

ÍNDICE

<u>1. HISTÓRICO DO DESENVOLVIMENTO DO MAGNETISMO E DA BIOLOGIA</u>	<u>2</u>
<u>2. O ANTIGO MAGNETISMO ANIMAL</u>	<u>7</u>
<u>3. O MODERNO MAGNETISMO ANIMAL</u>	<u>12</u>
3.1. BACTÉRIAS E MICROORGANISMOS	13
3.2. FORMIGAS	16
3.3. ABELHAS	20
3.4. PEIXES	24
3.5. PÁSSAROS	28
<u>4. CONCLUSÃO</u>	<u>30</u>
<u>5. GLOSSÁRIO</u>	<u>30</u>

O Magnetismo Animal e seus Aspectos ao longo do Desenvolvimento da Biologia e do Magnetismo

**Rafael Monteiro Fernandes e Sergio d'Almeida Sanchez
Instituto de Física "Gleb Wataghin", Universidade Estadual de
Campinas, Campinas, SP, Brasil**

Janeiro de 2001

Neste trabalho, apresentamos como o conceito de Magnetismo Animal evoluiu e influenciou o homem desde os primórdios do Magnetismo até os dias de hoje. Enfocamos especialmente os caminhos e resultados da pesquisa recente neste campo, realizada principalmente através de estudos dos efeitos do campo magnético na orientação de bactérias, formigas, abelhas, peixes e pássaros.

1. Histórico do desenvolvimento do Magnetismo e da Biologia

Vamos iniciar nossa discussão sobre o Magnetismo Animal apresentando como o Magnetismo e a Biologia se desenvolveram ao longo da História e em que momentos (e sob que aspectos) estas duas Ciências interagiram entre si. Maiores detalhes sobre o assunto podem ser encontrados no artigo "Barros, H. G. P. L e Esquivel, D. M. S. *Interação do Campo Magnético da Terra com os seres vivos: História da sua Descoberta*, Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, setembro de 2000", no qual nos baseamos para fazer esta parte do trabalho.

Acredita-se que os fenômenos magnéticos foram observados pela primeira vez há cerca de 3000 anos, através de interessantes propriedades de certas rochas da Magnésia, província grega da Ásia Menor. Estas rochas, denominadas magnetitas, tinham a capacidade de atrair um outro mineral, o ferro, à distância, capacidade esta que se conservava mesmo após inúmeros contatos entre a magnetita e os minérios de ferro. Foi a primeira vez que o homem pôde observar a

ação macroscópica e efetiva de uma força à distância, já que as outras forças que atuam sem contato, como a gravitacional e a elétrica, não ocorrem, para o observador macroscópico, em qualquer situação (por exemplo, não se observam os efeitos da atração gravitacional entre duas pedras pequenas, no dia a dia).

De início, pouco ou quase nada foi feito para se tentar compreender os fenômenos magnéticos; pelo contrário, a força magnética foi demasiadamente mistificada e tratada de modo ingênuo e emocional. Platão (427-347 a.C.) descrevia a inspiração dos artistas fazendo analogias com o campo produzido pela magnetita: assim como o poeta recebe de sua Musa inspiração e a Musa não perde sua capacidade de inspirá-lo novamente, o ímã (ou magneto, como assim são chamados os materiais que apresentam propriedades magnéticas) é capaz de induzir seu magnetismo sobre o ferro, à distância, sem por isso perder seu próprio magnetismo.

Aristóteles (384-322 a.C.) mencionou as forças magnéticas, no seu “Tratado sobre a Alma”, para fazer uma analogia entre a ação da Alma, que geraria o movimento dos animais, e a ação do ímã, que gera o movimento de um pedaço de ferro.

Lucrecio (98-55 a.C.), um dos primeiros a defender a idéia filosófica de átomo, tentou explicar a forma de atuação da força à distância da magnetita sobre o ferro, no livro VI de seu Tratado-Poema “Da Natureza”. Para ele, os átomos do material magnético, por alguma propriedade especial, expulsariam o ar presente entre eles e o ferro de modo que este seria empurrado, pelo ar atrás dele, em direção à magnetita.

Estas idéias de caráter místico e sobrenatural ao redor do magnetismo logo fez surgirem especulações, principalmente na Idade Média, a respeito de possíveis curas provenientes de “usos medicinais” da magnetita e outros ímãs. O principal representante desta primeira e tímida aproximação entre o Magnetismo e a Biologia foi Paracelso (1493-1541). Suas contribuições estão mais bem descritas na seção **O Antigo Magnetismo Animal**.

Um estudo mais científico e menos místico dos fenômenos magnéticos só foi realizado em 1600, com a publicação de “De Magnete”, do inglês William Gilbert (1544-1603). Nesta obra, Gilbert abandona o realismo ingênuo das idéias sugeridas até então em favor de uma posição de empirismo claro e racional, através de um detalhado estudo do magnetismo e da hipótese da existência de magnetismo terrestre, segundo a qual a Terra seria um gigantesco ímã.

Logo após esse trabalho de Gilbert, Galileu Galilei (1546-1642) estabelece a “Nova Ciência”, caracterizada por uma postura racional diante dos fenômenos da Natureza, que redefine o conceito do que é científico. Esta “Nova Ciência” tem seu ápice em Isaac Newton (1642-1727), que formula racionalmente toda a Mecânica em seu “Princípios Matemáticos de Filosofia Natural” (1686), além de realizar importantes estudos na área da Óptica e desenvolver o Cálculo Diferencial e Integral. Porém, os estudos do magnetismo à luz dessa “Nova Ciência” só seriam realizados mais tarde, por Gauss, Coulomb e Faraday.

Nessa mesma época, a Biologia, termo que ainda não era utilizado naquele tempo para denominar a Ciência que estuda os seres vivos, também se desenvolvia bastante. Em 1735, o sueco Carlos Lineu (1707-1778) publica seu trabalho “Sistemas Naturais”, no qual propõe uma classificação dos seres vivos

em categorias bem definidas. Em 1809, o francês Jean-Baptiste de Lamarck (1744-1829) publica “Philosophie Zoologique”, em que apresenta os primeiros estudos acerca dos processos evolutivos dos seres vivos, baseados nas idéias do “uso e desuso” e da herança de caracteres adquiridos.

É nessa época que surge a segunda aproximação entre a Biologia e o Magnetismo, mas ainda de maneira ingênua e com caráter místico, devido principalmente a Mesmer (1734-1815) e suas idéias acerca das propriedades curadoras dos ímãs, idéias estas que são apresentadas na seção **O Antigo Magnetismo Animal**.

Em meados do século XIX surgem os primeiros trabalhos sobre magnetismo baseados na “Nova Ciência” estabelecida por Galileu. Em 1820, o dinamarquês Hans Christian Oersted (1777-1851) mostra que a corrente elétrica, descoberta no final do século anterior, produzia um campo magnético e alterava o comportamento de uma bússola, instrumento utilizado pelos navegadores para se orientarem em alto-mar. Este conceito de campo magnético permite que Carl Friedrich Gauss (1777-1855) faça a primeira medida, em 1832, do campo magnético terrestre. Os trabalhos que se realizam ao longo deste século, principalmente os publicados por Michael Faraday (1791-1867), possibilitam que James Clerk Maxwell (1831-1879) unifique os fenômenos elétricos e magnéticos, através de suas famosas quatro equações, segundo as quais o campo magnético e o campo elétrico são apenas faces da mesma moeda. Tem-se, finalmente, uma descrição matemática e racional do campo magnético, transformando-o em um conceito abstrato, mas com inúmeras aplicações práticas.

