

Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD)
Programa de Pós-Graduação em Entomologia e Conservação da Biodiversidade

**EFEITO DO CAMPO MAGNÉTICO ALTERADO SOBRE O
COMPORTAMENTO DE FORMIGAS**

Dourados/MS
Fevereiro de 2017

Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD)
Programa de Pós-Graduação em Entomologia e Conservação da Biodiversidade

**EFEITO DO CAMPO MAGNÉTICO ALTERADO SOBRE O
COMPORTAMENTO DE FORMIGAS
PEREIRA, M. C. & ANTONIALI-JUNIOR, W. F.**

Dourados/MS
Fevereiro de 2017

Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD)
Programa de Pós-Graduação em Entomologia e Conservação da Biodiversidade

**EFEITO DO CAMPO MAGNÉTICO ALTERADO SOBRE O
COMPORTAMENTO DE FORMIGAS**

Defesa de Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Entomologia e Conservação da Biodiversidade, Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Entomologia e Conservação da Biodiversidade.

Orientador: Prof. Dr. William Fernando Antonialli-Junior

Dourados/MS
Fevereiro de 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

P436e

Pereira, Marlon César.

Efeito do campo magnético alterado sobre o comportamento de formigas. / Marlon César Pereira. – Dourados, MS: UFGD, 2017.
100f.

Orientador: Prof. Dr. William Fernando Antonialli-Junior.
Tese (Doutorado em Entomologia e Conservação da Biodiversidade) –
Universidade Federal da Grande Dourados.

1. Formicidae. 2. Geomagnético. 3. Magnetismo. 4. Padrões comportamentais. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central – UFGD.

©Todos os direitos reservados. Permitido a publicação parcial desde que citada a fonte.

“EFEITO DO CAMPO MAGNÉTICO ALTERADO SOBRE O
COMPORTAMENTO DE FORMIGAS.”

Por

MÁRLON CÉSAR PEREIRA

Tese apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD),
como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de
DOUTOR EM ENTOMOLOGIA E CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE
Área de Concentração: Biodiversidade e Conservação



Dr. William Fernando Antonialli Junior
Orientador/Presidente – UEMS



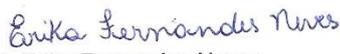
Dr. Valter Vieira Alves Junior
Membro Titular – UFGD



Dr. Wedson Desidério Fernandes
Membro Titular – UFGD



Drª. Maria da Graça Cardoso Pereira Bomfim
Membro Titular



Drª. Erika Fernandes Neves
Membro Titular – IFMS

Aprovado em: 23 de fevereiro de 2017.

Biografia do Acadêmico

Márlon César Pereira nasceu em Iguatemi/MS no dia 15 de janeiro de 1990, filho de Júlio Cesar Pereira e Izabel Quadros da Rocha Pereira.

Cursou a 1ª e 2ª Série do ensino fundamental na Escola Estadual de 1º e 2º Grau 8 de Maio em Iguatemi/MS nos anos de 1996 e 1997 respectivamente, cursou a 3ª Série do ensino fundamental na Escola Ativa em Iguatemi/MS no ano de 1998, cursou da 4ª a 8ª Série do ensino fundamental na Escola Estadual de 1º e 2º Grau 8 de Maio em Iguatemi/MS entre os anos de 1999 e 2003.

Cursou o 1º e 2º ano do ensino médio na Escola Estadual de 1º e 2º Grau 8 de Maio em Iguatemi/MS nos anos de 2004 e 2005 respectivamente, após isso concluiu o 3º ano do ensino médio na Escola Estadual de 1º e 2º Graus Joaquim Murtinho em Ponta Porã/MS no ano de 2006.

Possui graduação em Ciências Biológicas modalidade Licenciatura Plena pela Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul campus de Dourados/MS em 2011. Foi bolsista de iniciação científica CNPq no período de 2009/2010, com o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado “Assembléias de formigas associada à macrófitas aquáticas no Pantanal do Nabileque, Porto Murtinho-MS”.

Possui mestrado em Entomologia e Conservação da Biodiversidade pela Universidade Federal da Grande Dourados/UFGD, Dourados/MS. Foi bolsista Capes durante o período de mestrado. Em 2013 para obtenção do título de mestre apresentou como tema da dissertação o trabalho “Efeito Inimigo Íntimo em *Ectatomma brunneum* Smith 1858 (Hymenoptera: Formicidae)”.

Agradecimentos

Mais um importante passo da minha vida foi dado, e ainda assim consigo olhar para trás e perceber quem sempre esteve ao meu lado, nos momentos bons ou ruins, de alegrias ou de tristezas e sendo assim agradeço aqui a todos que marcaram esta etapa importante na minha caminhada ao futuro, sei que posso falhar e me esquecer de alguém, mas sempre que recebi algum tipo de apoio retribui de alguma forma e creio que todos que me ajudaram mesmo não estando marcados aqui sabem de sua importância neste momento.

Agradeço primeiramente a Deus, nossa fonte de vida, aquele que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos, me dando força para suportar as dificuldades e os desafios assim me ensinando sempre seguir seus passos com muita fé.

À minha família, principalmente meus pais Júlio e Izabel e meu irmão Rodrigo, que sempre estiveram comigo, e foram e sempre serão meus pilares verdadeiros, minha força, minha esperança, minha confiança, meus amigos, meu ontem, meu hoje e meu amanhã. Agradeço a meus pais que sempre que preciso se sacrificavam, visando sempre meu bem e almejando que eu tivesse um futuro excelente.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Prof. Dr. William Fernando Antonialli Junior, que desde o começo da minha caminhada na pesquisa científica se propôs a me guiar neste caminho para me tornar um verdadeiro cientista, também agradeço pelos diversos conselhos e ensinamentos, além da amizade que sempre levarei comigo, e um dia espero ter a mesma sabedoria e assim poder seguir seus passos.

Aos Professores Dr. Valter Alves Vieira Junior, Dr. Wedson Desidério Fernandes, Dra. Érika Fernandes Neves e Dra. Maria da Graça Cardoso Pereira-Bomfim, pela disponibilidade e gentileza para participar de minhas bancas examinadoras, além dos conselhos para melhorar a qualidade de minha tese.

Agradeço do fundo do coração a Ingrid de Carvalho Guimarães pela ajuda em todos os momentos, principalmente pela compreensão em momentos tensos que só a pós-graduação proporciona, enfim agradeço pelo companheirismo e por ser parte fundamental nesta vitória que sem dúvida alguma é um divisor de águas para minha história.

A todos meus amigos de laboratório, pelas muitas horas que passamos juntos, horas de angústias, aflições, algumas tristezas e sem sombra de dúvidas muitas alegrias, estas que com certeza ficarão para sempre em minha memória.

A todos meus amigos, ressaltando “meus brothers”, Marcelo Fruto, Paulo Ramos, Lucas Corrêa, Fernando Zolin, que sempre estiveram ao meu lado, me fazendo confiar que sempre é possível alcançar minhas metas e sempre estiveram comigo nos momentos de descontração, dúvidas, horas boas e horas ruins, foram fundamentais para minha formação como Doutor e como homem, que sabe que sem amigos leais não tem nada na vida.

Ao Programa de Pós Graduação em Entomologia e Conservação da Biodiversidade pela oportunidade de fazer parte do corpo discente do curso de mestrado e pelo suporte sempre que necessário.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo incentivo financeiro na modalidade de bolsa de estudo.

À Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, pelo apoio técnico.

Enfim, agradeço a todos que sempre estiveram ao meu lado na minha vida de doutorado, ajudando direta ou indiretamente, só tenho que dizer um simples porém sincero Muito Obrigado!!!

Dedicatória

*“Dedico esta minha vitória a meus pais,
Júlio e Izabel,
que sempre estiveram ao meu lado para
me dar apoio em todas as horas
além de me ensinar que mesmo a
vida sendo difícil ela é uma
dádiva divina”.*

“Tente aprender alguma coisa sobre tudo e tudo sobre alguma coisa.”

Thomas Henry Huxley

Efeito do Campo Magnético Alterado sobre o Comportamento de Formigas	
<i>Resumo/Abstract</i>	3
<i>Revisão “Como os organismos lidam e são afetados pelo campo magnético”</i>	5
<i>Capítulo I “Campos magnéticos alterados podem afetar o comportamento de forrageio de formigas?”</i>	
<i>Resumo</i>	18
<i>Introdução</i>	19
<i>Materiais e Métodos</i>	22
<i>Resultados</i>	26
<i>Discussão</i>	27
<i>Referências Bibliográficas</i>	31
<i>Anexos</i>	36
<i>Capítulo II “Campo magnético induzido pode alterar os padrões comportamentais intranidais de Neoponera inversa (Hymenoptera: Ponerinae)?”</i>	
<i>Resumo</i>	45
<i>Introdução</i>	47
<i>Materiais e Métodos</i>	50
<i>Resultados</i>	53
<i>Discussão</i>	54
<i>Referências Bibliográficas</i>	58
<i>Anexos</i>	64
<i>Capítulo III “Efeito da indução de campos magnéticos artificiais sobre o nível de reconhecimento intra-específico em formigas”</i>	
<i>Resumo</i>	70
<i>Introdução</i>	71
<i>Materiais e Métodos</i>	74
<i>Resultados</i>	77
<i>Discussão</i>	79
<i>Referências Bibliográficas</i>	82
<i>Anexos</i>	90

EFEITO DO CAMPO MAGNÉTICO ALTERADO SOBRE O COMPORTAMENTO DE FORMIGAS

Márlon César Pereira & William Fernando Antonialli-Junior

Resumo: Os seres vivos desde seu surgimento no planeta, estão sob influência de vários campos físicos como gravitacionais e geomagnéticos, por conta disto, são sensíveis a eles e podem detecta-los e usa-los para se orientarem. Já foram realizados vários estudos demonstrando que diferentes grupos de organismos são sensíveis ao campo magnético natural (CMN) do planeta e, por conta disto, são influenciados por qualquer tipo de variação de seus parâmetros naturais. De fato, experimentos demonstram que alterando a intensidade e componentes atrelados a direção vertical e/ou horizontal pode afetar o comportamento de diferentes organismos. Neste sentido, o constante aumento de dispositivos elétricos e eletrônicos concomitante ao aumento populacional humano vem colocando cada vez mais animais e outros organismos em contanto com variações dos padrões naturais de CMN. Portanto, é necessário que estudos nesta área investiguem o que isto pode estar modificando como o comportamento natural e a sua própria ocorrência.

Palavras-chave: Formicidae, Geomagnético, Magnetismo, Padrões Comportamentais.

Abstract: Living beings since their emergence on the planet are under the influence of various physical fields such as gravitational and geomagnetic, because of this, are sensitive to them and can detect and use them to orient themselves. Several studies have already been carried out showing that different groups of organisms are sensitive to the natural magnetic field (NMF) of the planet, thus any type of variation on the natural parameters affects them. Indeed, experiments demonstrate that altering the intensity and components related to vertical and/or horizontal direction can affect the behavior of

different organisms. In this sense, the constant increase of electrical and electronic devices along with human population increase is subjecting animals and other organisms to variations in the natural patterns of NMF. Therefore, it is necessary that studies in this area investigate what these variations may be modifying, their natural behavior and occurrence.

Keywords: Behavioral Patterns, Formicidae, Geomagnetic, Magnetism.

COMO OS ORGANISMOS LIDAM E SÃO AFETADOS PELO CAMPO MAGNÉTICO?

Márlon César Pereira & William Fernando Antonialli-Junior.

Introdução

Os seres vivos estão sob influência de vários campos físicos como gravitacionais e geomagnéticos desde o começo de sua existência, por conta disto, são sensíveis a eles e podem detectar campos magnéticos estáticos (sentido) através de estruturas especializadas ou órgãos, ou podem ser afetados por variações temporais desses campos magnéticos (Belova & Acosta-Avalos, 2015).

O campo geomagnético (CGM) é gerado principalmente no interior da Terra, e sofre influência de campos magnéticos gerados na magnetosfera. O CGM pode ser visto como resultado de um dipolo magnético no interior da Terra, porém o CGM não é completamente dipolar, algumas áreas da Terra apresenta uma superfície anômala nos valores do CGM que difere do que é esperado de um dipolo (Skiles, 1985; Belova & Acosta-Avalos, 2015). Em média o CGM apresenta uma amplitude de $50 \mu\text{T}$, e um exemplo de sua anomalia é a “Anomalia Geomagnética do Atlântico Sul”, no Brasil, que apresenta o menor valor de amplitude do CGM do mundo, $22 \mu\text{T}$ (Hartmann & Pacca, 2009).

O CGM pode variar temporalmente de duas formas: 1) ao longo de grandes passagens de tempo (cerca de 100 a 1000 anos), e essa variação é conhecida como variação secular (Skiles, 1985) e 2) rápidas variações, devido a tempestades magnéticas, podendo variar de 0,001 Hz até 10 Hz (Ptitsyna *et al.*, 1998) e, ainda, variações diárias em intervalos de 12 horas em função de irradiações solares (Price, 1969). Portanto grande parte dos seres vivos não sofrem diretamente impacto da variação secular, pois estes

períodos são geralmente maiores que o máximo de expectativa de vida dos mesmos, porém podem ser sensíveis as variações diárias (Belova & Acosta-Avalos, 2015).

As primeiras evidências que seres vivos podem perceber o CGM foram descritas por Salvatore Bellini em 1963 (Bellini, 2009; Frankel, 2009) em bactérias magnetostáticas, uma vez que observaram que estes organismos se alinhavam enquanto se movimentavam ao longo das linhas do CGM e chamaram esta resposta comportamental de magnetotaxia.

As bactérias percebem o CGM, porque biomineralizaram minerais magnéticos, geralmente nanopartículas de magnetita (Fe_3O_4), em organelas conhecidas como magnetossomas (Bazylinski & Frankel, 2004). Esses magnetossomas são organizados em cadeias no citoplasma e conferem à bactéria a capacidade de percepção magnética e permite sua orientação e navegação (Belova & Acosta-Avalos, 2015). Acredita-se que estas bactérias utilizam sua capacidade magnética para chegar aos sedimentos mais profundos, em lugares onde a concentração de oxigênio é ideal para elas (Frankel, 1984).

Bactérias magnetostáticas expostas a campos magnéticos fortes de oscilação maior do que de $105 \mu\text{T}$, 50 ou 60 Hz sofrem inversão da direção da percepção magnética em cerca de 50% da população (Blakemore *et al.*, 1980). As respostas de bactérias ao CGM por meio de nanopartículas magnéticas incentivou a ideia de que os animais devem detectar o CGM usando um mecanismo semelhante (Belova & Acosta-Avalos, 2015).

De fato, em animais, o uso de informação vectorial do CGM em tarefas de orientação e navegação está bem documentado, e esta habilidade é conhecida como magnetocepção (Wiltschko & Wiltschko, 1995), estudada principalmente em aves (Walcott & Green, 1974; Gudmundsson & Sandberg, 2000; Wiltschko & Wiltschko, 2005). Vários experimentos demonstraram também que crustáceos (Tomanova & Vacha, 2016), anfíbios (Phillips, 1986), peixes (Quinn, 1980), répteis (Lohmann, 1991),

mamíferos (Marhold *et al.*, 1997), insetos (Duelli & Duelli-Klein, 1978; Jacklyn & Munro, 2002; Nowinszky & Puskás, 2012; Nowinszky *et al.*, 2015) e os insetos sociais, como abelhas, formigas e vespas, podem usar informações de campo magnético em tarefas de orientação e navegação (Wajnberg *et al.*, 2010; Pereira-Bomfim *et al.*, 2015).

Animais e o Campo Magnético

A variação da intensidade magnética tem sido discutida como um componente de navegação 'mapa' de pombos desde finais do século XIX (Viguer, 1882). Ela pode ser usada da seguinte maneira: no hemisfério norte, os pássaros sabem por experiência que aumenta a intensidade magnética em direção norte. Portanto, quando encontrando-se em um local com intensidade maior do que em “casa”, concluem que eles estão ao norte e, portanto, devem voar para o sul para retornar (Wiltschko & Wiltschko, 2005).

As aves são, provavelmente, o grupo mais estudado quando se trata de orientação e navegação usando CGM (Ritz *et al.*, 2004; Thalau *et al.*, 2005; Wiltschko *et al.*, 2007; Engels *et al.*, 2014; Kavokin *et al.*, 2014). Um dos primeiros estudos feitos com aves migratórias que foram testadas em laboratório foi o de Walcott & Green (1974), com orientação de pintarroxos europeus, *Erithacus rubecula* Linnaeus 1758 em que concluíram que o impulso de migrantes movendo-se na direção que naturalmente migram, é tão forte que o fazem até mesmo na gaiola e em ambiente fechado, indicando que usam algum parâmetro de CGM para se orientarem (Wiltschko & Wiltschko, 1995). Experimentos com outras espécies como pombos correios também mostram resultados semelhantes quanto ao uso do CGM para se orientarem enquanto migram (Wiltschko & Wiltschko, 2005).

De acordo com Wiltschko & Wiltschko (2005) a bússola magnética aviária é utilizada como uma bússola 'inclinação', a qual é baseada na inclinação e graus do CM

em vez de sua polaridade, que é representado pela bússola de polaridade que é guiado por norte e sul magnéticos. Aparentemente, aves só podem perceber o curso axial das linhas de campo para derivar informações direcionais não ambíguas, interpretando a inclinação das linhas de campo no sentido vertical. Isto foi demonstrado quando invertendo componente vertical, aves inverteram seu voo, preferindo agora o sul magnético. Isto significa que a bússola magnética aviária não faz distinção entre magnético 'norte' e 'sul' como indicado pela bússola de polaridade, mas 'Polos', na qual as linhas de campo apontam para baixo e 'Equatorial', onde eles apontam para cima (Wiltschko & Wiltschko, 1972).

Evidências diretas do uso de fatores magnéticos, por animais como fonte de parâmetros para navegação ficaram mais claras quando lagostas *Panulirus argus* Latreille 1804 foram expostas em laboratório a condições magnéticas semelhantes as encontradas em no local em que viviam e acabaram se orientando na mesma direção que se orientariam *in situ* (Boles & Lohmann, 2003). Tomanova & Vacha (2016) analisaram os efeitos da alteração dos valores normais de campo magnético no crustáceo *Gondogeneia antarctica* Chevreux 1906 e concluíram que, de fato, o CM alterado por exemplo por radiofrequências (RF) geradas pelo homem gera uma perturbação na capacidade destes animais se orientarem.

