquer demanda metrológica do país. E essas demandas são várias: desde aquelas apresentadas pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), até as apresentadas por empresas de prospecção geofísica, que necessitam dos protocolos técnico-científicos desenvolvidos no Laboratório de Gravimetria e da Linha de Calibração Gravimétrica de Agulhas Negras (sobre a qual falaremos mais adiante) para calibrar seus próprios gravímetros.

DESAFIO

Dentre as aplicações metrológicas que envolvem a gravidade terrestre, devemos enfatizar os enormes esforços experimentais que vêm sendo realizados há pelo menos quarenta anos em vários laboratórios de metrologia em todo o mundo – em especial no Reino Unido, nos Estados Unidos, na Suíça e na China.

Sobre esse assunto, é pertinente lembrarmos o seguinte: no Sistema Internacional de Unidades (SI), a última das unidades fundamentais que não emprega uma propriedade física para sua definição é o quilograma. Essa medida, ao contrário, é ainda atrelada a um objeto macroscópico e tangível: o chamado Protótipo Internacional de Quilograma (ou IPK, na sigla em inglês). Armazenado desde o final do século 19 no Bureau Internacional de Pesos e Medidas, em Sèvres (França), o IPK é um cilindro metálico (figura 2) fabricado em 1880 – cuja liga é composta de 90% de platina e 10% de irídio. O diâmetro da base é igual a



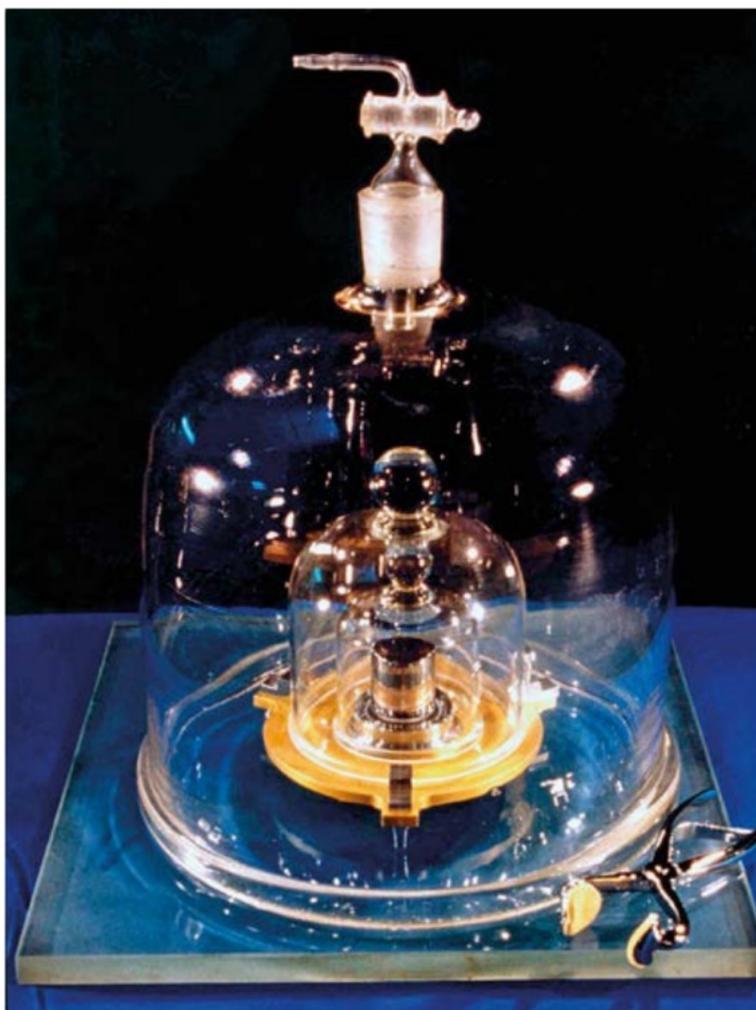


Figura 2. Protótipo internacional do quilograma, preservado no Bureau Internacional de Pesos e Medidas, na França

sua altura, e vale aproximadamente 39 mm. O quilograma representa a massa contida em 1 dm³ de água pura, em sua densidade máxima, a 4°C.

