

Insetos Sociais: um Exemplo de Magnetismo Animal

(Social insects: an example of animal magnetism)

Daniel Acosta-Avalos, Eliane Wajnberg, Darci M. S. Esquivel,
Léa Jaccoud El-Jaick

*Departamento de Matéria Condensada e Espectroscopia,
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas,
Rua Xavier Sigaud 150, 22290-180, Rio de Janeiro, RJ*

Marilia Paixão Linhares

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ

Recebido em 14 de Dezembro 1999. Aceito em 27 de abril, 2000

Neste trabalho são apresentados os efeitos de campos magnéticos nas abelhas *Apis mellifera* e em formigas. Tendo em vista o modelo de transdução ferromagnética, baseado na presença de nanopartículas magnéticas, como sendo o modelo de magnetorecepção mais bem aceito, apresentamos nossa contribuição para a caracterização destas partículas, utilizando Ressonância Paramagnética Eletrônica (RPE), magnetometria SQUID e microscopia eletrônica.

In this paper we report the effects of magnetic fields on honeybees *Apis mellifera* and ants. As the ferromagnetic transduction model, based on the presence of magnetic nanoparticles, is the most accepted one for magnetoreception, our contribution to characterize these particles using Electronic Paramagnetic Resonance (EPR), SQUID magnetometry and electron microscopy is presented.

I Introdução

Ser vivo e meio ambiente, meio ambiente e ser vivo: quem altera quem? O ser vivo adapta-se ao meio e, por sua vez, o meio vai se modificando pela ação do ser vivo. Esta interação que vivemos na Terra - nosso planeta - é uma experiência única, sem possibilidade de repetição no tempo. E, no entanto, muito pouco se conhece da diversidade dos seres aqui viventes ou que já existiram e se extinguiram, bem como sobre os processos de adaptação. Trata-se de uma interação complexa com uma dinâmica temporal não repetitiva e bastante desconhecida onde, por exemplo, pequenas alterações no meio ambiente podem ocasionar grandes desequilíbrios entre as diferentes populações destes seres e levando a novos caminhos evolutivos.

A percepção de sinais do meio pelos microrganismos e os animais superiores leva ao desenvolvimento de diferentes mecanismos ao longo do tempo, que são responsáveis pela sobrevivência das espécies, como a orientação e a navegação, contribuindo para o processo de adaptação ao meio. Um desses sinais, presente durante todo o tempo desde o aparecimento da vida na Terra, é o campo magnético terrestre (Skiles, 1985). Embora desde o segundo século os chineses usassem ímãs para se orientarem, somente em 1600 W. Gilbert, médico

da corte inglesa, publicou seu tratado de magnetismo, onde ele apresenta pela primeira vez a hipótese que a Terra se comporta como um enorme dipolo magnético. Entretanto, só recentemente, a ciência tem considerado a influência deste campo sobre os microrganismos. Além destes, abelhas, moscas, borboletas, salamandras, peixes, baleias, golfinhos, tartarugas e pombos, entre outros, respondem a este campo magnético e, em vários deles, já foram encontradas partículas de material magnético produzidas pelo próprio organismo animal (Kirschvink e col., 1985). Estas partículas, com tamanhos na faixa de 100-1000 Å são em geral de magnetita, um óxido de ferro fortemente magnético (Banerjee e Moskowitz, 1985). No caso de bactérias magnéticas e organismos unicelulares estas partículas estão organizadas dentro do citoplasma, tal que produzam um momento magnético resultante suficiente para orientá-las segundo as linhas de força do campo geomagnético. Esta resposta passiva ao campo é bastante compreendida do ponto de vista físico (Blakemore, 1975). Entretanto, para os seres mais complexos onde existem células especializadas, a magnetorecepção é um mecanismo mais sofisticado envolvendo células nervosas e do qual até agora só existem algumas hipóteses isoladas ou modelos específicos para alguns animais (Vácha, 1997).