Phillips (1986) demonstrou que machos de tritões vermelho (*Notophthalmus viridescens* Rafinesque 1820) sob condições controladas de laboratório usam um mecanismo de bússola para orientação semelhante àquele encontrado em aves migratórias, no entanto, segue um caminho distinto de magnetorrecepção diferentes das propriedades de resposta ligada aos polos, como as aves.

Alevinos de salmão-vermelho (*Oncorhynchus nerka* Walbaum 1792), apresentam um padrão natural de migração durante o dia ou noite dos rios para os lagos, porém

quando alterado artificialmente, em 90° anti-horário a componente horizontal do campo magnético da terra, os alevinos acompanharam a mudança e seguiram para a direção correspondente a alteração e, concluíram que o CM atua como auxiliar na navegação destes peixes (Quinn 1980).

As tartarugas marinhas também possuem uma bússola de inclinação como pássaros (Lohmann & Lohmann, 1992; Light *et al.*, 1993), e o salmão (Quinn & Brannon, 1982) e roedores (Marhold *et al.*, 1997). Salamandras parecem ter os dois tipos (Phillips, 1986)

Insetos e o Campo Magnético

A borboleta monarca, espécie migratória é capaz de se orientar com precisão sob céu nublado, sugerindo que também pode fazer uso de uma bússola magnética natural (Schmidt-Koenig, 1979). Chae (2008) testou a capacidade de resposta de detecção do CM na mariposa, *Spodoptera litura* (Fabricius 1775) e concluíram que as larvas desta espécie são sensíveis a mudanças no CM demonstrando mais movimentação durante a incidência do CM alterado. Vácha *et al.* (2009) realizaram um estudo com baratas induzindo mudanças periódicas na inclinação do CM e perceberam que elas são atraídas pelo norte magnético.

Em insetos sociais os primeiros estudos mais bem documentados sobre a interação destes insetos com o CGM foram realizados com abelhas por Lindauer & Martin (1972), no qual observaram que na ausência de pistas visuais e tácteis, abelhas constroem novos favos na mesma direção central da colmeia. De Jong (1982) foi capaz de controlar a direção na qual o favo dessas abelhas seria construído com um campo magnético artificial e o erro médio de 30° quando alterado o CM sugere sensibilidade das abelhas a variações do CM, além disso, sabe-se que as abelhas são capazes de associarem a presença de

comida ao CM e até mesmo serem treinadas para esta tarefa (Walker & Bitterman, 1985; Collett & Baron, 1994; Frier *et al.*, 1996).

Esquivel *et al.* (2008) concluíram que em colônias de abelhas sem ferrão *Tetragonisca angustula* Latreille 1811 não só podem perceber o campo magnético, como também tem a capacidade distinguir hemisférios norte e sul. Pereira-Bomfim *et al.* (2015), avaliou a sensibilidade da vespa social *Polybia paulista* Von Ihering 1896 a variação do CGM e concluíram que a variação de intensidade de CM pode afetar o comportamento de forrageio e de tarefas dentro do seu ninho.

As formigas, em especial por terem hábitos noturnos e subterrâneos em ambientes fechados com pistas celestes obstruídas podem ser excelentes modelos animais para estudos de orientação magnética (Wajnberg *et al.*, 2010). Estes insetos são adequados para se investigar este tema, porque podem ser treinados para forragearem em locais dos quais elas facilmente retornam ao ninho (Wajnberg *et al.*, 2010). Comportamentos orientados para um determinado objetivo facilitam as previsões de orientação durante tratamentos experimentais. De fato, dependendo do seu habitat, as formigas podem utilizar marcos, feromônios, vibrações, gravidade, bússola de sol e luz polarizada para se orientarem e, estes sinais devem ser cuidadosamente encobertos para investigar o uso exclusivo de uma orientação magnética (Wajnberg *et al.*, 2010).

Um dos primeiros experimentos comportamentais realizados sobre a capacidade de formigas se orientarem por meio de CGM foi desenvolvido com *Myrmica ruginodis* Nylander 1846 por Vowles (1954).

O uso de uma bússola magnética pelas formigas vem sendo avaliado por autores como, Jander & Jander (1998), Acosta-Avalos *et al.* (1999), Wajnberg *et al.* (2000), Acosta-Avalos *et al.* (2001), Çamlitepe *et al.* (2005), Riveros & Srygley (2008) e Acosta-Avalos *et al.* (2015), realizaram experimentos que provam que formigas de fato usam ou

podem usar parâmetros magnéticos para se orientarem quando forrageiam, neste sentido, estes experimentos avaliaram que a manipulação da intensidade ou direção do CM pode afetar o comportamento e a capacidade de orientação das formigas.

Conclusão

A literatura mostra que apesar do CGM ser um parâmetro importante para a orientação e navegação na grande maioria dos organismos até aqui estudados geralmente é menosprezado, em comparação a outros fatores abióticos. Por outro lado o constante aumento de dispositivos elétrico e eletrônicos concomitante ao aumento populacional humano vem colocando cada vez mais organismos em contato com variações dos padrões naturais de CM. Portanto, é necessário que estudos nesta área investiguem o que de fato, isto pode estar acarretando em seu comportamento natural e a sua própria ocorrência.

Referências bibliográficas

- Acosta-Avalos D, Esquivel DMS, Wajnberg E, Lins de Barros HGP, Oliveira PS, Leal I (2001) Seasonal patterns in the orientation system of the migratory ant *Pachycondyla marginata*. *Naturwissenschaften* 88, 343–346. (DOI:10.1007/s001140100245)
- Acosta-Avalos D, Pinho AT, Barbosa JS, Belova N (2015) Alternating magnetic fields of 60 Hz affect magnetic orientation and magnetosensitivity of fire ants. *Journal of Insect Behavior* 28, 664–673. (DOI 10.1007/s10905-015-9534-0).
- Acosta-Avalos D, Wajnberg E, Oliveira PS, Leal I, Farina M, Esquivel DMS (1999) Isolation of magnetic nanoparticles from *Pachycondyla marginata* ants. *Journal of Experimental Biology* 202, 2687–2692.

- Bazyliński DA, Frankel RB (2004) Magnetosome formation in prokaryotes. *Nature Reviews Microbiology*, 2 (3), 217–230.
- Bellini, S (2009) On a unique behavior of freshwater bacteria. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 27 (1), 3–5.
- Belova NA, Acosta-Avalos D (2015) The effect of extremely low frequency alternating magnetic field on the behavior of animals in the presence of the geomagnetic field. *Journal of Biophysics*, vol. 2015, Article ID 423838, 8 pages. (DOI:10.1155/2015/423838).
- Blakemore RP, Frankel RB, Kalmijn AJ (1980) South-seeking magnetotactic bacteria in the southern hemisphere. *Nature*, 286 (5771), 384–385.
- Boles LC, Lohmann KJ (2003) True navigation and magnetic map in spiny lobsters. *Nature*, 421, 60–63.
- Çamlitepe Y, Aksoy V, Neslihan U, Ayse Y, Becenen I (2005) An experimental analysis on the magnetic field sensitivity of the black-meadow ant *Formica pratensis* Retzius (Hymenoptera: Formicidae). *Acta Biologica Hungarica*, 56, 215–224. (DOI:10.1556/ABiol.56.2005.3-4.5).
- Chae K (2008) An extremely low frequency magnetic field increases unconditioned larval movement of the common cutworm, *Spodoptera litura*: a novel model for a magnetoreceptive neurobehavioral study. *Entomological Research*, 38, 299–302.
- Collett TS, Baron J (1994) Biological compasses and the coordinate frame of landmark memories in honeybees. *Nature*, 368, 137–140. (DOI:10.1038 /368137a0).
- De Jong D (1982) The orientation of comb-building by honeybees. *Journal of Comparative Physiology A*, 147, 495-501.

- Duelli P, Duelli-Klein R (1978) Die magnetische Nestausrichtung der australischen Kompaßtermiten *Amitermes meridionalis*. Mitteilungen der Schweizerischen Entomologischen Gesellschaft, 51, 337–342.
- Engels S, Schneider NL, Lefeldt N, *et al.* (2014) Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird. *Nature*, 509 (7500), 353–356.
- Esquivel DMS, Acosta-Avalos D, Sabagh LT, Correia AAC, Barbosa MA, Wajnberg E (2008) Nest-exiting flight angles of stingless bee *Tetragonisca angustula*: magnetic field effects. In RIN 08: Orientation and navigation: birds, humans and other animals. London, UK: Royal Institute of Navigation.
- Frankel RB (1984) Magnetic guidance of organisms. *Annual Review of Biophysics and Bioengineering*, 13, 85–103.
- Frankel RB (2009) The discovery of magnetotactic/magnetosensitive bacteria. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 27 (1), 1–2.
- Frier HJ, Edwards E, Smith C, Neale S, Collet TS (1996) Magnetic compass cues and visual pattern learning in honeybees. *Journal of Experimental Biology*, 199, 1353–1361.
- Gundmundsson GA, Sandberg R (2000) Sanderlings (*Calidris alba*) have a magnetic compass: orientation experiments during spring migration in Iceland. *Journal of Experimental Biology*, 203, 3137–3144.
- Hartmann GA, Pacca IG (2009) Time evolution of the South Atlantic Magnetic Anomaly. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 81 (2), 243–255.
- Jacklyn PM, Munro U (2002) Evidence for the use of magnetic cues in mound construction by the termite *Amitermes meridionalis* (Isoptera, Termitinae). *Australian Journal of Zoology*, 50, 357–368.
- Jander R, Jander U (1998) The light and the magnetic compass of the weaver ant, *Oecophylla smaragdina* (Hymenoptera: Formicidae). *Ethology* 104, 743–758.

Kavokin K, Chernetsov N, Pakhomov A, Bojarinova J, Kobylkov D, Namozov B (2014) Magnetic orientation of garden warblers (*Sylvia borin*) under 1.4 MHz radiofrequency magnetic field. *Journal of the Royal Society Interface*, 11, 20140451. (DOI: 10.1098/rsif.2014.0451).

Light P, Salmon M, Lohmann KJ (1993) Geomagnetic orientation of loggerhead sea turtles: evidence for an inclination compass. *Journal of Experimental Biology*, 182, 1–10.

Lindauer M, Martin H (1972) Magnetic effects on dancing bees. In: *Animal Orientation and Navigation*, (Ed.) Galler SR, *et al.* Washington DC: USGPO.

Lohmann KJ (1991) Magnetic orientation by hatchling loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*). *Journal of Experimental Biology*, 155, 37–49.

Lohmann KJ, Lohmann CMF (1992) Orientation to oceanic waves by green turtle hatchlings. *Journal of Experimental Biology*, 171, 1–13.

Marhold S, Burda H, Wiltschko W (1997) A magnetic polarity compass for direction finding in a subterranean mammal. *Naturwissenschaften*, 84, 421–423.

Nowinszky L, Puskás J (2012) Light trapping of Turnip Moth (*Agrotis segetum* Den. et Schiff.) connected with vertical component of geomagnetic field intensity. *E-Acta Naturalia Pannonica*, 3, 107–111.

Nowinszky L, Puskás J, Kiss O (2015) Light-trap catch of the fluvial Trichoptera species in connection with the geomagnetic h-index. *Journal of Biology and Nature*, 4(4), 206–216.

Pereira-Bomfim MGC, Antonialli-Junior WF, Acosta-Avalos D (2015) Effect of magnetic field on the foraging rhythm and behavior of the swarm-founding paper wasp *Polybia paulista* Ihering (Hymenoptera: Vespidae). *Sociobiology* 62(1), 99–104. (DOI: 10.13102/sociobiology.v62i1.99-104).

- Phillips JB (1986) Two magnetoreception pathways in a migratory salamander. *Science*, 233, 765–767.
- Price AT (1969) Daily variations of the geomagnetic field. *Space Science Reviews*, 9 (2), 151–197.
- Ptitsyna NG, Villosesi G, Dorman LI, Iucci N, Tyasto MI (1998) Natural and man-made low-frequency magnetic fields as a potential health hazard. *Physics Uspekhi*, 41 (7), 687–709.
- Quinn TP (1980) Evidence for celestial and magnetic compass orientation in lake migrating sockeye salmon fry. *Journal of Comparative Physiology A*, 137, 243–248.
- Quinn TP, Brannon EL (1982) The use of celestial and magnetic cues by orienting sockeye salmon smolts. *Journal of Comparative Physiology A*, 147, 547–552.
- Ritz T, Thalau P, Phillips JB, Wiltschko R, Wiltschko W (2004) Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass. *Nature*, 429, 177–180.
- Riveros AJ, Srygley RB (2008) Do leafcutter ants, *Atta colombica*, orient their path-integrated home vector with a magnetic compass? *Animal Behavior*, 75, 1273–1281.
- Schmidt-Koeig K (1979) Directions of migrating monarch butterflies in some parts of the eastern United States. *Behavioral Processes*, 4, 73-78.
- Skiles DD (1985) The geomagnetic field: its nature, history, and biological relevance. In *magnetite Biomineralization and Magnetoreception in Organisms. A New Biomagnetism*, (Eds.) Kirschvink JL, Jones DS, MacFadden BJ. Plenum Press, New York, NY, USA.
- Thalau P, Ritz T, Stapput K, Wiltschko R, Wiltschko W (2005) Magnetic compass orientation of migratory birds in the presence of a 1.315 MHz oscillating field. *Naturwissenschaften*, 92, 86–90.

- Tomanova K, Vacha M (2016) The magnetic orientation of the Antarctic amphipod *Gondogeneia antarctica* is cancelled by very weak radiofrequency fields. *Journal of Experimental Biology* 219, 1717-1724. (DOI:10.1242/jeb.132878).
- Vacha M, Puzova T, Kvicalova M (2009) Radio frequency magnetic fields disrupt magnetoreception in American cockroach. *Journal of Experimental Biology*, 212, 3473-3477.
- Viguiet C (1882) Le sens de l'orientation et ses organes chez les animaux et chez l'homme. *Revue Philosophique de la France et de l'Étranger*, 14, 1–36.
- Vowles DM (1954) The orientation of ants. II. Orientation to light, gravity and polarized light. *Journal of Experimental Biology*, 31, 356–375.
- Wajnberg E, Acosta-Avalos D, Alves OC, de Oliveira JF, Srygley RB, Esquivel DMS (2010) Magnetoreception in eusocial insects: an update. *Journal of the Royal Society Interface*, 7 (2), S207–S225.
- Wajnberg E, Acosta-Avalos D, El-Jaick LJ, Abraçado L, Coelho JLA, Bazukis AF, Morais PC, Esquivel DMS (2000) Electron paramagnetic resonance study of the migratory ant *Pachycondyla marginata* abdomens. *Biophysical Journal*, 78, 1018–1023. (DOI:10.1016/S0006-3495(00)76660-4).
- Walcott C, Green RP (1974) Orientation of homing pigeons altered by a change in the direction of an applied magnet field. *Science*, 184, 180–182.
- Walker MM, Bitterman ME (1985) Conditioned responding to magnetic-field by honeybees. *Journal of Comparative Physiology A*, 157, 67–71. (DOI:10.1007/BF00611096).
- Wiltschko R, Stapput K, Ritz T, Thalau P, Wiltschko W (2007) Magnetoreception in birds: different physical processes for two types of directional responses. *HFSP Journal*, 1, 41–48.

Wiltschko R, Wiltschko W (1995) *Magnetic Orientation in Animals*. Springer, Berlin, Germany.

Wiltschko W, Wiltschko R (1972) Magnetic compass of European Robins. *Science*, 176, 62–64.

Wiltschko W, Wiltschko R (2005) Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals. *Journal of Comparative Physiology A*, 191, 675–693. (DOI:10.1007/s00359-005-0627-7).

CAPÍTULO I: CAMPOS MAGNÉTICOS ALTERADOS PODEM AFETAR O COMPORTAMENTO DE FORRAGEIO DE FORMIGAS?

PEREIRA, M.C.^{1,2}, ACOSTA-AVALOS, D³. & ANTONIALLI-JR., W.F.^{1,2}

¹*Programa de Pós-graduação em Entomologia e Conservação da Biodiversidade, Universidade Federal da Grande Dourados, 79804-970 Dourados-MS, Brazil, marloncesarp@yahoo.com.br, +55 67 9253-0283.*

²*Laboratório de Ecologia Comportamental, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul.*

³*Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF, Rio de Janeiro-RJ, Brazil.*

Resumo. Com a nova frente de evolução da tecnologia cada vez mais novos aparelhos elétricos são criados e comercializados em larga escala no mundo, além disso a expansão da eletricidade, em áreas rurais, tem aumentado a quantidade de torres de energia e de fiação elétrica em áreas de campo e áreas próximas a matas fazendo com que haja irradiação eletromagnética por toda parte e em várias frequências. Formigas exibem uma grande diversidade de habitats e preferências alimentares com isso pesquisadores provaram que elas podem sentir e o campo magnético gerado por equipamentos eletrônicos podem modificar seus comportamentos. Neste sentido o objetivo deste estudo foi investigar como o campo magnético modifica o comportamento de forrageamento de tres especies de formigas, uma delas que apresenta o comportamento de marcação química de trilhas e duas outras que não apresentam este comportamento. Nós avaliamos as operárias que forragearam no experimento em busca de recursos, testes foram feitos com e sem a presença do campo magnético induzido. Os resultados demonstram que o campo magnético afeta o comportamento de operárias de *Ectatomma brunneum* e *Neoponera inversa*, porém em *Pheidole* sp. o comportamento e o fluxo de forrageio foi modificado drasticamente quando elas estavam sob a influência do campo magnético alterado.

Palavras-chave: Ecologia comportamental, *Ectatomma*, magnetismo, *Neoponera*, *Pheidole*.

INTRODUÇÃO

O campo geomagnético é um componente abiótico, com o qual os seres vivos interagem permanentemente e tem estado presente desde o surgimento da vida no planeta Terra (Jardine, 2010).

Muitos animais são sensíveis aos campos magnéticos e utilizam órgãos eletrorreceptores para captar sinais de orientação do campo geomagnético (Kalmijn, 1988). Os animais podem usar a direção do campo geomagnético como uma bússola e a sua intensidade como um componente navegacional. A detecção do campo geomagnético pode estar baseada em reações químicas sensíveis a ele e dependentes de luz, ocorrendo em fotopigmentos especializados ou também por meio de processos físicos envolvendo pequenos cristais de magnetita (Winklhofer, 2010). Os animais usam um desses sistemas, ou ambos simultaneamente, dependendo da espécie (Kirschvink *et al.*, 2001; Johnsen & Lohmann, 2005; Wiltschko *et al.*, 2007; Hsu *et al.*, 2007; Ritz *et al.*, 2009; Wajnberg *et al.*, 2010).