Concomitantemente, na Biologia, o inglês Charles Darwin (1809-1879) publica, em 1859, sua obra “A Origem das Espécies”, na qual reformula as idéias de Lamarck acerca da evolução dos seres vivos, substituindo os conceitos de “uso e desuso” e de herança de caráter adquirido pelo conceito importante de “Seleção Natural”. Mais tarde, em 1865, o monge austríaco Gregor Mendel (1822-1884), através de estudos envolvendo cruzamentos de ervilhas, introduz vários conceitos de Genética, que são usados até os dias de hoje.

Porém, nessa época, não há aproximação entre Magnetismo e Biologia. A Física, considerada a Ciência mais bem acabada na época, refutava a idéia de que um organismo vivo tivesse propriedades magnéticas importantes e por isso a Biologia, que não tinha na época a posição de destaque adquirida pela Física, deixou de lado a possibilidade de fenômenos magnéticos influenciarem os seres vivos. É interessante observar que isso não ocorreu com os fenômenos elétricos, cuja interação com a Biologia foi bastante relevante.

Apesar de Maxwell ter descrito matematicamente o campo magnético e suas propriedades, a origem microscópica do magnetismo na matéria (como em ímãs) ainda não tinha sido esclarecida. Somente no século XX, com os trabalhos pioneiros de Pierre Curie (1859-1906), Paul Langevin (1872-1946), Leon Brillouin (1889-1969), Pierre-Ernest Weiss (1865-1940) e, posteriormente, com o advento da Mecânica Quântica, é que se compreendeu, ainda que de forma parcial, a origem do magnetismo.

A Biologia, por sua vez, sofreu também uma revolução com o advento da Psicanálise, no século XX, baseada nos trabalhos de Sigmund Freud (1856-1939). Os estudos sobre comportamento, que tiveram grande avanço após a Segunda

Guerra Mundial, mostraram que vários estímulos do meio ambiente, embora muito fracos, poderiam mudar de forma significativa a resposta dos animais.

É nesse contexto que surge a mais recente aproximação, a primeira mais científica e racional, entre a Biologia e o Magnetismo, através de estudos sobre a influência do campo magnético terrestre na orientação de pássaros, abelhas, formigas e microorganismos. Apresentamos, na seção **O Moderno Magnetismo Animal**, estas novas idéias e esta nova e promissora interação entre a Biologia e o Magnetismo.

2. O Antigo Magnetismo Animal

Nesta seção, discutiremos as primeiras idéias que surgiram sobre a influência do magnetismo nos seres vivos. Estas idéias são caracterizadas pelo seu alto grau de misticismo e curandeirismo e por serem baseadas num realismo ingênuo e subjetivo. Mais informações sobre esse assunto são encontradas no livro de J. Livingston: “Driving Force: The Natural Magic of Magnets” (Harvard, 1996), páginas 202 a 217, o qual usamos como base para o texto dessa seção.

Uma das primeiras pessoas a procurarem efetivamente propriedades de cura em materiais magnéticos foi o suíço Philipus Aureolus von Hohenheim, no início do século XVI, mais conhecido como Paracelsus, nome que ele escolheu como uma espécie de homenagem ao médico romano do século I Celsus, cuja obra “De Medicina” é uma das maiores (e únicas) fontes de informação sobre a Medicina na Roma e na Grécia antigas. Paracelsus acreditava que, como os magnetos eram capazes de através de forças misteriosas atrair ferro, eles seriam

capazes de atrair e retirar as doenças do corpo humano. Paracelsus chegou a realizar algumas curas, que hoje em dia são creditadas não às suas mirabolantes terapias magnéticas, mas à auto-sugestão dos seus pacientes.

Apesar de muito controversas, as idéias de Paracelsus continuaram influenciando médicos e curandeiros mesmo depois de sua morte, principalmente no final do século XVII e no início do século XVIII, quando a Revolução Industrial inglesa deu bases para o desenvolvimento de fortes magnetos permanentes de aço-carbono. Um dos destaques dos novos “terapeutas magnéticos” que começaram a surgir na época era o padre jesuíta italiano Maximilian Hell (1720-1792), professor de Astronomia da Universidade de Viena. Hell tratava seus pacientes com magnetos de ferro que tinham a mesma forma da parte do corpo que não estava bem.

As idéias de Hell influenciaram o maior expoente dessa antiga corrente de pensamento sobre magnetismo, o alemão Franz Anton Mesmer. Médico em Viena, Mesmer começou a realizar curas com os “magnetos de Hell” e acabou desenvolvendo uma teoria particular sobre o Magnetismo Animal. Ele acreditava que podia, através de seus magnetos, controlar o fluxo de um certo “fluido universal”, que passaria dentro dos corpos de seus pacientes (e de todos os seres vivos). Nas suas memórias, ele explica que:

“certas propriedades análogas àquelas dos magnetos se revelam especialmente no corpo humano. É possível distinguir pólos diferentes e opostos que podem ser transformados, ligados, destruídos ou reforçados... Esta propriedade do corpo humano, que o deixa sensível às influências dos corpos

celestiais e à recíproca ação dos outros corpos a sua volta, fez com que eu, devido à analogia com os magnetos, a denominasse de magnetismo animal.”

Mesmer achava que os magnetos eram apenas instrumentos de “condução” para o “fluido universal” que passava por ele e o que passava pelos seus pacientes; ele acreditava que na verdade o magnetismo animal, que ele assim chamava, residia dentro do seu corpo e assim era ele na verdade quem realizava as curas.

Essas curas foram várias, o que o deixou bastante famoso na Europa no início do século XIX. Tinha vários admiradores e chegou até mesmo a ser citado, ainda que de forma indireta, numa ópera popular de Mozart, “Cosi fan tutte”. Porém, os médicos de Viena não o aceitavam – era a época do Iluminismo, da busca por explicações racionais dos fenômenos da Natureza – o que fez com que ele acabasse se mudando para Paris, onde pôde gozar de sua fama e ampliá-la ainda mais. Porém, novamente, apesar de seu prestígio junto ao público, Mesmer não gozava de semelhante admiração dos médicos oficiais de Paris, temerosos do meteórico sucesso por ele alcançado. Em 1784, esses médicos persuadiram o rei Luís XVI da França a criar uma comissão real para avaliar os conceitos do magnetismo animal de Mesmer. Essa comissão era formada por nada menos que Antoine Lavoisier, Joseph Guillotin (cujo nome é associado à guilhotina), e Benjamin Franklin. Em suas investigações, eles logo descobriram que o “fluido universal” de Mesmer era impossível de ser detectado, a não ser pelos seus efeitos. Após vários estudos e experimentos, eles acabaram concluindo que as curas realizadas eram somente devido ao poder da sugestão das mentes dos pacientes de Mesmer e a única coisa que os magnetos faziam era ajudar a criar

um ambiente favorável à própria sugestão. Era o fim das terapias de Mesmer, mas não o fim das suas idéias, que ainda influenciariam vários médicos dos Estados Unidos, recém independente na época, e vários grupos de estudantes europeus, que se dedicavam ao estudo da hipnose.