Mas nos últimos tempos a comunidade científica vem percebendo algo intrigante. Numerosas comparações do IPK com cópias oficiais e outros protótipos nacionais armazenados em diferentes institutos metroológicos ao redor do mundo vêm demonstrando que o protótipo tem sofrido uma inexorável alteração em sua massa – a uma taxa de cerca de 0,5 µg ao ano. Essa mudança se deve, muito provavelmente, à própria deterioração natural da superfície do objeto.

O que isso significa? De certo modo, que a unidade do quilograma está atrelada a um artefato padrão que vem sofrendo alterações ao longo do tempo, e isso é, de fato, um grande problema para a metrologia. Afinal, essa crescente incerteza quanto ao quilograma impacta não apenas todo o conhecimento científico baseado em unidades de massa. Essa incerteza também afeta, por exemplo, as unidades elétricas – uma vez

que o Ampère (A), unidade padrão de corrente elétrica, é definido a partir do quilograma padrão.

Por isso, numerosos pesquisadores têm se dedicado a uma difícil realização experimental: vincular o quilograma a uma constante fundamental da natureza, e não mais a um protótipo padrão. Essa tarefa pode ser realizada com o auxílio de um complexo equipamento conhecido como balança de Watt. É um dispositivo eletromecânico que pode medir, em laboratório, valores de massa com elevadíssima precisão. Nesse tipo de balança, o quilograma é definido a partir de medições muito exatas da massa do elétron (e) e da chamada constante de Plank (h) – que é, em linhas gerais, uma das constantes fundamentais da Física. Essa constante é usada para, entre outras coisas, descrever as proporções dos *quanta* (plural de *quantum*, que é a unidade básica de energia irradiada no mundo subatômico)

Os requerimentos para que uma balança de Watt venha a definir o quilograma padrão, no entanto, envolvem uma notável dificuldade: o

Figura 3. Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira



conhecimento da constante de Planck deve ter incerteza máxima de algumas partes em cem milhões. Esse nível de precisão é muito difícil de se conseguir. Mas no atual patamar de nosso desenvolvimento científico e tecnológico, talvez não estejamos longe do dia em que esse método seja usado com sucesso e o quilograma passe, enfim, a ser uma medida baseada em uma constante da natureza.

A CONSTRUÇÃO DE UMA REDE

A história das aferições gravimétricas no Brasil e dos estudos da rotação da Terra começou há bastante tempo. Em meados do século 19, o matemático, filósofo e militar Cândido Batista de Oliveira (1801-1865), funcionário do então Imperial Observatório do Rio de Janeiro, reproduziu a célebre experiência de Foucault – nomeada em referência ao físico e astrônomo francês Jean Bernard Léon Foucault (1819-1878), que desenvolveu tal experimento para demonstrar, entre outras coisas, a rotação da Terra. Nas primeiras décadas do século 20, o já republicano Observatório Nacional conduziu alguns experimentos para determinações do campo da gravidade no país. Nesses trabalhos foi empregado um dispositivo tetrapendular Von Sterneck – o dispositivo mais preciso e exato para se medir a gravidade naquela época.

Entretanto, foi somente em 1955, após a aquisição de um gravímetro a mola Worden W178, que os levantamentos gravimétricos terrestres no Brasil foram iniciados de forma sistemática. Os primeiros levantamentos com esse novo gravímetro aconteceram no sul do país. Na época, os dados complementarizavam os conhecimentos do IBGE e do Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. Em 1971, chegou ao país um novo equipamento: era o gravímetro LC & R G257 – mais estável e preciso que o anterior. Com a nova aquisição, consolidava-se no Brasil a necessidade de termos aqui uma rede gravimétrica de referência. Em julho de 1976, o ON foi encarregado pela Sociedade Brasileira de Geofísica a estabelecer, em todo o Brasil, uma rede de estações gravimétricas de alta precisão. Essa rede deveria ser usada não somente pelas comunidades acadêmicas de geofísica, geodésia e metrologia, mas também por laboratórios de empresas estatais e do setor privado, assim como pelas agências de regulação.