Entre os animais superiores, os insetos constituem a

classe dominante no nosso planeta. Entre eles o grupo dos insetos sociais ao qual pertencem as abelhas, formigas, vespas e cupins, apresentam vida em colônias onde formam uma sociedade organizada, basicamente, em três castas: soldados, rainhas e operárias (Hölldobler e Wilson, 1990). Dentre os insetos sociais o comportamento das abelhas *Apis mellifera* é o mais estudado. A presença de dois diferentes tamanhos de partículas de magnetita no abdômen desta espécie de abelhas tem levado a modelos para o mecanismo de sua orientação e para a compreensão da complexa dança feita quando elas voltam à colmeia em busca de ajuda para o transporte do alimento encontrado (Wiltschko e Wiltschko, 1995).

Quanto às formigas, o número de espécies existentes no planeta é maior que 12000 e no Brasil, devido ao seu clima tropical e às florestas, encontra-se grande parte destas espécies. Em geral formigueiros da terra são formados por vários túneis subterrâneos em completa escuridão, que se irradiam a partir de um centro e terminam em saídas por onde elas chegam à superfície. Apesar das diferenças para cada espécie quanto ao processo de descobrir e transportar alimento para a colônia, o que elas têm em comum é que deixam o ninho e exploram uma área ao redor, fazendo voltas em um padrão aleatório, até encontrar o alimento, quando então retornam a este ninho marcando uma trilha através de feromônios, característicos de cada colônia. Esta volta é feita numa trilha reta na direção da saída do túnel, independente das muitas voltas feitas ao acaso. Assim como na *Apis mellifera*, estudos recentes vêm mostrando a influência do campo magnético bem como a presença de material magnético biomineralizado (Vácha, 1997; Esquivel e col., 1999; Acosta-Avalos e col., 1999; Wajenberg e col., 2000).

Desde 1992 foram observadas partículas magnéticas no cérebro humano (Kirschvink e col., 1992). Diante destes resultados, qual é o efeito de nossa convivência diária com campos magnéticos constantes e oscilantes gerados artificialmente pelo homem nos eletrodomésticos, estações transmissoras urbanas, etc.? Dentro do processo evolutivo, este efeito ainda não é conhecido, uma vez que seres humanos só convivem com a eletricidade há menos de duas centenas de anos, ou seja, cerca de quatro gerações. No entanto, estudos recentes in vivo e in vitro têm mostrado o efeito de campos magnetostáticos e eletromagnéticos alternados (Feychting e Ahlbom, 1993; Marron e col., 1988; Nindl e col., 1997; Tynes e col., 1992). As alterações sofridas podem ser desde benéficas, como o efeito antitumoral destes campos de ultra-baixas frequências (Muzalevs-kaya e Uritskii, 1997), até o outro extremo, como a propensão a desenvolver algum tipo de câncer devido a campos gerados pelas correntes de 60 Hz (Savitz e col., 1988). Cresce o número de experiências sobre os efeitos de campos magnéticos em sistemas celulares, sobre genes e pequenas moléculas de interesse fisiológico, proteínas

etc, na busca de resultados que levem à compreensão deste complexo efeito.

Neste trabalho apresentamos os resultados obtidos em várias formigas e em abelhas *Apis mellifera* bem como o desenvolvimento da nossa pesquisa visando dar uma pequena contribuição à busca de material magneto-receptor. Para obtermos mais informações sobre as propriedades físicas da magnetita biológica, utilizamos técnicas físicas, que se complementam, com sensibilidade para medir quantidades muito pequenas de material magnético (10^{-6} a 10^{-7} emu/Oe), tais como:

- Ressonância Paramagnética Eletrônica (RPE): Espectroscopia de materiais paramagnéticos e ferromagnéticos onde elétrons desemparelhados submetidos a um campo magnético são excitados para um estado de energia mais alta através da absorção da microonda. Os elétrons excitados mudam sua direção de spin e relaxam para o estado fundamental emitindo fónons. O espectro é obtido como a derivada da curva de absorção da microonda em função do campo magnético. A Fig. 1 mostra um espectro de RPE, à temperatura ambiente, de abdomens de formigas migratórias, onde estão indicados o campo ressonante H_r (campo onde a absorção é máxima e a derivada é nula) e a largura de linha ΔH_{pp} (distância pico a pico de uma linha).