Os transe pelos quais os pacientes de Mesmer passavam, durante suas curas, eram o que hoje são chamados de transe hipnóticos. Provavelmente, este tenha sido o grande legado do mesmerismo: hipnose. Vincent Buranelli, um dos biógrafos de Mesmer, escreve que “a hipnose científica não teria se desenvolvido se não fosse Mesmer” e que “ele foi o Colombo da psicologia moderna”. Esta analogia entre Colombo e o médico alemão é bem interessante: ambos foram guiados para um estranho mundo novo por magnetos (Colombo se orientava em alto-mar pela bússola), mas ambos não tinham idéia de realmente onde tinham chegado.

Nos dias de hoje, ainda é possível identificarmos resquícios dessa crença em propriedades de cura relacionadas ao magnetismo; várias empresas e companhias vendem inúmeros tipos de “acessórios magnéticos” tais como colares, calçados, braceletes e brincos, com a promessa de que eles reforçam a saúde e curam doenças. Principalmente na China e no Japão, o uso desses acessórios é bastante popular e conta com o respaldo de várias empresas: colares magnéticos para fazer sumir aquela incômoda dor de cabeça; brincos magnéticos para melhorar a saúde do corpo em geral; travesseiros, cadeiras e solas de calçados com sistema de polarização magnética alternada para fazer as veias receberem os benéficos efeitos dos campos magnéticos; adesivos magnéticos circulares que estimulam a circulação sanguínea e aliviam torcicolos.

Porém, não é só no Oriente que se encontram esses produtos magneto-terapêuticos; no Ocidente, principalmente nos EUA, há vários exemplos. Uma companhia perto de Massachusetts, denominada Oriental Medical Supplies, apresenta uma quantidade impressionante de itens para acupuntura e terapia magnética, todas ilustradas num catálogo de 75 páginas: são braceletes, colares, brincos, cintos, “munhequeiras”, joelheiras, solas de calçados, coletes, martelos, e até mesmo magnetos aquáticos, para, segundo a empresa, “tratar água dura e ácida de modo natural”. No final do catálogo, a empresa adverte: “magnetos são vendidos apenas para pesquisa ou uso pessoal. Nenhuma pretensão médica é feita”. Mais informações sobre a OMS estão no site da empresa: www.omsmedical.com.

Outra companhia, de Kentucky, Massachusetts, vende “supermagnetos” de neodímio-ferro-boro, que, segundo ela, são capazes de curar diversos tipos de câncer em pessoas que os usem pendurados no pescoço. Esses efeitos milagrosos dos “supermagnetos” são explicados, pelos donos da empresa, através da “teoria espiral universal”, baseada no fato de que na Natureza são encontradas várias formas espirais, desde as galáxias até os DNAs. Segundo eles, as espirais dos “supermagnetos” são maiores que as espirais das células malignas e, por isso, as primeiras destroem as últimas, sem, contudo destruírem as células saudáveis. Maiores explicações estão no site: www.naturchem.com/MAGNETIC%20THERAPY%20SUMMARY.html.

O que é preocupante nisso tudo é que algumas pessoas que estejam com doenças realmente sérias podem estar deixando de tomar medicamentos adequados para utilizarem essas terapias magnéticas milagrosas, de pouca ou

nenhuma base científica. Na época de Mesmer, ele e a maior parte de seus seguidores pelo menos acreditavam de verdade em suas idéias sobre curas magnéticas e afins; hoje em dia, a maioria das terapias magnéticas, principalmente as de caráter milagroso, parece estar muito mais associada ao charlatanismo do que a uma verdadeira crença ou pesquisa de seus idealizadores, que raramente são cientistas sérios. Os processos eletroquímicos dentro do corpo humano são muito complexos e completamente desconhecidos, até hoje; por isso, efeitos de campos magnéticos dentro dele são imprevisíveis. Grande parte das curas que esses “doutores magnéticos” creditam a suas terapias é mais fruto de sugestão psicológica dos pacientes ou fruto da própria natureza da doença, que desaparece com o passar do tempo, sem nenhum medicamento (como, por exemplo, dor de cabeça, de estômago, gripe e mal-estar). Uma análise interessante e racional sobre essas terapias magnéticas, assinada por J. Livingston, pode ser vista no site da CSICOP (Committee for the Scientific Investigation of Claims of the Paranormal): www.csicop.org.

3. O Moderno Magnetismo Animal

Na seção anterior, discutimos as idéias que inicialmente surgiram acerca da influência do magnetismo nos animais; nesta seção, apresentamos como alguns trabalhos recentes, apoiados em sólida base científica, estão fornecendo importantes elementos para a construção de um modelo de como diversos campos magnéticos influenciam os seres vivos. Estes trabalhos estudaram desde

seres mais simples, como bactérias, até animais complexos, como peixes e pássaros, passando ainda por insetos sociais, tais como formigas e abelhas.

3.1. Bactérias e Microorganismos

Em 1975 Richard Blakemore, da Universidade de New Hampshire, demonstrou que algumas bactérias aquáticas (*Aquaspirillum magnetotacticum*), respondem ao campo magnético terrestre, nadando na direção das linhas de campo. Estas bactérias, encontradas em Massachusetts, EUA, se aproximavam do pólo sul de uma barra magnética e se afastavam de seu pólo norte. Este novo tipo de tactismo bacteriano recebeu o nome de magnetotactismo.

O movimento de uma bactéria se dá por uma organela denominada flagelo. O flagelo é uma longa "cauda" que gira, produzindo uma força que produz o deslocamento da bactéria. Em células magnetotáticas, observa-se a presença de cristais magnéticos biomineralizados pelo organismo. Estes cristais possuem um momento magnético de tal forma que a soma dos momentos magnéticos de todos os cristais encontrados no interior do citoplasma fornece um momento magnético resultante aproximadamente alinhado com a direção de deslocamento. A interação do momento magnético celular com o campo externo produz um torque que orienta o movimento celular com respeito às linhas de campo, como ocorre em bússolas. Nas bactérias encontradas por Richard Blakemore, a microscopia eletrônica revelou que dentro de cada bactéria havia uma cadeia de minúsculos cristais de magnetita. Estas cadeias são ímãs permanentes, minúsculas agulhas de bússolas com coercividade em torno de 300 gauss.