Assim, foi estabelecida no período 1976-1994 o arcabouço básico da Rede Gravimétrica Fundamental Brasileira (RGFB). Ela é mantida desde então pelo Laboratório de Gravimetria do ON (figura 3). Atualmente, essa rede conta com 535 estações gravimétricas interligadas entre si (ver ‘Precisão gravimétrica’).

PRECISÃO GRAVIMÉTRICA • Em geral, não mais do que quatro casas decimais são demandadas para conhecer a aceleração da gravidade em uma aferição laboratorial ou em aplicações industriais corriqueiras. Entretanto, os equipamentos de alta tecnologia disponíveis no Laboratório de Gravimetria do ON em Vassouras permitem obter medições absolutas e relativas da gravidade local com 7 a 8 casas decimais de precisão. Atualmente, o Laboratório de Gravimetria do ON conta com cinco gravímetros relativos e dois absolutos (figuras 6-A, 6-B, 6-C e 6-D). São usados para fins geofísicos, geodésicos e também para o atendimento de demandas de laboratórios metrológicos em todo o país.

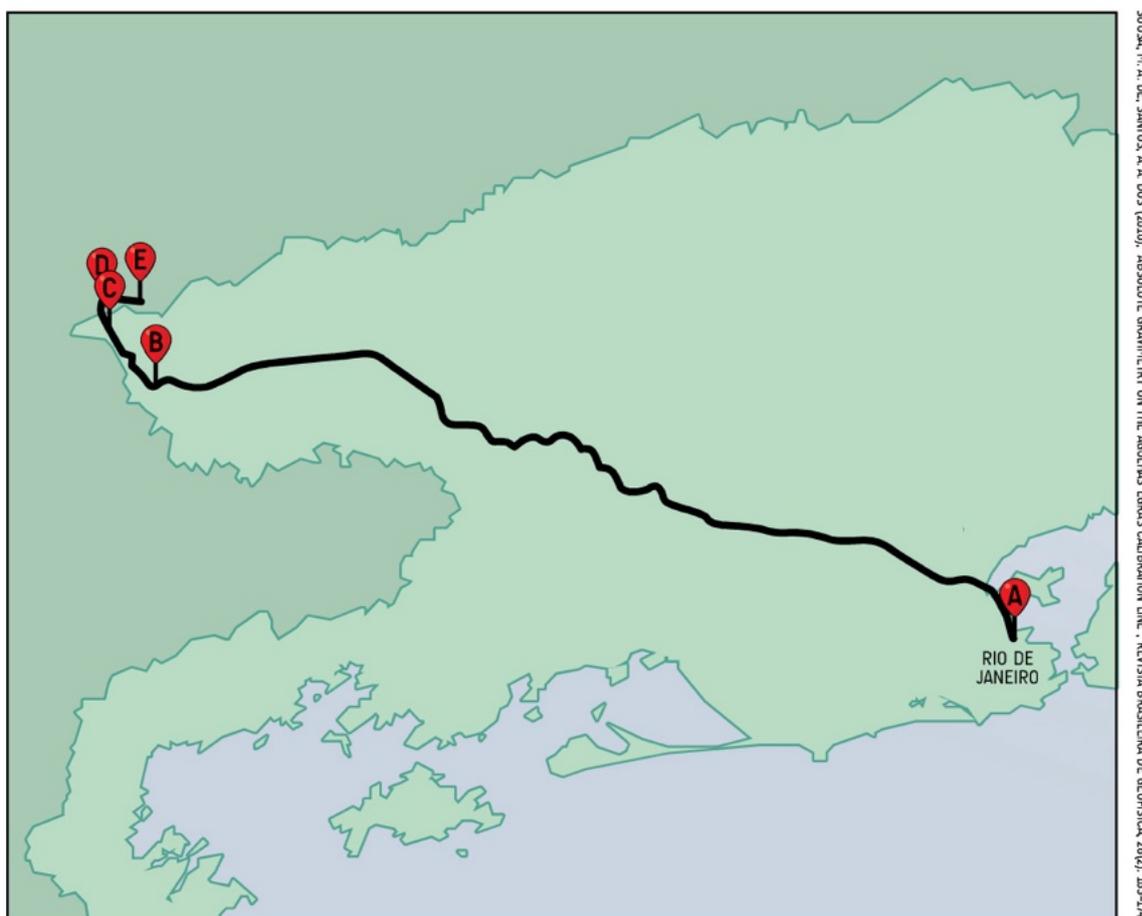


Figura 4. Linha de Calibração Gravimétrica de Agulhas Negras

A cada dez anos, aproximadamente, todo o acervo de dados da RGFB é submetido a uma compensação dos erros experimentais – comuns nesse tipo de medição. Uma vez executadas as correções, o acervo reajustado é publicado e disponibilizado na página eletrônica do ON (www.on.br).

Vale lembrar que a RGFB, além de ser fonte primária para todas as informações que de algum modo se relacionam ao conhecimento do campo gravitacional em nosso país, também está interligada a redes gravimétricas mundiais, como a International Absolute Gravity Base Stations Network (IAGBN), ou Rede Internacional de Estações Base de Gravidade Absoluta. Essa rede cobre todos os continentes do planeta – e conduz medições da gravidade até mesmo no Ártico e na Antártica.

CALIBRAÇÃO DOS GRAVÍMETROS

Quando falamos em medição da gravidade, é imperativo que os aparelhos científicos funcionem a contento. Mas gravímetros relativos são equipamentos opticomecânicos ou eletromecânicos bastante complexos. Estão sujeitos a problemas mecânicos; à liberação súbita de mi-