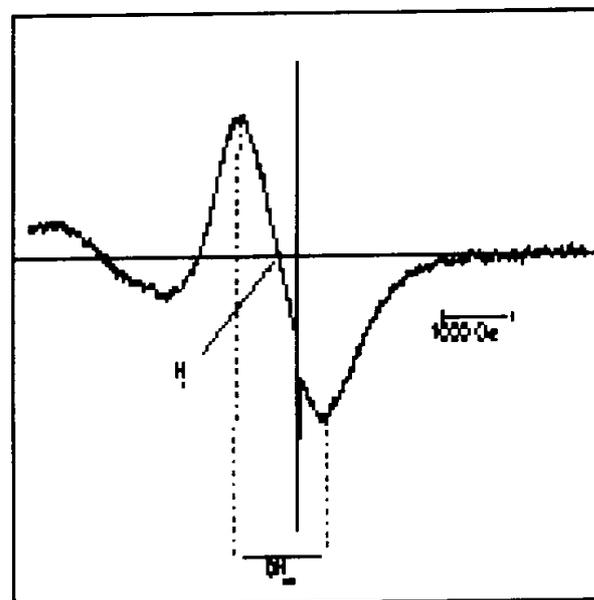


Figura 1. RPE de uma amostra de abdomens amassados de formigas migratórias à temperatura ambiente, com uma frequência de microondas de 9,4 GHz (banda X).

- Microscopia Eletrônica de Transmissão: microscopia especial para a observação de partículas muito menores que $1 \mu\text{mm}$, utilizando basicamente a interação

de um feixe de elétrons com a matéria. Com esta microscopia é possível estudar a estrutura cristalina e a composição química destas micropartículas. Um exemplo desta técnica pode ser visto no trabalho de Acosta-Avalos e col.(1999).

- Magnetometria SQUID (Superconducting Quantum Interference Device): técnica que utiliza como dispositivo um transdutor de alta sensibilidade para medidas de magnetização em amostras biológicas, as quais contém baixas concentrações de material magnético, através da variação de fluxo magnético em bobinas supercondutoras. A Fig. 2 mostra uma curva de histerese de abdomen de abelha a 60K, onde estão indicados a magnetização remanente M_r (magnetização residual de uma amostra em campo zero, depois de ter sido levada à saturação) e o campo coercivo H_c (campo magnético necessário para anular a magnetização de uma amostra levada à saturação).

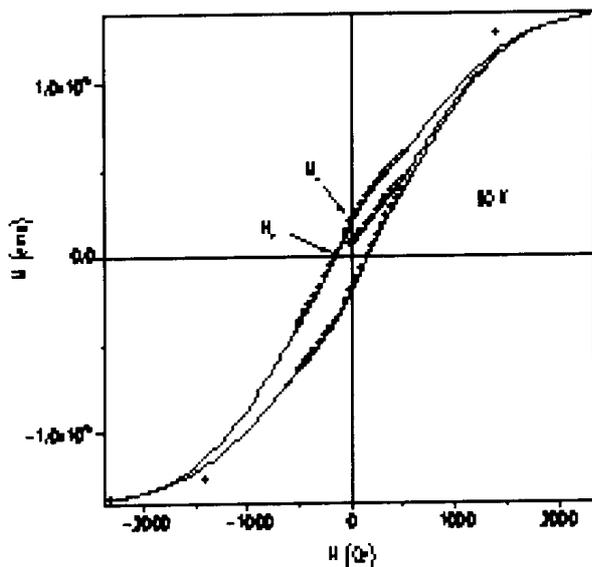


Figura 2. Histerese de abdomens de abelhas à temperatura de 60K, obtida por magnetometria SQUID. A magnetização de saturação não foi alcançada neste intervalo de campo aplicado. O campo coercivo, H_c e a magnetização remanente M_r estão indicados.

A utilização destas técnicas no estudo das propriedades magnéticas e estruturais das micropartículas presentes nestes insetos, poderá contribuir na elaboração de um modelo que permita uma melhor compreensão da magnetorecepção.