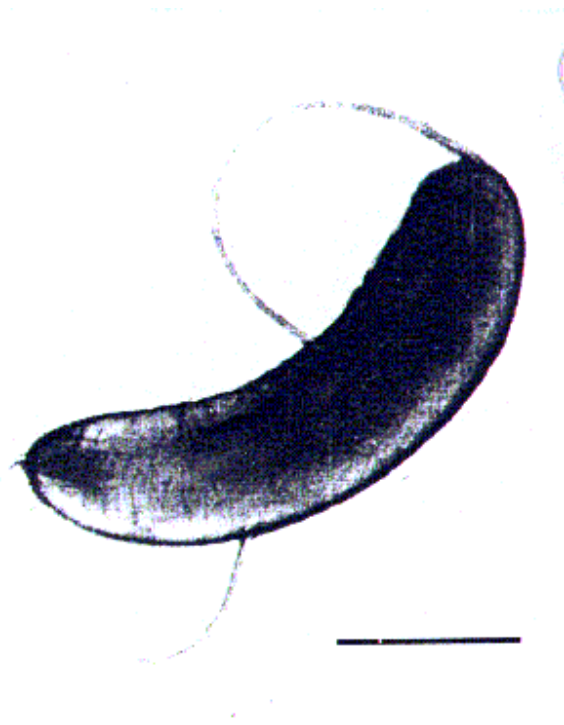


Figura 1 - Uma bússola interna: microscopia eletrônica de uma bactéria com partículas de magnetita em seu interior, extraída de - J. Livingston: Driving Force: The Natural Magic of Magnets

Como o campo terrestre possui uma inclinação que depende da posição na superfície da Terra, organismos magnetotáticos nadam na vertical para cima ou para baixo. Como simples bússolas, as bactérias não são puxadas para cima ou para baixo. O campo magnético da Terra exerce forças iguais e opostas nas pontas das correntes de partículas de magnetita, produzindo um torque que as rotacionam até que se alinhem com o campo. As bactérias fornecem sua própria energia (movimentando seus flagelos) para se moverem de acordo com a direção indicada pelo campo terrestre. Se nadarem para cima, as bactérias sentem o efeito do oxigênio, que lhes é prejudicial, no caso das anaeróbias, e morrem. Do contrário, as células que migram para baixo vão ao encontro de uma região rica em nutrientes e com pouca concentração de oxigênio molecular.

O campo geomagnético pode ser descrito por um campo de dipolo. No hemisfério Norte ele aponta para baixo enquanto que no hemisfério Sul ele aponta para cima. Assim, bactérias que possuem o momento magnético antiparalelo ao flagelo sobrevivem no hemisfério Sul e morrem no hemisfério Norte. As bactérias encontradas no Norte e no Sul têm, respectivamente, nas pontas das cadeias, pólos Norte e Sul, enquanto que próximo ao Equador, onde a inclinação do campo é quase zero, encontram-se ambos os tipos. Neste último caso, o movimento é predominantemente horizontal e, portanto, não lhes é prejudicial. Ocorre, então, uma seleção natural devido à uma propriedade física.

A observação de bactérias magnetotáticas pode ser feita com o auxílio de um microscópio óptico de grande aumento e um ímã permanente colocado próximo à lâmina. Colocandose uma gota d'água com um pouco de sedimento, em alguns minutos, as bactérias magnetotáticas se concentram numa das bordas da gota. Invertendo-se o ímã, elas migrarão para a extremidade oposta.

Resultados de observação em águas na região do Rio de Janeiro mostraram uma grande variedade de bactérias que responde ao campo geomagnético e que biomineraliza magnetita no interior de seu citoplasma. Além disso, descobriram-se microorganismos compostos por duas dezenas de células procariotas que biomineralizam sulfeto de ferro magnético, provavelmente greita ou pirrotita, e se orientam pelo campo terrestre (Barros, H.G.P.L. e Esquivel, D.M.S., 2000)

Mais recentemente foram encontrados microorganismos que biomineralizam não somente magnetita mas também sulfeto de ferro como magnetosensor. Resultados do estudo do meteorito marciano ALH 84001

mostraram a presença de material magnético similar aos encontrados em microorganismos coletados no Brasil junto a estruturas de formas biológicas, sugerindo a existência de vida passada em Marte (Barros, H.G.P.L. e Esquivel, D.M.S., 2000).

Em outros casos, os compostos de ferro encontrados não são usados para orientação e são, simplesmente, produtos do metabolismo. Por exemplo, a bactéria conhecida como GS-15 produz magnetita, mas numa forma que não será usada em sua movimentação. Recentemente, estudos sugerem que GS-15 fossilizadas e outras bactérias magnéticas podem ter contribuído para uma grande fração da magnetita encontrada em rochas sedimentares. Milhões de anos após a formação das rochas, geólogos irão usar a magnetita como bússolas fossilizadas para o estudo da história do campo magnético da terra, continentes e oceanos.

3.2. Formigas

Existem, no planeta, em torno de 12.000 espécies de formigas e, no Brasil, devido ao clima tropical e às florestas e encontrase grande parte delas. Formigueiros de terra são formados por inúmeros túneis subterrâneos em completa escuridão, que se irradiam a partir do centro e terminam na superfície. Apesar da diferença entre as espécies, o que elas têm em comum é que deixam o ninho, exploram a área ao redor até encontrarem o alimento e retornam a este ninho marcando uma trilha de ferormônios (característico de cada colônia).

Os estudos feitos até hoje sobre a influência de campos magnéticos no comportamento de formigas podem ser apresentados em dois tipos: um sobre

efeitos magneto-cinéticos (que não incluem orientação) e o outro sobre efeitos magneto-dinâmicos (que implica o uso da informação vetorial do campo magnético nas atividades de orientação e localização espacial).

No primeiro tipo, encontram-se estudos como o realizado por Kermarrec (1981) com a espécie *Acromyrmex octospinosus* que demonstrou que essas formigas sentem campos magnetotáticos com intensidade mínima de 6 Oe. Essas formigas se afastaram das regiões de campo magnético artificial intenso dentro do ninho. Anderson e Vander Meer (1993) observaram diferenças no tempo de formação da trilha na busca de alimento para a espécie *Solenopsis Invicta*, conhecida como "formiga de fogo". Foram comparadas duas situação: campo de mesmo sentido e campo de sentido oposto, antes e depois de colocar o alimento. Experiência semelhante foi realizada por Klotz e col. (1997), que, entretanto, não confirmou o resultado.

No segundo tipo, encontram-se estudos como os realizados por Rosengren e Fortelius (1986), com a espécie *Formica rufa*, e por Jander Jander (1998), com a espécie *Oecophylla smaragdina*, que comparam o orientação magnética com a orientação feita com outros estímulos (luz, ferormônios, etc.). Estes trabalhos mostraram que a influência do campo magnético na orientação não é predominante frente a estes estímulos. O resultado obtido por Çamlitepe e Stardling (1995) com *Formica Rufa*, entretanto, demonstrou que, na ausência de outros estímulos, o campo geomagnético é utilizado para orientação. As rotas obtidas em trabalho de campo feito por Leal e Oliveira (1995) na formiga migratória *Pachycondyla marginata* sugerem migrações preferencialmente na

direção norte, mostrando o possível uso da informação do campo geomagnético na escolha da direção de migração.