Vários experimentos demonstraram que crustáceos (Tomanova & Vacha, 2016), anfíbios (Phillips, 1986), peixes (Quinn, 1980), répteis (Lohmann, 1991), aves (Walcott & Green, 1974; Gudmundsson & Sandberg, 2000), mamíferos (Marhold *et al.*, 1997), insetos (Duelli & Duelli-Klein 1978; Jacklyn & Munro, 2002; Nowinszky & Puskás 2012, Nowinszky *et al.*, 2015) e os insetos sociais, como abelhas, formigas e vespas, podem usar informações de campo magnético em tarefas de orientação e navegação (Wajnberg *et al.*, 2010; Clarke *et al.*, 2013; Pereira-Bomfim *et al.*, 2015).

O modo eficiente de orientação que os insetos eussociais apresentam faz com que eles sejam um grupo particularmente interessante para estudos sobre orientação magnética, sobretudo, devido ao grande número de indivíduos em suas colônias, o que permite realizar muitas sessões de observações em um curto período de tempo (Wajnberg *et al.*, 2010).

A organização de suas colônias depende de um considerável grau de complexidade das tarefas, com a comunicação e o forrageamento sendo realizados por meio de habilidades sensoriais diferentes com base nos aspectos: visual, acústico, tátil, informação magnética e/ou química (Billen, 2006).

As formigas, em particular, são insetos sociais que representam uma ramificação evolutiva que surgiu há 50 milhões de anos atrás (Hölldobler & Wilson, 1990), sendo o primeiro grupo predador social que explorou o solo e a vegetação (Hölldobler & Wilson, 1990).

A busca de recursos nas colônias destes insetos pode variar, sendo que algumas espécies podem apresentar comportamento de forrageio solitário, no qual a operária busca recursos sozinha sem colaboração de suas companheiras de ninho, sendo este padrão encontrado em espécies menos derivadas. Por outro lado, algumas espécies mais derivadas apresentam um comportamento de forrageio em grupo por meio da marcação feromonal de trilha, no qual a primeira operária que localiza o recurso volta ao ninho marcando sua passagem para que as próximas sigam e encontrem o recurso (Hölldobler & Wilson 1990, Tranielo & Robson, 1995).

Muitas espécies de formigas produzem grandes padrões ramificados de trilhas ao redor de seus ninhos (Perna *et al.*, 2012). Esses padrões, que medem a exploração do espaço e a coordenação das atividades de forrageamento em toda a colônia, estão entre os mais importantes exemplos de redes de transporte construídos por animais (Franks *et*

al., 1991; Hölldobler & Wilson, 1990) e canalizam os movimentos diários de centenas ou milhares de formigas. Modelos (Solè *et al.*, 2000; Berthouze & Lorenzi, 2008) e observações empíricas (Acosta *et al.*, 1993; Buhl *et al.*, 2009; Latty *et al.*, 2011; Reid *et al.*, 2011) têm mostrado que as redes de trilha de formiga fornecem soluções eficientes para transportar e procurar alimento.

Uma eficiente e rápida exploração de recursos é essencial para a manutenção de uma colônia de formigas em um ambiente em modificação e com uma alta variedade de presas. As colônias respondem com uma alta alocação adaptativa das forrageadoras para ajustar a disponibilidade de recursos variáveis. Particularmente em grandes colônias como nas espécies de formigas de correição (Gottwald, 1995) e formigas cortadeiras (Wirth *et al.*, 1997), o número de forrageadoras pode facilmente exceder milhares de indivíduos quando os recursos estão em grande disponibilidade. A distribuição espacial destes grandes números de forrageiras pode ser particularmente desafiador para as espécies de formiga que forrageiam ao longo de sistemas permanentes de trilha que são limpos e mantidos pelas formigas. Essas trilhas foram descritas para Myrmicinae, Dolichoderinae e Formicinae (Hölldobler & Wilson 1990).

Baseado na premissa que o campo geomagnético alterado pode afetar o comportamento e o forrageamento de formigas a hipótese deste estudo é a de que os campos magnéticos podem alterar os padrões de busca de recurso e recrutamento de formigas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para testar o efeito do campo magnético alterado sobre a atividade de forrageio em formigas foram utilizadas uma Fonte de Alimentação Digital Simétrica SKFA-05D[®] ligada a Bobinas de Helmholtz como descrito por Pereira-Bomfim *et al.* (2015), construídas em 2 tubos de pvc de 300 mm, cada um com 4 cm de espessura; nestes foram enroladas 58 voltas de fios de cobre 14 AWG, capazes de gerar um campo magnético de 60 μ T (Fig. 1) e um par de ímãs de neodímio N35 disco de 25x5 mm (Fig. 2).

O efeito do campo magnético de 60 μ T sobre o comportamento de forrageio foi testado em duas espécies de forrageio solitário, *Ectatomma brunneum* Smith 1848 e *Neoponera inversa* Smith 1848 e, outra com recrutamento massal, *Pheidole* sp. Os experimentos foram realizados em condições de campo e laboratoriais.

Experimentos em campo

Foram selecionadas 10 colônias de *Pheidole* sp., nidificadas nos arredores do campus da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Dourados/MS 22° 11'55.44" S, 54°55'48.88" O.

Há uma 5 cm de distância do orifício de entrada do ninho, foi montada uma prancha de folha de etil vinil acetato (E.V.A) de 50 x 25 cm, totalmente coberta com uma folha de papel milimetrado, sempre no sentido norte (N). No ponto mais distante do orifício de entrada e saída do ninho foi oferecida 25 g de isca atrativa de mel e 25 g de sardinha.

Para avaliar o efeito do campo magnético sobre o comportamento de forrageio da espécie a isca foi alocada entre as duas bobinas de Helmholtz, ficando a 7,5 cm de cada uma das bobinas, em uma orientação perpendicular ao campo geomagnético (Fig. 1). A

intensidade do campo gerado foi de 60 μ T igual ao utilizado para avaliar os efeitos de campo magnético sobre comportamento de forrageio em vespas sociais (Pereira-Bomfim *et al.* 2015). O campo geomagnético local apresentava intensidade de 10 μ T. O campo magnético gerado entre as iscas foi mantido durante 1 hora e durante este tempo foram avaliados os seguintes parâmetros: 1) trajetória de ida da primeira operária (DI1), 2) tempo que a primeira formiga levou para chegar ao recurso (BR1), 3) tempo que permanecia no recurso (TR1), 4) trajetória de volta ao ninho da primeira operária (DV1), 5) tempo de retorno até o ninho (TV1), 6) velocidade de ida (VIP1), 7) velocidade de retorno até o ninho (VVP1), 8) trajetória da primeira operária a ser recrutada a seguir a trilha química (DI2), 9) tempo que esta operária levou para chegar ao recurso (BR2), 10) tempo que permanecia no recurso (TR2), (11) trajetória de volta (DV2), 12) tempo de retorno até o ninho (TV2), 13) velocidade de ida (VIP2) e 14) velocidade de volta (VVP2).

A cada 5 segundos, durante o deslocamento de cada formiga no papel milimetrado, era fixado um alfinete para delinear sua trajetória.

Além disto, a cada minuto era anotado quantas operárias chegavam até o recurso e retornava ao ninho para estabelecer o fluxo de forrageio por hora (FF). Os parâmetros de tempo foram medidos em segundos e os de velocidade foram medidos em cm/s. Utilizamos a mesma metodologia porém com a fonte de energia desligada para estabelecermos um padrão de controle do experimento.

O mesmo experimento foi repetido seguindo os mesmos padrões com o aparato dos ímãs de neodímio.

Em laboratório

Foram avaliados o comportamento de forrageio e tomada de decisão de forrageadoras de 6 colônias de *Neoponera inversa* coletadas no Centro de Pesquisa da Lavoura Cacaueira em Ilhéus/BA (14°45'40.36"S, 39°13'41.02" O), nidificadas em área de lavoura de cacau e de 4 colônias de *Ectatomma brunneum* coletadas nos arredores do campus da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul/Dourados/MS. Após coleta, as colônias foram alocadas em ninhos artificiais no Laboratório de Ecologia Comportamental na Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul/UEMS e mantidas a temperaturas constantes de $22^{\circ} \pm 2^{\circ}$ C com regime de luz 12:12 claro/escuro, alimentadas com larvas do coleóptero *Tenebrio molitor* Linnaeus 1758, melão e água *ad libitum*. Após período de habituação de 2 semanas, foram realizados os experimentos.

Cada ninho artificial foi acoplado a um tubo com formato de Y de 2,5 cm de diâmetro por 65 cm de comprimento (Fig. 3), no qual em cada extremidade foram conectadas placas Gerbox® de 250 ml. Assim foram disponibilizadas às forrageadoras duas opções de trajetória, nas quais, em suas extremidades foi oferecida uma mistura de dois tipos de isca atrativa, sendo 50 g de mel e 50 g de sardinha (Fig. 3).

Logo após a instalação das iscas era permitido por meio da abertura de um anteparo, que duas operárias por vez, acessassem o tubo. Logo após a entrada das operárias no tubo foram avaliados os seguintes parâmetros 1) qual das extremidades a formiga optou, 2) tempo de chegada até esta extremidade (TE), 3) velocidade média de deslocamento dentro dos tubos na ida até o recurso (VI), no retorno ao ninho (VV) e 4) todo o comportamento das forrageadoras ao se deslocar pelo tubo, pelo método *ad libitum* (Altman, 1974). Foram avaliadas a tomada de decisão de um total de 10 operárias de cada colônia.

Para avaliar o efeito do campo magnético sobre estes parâmetros foi instalado em uma das extremidades um par de bobinas de Helmholtz, com cada bobina a 7,5 cm do

recurso oferecido, gerando um campo magnético de 60 μ T (Fig. 1), estas bobinas ficavam a 1 metro da fonte de alimentação para assegurar que a fonte não interferisse no experimento.

Como controle o experimento foi realizado com as bobinas posicionadas no mesmo local, mas desligadas, assim foi possível definir se somente a presença das bobinas podia alterar o comportamento e a tomada de decisão das formigas.

O mesmo experimento foi repetido seguindo os mesmos padrões com o aparato dos ímãs de neodímio.

Análises estatísticas

Para avaliar o efeito do campo alterado na atividade de *Pheidole* sp. em campo, todas as médias dos parâmetros avaliados, com e sem as bobinas ligadas e com e sem os ímãs, foram comparados por um teste T. Com o auxílio do OVS Program foram analisadas as trajetórias obtidas seguindo metodologia de forrageio de acordo com Cammaerts et. al. (2012). Este programa fornece distância, tempo, orientação, velocidade e sinuosidade como parâmetros para a trajetória.

Para avaliar o efeito do campo alterado no comportamento e tomada de decisão das forrageadoras em condição laboratorial, realizamos um teste de qui quadrado, utilizando como variáveis o caminho escolhido pelas formigas (com ou sem campo magnético). Foi realizado um teste T para comparar a velocidade média de deslocamento de cada formiga e qual trajetória adotava, a da isca que estava entre as bobinas ligadas e aquela que não comparamos entre as que escolhiam o lado com o campo magnético induzido e as que optavam pelo outro lado.

RESULTADOS

Por inspeção visual das trajetórias das operárias de *Pheidole* sp. é possível perceber que há uma alteração perceptível entre a condição com e sem alteração dos valores do CM (Fig. 4 e 5).

De fato, foram encontradas diferenças significativas entre todos os valores médios de todos os parâmetros avaliados, com exceção de apenas um, a velocidade de ida ao recurso da primeira operária (Tab. 1)

Foi encontrada diferença significativa de tomada de decisão entre as escolhas feitas pelas operárias de *N. inversa* ($\chi^2 = 53,9$ $p < 0,005$) e *E. brunneum* ($\chi^2 = 34,8$ $p < 0,05$) entre a condição com e sem o CM alterado. Houve um número significativamente maior na escolha pela trajetória que dava acesso às iscas que não estavam entre as bobinas ligadas. Não foi encontrada diferença significativa entre a tomada de decisão de qual isca explorar, quando as bobinas estavam desligadas.

Há diferenças significativas entre as velocidades médias de deslocamento das formigas dentro dos tubos e tempo médio de chegada a isca entre as condições, com e sem o CM alterado (Figs. 6 e 7).

Enquanto as formigas das duas espécies se deslocavam dentro dos tubos quando as bobinas estavam ligadas foram observadas realizando limpeza do corpo, boxe antenal e tentativa de apreensão, elevação do corpo e abertura de mandíbula (Tab. 2). Em 75% dos casos, as operárias de *N. inversa* e 85% de *E. brunneum* paravam e ficavam completamente imóveis dentro do tubo quando optavam pelo braço do Y com a isca que estava sob CM alterado durante um tempo médio de $15,71s \pm 4,07s$ e $20,25s \pm 8,48s$ respectivamente.

DISCUSSÃO

A partir de nossos resultados é possível inferir que o CM alterado interfere no comportamento de forrageio e tomada de decisão das operárias de formigas, tanto daquelas que apresentam recrutamento massal, como aquelas que forrageiam de forma individual.

Os resultados do OVS mostram que o CM alterado afeta a decisão da primeira operária, mas não afeta daquela segunda que foi recrutada, o que significa que os estímulos químicos são mais fortes do que os magnéticos.

Especificamente, quanto aos efeitos do CM alterado sobre o forrageio de *Pheidole* sp, ele alterou significativamente a trajetória, velocidade média de deslocamento, tempo de detecção das iscas e fluxo de formigas, o que sugere que as formigas além de perceberem estes estímulos, sofrem algum grau de perturbação. Anderson & Vander Meer (1993) observaram que CM alterado pode afetar a formação de trilhas na busca de alimentos e retorno para as colônias de *Solenopsis invicta* Buren 1972. Contudo, Rosengren & Fortelius (1986) concluíram que colônias de *Formica rufa* Linnaeus 1761 não sofrem efeitos da alteração de CM e, inferem que sua capacidade de orientação é baseada em enfaticamente em sinais visuais e olfativos em detrimento aos magnéticos.

A alteração significativa dos valores dos parâmetros avaliados sobretudo, os tempos de detecção e exploração das iscas, bem como o tempo de retorno ao ninho e, portanto, da trajetória (Tab. 1), sugere que os efeitos do CM alterado somente são sentidos pela formiga quando estão próximas às bobinas e persiste pelo menos até que retornem ao ninho. O fato de que permanecem significativamente menos tempo nas iscas quando as bobinas estão ligadas (Tab. 1), reforça o fato de que o CM alterado deve gerar algum tipo de perturbação, como já documentado por Kermarrec (1981) que avaliou os efeitos

do campo magnético na espécie *Acromyrmex octospinosus* Forel 1899 e observou que o CM alterado gera mudanças na alocação dos imaturos e das operárias dentro das colônias.

Outro fato importante que também sugere que as formigas sofrem algum tipo de perturbação e/ou desorientação, é que, além da alteração da trajetória e do tempo de busca e retorno, quando se aproximam das iscas na área entre as bobinas ativadas, param e ficam completamente imóveis por cerca de vinte segundos. A queda no fluxo de formigas (Tab. 1) comprova que o CM alterado deve gerar algum tipo de perturbação nas formigas que por vezes além de ficarem imóveis deixam de seguir os sinais químicos depositados nas trilhas (Fig. 4).

Alguma provável perturbação também é percebida quando as formigas durante o os testes de decisão optam na maioria das vezes pela extremidade do Y com a isca sem o CM alterado (Tab. 1). Um fato interessante é que a velocidade e o tempo que as formigas levavam até chegar ao recurso tanto para o controle quanto para o tratamento não apresentou diferença significativa, mostrando que elas buscam recursos aleatoriamente, porém quando percebem uma perturbação mudam sua trajetória, e procuram voltar ao ninho ou buscar outra via para forragear.

A velocidade de chegada até o recurso não é significativamente diferente, independentemente da bobina está ligada ou não, porém tanto o tempo, quanto a velocidade de retorno ao ninho são significativamente diferentes quando retorna ao ninho, quando as bobinas estão ligadas. Parece então que ao perceberem os valores alterados de CM tendem a retornar o mais rápido possível, sugerindo mais uma vez que podem estar sofrendo algum tipo de perturbação, uma vez que, quando isto acontece, também executam comportamentos atípicos ao exibido em seu repertório normal de forrageio (Pie, 2002; Miguel & Del Claro, 2005).

O efeito do campo magnético afetando a execução de comportamentos reconhecidos como parte do repertório da espécie já foi documentado por Çamlitepe *et al.* (2005) em *Formica pratensis* Retzius 1783, que observaram uma mudança no padrão de orientação quando as formigas foram estimuladas por aparatos magnéticos.

A mudança comportamental pode de fato, estar relacionada à perturbação, uma vez que, quando elas se sentem ameaçadas tendem a ser mais agressivas. Interessante o fato de que ao perceberem a alteração do CM, ficam menos tolerantes com as próprias companheiras de ninho. Estudos sobre interação intraespecífica sugerem que as formigas raramente fazem isto (Beye *et al.*, 1998; Knaden & Wehner, 2003).

O tempo de busca por recurso apresentou diferenças significativas quando comparadas ao controle (Fig. 6) e experimento (Fig. 7); a este fato acreditamos que o tempo que a formiga ficou parada analisando a mudança do CM foi importante para dar essa variação nas médias, assim o CM atrasou a busca por recursos das formigas, sendo assim um obstáculo a mais na busca por recursos e manutenção das colônias.

Em nenhum dos experimentos realizados com os ímãs de neodímio obtivemos resultados sobre os parâmetros para busca de recurso ou para tomada de decisão, muito disso se deve ao fato dos ímãs de terra rara apresentarem um CM muito elevado em relação ao campo geomagnético e mesmo ao gerado pelas bobinas, podendo ser até 16000 vezes maior o campo gerado por eles do que os campos gerados pelas bobinas, fato este que provavelmente provocou uma repulsão nas formigas, não permitindo que elas chegassem próximas ao recurso oferecido nos experimentos.