II Abelhas *Apis mellifera*

Os estudos mais bem documentados sobre a influência das mudanças na direção e na intensidade do campo

magnético terrestre no comportamento dos insetos sociais têm sido feitos em abelhas *Apis mellifera* (Fig. 3). Apesar das inúmeras evidências de que elas se orientam por este campo, não se sabe ao certo quais os mecanismos de recepção capazes de detectá-lo e como é feita a transmissão de informações ao seu sistema nervoso. Em 1968, Lindauer e Martin (citado em Towne e Gould, 1985), observaram quatro manifestações de comportamento destas abelhas influenciadas pelo campo magnético terrestre:

1- as abelhas operárias, quando retornam de uma bem sucedida procura de comida, executam uma dança cuja orientação, em relação à direção vertical do favo, indica, às outras abelhas, a localização da fonte de alimento. Em geral, a dança é executada na escuridão da colméia. 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° à esquerda ou à direita da “direção correta”, variando com a direção do campo magnético terrestre. Para verificar se, de fato, a “má direção” é dependente do campo, foi simulado um campo nulo dentro da colméia e observado que a “direção incorreta” anula-se completamente cerca de 45 minutos depois. Estes “erros” não são “ruídos do sistema”, pois todas as abelhas, dançando num dado tempo, cometem o mesmo “erro”, tanto em intensidade como em direção;

2- ocasionalmente, em dias de verão, é realizada uma dança anômala numa superfície horizontal, na entrada da colméia. Neste caso, depois de um período inicial de desorientação, as abelhas dançam, ao longo dos oito pontos cardeais magnéticos, desorientando-se novamente quando o campo geomagnético é artificialmente anulado;

3- quando um enxame deixa a colmeia original, abelhas operárias constroem novos favos na mesma direção magnética anterior. São necessários campos magnéticos muito fortes (~10 vezes o da Terra) para destruir esta orientação dos favos;

4- 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, em 1988, (citado em Vácha, 1997) 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 a mudanças do campo geomagnético, cerca de 10^{-4} vezes o valor do campo.



Figura 3. Foto de uma abelha *Apis mellifera*.

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).

A pergunta a ser feita é: como as abelhas fazem isso? Qual a natureza do sensor biológico das abelhas?

Vários modelos teóricos têm sido propostos para explicar de que forma se faz esta detecção, todos baseados numa das três hipóteses: lei da indução eletromagnética de Faraday, ressonância magnética (efeitos paramagnéticos) e transdução ferromagnética.

O comportamento magnético de uma partícula depende da sua forma e tamanho. Partículas eletrondensas de 10-20 nm foram observadas por microscopia eletrônica, na base dos pêlos pretos e duros da região anterodorsal do abdômen destas abelhas. Foi sugerido que estas partículas são de magnetita superparamagnética e estão envolvidas na detecção do gradiente do campo, amplificando localmente as mudanças do campo magnético externo (Schiff e Canal, 1995). Por outro lado, um detetor tipo agulha de bússola poderia medir o torque de uma ou mais partículas monodomínios magnéticos para determinar a direção do campo magnético externo (Kirschvink e col., 1985). Cristais do tipo monodomínio foram observados por Schiff (1991). Outras indicações da presença de óxidos de ferro biomineralizado têm sido relatadas por Gould e col. (1978), Kuterbach e col. (1982), Kuterbach e Walcott (1986) e Hsu e Li (1994).

Dados experimentais publicados até agora não permitem descartar nenhuma das hipóteses anteriores. Diante dos estudos acima citados a transdução ferro-

magnética é a hipótese mais provável para as abelhas *Apis mellifera*.

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

Medidas de histerese magnética têm sido realizadas pelo nosso grupo, nos três primeiros segmentos abdominais de *A. mellifera* orientados relativamente ao campo aplicado do SQUID (Fig. 2). Análises das histereses a diferentes temperaturas confirmam a organização das partículas observadas por Gould e col. (1978). Realizamos, também, medidas de RPE nos abdomens destas abelhas (Fig. 4) observando a presença de, pelo menos, quatro estruturas de ferro: íon isolado, nanopartículas isoladas, aglomerados destas partículas e possivelmente oxi-hidróxido de ferro. Utilizando um modelo para a largura de linha destes espectros que considera as partículas superparamagnéticas como partículas paramagnéticas, um tamanho magnético aproximado de 12 nm foi estimado para as partículas isoladas. A partir da análise do campo resonante, determinamos a anisotropia magnética destas partículas, em função da temperatura. Estes resultados (submetidos a publicação) estão sendo comparados com os que obtivemos com formigas, descritos a seguir.