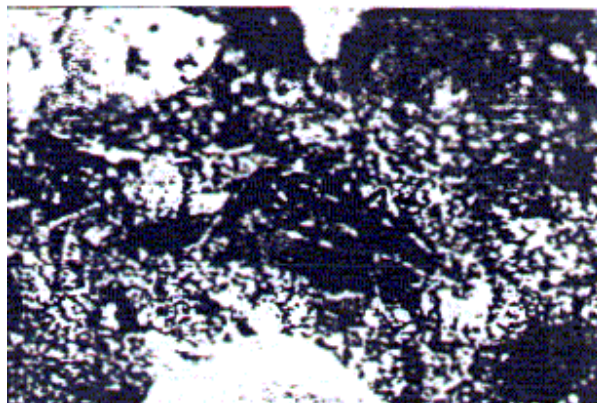


Figura 2 : Foto de uma formiga migratória, *Pachycondyla marginata*, carregando um cupim, alimento único de sua dieta, extraída de Acosta-Avalos (2000)

Num estudo realizado por Slowick e Thorvilson (1996) em formigas operárias da espécie *Solenopsis invicta*, foi encontrado acúmulo de ferro Fe^{3+} no olho e em algumas regiões do abdome, bem perto da cutícula, sem, porém, mostrarem se este ferro fazia parte de algum óxido magnético. Slowick e col. (1997) fizeram imagens por ressonância magnética em formigas, comparando com controle positivo, no caso, abelhas *Apis mellifera*. Eles observaram imagens semelhantes em ambos os casos, concluindo que as formigas tem um magnetismo interno próprio, sem concluir onde este se origina.

Numa análise feita de ressonância paramagnética eletrônica por Acosta-Avalos e col. (2000) foram mostrado espectros indicativos de presença de material magnético que levaram os pesquisadores a concluir que estas formigas possuem nanopartículas de magnetita. Os estudos de Esquivel e col. (1999) e o de Slowick e col. (1997) levam a afirmar que as "formigas de fogo" biomineralizam material magnético. Neste mesmo estudo procurou-se material magnético biomineralizado

na formiga migratória *Pachycondyla marginata*, que é mais comum na região de anomalia magnética do Atlântico Sul. Foram isoladas nanopartículas de óxido de ferro magnéticas dessas formigas, mostrando que a cabeça pode estar envolvida no processo de magnetorecepção. Medidas da magnetização induzida, feitas com magnetometria SQUID por Acosta-Avalos (2000) em abdômes amassados dessas formigas, mostraram propriedades ferromagnéticas coexistindo com o estado superparamagnético à temperatura ambiente, o que pode implicar na presença de duas diferentes nanopartículas magnéticas.

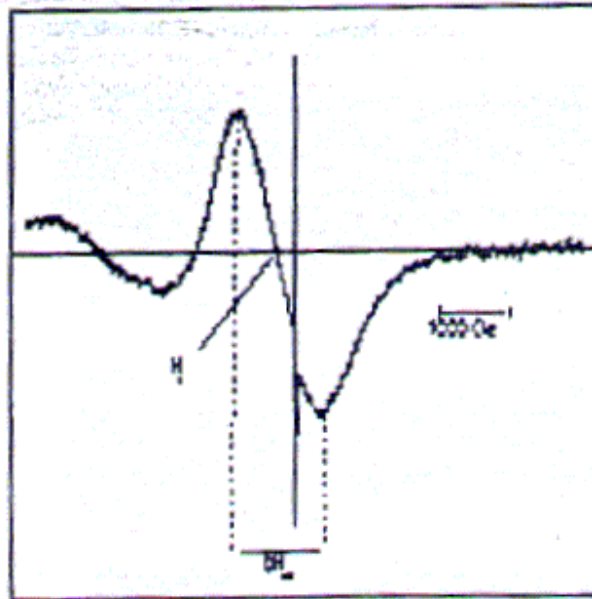


Figura 3: RPE de uma amostra de abdômes amassados de formigas migratórias à temperatura ambiente, com uma frequência de microondas de 9,4 GHz (banda x), extraída de Acosta-Avalos (2000)

3.3. Abelhas

Os insetos constituem a classe dominante em nosso planeta; entre eles está o grupo dos insetos sociais, ao qual pertencem as abelhas. Dentre os insetos sociais pesquisados destacam-se as abelhas *Apis mellifera*. A presença de dois diferentes tamanhos de magnetita no abdome desta espécie de abelhas tem levado a modelos para o mecanismo de sua orientação e para a compreensão de sua complexa dança quando voltam à colmeia em busca de ajuda para o transporte do alimento encontrado.



Figura 4: foto de uma abelha *Apis mellifera*, , extraída de Acosta-Avalos (2000)

Um dos estudos mais bem documentados sobre a influência do campo geomagnético é o realizado nas abelhas *Apis mellifera*. Apesar das evidências de que elas se orientam por este campo, não se sabia qual o mecanismo receptor nem de que forma a informação é transmitida ao sistema nervoso. Em 1968,

Lindauer e Martin observaram quatro manifestações de comportamento destas abelhas influenciadas pelo campo terrestre:

- As abelhas operárias, após o descobrimento de comida, realizam uma dança, geralmente executada em total escuridão, cuja orientação, em relação à direção vertical do mel, indica às outras abelhas a localização da comida. O ângulo entre a direção da dança e a vertical indica o ângulo entre a fonte de comida e o sol. No entanto, foram observados "erros" de até 20 graus à esquerda ou à direita da localização exata do alimento, variando com a direção do campo magnético terrestre. Para verificar se esta "imprecisão" se dava ao fato da presença do campo, foi simulado um campo nulo na colmeia e este "erro" se anulou cerca de 45 minutos depois. Estes "erros" não são "ruídos do sistema" pois todas as abelhas cometem o mesmo "erro", tanto em intensidade quanto em direção.
- Ocasionalmente, em dias de verão, é realizada uma dança anômala, numa superfície horizontal, na entrada da colmeia, onde, após um breve intervalo de desorientação, as abelhas dançam ao longo dos oito pontos cardeais magnéticos. Elas voltam a se desorientar quando o campo geomagnético é artificialmente anulado.
- Quando um enxame abandona a colmeia original, abelhas operárias constroem novos favos na mesma direção magnética anterior. São necessários campos magnéticos muito fortes, em torno de 10 vezes o da Terra, para destruir esta orientação dos favos.

- Aparentemente os ritmos circadianos das abelhas (alterações comportamentais ou fisiológicas associadas ao ciclo diário da rotação da Terra) são devidos às variações de intensidade e direção do campo magnético terrestre causadas por influências astrofísicas. No entanto, Neumann (1988) afirmou que o ritmo do comportamento das abelhas que procuram comida é completamente explicável pela influência de fatores endógenos e sazonais. Esta habilidade se deveria à extraordinária sensibilidade à mudança do campo magnético da Terra, cerca de 10^{-4} vezes menor que o valor do próprio campo.

Atualmente, depois de várias experiências bem sucedidas, sabe-se que as abelhas podem ser treinadas para associarem a presença e a direção de campos magnéticos locais a fontes de comida (Walker e Bitterman, 1985; Collet e Baron, 1994; Frier e col., 1996, citados em Acosta-Avalos e col 2000).