O fato de nossos resultados mostrarem que um CM alterado pode influenciar no comportamento de colônias de formigas, provavelmente gerando perturbação a ponto de modificar o padrão normal de forrageio e/ou tomada de decisão pode a médio prazo gerar problemas sérios a manutenção e mesmo ocorrência de colônias em determinados locais,

sobretudo, porque há um aumento da tecnologia na forma de fios elétricos, torres de energia e de celular que podem gerar alteração normal dos valores do campo magnético natural (Balmori, 2015), outro ponto importante é que esses resultados oferecem elementos a serem utilizados em estratégias de manejo de população de formigas assim como auxiliar processos de controle quando atingem nível de dano econômico. Portanto, a hipótese assumida neste estudo, de que o CM alterado pode modificar os padrões comportamentais das formigas testadas, foi confirmada e, como há raros estudos sobre os efeitos de CM alterado sobre o comportamento de animais, sobretudo sociais, faz se necessários novos estudos que esclareça seus impactos sobre suas colônias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta FJ, López F, Serrano JM (1993) Branching angles of ant trunk trails as an optimization cue. *Journal of Theoretical Biology*, 160, 297–310.
- Altman J (1974) Observational study of behaviour: sampling methods. *Behaviour*, 49, 227-267.
- Anderson JB Vander Meer RK (1993) Magnetic orientation in the fire ant, *Solenopsis invicta*. *Naturwissenschaften*, 80, 568-570.
- Balmori A (2015) Anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields as an emerging threat to wildlife orientation. *Science of the Total Environment*, 518–519, 58–60.
- Berthouze L, Lorenzi A (2008) Bifurcation angles in ant foraging networks: A trade-off between exploration and exploitation? *Journal of Theoretical Biology*, 12, 113–122.
- Beye M, Neumann P, Chapuisat M, Pamilo P, Moritz RFA (1998) Nestmate recognition and the genetic relatedness of nests in the ant *Formica pratensis*. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 43, 67-72.
- Billen J (2006) Signal variety and communication in social insects. *Proceedings of the Netherlands Entomological Society Meetings*, 17, 9-25.
- Buhl J, Hicks K, Miller E, Persey S, Alinvi O, Sumpter, DJT (2009) Shape and efficiency of wood ant foraging networks. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 63, 451–460.
- Çamlitepe Y, Aksoy V, Neslihan U, Ayse Y, Becenen I (2005) An experimental analysis on the magnetic field sensitivity of the black-meadow ant *Formica pratensis* retzius (hymenoptera: formicidae). *Acta Biologica Hungarica*, 56, 215–224.
- Cammaerts MC, Morel F, Martino F, Warzée N (2012) An easy, cheap computerized method to assess two-dimensional trajectory parameters. *Belgian Journal of Zoology*, 142(2), 147-153.

- Clarke D, Whitney H, Sutton G, Robert D (2013) Detection and learning of floral electric fields by bumblebees. *Science*, 340, 66-69.
- Duelli P, Duelli-Klein R (1978) Die magnetische Nestausrichtung der australischen Kompaßtermitte *Amitermes meridionalis*. *Mitteilungen der Schweizerischen Entomologischen Gesellschaft*, 51, 337–342.
- Franks NR, Gomez N, Goss S, Deneubourg JL (1991) The blind leading the blind in army ant raid patterns – testing a model of self-organization (Hymenoptera, Formicidae). *Journal of Insect Behavior*, 4, 583–607.
- Gottwald Jr. WH (1995) *The Army Ants: The Biology of Social Predation*. Cornell University Press, London.
- Gundmundsson GA, Sandberg R (2000) Sanderlings (*Calidris alba*) have a magnetic compass: orientation experiments during spring migration in Iceland. *Journal of Experimental Biology*, 203, 3137–3144.
- Hölldobler B, Wilson EO (1990) *The ants*. Cambridge, Mass: Belknap Press of Harvard University Press.
- Hsu CY, Ko FY, Li CW, Fann K, Lue JT (2007) Magnetoreception system in honeybees (*Apis mellifera*). *PLoS ONE* 2, e395. (DOI:10.1371/journal.pone.0000395).
- Jacklyn PM, Munro U (2002) Evidence for the use of magnetic cues in mound construction by the termite *Amitermes meridionalis* (Isoptera, Termitinae). *Australian Journal of Zoology*, 50, 357–368.
- Jardine M (2010) Sunscreen for the young earth. *Science*, 327, 1206 – 1207.
- Johnsen S, Lohmann KJ (2005) The physics and neurobiology of magnetoreception. *Nature Reviews Neuroscience*, 6, 703–712.
- Kalmijn AJ (1988) Detection of weak electric fields. In: *Sensory Biology of Aquatic Animals*, (Eds) Atema J, Fay RR, Popper AN, Tavolga WN. Springer, New York.

Kermarrec A (1981) Sensibilité à un champ magnétique artificiel et réaction d'évitement chez *Acromyrmex octospinosus* (Reich) (Formicidae, Attini). *Insectes Sociaux*, 28, 40–46.

Kirschvink JL, Walker MM, Diebel CE (2001) Magnetite-based magnetoreception. *Current Opinion in Neurobiology*, 11, 462–467.

Knaden M, Wehner R (2003) Nest defense and conspecific enemy recognition in the desert ant *Cataglyphis fortis*. *Journal of Insect Behavior*, 16, 717–729.

Latty T, Ramsch K, Ito K, Nakagaki T, Sumpter DJT, Middelndorf M, Beekman M (2011) Structure and formation of ant transportation networks. *Journal of the Royal Society Interface*, 8, 1298–1306.

Lohmann KJ (1991) Magnetic orientation by hatchling loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*). *Journal of Experimental Biology*, 155, 37–49.

Marhold S, Burda H, Wiltschko W (1997) A magnetic polarity compass for direction finding in a subterranean mammal. *Naturwissenschaften*, 84, 421–423.

Miguel TB, Del-Claro K (2005) Polietismo etário e repertório comportamental de *Ectatomma opaciventre* Roger, 1861 (Formicidae, Ponerinae). *Revista Brasileira de Zoociências*, 7 (2), 285–296.

Nowinszky L, Puskás J (2012) Light trapping of Turnip Moth (*Agrotis segetum* Den. et Schiff.) connected with vertical component of geomagnetic field intensity. *E-Acta Naturalia Pannonica*, 3, 107–111.

Nowinszky L, Puskás J, Kiss O (2015) Light-trap catch of the fluvial Trichoptera species in connection with the geomagnetic h-index. *Journal of Biology and Nature*, 4(4), 206–216.

Pereira-Bonfim MGC, Antonialli-Junior WF, Acosta-Avalos D (2015) Effect of magnetic field on the foraging rhythm and behavior of the swarm-founding paper wasp *Polybia*

paulista Ihering (Hymenoptera: Vespidae). *Sociobiology*, 62(1), 99-104. (DOI: 10.13102/sociobiology.v62i1.99-104).

Perna A, Granovskiy B, Garnier S, Nicolis SC, Labedan M, Theraulaz G, Fourcassié V, Sumpter DJT (2012) Individual rules for trail pattern formation in Argentine ants (*Linepithema humile*). *PLOS Computational Biology* 8(7), e1002592.

Phillips JB (1986) Two magnetoreception pathways in a migratory salamander. *Science*, 233, 765–767.

Pie MR (2002) Behavioral repertoire, age polyetism and adult transport in *Ectatomma opaciventre* (Formicidae: Ponerinae). *Journal of Insects Behavior*, 15(1), 25-35.

Quinn TP (1980) Evidence for celestial and magnetic compass orientation in lake migrating sockeye salmon fry. *Journal of Comparative Physiology A*, 137, 243–248.

Reid CR, Sumpter DJT, Beekman M (2011) Optimization in a natural system: Argentine ants solve the towers of Hanoi. *Journal of Experimental Biology*, 214, 50–58.

Ritz T, Wiltschko R, Hore PJ, Rodgers CT, Stapput K, Thalau P, Wiltschko W (2009) Magnetic compass of birds is based on a molecule with optimal directional sensitivity. *Biophysical Journal*, 96, 3451–3457.

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

Solé RV, Bonabeau E, Delgado J, Fernández P, Marín J (2000) Pattern formation and optimization in army ant raids. *Artificial Life*, 6, 219–226.

Tomanova K, Vacha M (2016) The magnetic orientation of the Antarctic amphipod *Gondogeneia antarctica* is cancelled by very weak radiofrequency fields. *Journal of Experimental Biology* 219, 1717-1724. (DOI:10.1242/jeb.132878).

Traniello JFA, Robson SK (1995) Trail and territorial communication in social insects. *Chemical Ecology of Insects*, 2, 241–86.

Wajnberg E, Acosta-Avalos D, Alves OC, de Oliveira JF, Srygley RB, Esquivel DM (2010) Magnetoreception in eusocial insects: an update. *Journal of The Royal Society Interface* 7, S207–S225. (DOI:dx.doi.org/10.1098/rsif.2009.0526.focus).

Walcott C, Green RP (1974) Orientation of homing pigeons altered by a change in the direction of an applied magnet field. *Science*, 184, 180–182.

Wiltschko R, Stapput K, Ritz T, Thalau P, Wiltschko W (2007) Magnetoreception in birds: different physical processes for two types of directional responses. *HFSP Journal*, 1, 41–48.

Winklhofer M (2010) Magnetoreception. *Journal of the Royal Society Interface*, 7 (2), S131–S134.

Wirth R, Beyschlag W, Ryel RJ, Holldobler B (1997) Annual foraging of the leaf-cutting ant *Atta colombica* in a semideciduous rain forest in Panama. *Journal of Tropical Ecology*, 13, 741–757.

ANEXOS

Tabela 1. Valores médios dos parâmetros analisados nos experimentos em campo e laboratoriais com campo magnético.

ESPÉCIE	CAMPO MAGNÉTICO		P TESTE T
	NATURAL	ALTERADO	
<i>Pheidole</i> sp. 60 Δ			
DI1 (cm)	70,9±11,6	107,4±15,7	0,000001
DV1 (cm)	62,2±8,9	79,1±10,1	0,0009
BR1 (s)	133,2±63,8	215,5±33,4	0,005
TR1 (s)	149,9±87,3	33±11,5	0,004
TV1 (s)	115,3±45,1	270,2±101,3	0,0004
VIP1 (s)	0,73±0,5	0,47±0,1	0,19
VVP1 (cm/s)	0,61±0,2	0,34±0,1	0,008
DI2 (cm)	51,7±1,5	70,1±14,5	0,0009
DV2 (cm)	52±0,4	66,9±11,9	0,0009
BR2 (s)	31,7±6,6	157,9±91,8	0,001
TR2 (s)	199,9±78,3	32,1±9,8	0,000007
TV2 (s)	36,9±12	152,6±80,5	0,001
VIP2 (cm/s)	1,71±0,4	0,66±0,5	0,0001
VVP2 (cm/s)	1,6±0,6	0,73±0,8	0,02
FF (Δ/h)	1,51±0,5	0,53±0,3	0,0001
<i>E. brunneum</i> 40 Δ			
Controle			
TE (s)	98,2±17,5	93,9±12,9	0,38
VI (cm/s)	0,68±0,1	0,70±0,1	0,59
VV (cm/s)	0,97±0,4	1,01±0,3	0,75
<i>E. brunneum</i> 40 Δ			
Experimento			
TE (s)	114,4±18,3	154,2±20,9	0,001
VI (cm/s)	0,58±0,09	0,42±0,06	0,0001
VV (cm/s)	0,88±0,3	0,64±0,1	0,0009
<i>N. inversa</i> 60 Δ			
Controle			
TE (s)	93,2±37,6	85,7±32,6	0,4
VI (cm/s)	0,82±0,3	0,86±0,3	0,72
VV (cm/s)	1,06±0,6	1,23±1	0,37
<i>N. inversa</i> 60 Δ			
Experimento			
TE (s)	52,8±27,9	112,3±13,9	2,1 ^{e-12}
VI (cm/s)	1,64±1,05	0,58±0,07	1,0 ^{e-8}
VV (cm/s)	1,89±0,9	0,96±0,1	5,8 ^{e-8}

Δ = indivíduos, s = segundos, cm = centímetros.

Tabela 2. Frequências de comportamentos executados em interações entre operárias durante os experimentos de tomada de decisões em duas espécies de formigas.

Comportamentos	Frequência durante os encontros (%)			
	<i>Ectatomma brunneum</i>		<i>Neoponera inversa</i>	
	SCM	CCM	SCM	CCM
Limpar antenas	100	100	100	100
Limpar pernas	55	100	65	96,6
Limpar Abdome	<i>n/c</i>	<i>n/c</i>	1,6	80
Elevação do corpo	0	12,5	0	33,3
Boxe antenal	7,5	52,5	40	86,6
Tentativa de apreensão	0	27,5	8,3	25
Abertura de mandíbula	10	0	18,3	10

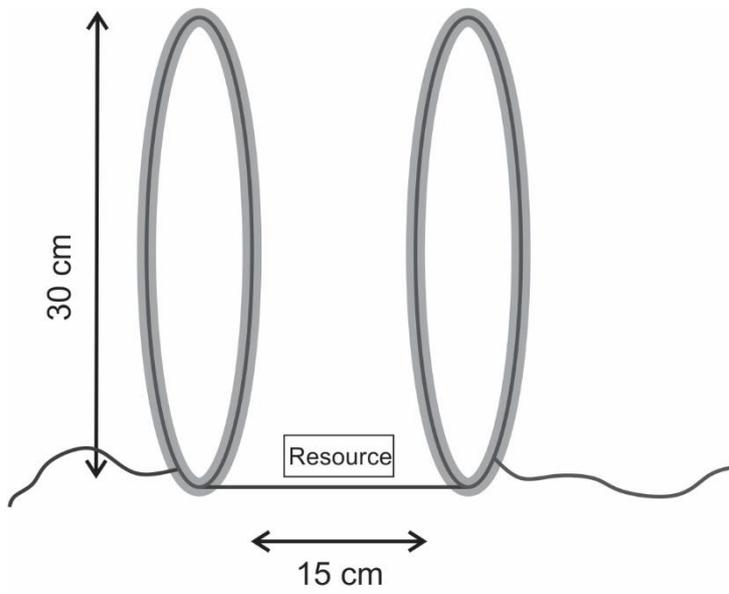


Figura 1. Modelo das bobinas de Helmholtz utilizadas no experimento de forrageamento em campo.

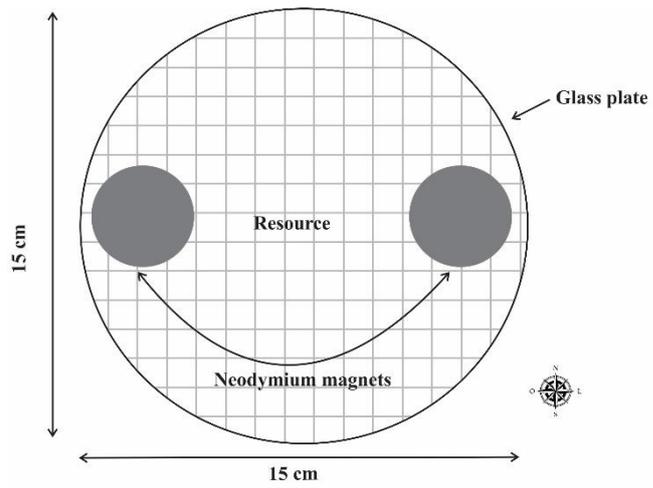


Figura 2. Modelo do aparato dos ímãs de neodímio N35 disco \varnothing 40x5 mm utilizado nos experimentos, ímãs situados em uma placa de isopor acima de uma folha de papel milimetrado e abaixo de uma placa de vidro de 1mm.

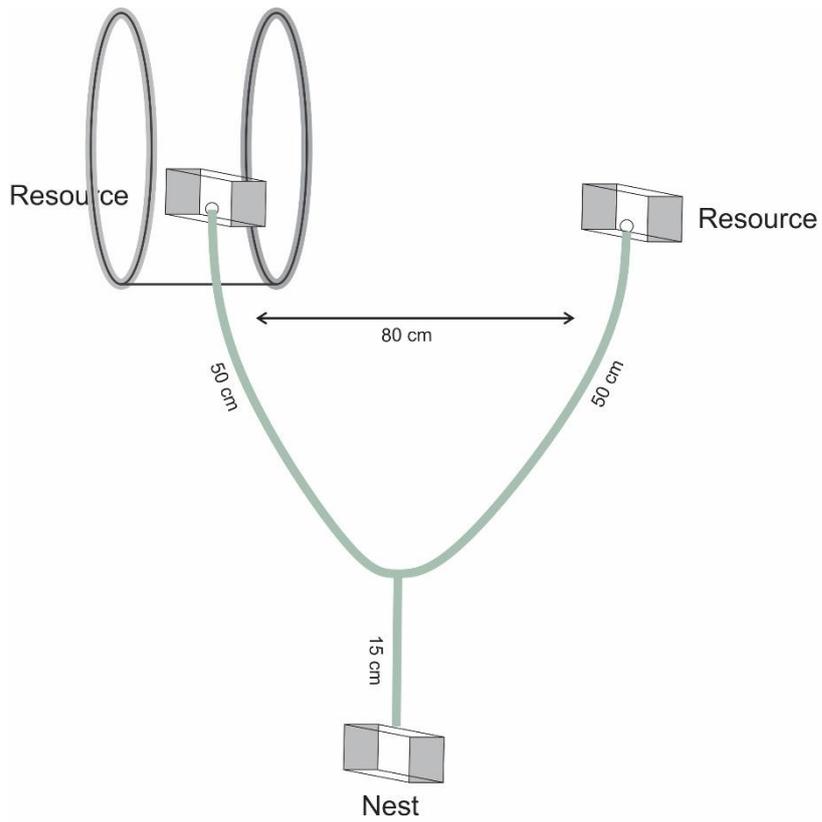


Figura 3. Modelo de trajetórias oferecido para as formigas durante o experimento com tomada de decisão das espécies *Ectatomma brunneum* e *Neoponera inversa*.