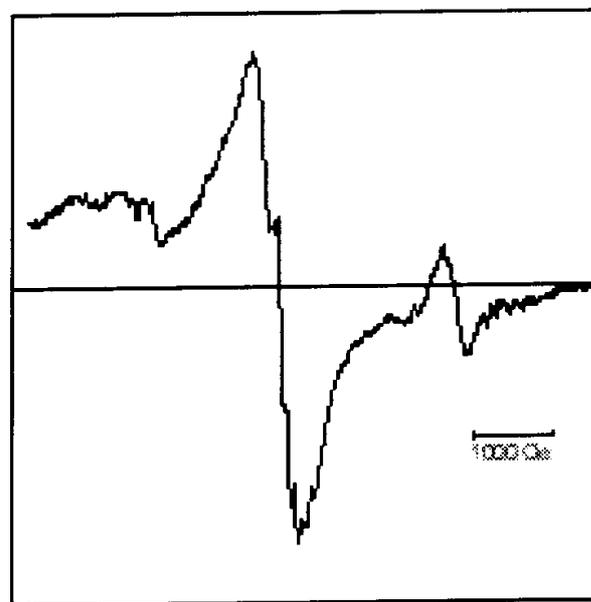


Figura 4. RPE de uma amostra de abdomens amassados de abelhas à temperatura ambiente em banda X.

III Formigas

Os estudos feitos até hoje sobre a influência de campos magnéticos no comportamento de formigas, podem ser apresentados da seguinte maneira:

1. Efeitos magneto-cinéticos (não incluindo orientação): o estudo feito por Kermarrec (1981) com a espécie *Acromyrmex octospinosus*, demonstrou a sensibilidade destas formigas a campos magnetostáticos com intensidade mínima de 6 Oe. As 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” ou “lava-pés”. Foram comparadas duas situações: campos de mesmo sentido e campos de sentidos opostos, antes e depois de colocar o alimento. Experiência semelhante foi feita por Klotz e col. (1997), que, entretanto, não confirmou o resultado acima.

2. Efeitos magneto-dinâmicos (implicando o uso da informação vetorial do campo magnético nas atividades de orientação e localização espacial): estudos feitos por Rosengren e Fortelius (1986), com a espécie *Formica rufa*, e por Jander e Jander (1998), com a espécie *Oecophylla smaragdina*, comparam a orientação magnética com aquela feita com outros estímulos (luz, feromônios, 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 Stradling (1995) com *Formica rufa*, entretanto, demonstrou que, na ausência de outros estímulos, o campo geomagnético é utilizado para a 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.

Assim como em abelhas, baseado no modelo da existência de magnetosensores, estudos têm sido feitos à procura de nanopartículas magnéticas nas formigas *Solenopsis invicta* e *Pachycondyla marginata* (Fig. 5).



Figura 5. Foto de uma formiga migratória, *Pachycondyla marginata*, carregando um cupim, alimento único de sua dieta.

buição de ferro (Fe^{3+}) no corpo de formigas operárias da espécie *Solenopsis invicta*, encontrando acúmulos de ferro no olho e em algumas regiões do abdômen, 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 destas formigas, comparando-as com um controle positivo, no caso, abelhas *Apis mellifera*. Eles observaram imagens semelhantes em ambos os casos, concluindo que as formigas têm um magnetismo interno próprio, sem, no entanto, concluir de qual região corporal se origina o campo magnético.

Análise feita por nós, utilizando a técnica de RPE, mostrou espectros indicativos da presença de material magnético, que, comparados com aqueles na literatura para magnetita, levaram a concluir que estas formigas possuem nanopartículas deste material. Nossos estudos (Esquivel e col., 1999) e o de Slowick e col., 1997, levam-nos a afirmar que as “formigas de fogo” também biomineralizam material magnético.

Outra espécie interessante para se procurar material magnético biomineralizado é a formiga migratória *Pachycondyla marginata*, que é mais comum na região de anomalia magnética do Atlântico Sul. Nós isolamos nanopartículas de óxidos de ferro magnéticos destas formigas, mostrando, de maneira indireta, que, além do abdômen, a cabeça pode estar envolvida no processo de magnetorecepção. Medidas da magnetização induzida, feitas com magnetometria SQUID em abdomens amassados destas formigas, mostraram propriedades ferro(i)magnéticas coexistindo com um estado superparamagnético à temperatura ambiente. Isso pode implicar a presença de duas diferentes nanopartículas magnéticas com distribuições de volume, no abdômen destas formigas. Nossos estudos de RPE (Wajnberg e col., 2000) revelaram a presença nestes abdomens de pequenos aglomerados destas nanopartículas magnéticas, com volumes menores do que os medidos por microscopia eletrônica (Acosta-Avalos e col., 1999).