Um grupo de pesquisa em Honolulu conduziu um experimento em abelhas no qual ele as anestesiava e colava, em seus abdômes, barras magnéticas ou não magnéticas. Abelhas condicionadas, por exposição a campos magnéticos de um pequeno eletroímã, para escolher um determinado tipo de comida não foram tão capazes de selecioná-lo se estavam usando pequenas barras magnéticas, o que não aconteceu com as que estavam usando barras de cobre. A conclusão dos cientistas foi que pequenos ímãs confundiram o sentido magnético das abelhas. No entanto, há cientistas que consideram os dados estatístico desse experimento pouco convincentes.

Vários modelos teóricos têm sido propostos para explicar de que forma se faz a detecção do campo magnético, todos baseados numa das 3 hipóteses: Lei

da indução eletromagnética de Faraday, ressonância magnética (efeitos paramagnéticos) e transdução ferromagnética.

Diante dos estudos que vêm sendo realizados por (Schiff e Canal, 1995), (Kirschvink e col, 1985), (Schiff, 1991), (Gould e col., 1978), (Kuterbach e col., 1982) e (Kuterbach e Walcott, 1986), a transdução ferromagnética é a hipótese mais provável no caso das abelhas *Apis mellifera*.

Medidas de magnetização induzida, utilizando magnetometria SQUID foram realizadas por Gould e col. (1978, 1980) no abdome de abelhas, inferindo-se a presença de partículas paramagnéticas de magnetita que se encontram organizadas perpendicularmente ao corpo.

Medidas de histerese magnética têm sido realizadas por Acosta-Avalos (2000), nos três primeiro segmentos abdominais de *Apis mellifera* orientados relativamente ao campo aplicado do SQUID. Análises das histereses a diferentes temperaturas confirmaram os resultados obtidos por Gould e col.(1978).

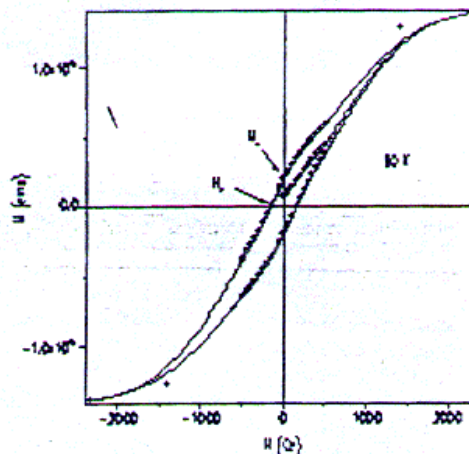


Figura 5: Histerese de abdomes de abelhas à temperatura de 60K, obtida por magnetometria SQUID. A magnetização de saturação não foi alcançada neste intervalo de campo aplicado. O campo coercivo, H_c e a magnetização remanente M_r estão indicados, extraída de Acosta-Avalos (2000)

Medidas realizadas por ressonância paramagnética eletrônica, novamente por Acosta-Avalos e col. (2000), nos abdômes das abelhas observaram a presença de pelo menos quatro tipos de estruturas de ferro: íons isolados, nanopartículas isoladas, aglomerados dessas partículas e possivelmente oxi-hidróxido de ferro. Utilizando um modelo de largura de linha, que considera as partículas superparamagnéticas em paramagnéticas, um tamanho magnético aproximado de 12nm foi estimado para partículas isoladas.

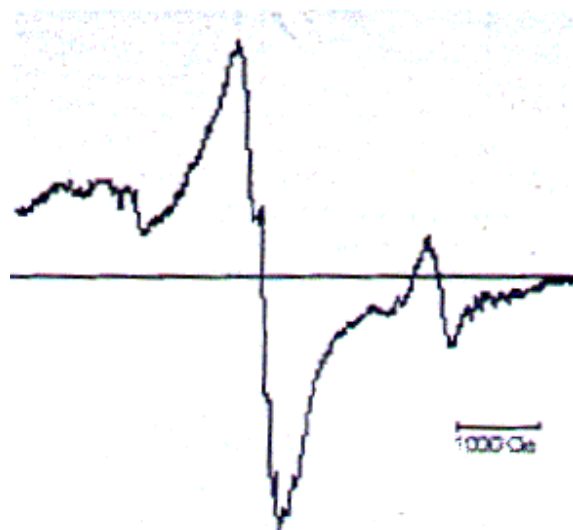


Figura 6: RPE de uma amostra de abdômes amassados de abelhas à temperatura ambiente em banda X, extraída de Acosta-Avalos (2000)

3.4. Peixes

Num estudo realizado por Walker e col. (2000), foram encontrados alguns neurônios no nervo trigeminal das trutas (do inglês, trigeminal nerve, TN) que respondem a mudanças na intensidade do campo magnético aplicado e que finas ramificações desse nervo se aproximam de células magnetoreceptoras de magnetita no nariz da truta.

Foi realizada uma experiência por Walker e col. (2000) onde eles variavam a intensidade e/ou a direção do campo magnético aplicado. As fibras dos nervos do TN exibiu padrões regulares de resposta ao campo magnético exceto durante a mudança de intensidade, mas não da direção, desse campo.

Demonstrar um mecanismo de detecção de magnetita depende, primeiramente, na identificação da magnetita associada a células candidatas a serem magnetoreceptoras. Foi utilizado o microscópio de rastreamento a laser cofocal (do inglês, confocal laser scanning microscope, CLSM), apesar do tamanho minúsculo das partículas de magnetita (50nm), e a microscopia eletrônica de transmissão (do inglês, transmission electron microscope, TEM), onde as partículas não serão facilmente visíveis dentre a grande variedade de materiais com alta densidade de elétrons em células tratadas com corantes de metais pesados.

Uma procura nas cabeças das trutas arco-íris embebidas em resinas utilizando o CLSM, revelou a presença de material cristalino numa camada discreta de célula do nariz da truta. As células que continham as partículas refletoras têm 10-15 μm de comprimento, possuíam uma forma característica e eram localizados perto da lâmina basal do epitélio olfatório (figura 7(b)).

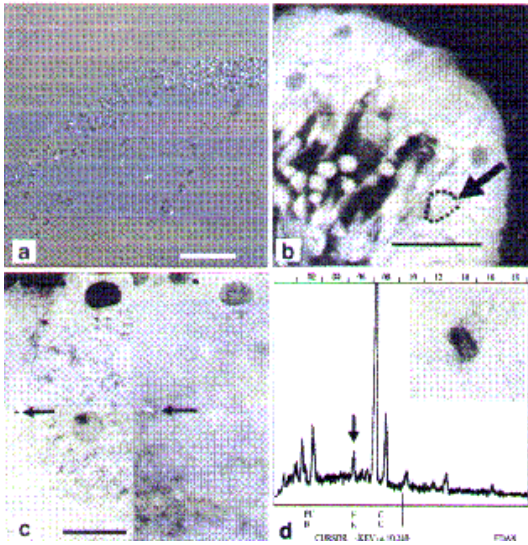


Figura 7: (a) imagem de bactérias magnetotáticas vistas pela utilização do CLSM. Os pontos brilhantes correspondem à localização dessas bactérias. (escala de 50 μm). (b) célula que contém material cristalina na lamela olfatória (escala de 25 μm). (c) figura mostrando o cristal num campo brilhante (flecha da esquerda) e num campo escuro (flecha da direita) (escala de 1 μm). (d) análise da energia dispersada devido à emissão de raios x. Nesta figura, a seta demonstra a concentração de ferro, - Walker, M. M. e Green, C. R. Structure, function, and use of the magnetic sense in animal