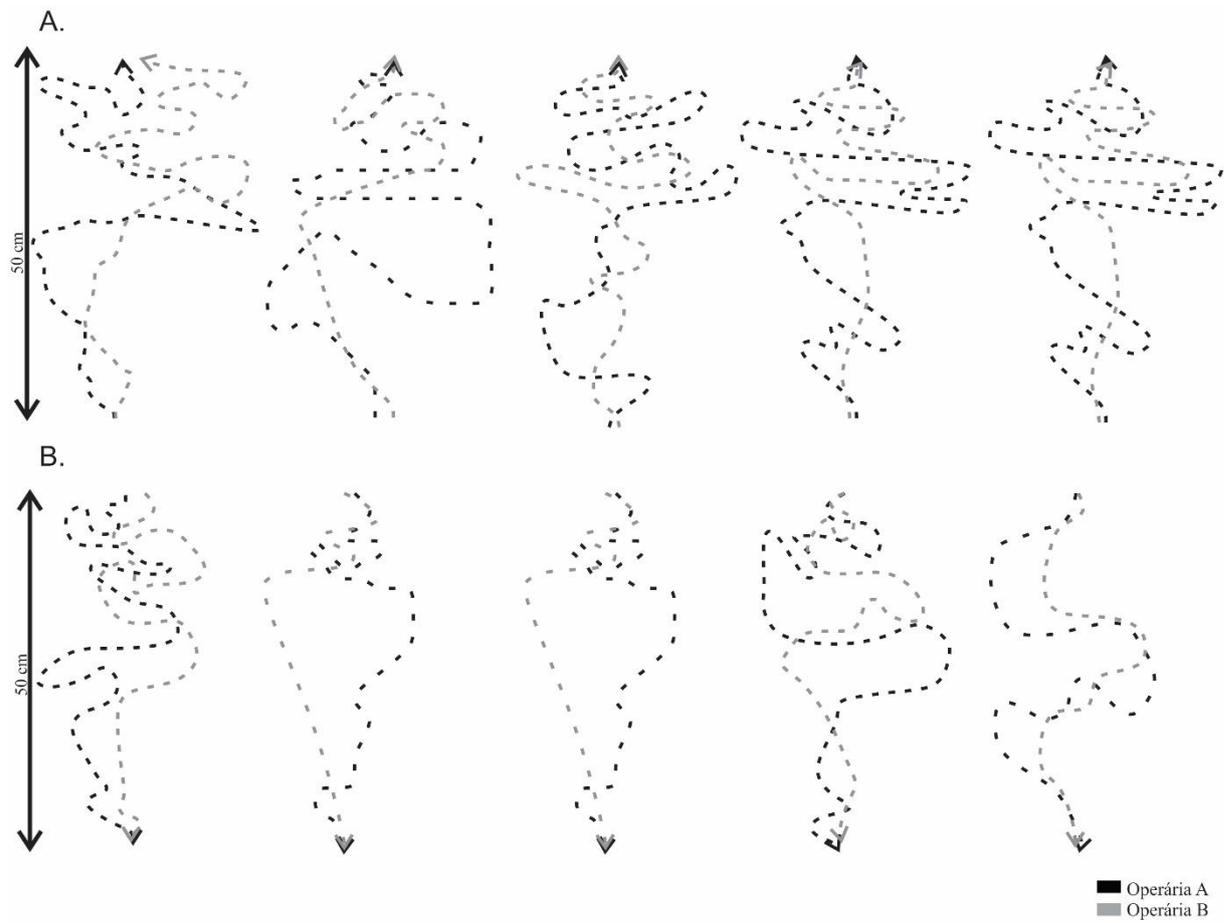


Figura 4. Trajetória de busca de recurso (A) e retorno ao ninho (B) de duas operárias de *Pheidole* sp. em 5 colônias diferentes, com CM alterado na área do recurso.

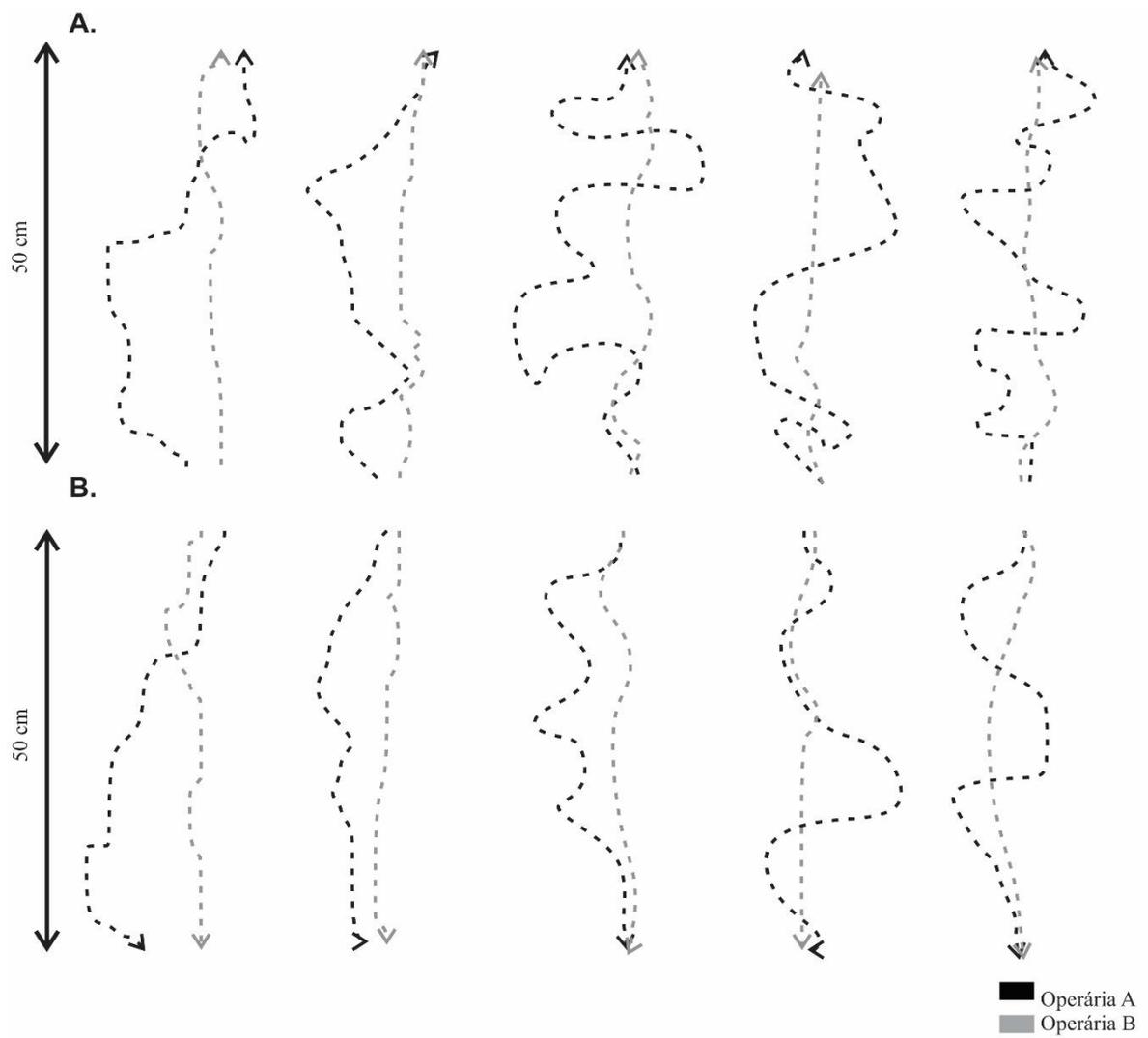


Figura 5. Trajetória de busca de recurso (A) e retorno ao ninho (B) de duas operárias de *Pheidole* sp. em 5 colônias diferentes, com CM natural.

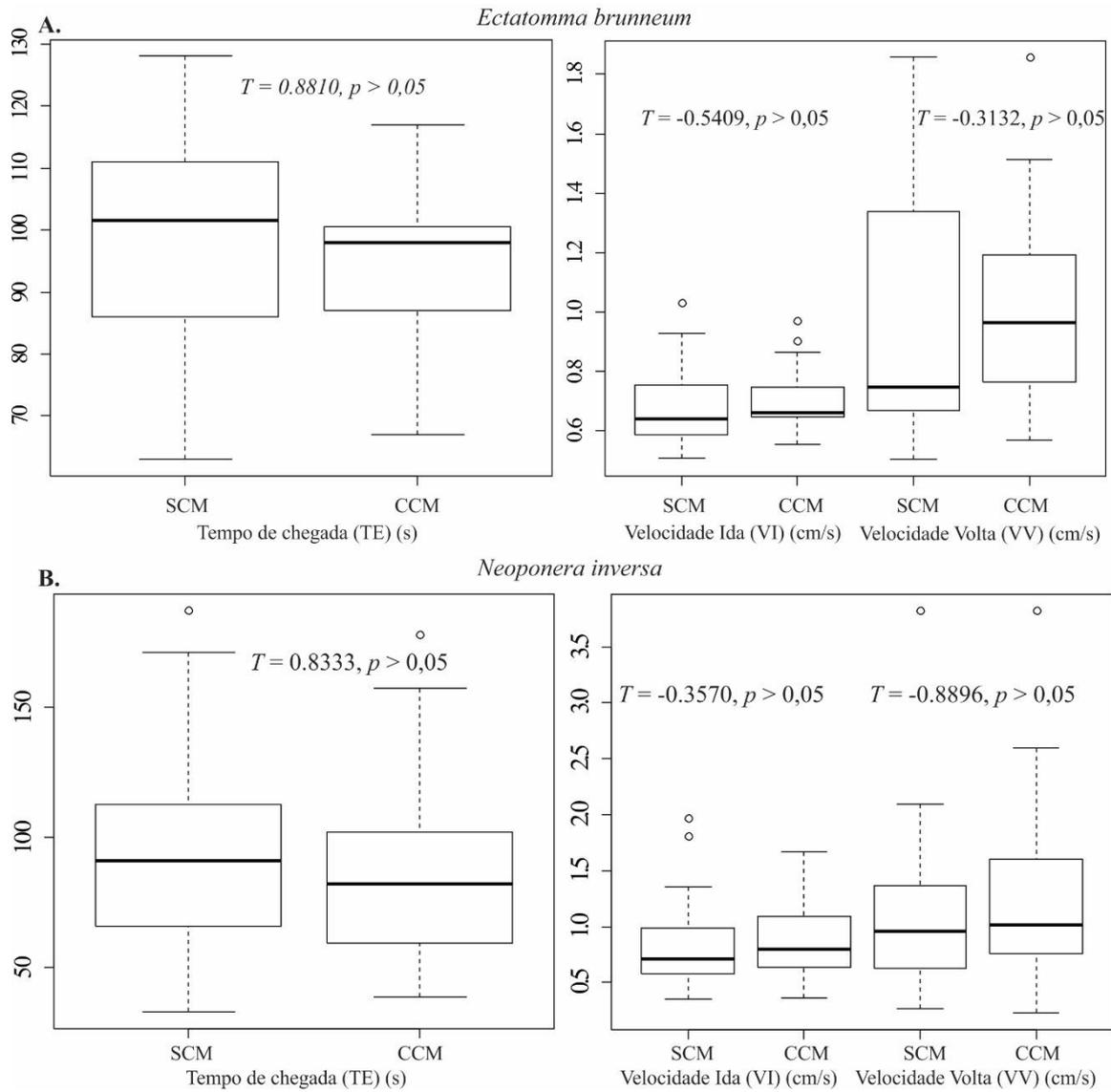


Figura 6. Teste T comparando as médias dos parâmetros avaliados durante os experimentos em laboratório com (CCM) e sem (SCM), com CM natural.

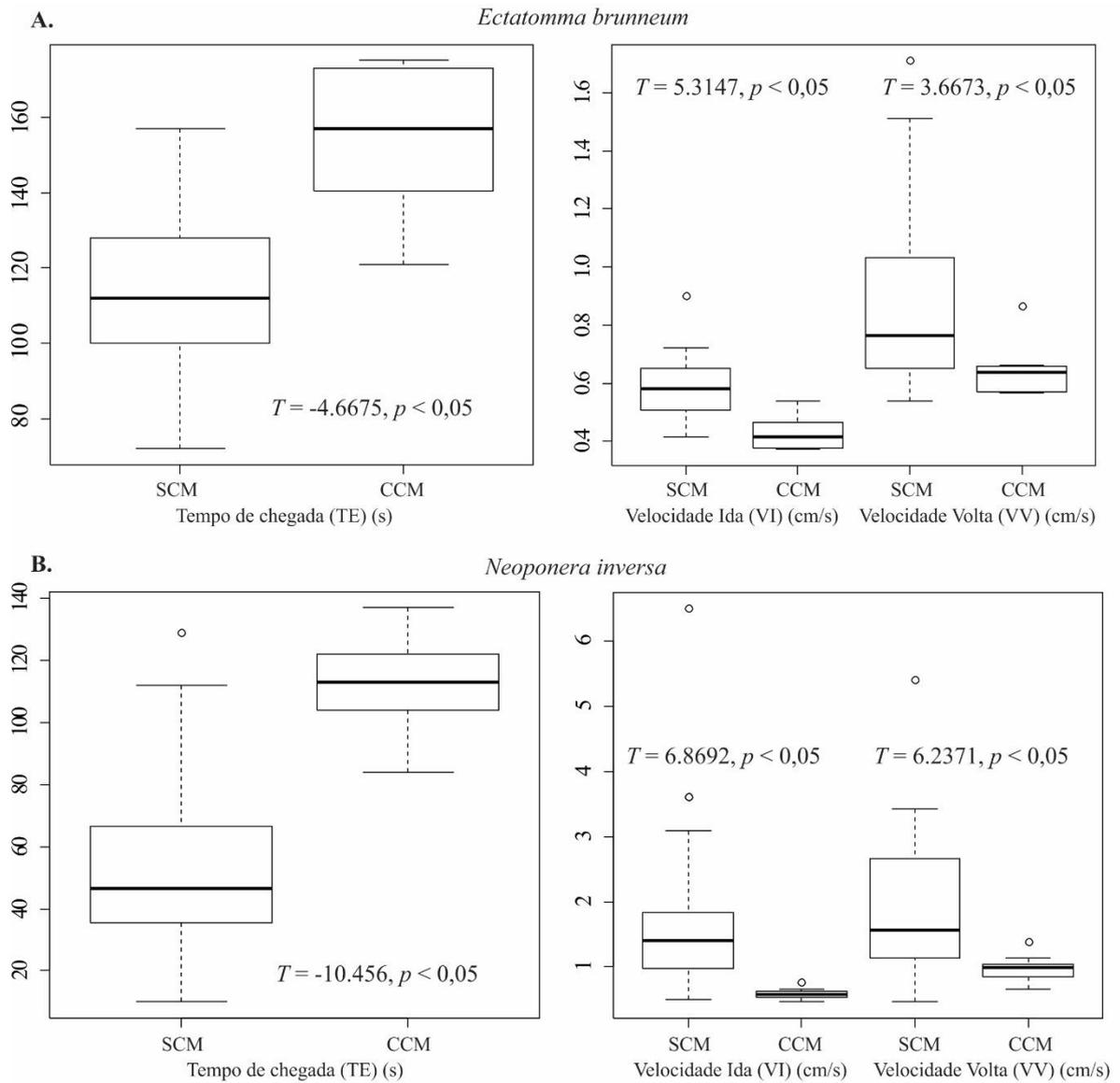


Figura 7. Teste T comparando as médias dos parâmetros avaliados durante os experimentos em laboratório com (CCM) e sem (SCM), com CM alterado.

CAPÍTULO II: CAMPO MAGNÉTICO INDUZIDO PODE ALTERAR OS PADRÕES COMPORTAMENTAIS INTRANIDAIIS DE *NEOPONERA INVERSA* (HYMENOPTERA: PONERINAE)?

PEREIRA, M.C.^{1,2}; GUIMARÃES, I. C.²; ACOSTA-AVALOS, D.³ & ANTONIALLI-JUNIOR, W.F.^{1,2}

¹*Programa de Pós-graduação em Entomologia e Conservação da Biodiversidade, Universidade Federal da Grande Dourados, 79804-970 Dourados-MS, Brazil, marloncesarp@yahoo.com.br, +55 67 99253-0283.*

²*Laboratório de Ecologia Comportamental, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul.*

³*Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF, Rio de Janeiro-RJ, Brazil.*

Resumo: Campo magnético é a região do espaço na qual atuam forças magnéticas. O campo geomagnético é um componente abiótico com o qual os seres vivos interagem permanentemente e tem estado presente desde muito antes do surgimento da vida no planeta. De fato, alguns trabalhos avaliaram que o campo magnético é percebido e pode influenciar o comportamento de vários animais como aves, crustáceos, mamíferos e mesmo insetos. Contudo, apesar de existirem estudos avaliando que CM afeta a vida de animais, ainda pouco se sabe, de fato, como a alteração de seus valores naturais atua. Portanto, o objetivo deste estudo foi testar a hipótese de que um campo magnético alterado pode modificar os padrões comportamentais exibidos pela formiga *Neoponera inversa* dentro de suas colônias. Foram avaliados os efeitos de CM alterado em seis colônias. Para modificar os valores de CM natural utilizamos uma fonte de alimentação elétrica que abastecia um par de bobinas de helmholtz, alocadas ao redor das câmaras do ninho. Os resultados demonstram que esta espécie tem mecanismos para perceber as alterações do CM, uma vez que, alterações dos valores naturais de CM afetam significativamente a execução das atividades de manutenção e alocação de imaturos em suas colônias.

Palavras-chave: comunicação, Formicidae, magnetismo, orientação.

INTRODUÇÃO

A divisão de trabalho é uma característica fundamental na sociedade das formigas, assim como em outros insetos sociais e em muitas espécies, a reprodução é monopolizada por rainhas morfológicamente distintas das operárias (Hölldobler & Wilson, 1990). Esta característica pode contribuir para o desenvolvimento da colônia (Beshers & Fewell, 2001) e, em geral, é um sistema produtivo, pois a eficiência de cada tarefa é realçada devido à especialização dos indivíduos (Wakano *et al.*, 1998). As operárias mais jovens cuidam da prole e menos atenção é oferecida à defesa e exploração do ambiente (Miguel & Del-Claro, 2005), em compensação, as operárias mais velhas dedicam-se à atividade de defesa e exploração (Sudd & Franks, 1987; Antonialli-Jr & Giannotti, 2003).

A organização de suas colônias depende de um considerável grau de complexidade das tarefas, com a comunicação e a orientação, além de outros aspectos, sendo realizados por meio de habilidades sensoriais diferentes com base nos aspectos: visual, acústico, tátil, informação magnética e/ou química (Billen, 2006).

O campo geomagnético é um componente abiótico que os seres vivos interagem frequentemente e está presente desde antes do surgimento da vida no planeta Terra, essa interação complexa e não repetitiva levou aos seres vivos a tomarem diferentes caminhos evolutivos (Acosta-Avalos *et al.*, 2000). O campo geomagnético fornece aos animais informações direcionais e posicionais mesmo em ambientes escuros (Wiltschko & Wiltschko, 2006).