IV Conclusão

Existe um longo caminho até que a compreensão de mecanismos de magnetorecepção se faça, levando em conta a diversidade de espécies. Embora estudos comportamentais relativos a campos magnéticos aplicados em formigas e abelhas estejam sendo feitos, é necessário que, paralelamente, se estudem as características e as propriedades magnéticas do material biomineralizado, para que modelos mais adequados sejam propostos. Assim, através de estudos que utilizam técnicas físicas em material biológico, será possível gerar um conjunto de resultados visando este objetivo. E neste ponto, no caso das formigas e abelhas, que se inserem nossas pesquisas.

Slowick e Thorvilson (1996), pesquisaram a distri-

Agradecimentos

D. A-A, D. M. S. E. e E. W. agradecem o apoio do CNPq e M. P. L. e D. M. S. E. à FAPERJ.

Referências

- [1] Acosta-Avalos, D.; Wajnberg, E.; Oliveira, P. S.; Leal, I.; Farina, M. e Esquivel, D. M. S. Isolation of magnetic nanoparticles from *Pachycondyla marginata* ants. *J. Exp. Biol.* **202**, 2687-2692 (1999).
- [2] Anderson, J. B. e Vander Meer, R. K. Magnetic orientation in the fire ant, *Solenopsis invicta*. *Naturwissenschaften* **80**, 568-570 (1993).
- [3] Banerjee, S. K. e Moskowitz, B. M., 1985 Ferrimagnetic properties of magnetite. Em: *Magnetite Biomineralization and Magnetoreception in Organisms: a new Biomagnetism*. Kirschvink, J.L.; Jones, D.L. and MacFadden, B.J. (Eds.) pp. 17-42, Plenum Press, N.Y.
- [4] Blakemore, R. P., Magnetotactic Bacteria, *Science* **190**, 377-379 (1975).
- [5] Çamlitepe, Y. e Stradling, D. J. Wood ants orient to magnetic fields. *Proc. R. Soc. Lond. B* **261**, 37-41 (1995).
- [6] Collet, T. S. e Baron, J. Biological compasses and the coordinate frame of landmark memories in honeybees. *Nature* **368**, 137-140 (1994).
- [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 Electron Paramagnetic Resonance measurements. *Naturwissenschaften* **86**, 30-32 (1999).
- [8] Feychting, M. e Ahlbom, A. Magnetic fields and cancer in children residing near Swedish HIGH-voltage power lines. *Am. J. Epidemiology* **138**, 467-481 (1993).
- [9] Frier, H. J.; Edwards, E.; Smith, C.; Neale, S. e Collet, T. S. Magnetic compass cues and visual pattern learning in honeybees. *J. Exp. Biol.* **199**, 1353-1361 (1996).
- [10] Gould, J. L.; Kirschvink, J. L. e Deffeyes, K. S. Bees have magnetic remanence. *Science* **201**, 1026-1028 (1978).
- [11] Gould, J. L.; Kirschvink, J. L.; Deffeyes, K. S. e Brines, M. L. Orientation of demagnetized bees. *J. Exp. Biol.* **80**, 1-8 (1980).
- [12] Hölldobler, B. e Wilson, E. O. (1990) *The ants*. Harvard University Press, Cambridge.
- [13] Hsu, C. Y. e Li, C. W. Magnetoreception in honeybees (*Apis mellifera*). *Science* **265**, 95-97 (1994).
- [14] Jander, R. e Jander, U. The light and magnetic compass of the weaver ant, *Oecophylla smaragdina* (Hymenoptera: Formicidae). *Ethology* **104**, 743-758 (1998).
- [15] Kermarrec, A. Sensibilité à un champ magnétique artificiel et réaction d'évitement chez *Acromyrmex octospinosus* (Reich) (Formicidae, Attini). *Insectes Soc.* **28**, 40-46 (1981).
- [16] Kirschvink, J. L.; Jones, D. L. e MacFadden, B. J. (1985) *Magnetite Biomineralization and Magnetoreception in Organisms: a new Biomagnetism*. Plenum Press, N. Y.
- [17] Kirschvink, J. L.; Kobayashi-Kirschvink, A. e Woodford, B. J. Magnetite biomineralization in the human brain. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **86**, 7683-7687 (1992).
- [18] Kuterbach, D. A., Walcott, B., Reeder, R. J. e Frankel, R. B. Iron-containing cells in the honey bee (*Apis mellifera*). *Science* **218**, 695-697 (1982).
- [19] Kuterbach, D. A. e Walcott, B. Iron-containing cells in the honey-bee (*Apis mellifera*). I. Adult morphology and physiology. II. Accumulation during development. *J. Exp. Biol.* **126**, 375-401 (1986).
- [20] 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).
- [21] Leal, I. R. e Oliveira, P. S. Behavioral ecology of the neotropical termite-hunting ant *Pachycondyla* (= *Termitopone*) *marginata*: colony founding, group-raiding and migratory patterns. *Behav. Ecol. Sociobiol.* **37**, 373-383 (1995).
- [22] Marron, M. T.; Goodman, E. M.; Sharpe, P. T. e Grenebaum, B. Low frequency electric and magnetic fields have different effects on the cell surface. *FEBS Lett.* **230**, 13-16 (1988).
- [23] Muzalevskaia, N. I. e Uritskii, V. M. The antitumour effect of a weak ultralow-frequency stochastic magnetic field with a 1/f spectrum. *Biofizika* **42**, 961-970 (1997).
- [24] Nindl, G.; Swez, J. A.; Miller, J. M. e Balcavage, W. X. Growth stage dependent effects of electromagnetic fields on DNA synthesis of Jurkat cells. *FEBS Lett.* **414**, 501-506 (1997).
- [25] 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).
- [26] Savitz, D. A.; Wachtel, H.; Barnes, F. A.; John, E. M. e Tvrdik, J. G. Case-control study of childhood cancer and exposure to 60 Hz magnetic fields. *Am. J. Epidemiology* **128**, 21-38 (1988).
- [27] Schiff, H. Modulation of spike frequencies by varying the ambient magnetic field and magnetite candidates in bees (*Apis mellifera*). *Comp. Biochem. Physiol. A* **100**, 975-985 (1991).
- [28] Schiff, H. e Canal, G. The magnetic and electric fields induced by superparamagnetic magnetite in honeybees. *Biol. Cybern.* **69**, 7-17 (1993).
- [29] Skiles, D. D. (1985) The geomagnetic field: its nature, history, and biological relevance. Em: *Magnetite Biomineralization and Magnetoreception in Organisms: a new Biomagnetism*. Kirschvink, J.L.; Jones, D.L. e MacFadden, B.J. (Eds.) pp. 43-102, Plenum Press, N. Y.
- [30] 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).
- [31] 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).