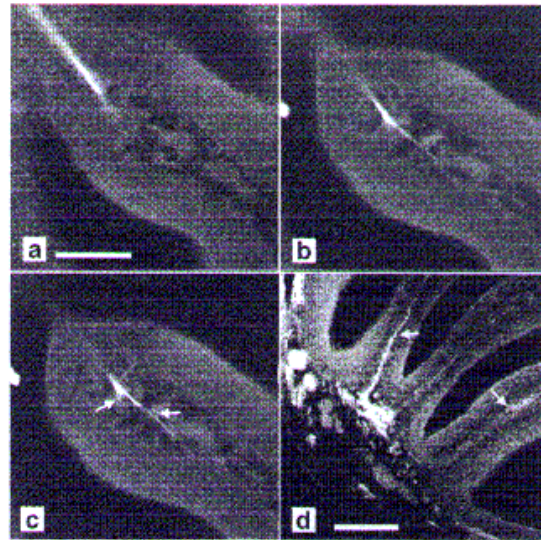


Figura 8: Com a ajuda do Di-I foi possível detectar dois tipos diferentes de ramificações do TN. (a)- (c) as figuras mostram as séries de ramificações do TN que penetram individualmente na lamela da cápsula nasal por cima. (d) essa figura mostra o TN penetrando a cápsula olfatória a partir da base e se ramificando após esse processo, - Walker, M. M. e Green, C. R. Structure, function, and use of the magnetic sense in animal

As células que contêm esse material são relativamente raras, com nunca mais de duas ou três sendo detectadas num dado intervalo de tempo, dentro de um volume (aproximadamente 25 μm^3) da amostra usada pelo CLSM. Análises TEM mostraram que o cristal era rico em ferro (seta da direita na figura 7(d)) e praticamente idêntico em tamanho (50 nm de comprimento) e forma a uma magnetita de monodomínio extraída de um salmão.

A forma distinta e a consistente localização das células que contêm esse material cristalino juntamente com a similaridade dessas reflexões da truta e as

reflexões nas bactérias, nos levam a crer que as células que possuem esta capacidade são candidatas a magnetoreceptoras. O cristal era provavelmente parte de um grande grupo, como uma cadeia de cristais, como observado na bactéria magnetotáctica, porque era muito pequeno por si só para produzir a reflexão que poderia ser detectada no nível microscópico da luz.

Se as células na lamela olfatória realmente contêm magnetita usada na magnetorecepção, é razoável prever que o nervo receptor magnético deve ser ligado às células candidatas a serem receptoras. Foram usadas várias seções histológicas e Di-I, um corante lipofílico fluorescente, para demarcar as ramificações do TN onde os registros electro-fisiológicos das respostas ao campo magnético simulado foram feitos finalizando nas células nervosas individuais.

Com a ajuda do Di-I foram identificados dois padrões distintos de ramificação pelo qual o TN inerva a lamela olfatória. O primeiro desse era uma série de ramificações do nervo que individualmente penetravam na lamela da cápsula olfatória por cima (figura 8 (a) - (c)). Os processos de ramificação do TN terminam nas porções distais da lamela olfatória, após contínuas ramificações no interior da camada celular da lamela olfatória, onde as células candidatas à magnetoreceptoras são freqüentemente encontradas. No segundo padrão de ramificação, o nervo penetra pela cápsula olfatória, a partir da base, onde depois se ramifica (figura 8 (d)).

Os resultados obtidos por Walker e col. (2000) sugerem que vertebrados detectam o campo magnético usando magnetoreceptores de magnetita localizados no epitélio olfatório e conectados ao cérebro pelo TN. A presença de respostas comportamentais e eletrofisiológicas à intensidade magnética na truta e

a proximidade da associação entre o nervo receptor magnético e as células candidatas a magnetoreceptoras sugerem uma conexão funcional entre eles.

3.5. Pássaros

Um dos mistérios do reino animal é a migração dos pássaros, em alguns casos por milhares de quilômetros , geralmente acima de grandes porções de água.

Pássaros migratórios se utilizam de sua habilidade de navegação apenas duas vezes ao ano, mas pombos correios utilizam essa habilidade durante o ano todo para voltarem à suas casas após serem libertados de muito longe.

O sol, o vento, as estrelas e outras características ambientais são partes de "dicas" de navegação usadas pelos pombos. Mas, a partir de 1960, evidências começaram a surgir que eles também usam o campo magnético. Um grupo de pesquisa em Frankfurt, Alemanha, levantou essa possibilidade com Pintarroxos europeus. Mantidos em gaiola de teste circulares no laboratório, sem oferecer nenhuma pista visual, os pintarroxos demonstraram uma orientação preferencial para uma dada direção, e essas preferências poderiam ser modificadas aplicando campos magnéticos. Mas os resultados mostraram um grande número de variabilidade e muitos cientistas se mantiveram céticos. Foram os experimentos de William Keeton, da Universidade de Cornell, EUA, em pombos correios que convenceram ornitologistas e estudiosos do comportamento animal em todo mundo que pássaros têm um sentido magnético.

A clássica experiência de Keeton foi publicada em 1971. Ele colou barras magnéticas ou não-magnéticas de aproximadamente mesmos tamanho e peso nas costas dos pombos. Os pombos eram liberados a muitos quilômetros de suas casas e eram observados até saírem do campo de visão. Em dias nublados, onde eles eram privados da navegação pelo sol, a maior parte dos pássaros com barras não-magnéticas se deslocaram na direção de suas casas. Mas muitos dos pássaros com barras magnéticas não o fizeram. Keeton argumentou que o campo desse ímãs interferiram com o campo geomagnético, bloqueando a habilidade dos pombos de usar seu sentido magnético para orientação.

Foi um experimento surpreendente, com um incrível resultado, e foi citado várias vezes como a mais clara observação que pássaros realmente têm um sentido magnético. No entanto, Keeton começou a ter dúvidas sobre seu próprio resultado. As barras magnéticas nem sempre confundiam os pombos e, num paper de 1972 ele notou "a preocupante variabilidade encontrada nos resultados". Ele foi, então, testar várias centenas de pássaros diferentes em diversas situações. Seus novos resultados, acumulados entre 1971 e 1979, não mostraram um efeito significativo das barras magnéticas.

Num estudo realizado por Walker e col.(2000), foi proposto um modelo teórico em que, com base na experiência de Keeton, os pombos não só conseguiriam obter sua latitude, devido à mudança da intensidade do campo magnético, mas também conseguiriam obter a segunda coordenada, a longitude, conhecendo sua exata posição na superfície terrestre.