O campo magnético sofre alterações naturais de seus valores ao longo do tempo além de variações diárias por conta da radiação eletromagnética originadas a partir do sol, ocasionais por tempestades magnéticas que podem alterar drasticamente os parâmetros magnéticos naturais (Wiltschko & Wiltschko, 2005). É aceitável supor que, por razões evolutivas, os seres vivos são insensíveis a variações seculares, porque estes períodos são

maiores do que o tempo de vida máximo de qualquer ser vivo, entretanto, os seres vivos devem ser sensíveis as variações rápidas e diárias (Belova & Acosta-Avalos, 2015).

Os dispositivos de energia elétrica, base de estações, telefones celulares, dispositivos portáteis (ou seja, roteadores Wi-Fi, telefones sem fio) são parte de nossa vida diária, transmitindo radiação não-ionizante (Geronikolou *et al.*, 2014; Urbinello *et al.*, 2014).

Balmori (2015) descreve o possível impacto das ondas de comunicação magnética sobre a vida do mundo, tais efeitos também podem ser relevantes para insetos, essencialmente para aqueles que vivem e dependem de aprendizagem e memória (Clarke *et al.*, 2013).

Estudos comportamentais têm demonstrado que, de fato, os animais podem usar o campo geomagnético como sinais para orientação espacial (Wiltschko & Wiltschko, 2005) e, portanto, também qualquer tipo de alteração de seus valores naturais. A primeira evidência que os seres vivos sofrem influência do campo geomagnético foi observado por Salvatore Bellini em 1963 (Ver: Bellini, 2009; Frankel, 2009) que constatou que bactérias poderiam se alinhar a linhas de campo geomagnético quando excitadas. Muitos outros estudos trataram do assunto com outros grupos de animais, como por exemplo peixes (Walker *et al.*, 1997), tartarugas (Lohmann *et al.*, 2007) e aves (Wiltschko *et al.*, 2010).

Alguns estudos já avaliaram os efeitos do CM como fonte para orientação magnética e sob comportamentos ligados a magneto recepção como, com as formigas *Acromyrmex octospinosus* (Kermarrec, 1981), *Formica rufa* (Çamlitepe & Stradling, 1995), *Oecophylla smaradigna* (Jander & Jander, 1998), *Pachycondyla marginata* (Acosta-Avalos *et al.*, 2001), *Atta colombica* (Banks & Srygley, 2003), *Formica pratensis* (Çamlitepe *et al.*, 2005) e *Cataglyphis noda* (Buehlmann *et al.*, 2012). Contudo, poucos estudos propuseram a avaliar o quanto o campo magnético induzido, ou seja, o campo

natural alterado pode afetar na execução de tarefas de manutenção de colônias de formigas.

Portanto, a hipótese deste estudo é que o campo magnético alterado causa uma perturbação na colônia alterando assim os padrões comportamentais intranidais normais da formiga *Neoponera inversa* (Smith 1858).

MATERIAIS E MÉTODOS

Coleta das colônias

Foram coletadas seis colônias de *P. inversa* no Centro de Pesquisa da Lavoura Cacaueira em Ilhéus/BA, nidificadas em frutas do cacau, estas colônias foram transferidas para laboratório em ninhos artificiais de gesso moldados em 3 potes plásticos de 10x7x5 conectados entre si e ligados a bandeja de plástico de 31x19x6 que era utilizada como arena de forrageamento com mangueiras flexíveis, onde foram mantidos sob condições constantes de temperaturas média de $20^{\circ} \pm 2^{\circ}$ C, umidade relativa 60% e com regime de luz 12:12 claro/escuro. Na arena de forrageamento eram oferecidas larvas do coleóptero *Tenebrio molitor*, melão e água *ad libitum*. As colônias não foram manipuladas por período de 1 semana para se habituarem as condições laboratoriais e minimizar os efeitos do estresse.

Análise do efeito do campo magnético alterado sobre o repertório comportamental.

Para testar o efeito do campo magnético alterado sobre colônias desta espécie, foram utilizadas uma Fonte de Alimentação Digital Simétrica SKFA-05D® ligada a Bobinas de Helmholtz como descrito por Pereira-Bomfim *et al.* (2015) revestidas com 58 voltas de fios de cobre 14 AWG, capazes de gerar um campo magnético de $60\mu\text{T}$. As bobinas foram alocadas no centro do ninho artificial afim de gerar um campo magnético sobre uma das câmaras artificiais (Fig. 1).

Como forma de controle para avaliar o repertório comportamental sem os efeitos do CM alterado foram realizadas 45 horas de observações sobre todas as colônias, divididas em 5 sessões de 90 minutos em 7 dias consecutivos. O método de observação utilizado foi o *ad libitum* (Altman, 1974) e durante todas as sessões as bobinas estavam posicionadas como mostra a figura 1 e desligadas.

Durante estas sessões foram qualificados e quantificados todos os atos comportamentais executados nas colônias

Após os dias de sessões controle, foi dado um dia de pausa e, em seguida foram realizadas outras 30 sessões de 90 minutos, durante o mesmo período de dias, totalizando 45 horas, agora com as bobinas ligadas. Todos os atos qualificados durante a sessões controle foram quantificados nestas sessões.

Análise do efeito do campo magnético alterado sobre a alocação de imaturos.

Para avaliar como o CM alterado pode afetar a alocação de imaturos dentro do ninho foi incidido sobre uma câmara do ninho artificial um CM alterado de 60 μ T de acordo com a Figura 1. A câmara circular foi dividida em quadrantes, cada quadrante correspondia a 90° na angulação da câmara, nos quais foram medidos os valores de CM e em cada um dos quadrantes variou seus valores (Fig. 2). (Q1 = -2,5 G; Q2 = 1,2 G, Q3 = 2,5 G e Q4 = -2 G).

Para garantir que as formigas não deixassem o interior do ninho artificial com os imaturos o acesso para área de forrageamento foi lacrado durante todo o experimento.

O experimento consistiu em avaliar ao longo de 30 minutos sob exposição do CM alterado se a formigas apresentavam alguma preferência por alocar os imaturos em alguns dos 4 quadrantes, bem como analisar os comportamentos exibidos pelos adultos quando interagiam com os imaturos.

A fim de se obter o padrão controle, as bobinas eram posicionadas desligadas na câmara do ninho e, em seguida era iniciada a sessão de observação de 30 minutos. Após este período era dado um intervalo de 5 minutos e, em seguida eram ligadas as bobinas; ao final de mais 30 minutos era avaliada a preferência de alocação dos imaturos pelas formigas em cada quadrante.

Análises estatísticas

Para avaliar as diferenças entre o repertório exibido nas sessões controle e aquelas com as bobinas de Helmholtz ligadas foi aplicado um teste de qui-quadrado com os valores de frequência relativa dos atos quantificados nos dois tipos de sessões.

A fim de complementar as análises foi aplicado com os valores brutos de cada ato comportamental quantificado durante as sessões controles e com CM alterado, uma análise de dissimilaridade.

Para avaliar se há diferenças na preferência de alocação de imaturo nas câmaras dos ninhos com e se o CM alterado foi realizada uma análise circular com os valores iniciais e finais dos ângulos entre as posições dos imaturos alocados nas duas situações. Para confirmar a homogeneidade das variáveis utilizamos o teste de Watson. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o programa R.

RESULTADOS

Análise dos Efeito e do campo magnético alterado sobre o repertório comportamental.

Durante a sessão controle com a bobina desligada foram qualificados 44 atos comportamentais e quantificados 4130 atos comportamentais nas sessões controle e 5770 com o CM alterado (Tab. 1). Operárias realizaram 43 atos durante as sessões controle e 37 durante as sessões com CM alterado. Rainhas realizaram 16 na primeira situação e 17 na segunda.

Dois comportamentos só foram observados durante a alteração do CM, “agredir” e “inativa”, ambos realizados por operárias e rainhas (Tabela 1). O comportamento “inativa” se destaca pelo fato de as formigas não realizarem qualquer tipo de movimento, nem mesmo das antenas, como se estivessem impossibilitadas de executar qualquer tipo de ação.

O teste de qui quadrado mostrou que há uma diferença significativa entre os repertórios comportamentais executado pelas rainhas com e sem o CEM alterado ($\chi^2 = 82,7$ $p < 0,05$) e também entre os repertórios comportamentais de operárias nas duas situações ($\chi^2 = 791,2$ $p < 0,05$). Dentre as categorias de atos que mais apresentaram diferenças entre o controle e o experimento foram os comportamentos de limpeza ($\chi^2 = 89,3$ $p < 0,05$), cuidado parental ($\chi^2 = 69,6$ $p < 0,05$) e comunicação ($\chi^2 = 20$ $p < 0,05$).

A análise de agrupamento entre os atos executados por operárias e quantificados durante a sessão com as bobinas ligadas e desligadas é exibida na Figura (Fig. 3).

A análise circular com os pontos de alocação de imaturos durante as sessões com as bobinas ligadas e desligadas é exibida na Figura 2. O teste de Watson mostra que, de fato, há diferenças significativas entre os pontos de preferência de alocação de imaturos pelas operárias quando as bobinas estão ligadas e desligadas ($T=46.6$ $p < 0.001$).

DISCUSSÃO

Rainhas e operárias sofreram efeito do CM alterado, uma vez que sofreram alteração significativa de seus repertórios comportamentais. Operárias, sobretudo, expressam um conjunto distinto de comportamentos quando a bobina está ligada em detrimento de quando não está ligada.

A análise de cluster (Fig. 3), demonstra que os conjuntos de comportamentos expressos das operárias (Fig. 3) variam e no gráfico separou 2 ramos, um com os comportamentos com o campo magnético induzido e o outro sem.

Alguns comportamentos sugerem que a alteração do CM pode gerar alguma perturbação, como, por exemplo, o aumento na frequência de comportamentos de limpeza do corpo, sobretudo das antenas. Ao limpar a antena a formiga está limpando órgão essencial para captação de sinais do meio, assim o aumento na frequência desta atividade pode sugerir que esteja tentando otimizar a captação de algum estímulo ou fonte de perturbação, uma vez que as antenas são os órgãos responsáveis pelas funções tátil-olfativa nas formigas (Hölldobler & Wilson, 1990).

Uma evidência de que as formigas podem interpretar a alteração de CM, como fonte de perturbação é que aumentam os comportamentos antagônicos entre companheiras de ninho, talvez por conta do estresse, caso seja realmente um fator de perturbação. A limpeza de antenas, neste sentido, também poderia ser por conta de alguma desorientação quanto ao recebimento de sinais químicos que indique que as operárias são da mesma colônia.

Outro ponto importante é que a alteração do CM induz alguns comportamentos atípicos nas formigas, como por exemplo a agressividade entre companheiras do próprio ninho. De fato, a agressividade entre companheiras de ninho, por conta da alteração do campo magnético já foi documentado em colônias de *Formica pallidefulva* por MacKay *et al.* (1992). Durante os testes sem a indução do CM alterado não foi observado nenhum

tipo de comportamento antagônico, porém com a indução do campo pode-se notar que algumas operárias e até mesmo as rainhas apresentavam comportamentos agressivos como, por exemplo boxe antenal e tentativa de apreensão entre elas.

Outro comportamento induzido pela alteração do CM (Tab. 1) foi o de inatividade em que as formigas parecem detectar a alteração do campo e, em resposta ficam completamente imóveis, sem, aparentemente movimentar qualquer parte do corpo. Em estudos de repertório comportamentais a descrição de atos de inatividade (Perez-Bautista *et al.*, 1985; Antonialli-Junior *et al.*, 2007; Silva-Melo & Giannotti, 2012), descrevem que durante a inatividade as formigas ficam paradas, sem se deslocarem, mas neste caso suas antenas ficam sempre se movimentando. Neste caso, até mesmo as antenas não se moviam, o que permite sugerir que algo a tenha afetado temporariamente não permitindo qualquer tipo de movimento.

É fato conhecido e descrito em alguns estudos que formigas (Kermarrec, 1981; Çamlitepe & Stradling, 1995; Acosta-Avalos *et al.*, 2001; Buehlmann *et al.*, 2012), bem como outros insetos (Nowinszky & Puskás 2012; Nowinszky *et al.*, 2015; Pereira-Bomfim *et al.*, 2015), percebem alterações de CM e podem ter seu comportamento alterado, portanto, a alteração de valores naturais pode ter induzido esta resposta nas formigas.

Por outro lado, já foi documentado e sugerido que campos eletromagnéticos gerados por fiação em eletrodomésticos podem atrair formigas que acabam locando colônias inteiras para dentro destes equipamentos (Fowler *et al.*, 1990; Mackay *et al.*, 1992).

De fato, a percepção do CM natural e de sua alteração do CM já foi documentada em bactérias (Bellini, 2009) onde o autor encontrou que estes microorganismos apresentavam um alinhamento magnético quando excitados, em crustáceos (Tomanova & Vacha, 2016) os autores encontraram que a orientação foi perdida em campos magnéticos alterados, em

aves (Ritz *et al.*, 2004; Thalau *et al.*, 2005; Wiltschko *et al.*, 2007; Engels *et al.*, 2014; Kavokin *et al.*, 2014) que também perdiam a orientação magnética quando ocorriam mudanças no padrão natural geomagnético, em mamíferos (Begall *et al.*, 2013) que os ratos apresentavam mudanças de orientação quando o CM era alterado e insetos (Vacha *et al.*, 2009) em que as baratas testadas tinham uma perturbação quando alterado o CM.

Ainda que se tenha avaliado que a alteração de CM pode alterar significativamente os comportamentos de colônias desta espécie, é oportuno citar que os valores de intensidade do campo eletromagnético podem influenciar a resposta, uma vez que muitos animais tem uma sensibilidade aguçada ao campo magnético. No grupo dos insetos sociais destaca-se as abelhas como animais mais estudados neste sentido; em alguns estudos os autores investigaram como elas utilizam o campo magnético para orientação, navegação e para busca por recursos florais (Lindauer & Martin, 1968; Collett & Baron, 1994; Frier *et al.*, 1996), portanto o usando como sinais adicionais para orientação.

Outro fato importante que demonstra uma reação das formigas a uma possível fonte de perturbação é que elas alocam os imaturos em pontos diferentes da câmara, quando as bobinas estão ligadas, estes que são os locais com menor intensidade de campo magnético (Fig. 2). Isto também pode ajudar a fomentar a hipótese de que a alteração dos valores normais de CM pode gerar perturbação e estresse nas formigas, alterando os padrões normais de comportamento levando-as a alocar seus imaturos para o mais longe possível da fonte de perturbação.

É fato que este comportamento de transporte para locais distantes de fontes de perturbação foi documentado em estudos, por exemplo que descrevem metodologias de escavação de seus ninhos. Sempre que um ninho é escavado, formigas tentam se afastar da fonte de perturbação carregando os imaturos para outras câmaras ou para fora do ninho (Antoniali-Junior & Giannotti, 1997, 2001; Vieira *et al.* 2007). Por outro lado, Kermarrec

(1981) que analisou a sensibilidade de *Acromyrmex octospinosus* a campos magnetostáticos observou que as formigas se afastam das regiões com campo magnético intenso dentro do ninho. Neste estudo os indivíduos adultos procuravam se afastar e carregar os imaturos para locais mais distantes das zonas de maior incidência do CM.

O CM alterado pode ser interpretado como fonte de perturbação que, alterando os valores normais de CM em colônias de vespas sociais, alteram também o comportamento normal de forrageio, exibindo também comportamento característico de defesa a fontes de perturbação ao ninho (Pereira-Bomfim *et al.*, 2015).

Portanto, os resultados deste estudo indicam que a hipótese aqui testada é válida, uma vez que o campo magnético altera a execução de comportamentos de manutenção das colônias desta espécie.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta-Avalos D, Esquivel DMS, Wajnberg E, Lins de Barros HGP, Oliveira PS, Leal I (2001) Seasonal patterns in the orientation system of the migratory ant *Pachycondyla marginata*. *Naturwissenschaften*, 88, 343–346.
- Acosta-Avalos D, Wajnberg E, Esquivel DMS, El-Jaick LJ, Linhares MPL (2000) Insetos Sociais: um Exemplo de Magnetismo Animal. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 22(3), 317-323.
- Altman J (1974) Observational study of behaviour: sampling methods. *Behaviour*, 49, 227-267.
- Antonialli-Junior WF, Giannotti E (1997) Nest architecture and population dynamics of the Ponerinae ant *Ectatomma opaciventre* Roger (Hymenoptera: Formicidae). *Journal of Advanced Zoology*, 18, 64–71.
- Antonialli-Junior WF, Giannotti E (2001) Nest architecture and population dynamics of the Ponerinae ant *Ectatomma edentatum* (Hymenoptera, Formicidae). *Sociobiology*, 38, 1–12.
- Antonialli-Junior WF, Giannotti E (2003) Temporal polyethism in workers of *Ectatomma edentatum* (Formicidae: Ponerinae). *Sociobiology*, 41(2), 461-478.
- Antonialli-Junior WF, Tofolo VC, Giannotti E (2007) Population dynamics of *Ectatomma planidens* (Hymenoptera: Formicidae) under laboratory conditions. *Sociobiology*, 50(3), 1005-1013.
- Balmori A (2015) Anthropogenic radiofrequency electromagnetic fields as an emerging threat to wildlife orientation. *Science of the Total Environment*, 518–519, 58–60.
- Banks AN, Srygley RB (2003) Orientation by magnetic fields in leaf-cutter ants *Atta colombica* (Hymenoptera: Formicidae). *Ethology*, 109, 835-846. (DOI:10.1046/j.0179-1613.2003.00927.x).

- Begall S, Malkemper EP, Červený J, Němec P, Burda H (2013) Magnetic alignment in mammals and other animals. *Mammalian Biology*, 78(1), 10–20.
- Bellini S (2009) On a unique behavior of freshwater bacteria. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 27(1), 3–5.
- Belova NA, Acosta-Avalos D (2015) The effect of extremely low frequency alternating magnetic field on the behavior of animals in the presence of the geomagnetic field. *Journal of Biophysics*, vol. 2015, Article ID 423838, 8 pages. (DOI:10.1155/2015/423838).
- Beshers SN, Fewell JH (2001) Models of division of labor in social insects. *Annual Review of Entomology*, 46, 413-400.
- Billen J (2006) Signal variety and communication in social insects. *Proceedings of the Netherlands Entomological Society Meetings*, 17, 9-25.
- Buehlmann C, Hansson BS, Knaden M (2012) Desert ants learn vibration and magnetic landmarks. *PLoS One*, 7, e33117.
- Çamlitepe Y, Aksoy V, Uren N, Yilmaz A, Becenen I (2005) An experimental analysis of the magnetic field sensitivity of the black meadow ant *Formica pratensis* Retzius (Hymenoptera: Formicidae). *Acta Biologica Hungarica*, 56, 215-224. (DOI: 10.1556/ABiol.56.2005.3-4.5).
- Çamlitepe Y, Stradling DJ (1995) Wood ants orient to magnetic fields. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 261, 37–41.
- Clarke D, Whitney H, Sutton G, Robert D (2013) Detection and learning of floral electric fields by bumblebees. *Science*, 340, 66-69.
- Collett TS, Baron J (1994) Biological compasses and the coordinate frame of landmark memories in honeybees. *Nature*, 368, 137-140.