crogrãos de poeira entranhados nas espiras de suas molas; e à adsorção cumulativa de vapor d'água na câmara dos sensores. Gravímetros relativos, da mesma forma, também demonstram ocasionais deficiências e exibem, com o tempo, tendências a realizar medições menos precisas do que o esperado.

Esse é o motivo pelo qual os gravímetros devem ser constantemente aferidos. E para tais avaliações existem as chamadas linhas de calibração gravimétrica. Elas são formadas por uma classe de estações gravimétricas dispostas em locais de diferentes altitudes – são pontos nos quais os valores do campo gravitacional são conhecidos com bastante precisão. Quando há suspeita de que um gravímetro passa por algum tipo de instabilidade instrumental, esse equipamento é então usado nos diferentes pontos situados ao longo das linhas de calibração gravimétrica. O instrumento é assim calibrado. Ao percorrer essas linhas, é possível verificar quantitativamente se os intervalos de gravidade medidos com o gravímetro sob teste correspondem, de fato, aos valores conhecidos da gravidade absoluta ao longo das estações da linha de calibração.

É por isso que a Linha de Calibração Gravimétrica de Agulhas Negras, no estado do Rio de Janeiro, é tão importante para o país (figura 4). Ela foi estabelecida em meados dos anos 1980, e funciona até hoje ao longo de cerca de 230 km entre as imediações da capital carioca e a região de Agulhas Negras.

MAURO ANDRADE DE SOUSA

Figura 5. Laboratório de Gravimetria implantado pelo ON, em Vassouras, em maio de 2005







Figura 6. Gravímetros relativos (A e B) e absolutos (C e D) usados no Laboratório de Gravimetria do ON

A GRAVIDADE EM VASSOURAS

Desde 1827 até 1955, todos os experimentos e medições acerca do campo de gravidade terrestre, no Brasil, ficaram restritos à sede do ON no Rio de Janeiro (RJ). A partir de 1955, com a aquisição do gravímetro relativo Worden W178, uma nova fase se iniciou. Medições passaram a ser conduzidas às margens de rodovias. E, em novembro de 1955, foram feitas as primeiras medições na estrada que liga Vassouras a Barra do Pirai (RJ).