- [32] Towne, W. F. e Gould, J. L. (1985) Magnetic field sensitivity in honeybees. Em *Magnetite Biomineralization and Magnetoreception in Organisms: a new magnetism*. Kirschvink, J. L., Jones, D. S. and MacFadden, B. J. (Eds.), pp. 385-406 Plenum Press, N.Y.
- [33] Tynes, T.; Andersen, A. e Langmark, F. Incidence of cancer in Norwegian workers potentially exposed to electromagnetic fields. *Am.J. Epidemiology* **136**, 81-88 (1992).
- [34] Vácha M. Magnetic orientation in insects. *Biologia, Bratislava* **52**, 629-636 (1997).
- [35] Walker, M. M. e Bitterman, M. E., Conditioned responding to magnetic fields by honeybees. *J. Com. Physiol.* **157**, 67-71 (1985).
- [36] Wajnberg, E.; Acosta-Avalos, D.; El-Jaick, L. J.; Abraçado, L.; Coelho, J. L. A.; Bakuzis, A. F.; Moraes, P. C. e Esquivel, D. M. S., EPR study of migratory ant *Pachycondyla marginata* abdomens. *Biophys. J.* **78**, 1018-1023 (2000).
- [37] Wiltschko R. e Wiltschko, W. (1995) *Magnetic Orientation in Animals*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.