Engels S, Schneider NL, Lefeldt N, Hein CM, Zapka M, Michalik A, Elbers D, Kittel A, Hore PJ, Mouritsen H (2014) Anthropogenic electromagnetic noise disrupts magnetic compass orientation in a migratory bird. *Nature*, 509 (7500), 353–356.

Fowler HG, Pereira da Silva V, Forti LC (1990) Major ant problems of South America. In: *Applied Myrmecology - A World Perspective*, (Eds) Vander Meer R, Jaffe R, Cedeno A. Westview Press, Boulder, CO.

Frankel RB (2009) The discovery of magnetotactic/magnetosensitive bacteria. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 27(1), 1–2.

Frier HJ, Edwards E, Smith C, Neale S, Collet TS (1996) Magnetic compass cues and visual pattern learning in honeybees. *Journal of Experimental Biology*, 199, 1353-1361.

Geronikolou S, Zimeras S, Davos CH, Michalopoulos I, Tsitomeneas S (2014) Diverse radiofrequency sensitivity and radiofrequency effects of mobile or cordless phone near fields exposure in *Drosophila melanogaster*. *PLoS ONE*, 9(11), e112139. (DOI:10.1371/journal.pone.0112139).

Hölldobler B, Wilson EO (1990) *The ants*. Cambridge, Mass: Belknap Press of Harvard University Press.

Jander R, Jander U (1998) The light and the magnetic compass of the weaver ant, *Oecophylla smaragdina* (Hymenoptera: Formicidae). *Ethology* 104, 743–758.

Kavokin K, Chernetsov N, Pakhomov A, Bojarinova J, Kobylkov D, Namozov B (2014) Magnetic orientation of garden warblers (*Sylvia borin*) under 1.4 MHz radiofrequency magnetic field. *Journal of the Royal Society Interface*, 11, 20140451. (DOI: 10.1098/rsif.2014.0451).

Kermarrec A (1981) Sensibilité à un champ magnétique artificiel et reaction d'évitement chez *Acromyrmex octospinosus* (Reich) (Formicidae, Attini). *Insectes Sociaux*, 28, 40-46.

- Lindauer M, Martin H (1968) Die Schwereorientierung der Biene unter dem Einfluss des Erdmagnetfelds. *Zeitschrift für vergleichende Physiologie*, 60, 219-243.
- Lohmann KJ, Lohmann CMF, Putman NF (2007) Magnetic maps in animals: nature's GPS. *Journal of Experimental Biology*, 210(21), 3697–3705.
- MacKay WP, Majidi S, Irving J, Vinson SB, Messer C (1992) Attraction of Ants (Hymenoptera: Formicidae) to Electric Fields. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 65(1), 39-43. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/25085325>.
- Miguel TB, Del-Claro K (2005) Polietismo etário e repertório comportamental de *Ectatomma opaciventre* Roger, 1861 (Formicidae: Ponerinae). *Revista Brasileira de Zoociências*, 7(2), 293-310.
- Nowinszky L, Puskás J (2012) Light trapping of Turnip Moth (*Agrotis segetum* Den. et Schiff.) connected with vertical component of geomagnetic field intensity. *E-Acta Naturalia Pannonica*, 3, 107–111.
- Nowinszky L, Puskás J, Kiss O (2015) Light-trap catch of the fluvial Trichoptera species in connection with the geomagnetic h-index. *Journal of Biology and Nature*, 4(4), 206-216.
- Pereira-Bomfim MGC, Antonialli-Junior WF, Acosta-Avalos D (2015) Effect of magnetic field on the foraging rhythm and behavior of the swarm-founding paper wasp *Polybia paulista* Ihering (Hymenoptera: Vespidae). *Sociobiology*, 62(1), 99-104. (DOI:10.13102/sociobiology.v62i1.99-104).
- Perez-Bautista M, Lachaud JP, Fresneau D (1985) La division del trabajo em la hormiga primitiva *Neoponera villosa* (Hymenoptera: Formicidae). *Folia Entomologica Mexicana*, 65, 119–130.
- Ritz T, Thalau P, Phillips JB, Wiltschko R, Wiltschko W (2004) Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass. *Nature*, 429, 177–180.

Silva-Melo A, Giannotti E (2012) Division of labor in *Pachycondyla striata* Fr. Smith, 1858 (Hymenoptera:Formicidae:Ponerinae). *Psyche* Article ID 153862, 7 pages. (DOI:10.1155/2012/153862).

Sudd JH, Franks NR (1987) *The behavioural ecology of ants*. New York. Chapman and hool.

Thalau P, Ritz T, Stapput K, Wiltshko R, Wiltshko W (2005) Magnetic compass orientation of migratory birds in the presence of a 1.315 MHz oscillating field. *Naturwissenschaften*, 92, 86–90.

Tomanova K, Vacha M (2016) The magnetic orientation of the Antarctic amphipod *Gondogeneia antarctica* is cancelled by very weak radiofrequency fields. *Journal of Experimental Biology* 219, 1717-1724. (DOI:10.1242/jeb.132878).

Urbiniello D, Joseph W, Verloock L, Martens L, Rösli M (2014) Temporal trends of radio-frequency electromagnetic field (RF-EMF) exposure in everyday environments across European cities. *Environmental Research*, 134,134–142.

Vacha M, Puzova T, Kviclova M (2009) Radio frequency magnetic fields disrupt magnetoreception in American cockroach. *Journal of Experimental Biology*, 212, 3473-3477.

Vieira AS, Antonioli-Junior WF, Fernandes WD (2007) Modelo arquitetônico de ninhos da formiga *Ectatomma vizottoi* Almeida (Hymenoptera, Formicidae). *Revista Brasileira de Entomologia*, 51(4), 489-493.

Wakano JY, Nakata K, Yamamura N (1998) Dinamic model of optimal age polyethism in social insects under stable and fluctuating environments. *Journal of Theoretical Biology*, 193, 153-165.

Walker MM, Diebel CE, Haugh CV, Pankhurst PM, Montgomery JC, Green CR (1997) Structure and function of the vertebrate magnetic sense. *Nature*, 390(6658), 371– 376.

Wiltschko R, Stapput K, Ritz T, Thalau P, Wiltschko W (2007) Magnetoreception in birds: different physical processes for two types of directional responses. *HFSP Journal*, 1, 41–48.

Wiltschko R, Stapput K, Thalau P, Wiltschko W (2010) Directional orientation of birds by the magnetic field under different light conditions. *Journal of the Royal Society Interface*, 7, S163–S177.

Wiltschko R, Wiltschko W (2006) Magnetoreception. *BioEssays*, 28, 157-168. (DOI:10.1002/bies.20363).

Wiltschko W, Wiltschko R (2005) Magnetic orientation and magnetoreception in birds and other animals. *Journal of Comparative Physiology A*, 191, 675–693. (DOI:10.1007/s00359-005-0627-7).

ANEXOS

Tabela 1. Frequências comportamentais das operárias e das rainhas durante experimento comportamental de *Neoponera inversa*, com campo magnético alterado (CMA) e com campo magnético natural (CMN).

Comportamentos	Operária		Rainha	
	CMN	CMA	CMN	CMA
1. Alimentação				
Coletando água	0,0056	0,0059	0,0135	-
Coletando mel	0,0127	0,0029	-	-
Se alimentar	0,0113	0,0069	-	-
2. Comunicação				
Antenar larva	0,0184	0,0119	0,0135	-
Antenar operária	0,0453	0,0696	0,1486	0,1839
Antenar ovo	0,0028	0,0019	-	-
Antenar pupa	0,0084	-	-	-
Antenar rainha	0,0042	0,0039	-	-
Seguir operária	-	-	0,0135	0,0114
3. Cuidado parental				
Alimentar larva	0,0212	0,0029	-	-
Carregar larva	0,0212	0,0139	0,0135	-
Carregar ovo	0,0311	0,0218	0,027	-
Carregar pupa	0,024	0,0059	-	-
Limpar larva	0,0226	0,0029	-	-
Organizar larvas	0,0439	0,0238	-	-

Organizar ovos	0,0014	-	-	-
Parada segurando larva	0,0354	0,0238	-	0,0114
Parada segurando ovo	0,0283	0,0378	0,0135	-
Parada segurando pupa	0,0127	0,0248	-	-
Parada sobre imaturos	0,0212	0,0487	0,1216	0,0344
4. Defesa				
Patrulhar entrada	0,0283	0,0079	-	0,0229
Patrulhar ninho	0,1288	0,0487	0,0405	0,0344
5. Dominância				
Agressão	-	0,0019	-	0,0114
Boxe antenal	0,0481	0,0318	0,0945	0,0229
Sobrepor o corpo	0,0028	0,0009	-	0,0114
6. Limpeza				
Lamber outra operária	0,0042	0,0069	-	-
Limpendo câmara	0,0042	-	-	-
Limpendo ferrão	0,0028	-	-	-
Limpendo pupas	0,0028	-	-	-
Limpar 1º par de pernas	0,0424	0,0686	0,027	0,0344
Limpar 2º par de pernas	0,0297	0,0587	0,0135	0,0229
Limpar 3º par de pernas	0,0283	0,0597	0,027	0,0114
Limpar antena	0,0538	0,0985	0,0405	0,2068
Limpar olhos	0,0042	0,0507	0,0135	0,0229
Limpeza coletiva	0,0113	0,0019	-	-

Limpeza individual	0,0212	0,0208	-	-
Sendo limpa	0,0084	0,0119	-	0,0114
7. Outros				
Carregar lixo	0,0155	0,0288	-	-
Carregar operária morta	0,0014	0,0019	-	-
Cavar gesso	0,0014	-	-	-
Cortando op. Morta	0,00283	-	-	-
FORAGEAR arena	0,0878	0,0766	-	-
Parada	0,0609	0,0865	0,3783	0,2988
Travada	-	0,0208	-	0,0459
Vasculhar gesso	0,0169	0,0049	-	-
Vasculhar lixo	0,0184	-	-	-
Total	1	1	1	1

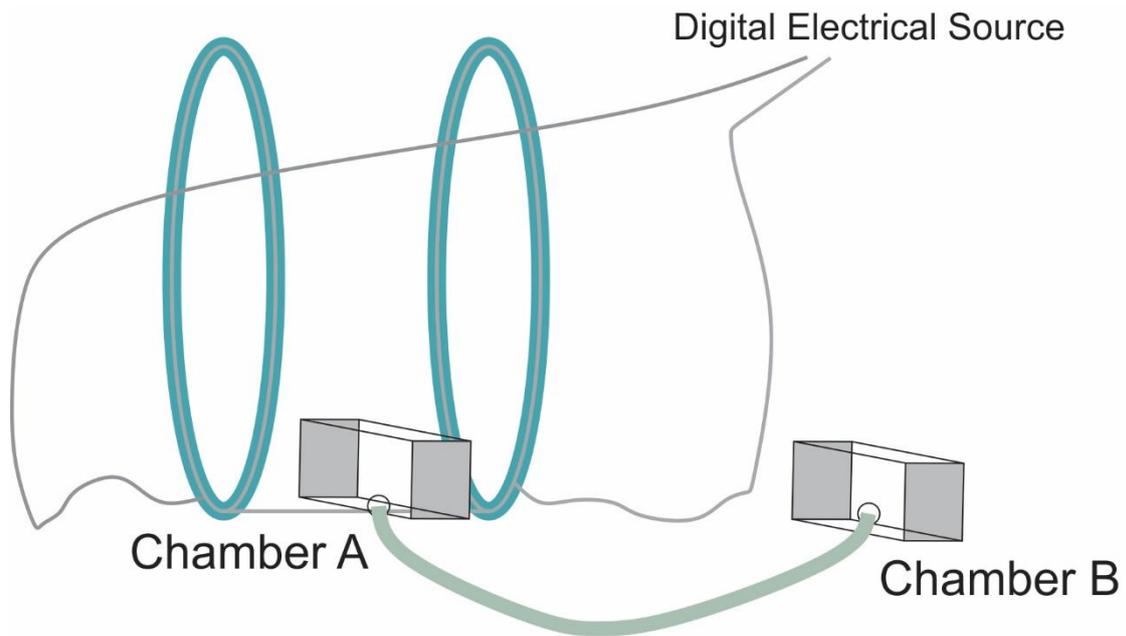
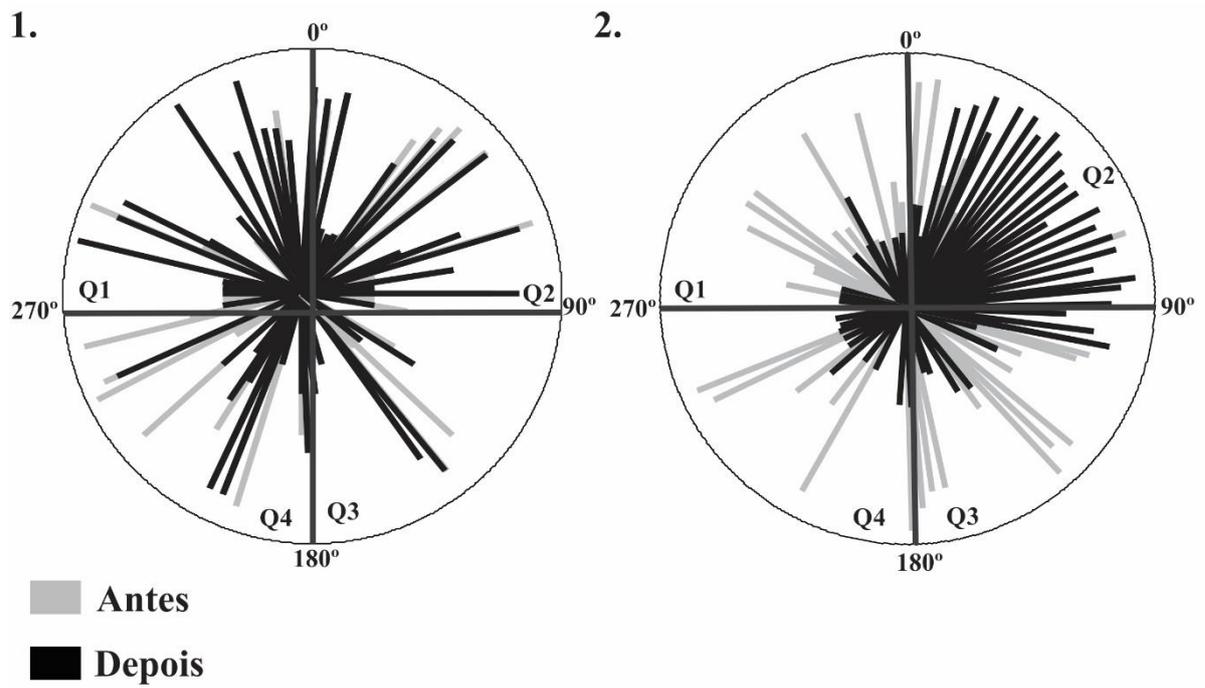


Figura 1. Esquema para testar o efeito da alteração de CM por meio de bobinas de helmoltz instaladas entre uma das câmaras do ninho artificial de *Neoponera inversa*. Câmara A com influência do campo magnético e câmara B sem influência.



Q* quadrantes

Figura 2. Histograma circular com os dados iniciais e finais dos ângulos de alocação dos imaturos, antes (2.1) e depois (2.2) da indução do campo magnético alterado.

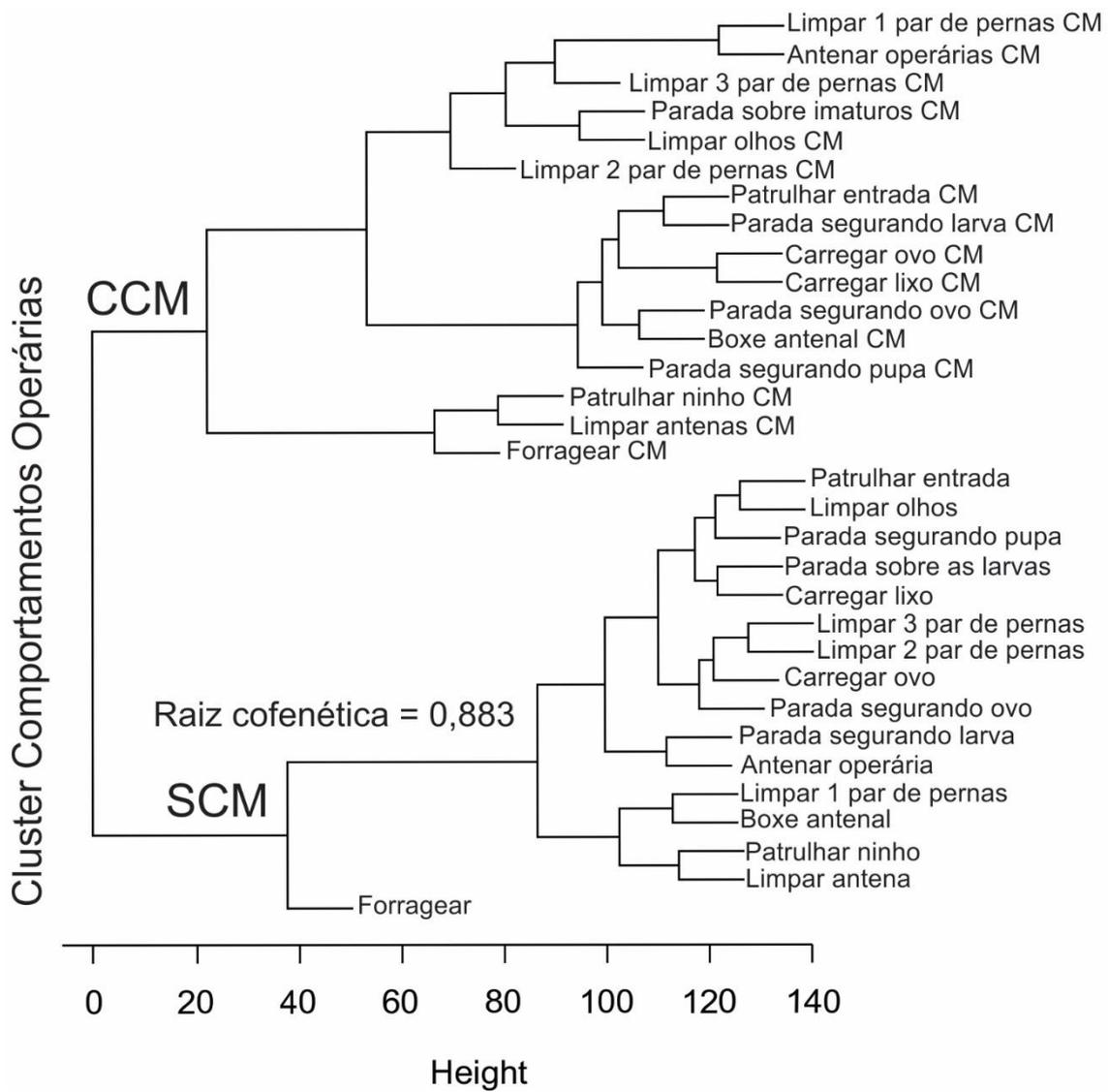


Figura 3. Análise de cluster com os comportamentos mais frequentes das operárias.