Mas medições gravimétricas com o Worden W178 no próprio *campus* do ON em Vassouras só ocorreram de fato a partir de janeiro de 1963. Na época, boa parte das rodovias entre o Rio de Janeiro e o Rio Grande do Sul, São Paulo e Minas Gerais já havia sido mapeada gravimetricamente com o uso desse instrumento. Pouco tempo depois, um novo gravímetro, o LaCoste & Romberg G61, mais exato e preciso, foi cedido ao Observatório Nacional pela Agência de Cartografia e Defesa (*Defense Mapping Agency*), dos Estados Unidos. Ele foi então usado na estação gravimétrica de Vassouras, onde ficou entre 1968 e 1976. Nas décadas de 1980 e 1990, ele foi usado na Amazônia e no Pantanal, no esforço de construção da RGFb.

Em fevereiro de 1989, uma equipe da Universidade de Hanôver (Alemanha) veio ao Brasil para realizar estudos em gravimetria. A estação gravimétrica absoluta de Vassouras – cuja identificação internacional é



IMAGEM CEDIADA PELO AUTOR

Ife 142 Vassouras A – foi um dos sítios escolhidos para sediar tais medições. A partir de então, seis novas estações gravimétricas absolutas, além da sediada em Vassouras, foram implantadas no país. Elas seguem uma disposição em arco Norte-Sul: Teresina (PI), Brasília (DF), Viçosa (MG), Valinhos (SP), Curitiba (PR) e Santa Maria (RS).

Recentemente, o ON adquiriu do fabricante norte-americano Micro-g LaCoste dois novos gravímetros absolutos do tipo de queda livre, dispostos no Laboratório de Gravimetria situado no *campus* de Vassouras (figura 5). Tais equipamentos são únicos na América do Sul (figura 6). A propósito, o município de Vassouras sedia o único laboratório de gravimetria existente em toda a América do Sul. Lá, são regularmente realizados treinamentos de estudantes de graduação e pós-graduação em geofísica e engenharia cartográfica.

Além dessas práticas, todos os anos, durante a Semana Nacional de Ciência e Tecnologia, o laboratório é aberto para visitação pública. São colocados em exposição os equipamentos científicos ali abrigados; e são oferecidas aos visitantes apresentações concisas sobre os projetos em andamento, assim como um resumo dos trabalhos anteriores já concluídos. Desde 2009, mais de 300 estudantes – tanto de universidades quanto de escolas locais – já visitaram as instalações e se beneficiaram do conhecimento disponível nesse local de tão destacada importância científica.

SUGESTÕES PARA LEITURA

- MARSON, I. and Faller, J.E. (1986), "g-the acceleration of gravity: its measurement and its importance", *Journal Physics E: Scientific Instruments*, 19(22): 22-32, DOI:10.1088/0022-3735/19/1/002.
- STOCK, M. (2011), "The Watt Balance: determination of the Planck Constant and redefinition of kilogram", *Royal Society Discussion Meeting*, janeiro de 2011, Londres.
- LACOSTE & ROMBERG (2004), "Instruction manual model G & D gravity meters", Austin (EUA), 127 pp.
- Scintrex Ltd. (2010), "CG-5 Scintrex Autograv System Operation Manual", Concord (Canadá), 312 pp.
- MICRO-g LACOSTE, Inc. (2006a), "The A-10 Portable Gravimeter", Lafayette (EUA), 45 pp.
- MICRO-g LACOSTE, Inc. (2006b), "Absolute Gravimeter Workshop 2006 – FG-5 Version", Lafayette (EUA), 49 pp.