4. Conclusão

Neste trabalho, vimos que estudos científicos mais sérios sobre a influência de campos magnéticos no comportamento dos seres vivos só começaram a ser realizados recentemente. Além disso, na sua maioria, esses estudos forneceram apenas “pistas” sobre essa interação campo magnético - seres vivos, sem contudo chegarem a resultados ou modelos conclusivos. Porém, com os crescentes avanços tecnológicos nas áreas da Biologia e do Magnetismo, podem-se esperar novos experimentos mais sofisticados e mais conclusivos.

Desse modo, ainda é cedo para se afirmar como os campos magnéticos presentes no dia a dia do homem (gerados por telefones celulares, linhas de transmissão, aparelhos eletrodomésticos, veículos, entre outros) o influenciam e mesmo se eles causam alguma doença ou algum problema para o seu organismo. Só com o advento de experimentos mais sofisticados que comprovem modelos teóricos confiáveis é que se poderá começar a afirmar algo sobre esse assunto.

5. Glossário

Campo Coercivo: Campo magnético necessário para anular a magnetização de uma amostra levada à saturação. Numa curva de histerese, é o cruzamento desta com o eixo das abscissas.

Campo Remanente: Magnetização residual de uma amostra em campo zero depois de ter sido levada à saturação. Numa curva de histerese, é o cruzamento desta com o semi-eixo positivo das ordenadas.

Geomagnetismo: A Terra pode ser considerada um gigantesco ímã, cujo pólo Norte magnético está no pólo Sul geográfico do planeta e cujo pólo Sul magnético está no pólo Norte geográfico. Acredita-se que este campo se inverta em períodos muito longos de tempo e que ele seja causado pelo movimento do núcleo terrestre, constituído de ferro e níquel líquido, que são materiais ferromagnéticos.

Histerese: Curva característica de cada material, que apresenta como a magnetização do material varia com a aplicação de um campo magnético externo. Pela curva de histerese, é possível conhecerem-se várias propriedades do material em questão.

Lei de Faraday: Uma das equações de Maxwell, a Lei de Faraday diz que a derivada temporal do fluxo magnético é igual ao oposto da tensão induzida; trocando em miúdos, esta Lei enuncia que um campo magnético que varia com o tempo produz um campo elétrico.

Microscopia Eletrônica de Transmissão: Microscopia especial para a observação de partículas muito menores que 1 micro milímetro, utilizando basicamente propriedades da interação de um feixe de elétrons com a matéria.

Momento Magnético: De maneira simples e informal, podemos dizer que o magnetismo num magneto é causado por inúmeras e minúsculas “bússolas”. Cada uma dessas “bússolas” está em cada um dos átomos do material e é representada

por um vetor chamado de momento magnético, que aponta do pólo Sul para o pólo Norte.

Partículas Ferromagnéticas: As partículas ferromagnéticas são divididas em regiões, no interior delas, chamadas de domínios. Em cada domínio, todos os momentos magnéticos apontam para a mesma direção; por isso, em cada domínio, a soma vetorial dos momentos magnéticos é não nula.

Partículas Paramagnéticas: Nas partículas paramagnéticas, a soma (vetorial) dos momentos magnéticos de todos os átomos que as constitui é nula. Porém, quando submetidos a um campo magnético externo, estes momentos magnéticos se alinham com ele e criam um vetor momento magnético não-nulo, na direção do campo externo, que deixa a partícula magnetizada.

Ressonância Paramagnética Eletrônica (RPE): Aparelho que revela o espectro de materiais paramagnéticos ou ferromagnéticos, através de técnicas relacionadas com conceitos de Mecânica Quântica.

SQUID: Dispositivo capaz de medir a magnetização em amostras biológicas que contenham baixas concentrações de material magnético, através da variação de fluxos magnéticos em bobinas supercondutoras. A sigla é do inglês: *Superconducting Quantum Interference Device*.

Referências Bibliográficas

- [1] - Barros, H. G. P. L e Esquivel, D. M. S. Interação do Campo Magnético da Terra com os seres vivos: História da sua Descoberta. Revista Brasileira de Ensino de Física, setembro de 2000.
- [2] - J. Livingston: Driving Force: The Natural Magic of Magnets (Harvard, 1996), páginas 202 a 217.
- [3] - Walker, M. M. e Green, C. R. Structure, function, and use of the magnetic sense in animal. Journal of Applied Physics, maio de 2000.
- [4] - Acosta-Avalos, D. e Linhares, M. P. Insetos Sociais: um Exemplo de Magnetismo Animal. Revista Brasileira de Ensino de Física, setembro de 2000.
- [5] - Anderson, J. B. e Vander Meer, R. K. Magnetic orientation in the fire ant, *Solenopsis invicta*. Naturwissenschaften 80, 568-570 (1993).
- [6] - Çamlitepe, Y. e Stradling, D. J. Wood ants orient to magnet fields. Proc. R. Soc. Lond. B 261, 37-41 (1995).
- [7] - Esquivel, D. M. S.; Acosta-Avalos, D.; El-Jaick, L. J.; Cunha, A. D. M.; Malheiros, M. G., Wajnberg, E. e Linhares, M. P. Evidence for magnetic material in the fire ant *Solenopsis* sp. By Eletron Paramagnetic Resonance measurements. Naturwissenschaften 86, 30-32 (1999).
- [8] - Gould, J. L.; Kirschvink, J. L. e Deffeyes, K. S. Bees have magnetic remanence. Science 201, 1026-1028.
- [9] - Jander, R. e Jander, U. The light and magnetic compass of the weaver ant, *Oecophylla smaragdina* (Hymenoptera: Formicidae). Ethology 104 743-758 (1998).
- [10] - Kermarrec, A. Sensibilité à un champ magnétique artificiel et réaction d'évitement chez *Acromyrex octospinosus* (Reich) (Formicidae, Attini). Insectes Soc. 28, 40-46 (1981).
- [11] - Klotz, J. H.; Van Zandt, L. L.; Reid, B. L. e Bennett, G. W. Evidence lacking for magnetic compass orientation in fire ants (Hymenoptera: Formicidae). J. Kansas Entomol. Soc. 70, 64-65 (1997).
- [12] - Leal, I. R. e Oliveira, P. S. Behavioral ecology of the neotropical termite-hunting ant *Pachycondyla* (= *Termitopne*) *marginata*: colony founding, group-raiding and migratory patterns. Behav. Ecol. Sociobiol. 37, 373-383 (1995).

[13] - Rosengren, R. e Fortelius, W. Ortstreue in foraging ants of the *Formica rufa* group. Hierarchy of orienting cues and long-term memory. *Insectes Soc.* 33, 306-337 (1986).

[14] - Schiff, H. e Canal, G. The magnetic and electric fields induced by superparamagnetic magnetite in honeybees. *Biol. Cybern.* 69, 7-17 (1993).

[15] - Slowick, T. J.; Green, B. L. e Thorvilson, H. G. Detection of magnetism in the red imported fire ant (*Solenopsis invicta*) using magnetic resonance imaging. *Bioelectromagnetics* 18, 396-399 (1997).

[16] – Slowick, T. J. e Thorvilson, H. G. Localization of subcuticular iron-containing tissue in the red imported fire ant. *Southwest. Entomol.* 21, 247-253 (1996).