CAPÍTULO III: EFEITO DA INDUÇÃO DE CAMPOS MAGNÉTICOS ARTIFICIAIS SOBRE O NÍVEL DE RECONHECIMENTO INTRA-ESPECÍFICO EM FORMIGAS.

PEREIRA, M.C.^{1,2}, ANTONIALLI-JUNIOR W.F.²

¹*Programa de Pós-graduação em Entomologia e Conservação da Biodiversidade, Universidade Federal da Grande Dourados, 79804-970 Dourados-MS, Brazil, marloncesarp@yahoo.com.br, +55 67 99253-0283.*

²*Laboratório de Ecologia Comportamental, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul.*

Resumo. Pouco se sabe como os insetos sociais interagem com o campo magnético da Terra, muito menos ainda dos efeitos da alteração de seus valores naturais sobre sua biologia e comportamento. Sabe-se que esses insetos por viverem em colônias desenvolveram métodos de reconhecimento de companheiros de ninho muito eficientes, sendo menos tolerantes ao contato com indivíduos de outras colônias. Portanto, qualquer tipo de estranhamento entre companheiros de ninhos fora aqueles presentes em seu próprio repertório comportamental não é o esperado. Há na literatura alguns poucos relatos discutindo os efeitos da alteração de valores naturais de CM em animais sobre seu comportamento e, neste sentido, a hipótese deste estudo é que alterando os valores naturais de CM sobre colônias de formigas irá causar uma alteração no padrão normal de interação entre coespecíficos. Para alterar os valores normais de CM foram usadas bobinas de Helmholtz sobre as colônias. Os resultados demonstram que quando se altera os valores de intensidades de CM, isto afeta as interações entre operárias de colônias diferentes, diminuindo o nível de agressividade e, conseqüentemente aumentando o nível de tolerância entre elas. Por outro lado, o aumento do calor gerado pelas bobinas não foi significativo a ponto de gerar perturbação e alterar as respostas comportamentais. Portanto, a hipótese levantada neste estudo é válida.

Palavras-chave: Agressividade, Ectatomminae, magnetismo.

INTRODUÇÃO

Assim como nas demais sociedades de insetos, as formigas são caracterizadas pelo alto grau de cooperação entre os diferentes indivíduos que integram a colônia. Os membros de uma colônia exibem comportamentos sociais individuais que, no entanto, se complementam, resultando em um desenvolvimento global da colônia (Zinck *et al.*, 2008). As operárias, por exemplo, agem de modo ativo na construção de ninhos, na proteção da colônia contra predadores, no forrageio e no cuidado com a prole (Ratnieks *et al.*, 2006). É bem sabido que a integridade de uma colônia depende exclusivamente das relações sociais entre seus indivíduos e, portanto, de sua capacidade de comunicação entre membros do grupo (Crozier & Pamilo, 1996).

O reconhecimento do companheiro de ninho desempenha um papel fundamental na biologia de organismos sociais (Strassmann *et al.*, 2011). Nas formigas, a capacidade de discriminar as companheiras de ninhos é bem desenvolvida, como em outros insetos sociais e os indivíduos provenientes de um ninho estrangeiro geralmente são agredidos e rejeitados em colônias alheias (Crozier & Pamilo 1996; Sturgis & Gordon, 2012). O grau de agressividade em relação aos companheiros que não fazem parte da colônia pode, contudo, variar entre espécies e também dentro da mesma espécie (d'ettorre & Lenoir, 2010). O reconhecimento de companheiros de ninho é predominantemente baseado em pistas químicas, entre os quais os hidrocarbonetos cuticulares desempenham papel fundamental (Bonavita-Cougourdan *et al.*, 1987, Greene & Gordon, 2003).

As formigas, de modo geral, controlam e defendem seus territórios, de onde extraem recursos para alimentar o grande número de larvas, dos machos e fêmeas reprodutores de suas colônias (Newey *et al.*, 2010). No entanto, na maioria das espécies, encontros entre forrageadoras de colônias distintas podem gerar conflitos que, dependendo do grau de competição, podem se transformar em embates com contatos físicos resultando até na morte de indivíduos (Matthews & Matthews, 2010). Os conflitos

podem ser gerados por indivíduos de várias colônias ou espécies durante a competição por fontes de alimentos, território ou parceiros reprodutivos. Tais conflitos, de fato, geralmente envolvem comportamentos agressivos (Huntingford & Turner, 1987).

Muitos autores já avaliaram os níveis de agressão durante interações intra e interespecíficas para investigar a origem dos sinais de reconhecimento individual em espécies de formigas, pois membros da mesma colônia geralmente ignoram uns aos outros durante os encontros, mas demonstram diferentes níveis de agressividade aos indivíduos de colônias ou espécies diferentes (Stuart & Herbers, 2000; Boulay & Lenoir, 2001; Roulston *et al.*, 2003; Buczkowski & Silverman, 2005; Menzel *et al.*, 2009).

Os seres vivos desde o começo de sua existência estão sob influência de vários campos físicos como gravitacionais e geomagnéticos (Belova & Acosta-Avalos, 2015). Vários experimentos demonstraram, por exemplo, que crustáceos (Tomanova & Vacha, 2016), anfíbios (Phillips, 1986), peixes (Quinn, 1980), répteis (Lohmann, 1991), aves (Walcott & Green, 1974; Gudmundsson & Sandberg, 2000), mamíferos (Marhold *et al.*, 1997), insetos (Duelli & Duelli-Klein, 1978; Jacklyn & Munro, 2002; Nowinszky & Puskás, 2012; Nowinszky *et al.* 2015) e os insetos sociais, como abelhas, formigas e vespas, podem usar informações de campo magnético em tarefas de orientação e navegação (Wajnberg *et al.*, 2010; Pereira-Bomfim *et al.*, 2015).

A influência do campo geomagnético em diferentes espécies de formigas, como seus efeitos sobre colônias de *Formica pratensis* (Çamlitepe *et al.*, 2005), *Solenopsis invicta* (Anderson & Vander Meer, 1993), *Formica rufa* (Çamlitepe & Stradling, 1995) e *Atta colombica* (Riveros & Srygley, 2008), sendo pioneiro o trabalho feito com a formiga *Myrmica ruginodis*, no qual descobriram que a antena responde a campos magnéticos, com o pedicelo sendo a parte sensível (Vowles, 1954).

A vida animal, especialmente em áreas urbanas e também nas zonas rurais, está cada vez mais propícia a sofrer influência de CM alterado, uma vez que em locais naturais e protegidos cada vez mais existem emissores poderosos de altas radiofrequências (Burgi *et al.*, 2014). Os efeitos causados por essas emissões ainda não foram examinados, tendo em vista que para a proteção da saúde animal só se considera os efeitos da exposição térmica (Hyland, 2000). Portanto, são necessários mais estudos sobre os efeitos da radiação magnética sobre os organismos para avaliar quais seus efeitos sobre eles (Balmori, 2014).

A partir deste pressuposto, a hipótese deste estudo é a de que a alteração dos valores naturais de CM sobre colônias de formigas irá causar uma alteração no padrão normal de interação entre coespecíficos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para testar o efeito do campo magnético alterado sobre as interações intraespecíficas de formigas foram utilizadas uma Fonte de Alimentação Digital Simétrica SKFA-05D[®] ligada a Bobinas de Helmholtz como descrito por Pereira-Bomfim *et al.* (2015) construídas com 58 voltas de fios de cobre 14 AWG, capazes de gerar um campo magnético de 60 μ T num recipiente plástico denominado de arena de encontros (Fig. 1).

Foram coletadas no total, 56 forrageadoras da espécie *Ectatomma brunneum* e 42 da espécie *Ectatomma vizottoi* diretamente dos orifícios de entrada dos ninhos, de duas localidades diferentes: 1) arredores do Laboratório de Ecologia Comportamental, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul 22°11'55.44"S, 54°55'48.88"O e 2) Mata do Azulão 22°12'51.10"S, 54°55'14.98"O, de seis e quatro colônias de cada uma das espécies respectivamente. Após transferência para o laboratório, grupos de formigas de cerca de dez indivíduos foram mantidas em um recipiente de plástico de 250 ml, envolto em papel celofane vermelho para diminuir o estresse gerado pela coleta e se habituarem por um período de 24 horas as condições laboratoriais. Em seguida, foram realizados encontros induzidos entre operárias de colônias distintas. Para tanto, as formigas eram transferidas para outro recipiente de 16x10x10 cm denominado neste estudo de "arena de encontros", no qual, em sua parte interior e central havia outro recipiente menor de 6x4x3 cm, onde era colocada a formiga. Em seguida, após um minuto, era adicionada na arena nesta arena uma segunda operária de outra colônia. Para diminuir o estresse devido a manipulação, era esperado um minutos, para retirar o recipiente menor possibilitando assim o encontro entre as duas operárias

Em cada arena foram induzidos 24 encontros, par a par, entre 48 operárias de seis diferentes colônias, da espécie *Ectatomma brunneum* e 18 encontros, par a par, entre 36

operárias de quatro colônias diferentes de *Ectatomma vizottoi*. Como controle das condições do experimento, foram realizados, antes de cada experimento, de cada colônia, quatro encontros induzidos entre companheiras de seu próprio ninho.

O método de observação usado para avaliar as interações durante os encontros foi o *ad libitum* (Altman, 1974). Cada dupla foi observada interagindo por 45 minutos. Nos primeiros 15 minutos, as interações ocorreram com as bobinas desligadas, nos 15 minutos seguintes, as bobinas estavam ligadas e no terceiro, novamente as bobinas foram desligadas. Para evitar que só a presença da bobina pudesse influenciar as respostas comportamentais, elas sempre foram mantidas na mesma posição, mesmo quando desligadas.

Os comportamentos qualificados e quantificados durante as interações foram: ignorar (Thomas *et al.*, 2004), toque, fuga (Suarez *et al.*, 1999), tentativa de apreensão, apreensão (Mercier *et al.*, 1997), boxe antenal, elevação do corpo, exibição do abdômen (Monnin & Peeters, 1999) e luta (Mercier *et al.*, 1997). Para avaliar o nível de tolerância nos encontros, foi calculado um nível de agressividade, no qual a intensidade da agressão foi baseada nos comportamentos exibidos recebendo uma escala de pontuação modificada de Suarez *et al.* (1999) de 0 a 2, sendo: 0 para toque, fuga e ignorar; 1 para tentativa de apreensão, apreensão, boxe antenal, elevação do corpo e elevação do abdômen; e 2 para luta. Para cada encontro foi compilada uma média aritmética da pontuação relativa aos níveis de agressão.

Como a alteração do CM gerada pelas bobinas também pode gerar uma alteração nos valores de temperatura em pontos entre as bobinas, portanto, para avaliar se a variação de temperatura poderia gerar a alteração nas respostas comportamentais e não necessariamente a alteração de CM, todos os encontros entre as formigas foram fotografados com uma câmera termal Testo® 870. Com o auxílio do software Testo

IRSOFIT foram selecionados 10 pontos de forma aleatória da imagem térmica, tanto da arena, quanto do corpo das formigas para estabelecer a temperatura média da arena, das bobinas e das formigas durante os encontros e avaliar se a temperatura varia com as bobinas ligadas/desligadas.

Para avaliar as diferenças entre as médias de índice de tolerância entre as 3 condições testadas, bobina desligada, ligada e novamente desligada, foi aplicada aos seus valores o teste de Kruskal-Wallis. Para avaliar se houve diferenças significativas entre as médias de temperatura das fotos térmicas durante os mesmos encontros foi aplicado um teste de Kruskal-Wallis. Todos os testes estatísticos foram realizados utilizando o programa livre R versão 3.2.1.

RESULTADOS

Foram quantificados um total de 2692 atos executados durante os encontros, 1571 entre operárias de *E. brunneum* e 1121 entre operárias de *E. vizottoi*. Deste total, 43,7% ocorreram antes da alteração do CM, 27,6% durante e 28,7% depois. Os principais comportamentos executados por operárias de *E. brunneum* durante os encontros foram apreensão (10,6%), tentativa de apreensão (9,73%) e boxe antenal (9,35%) enquanto entre operárias de *E. vizottoi* foram tentativa de apreensão (21,5%), apreensão (9,9%) e elevação do corpo (9,63%). Durante os testes controle não observamos nenhum tipo de comportamento agressivo entre companheiras de ninho, sendo que em todos os encontros ocorreram apenas toque e antenação (100%).

A média entre os níveis de agressividade apresentados durante os encontros de operárias de colônias distintas de *E. brunneum* foi de $1,47 \pm 0,3$ antes da alteração do CM, $1,1 \pm 0,09$ durante a alteração e $1,3 \pm 0,2$ após a alteração (Fig. 2), o teste de Kruskal-Wallis mostrou que há diferenças significativas entre os grupos ($\chi^2 = 17,8$ $p < 0,05$) (Fig. 3).

Durante os encontros entre as operárias de colônias distintas de *E. vizottoi* a média entre os índices de agressividade foi de $1,88 \pm 0,1$ antes da alteração do CM, $1,29 \pm 0,1$ durante a alteração do CM e $1,61 \pm 0,1$ depois da alteração do CM (Fig. 4), o teste de Kruskal-Wallis mostrou que há diferenças significativas entre os grupos ($\chi^2 = 41,7$ $p < 0,05$) (Fig. 3).

O teste de Kruskal-Wallis mostra que apesar de haver diferenças significativas entre a média de temperatura entre os pontos diferentes da arena ($\chi^2 = 24,7$ $p < 0,05$), antes, durante e depois de ligadas as bobinas ($\chi^2 = 105,8$ $p < 0,05$) (Figs. 5 e 6), não houve diferenças significativas entre as médias de temperatura entre os pontos da superfície do corpo de operárias de *Ectatomma brunneum* ($\chi^2 = 1,3$ $p > 0,052$) nem para a temperatura

do corpo de operárias de *Ectatomma vizottoi* ($\chi^2 = 1,2$ $p > 0,07$) nas mesmas condições experimentais (Figs. 5 e 6).

As imagens termais mostram que visualmente há pouca mudança na temperatura corporal das formigas nas três condições experimentais (Figs. 7 e 8).

DISCUSSÃO

De forma geral, nos testes das duas espécies, antes da alteração do CM as formigas apresentaram um nível de agressividade significativamente maior do que quando ligada a bobina e após o desligamento. O fato de serem intolerantes provavelmente é porque possuem a capacidade de se reconhecerem como não companheiras de ninho, por conta de sinais químicos, em especial os hidrocarbonetos cuticulares já investigados em vários estudos (Jutsum *et al.*, 1979; Liang & Silverman, 2000; Sorvari *et al.*, 2008; van Zweden *et al.*, 2009; van Zweden & D’ettore, 2010; Helanterä *et al.*, 2011). A capacidade de se reconhecerem como não companheiras de ninho e por consequência serem intolerantes entre si, está ligada a fatores como por exemplo, competição por recursos (Temeless, 1994; Sanada-Morimura *et al.*, 2003). Este tipo de disputa já foi descrito em cupins *Nasutitermes corniger* (Dunn & Messier, 1999) e em formigas *Pogomyrmex barbatus* (Gordon, 1989), *Pristomyrmex punctatus* (Sanada-Morimura *et al.*, 2003) e *Linepithema humile* (Thomas *et al.*, 2004).

A alteração do CM, portanto, parece ter afetado a capacidade de identificar a presença de não companheiros de ninhos durante as interações com a bobina ligada, uma vez que estudos já documentaram que as formigas utilizam o CM para orientação em seu dia a dia (Jander & Jander, 1998; Wajnberg *et al.*, 2010) e que modificações nos padrões naturais do CM pode alterar a orientação, navegação e os comportamentos das formigas (Çamlitepe *et al.*, 2005; Riveros & Srygley, 2008; Acosta-Avalos *et al.*, 2015).

A alteração dos valores normais de CM pode ter gerado algum tipo de perturbação nas formigas alterando o seu comportamento, uma evidencia disto é que durante os encontros, as formigas apresentaram um comportamento atípico de “imobilidade”, em que elas permaneciam aparentemente completamente imóveis, sem ao menos movimentar as antenas e, após este período passavam a limpar com frequência suas antenas. Como é

por meio das antenas que captam sinais de vários tipos, inclusive os magnéticos (Oliveira *et al.*, 2010), é possível que o aumento da execução deste comportamento, seria uma tentativa de ajuste a nova intensidade de campo.

Outra evidência de que o CM alterado de fato é percebido e gera uma alteração no comportamento, provavelmente gerando algum tipo de perturbação é que logo após desligar a bobina as formigas deixam de executar os comportamentos acima listados e os índices de agressividade novamente aumentavam.

Uma outra possível explicação para gerar esta perturbação seria a alteração nos valores de temperatura, porque, a geração de um CM (ou eletromagnético) gera calor (Gavili *et al.*, 2012; Salili *et al.*, 2016) e alguns estudos já avaliaram que a alteração da temperatura pode afetar o comportamento de diversos grupos animais (Walther *et al.*, 2002; Deutsch *et al.*, 2008; Dell *et al.*, 2011, 2014; Huey *et al.*, 2012; Gilbert *et al.*, 2014; Sunday *et al.*, 2014; Vasseur *et al.*, 2014; Woods *et al.*, 2015).

De fato entre as bobinas, no centro da arena há uma elevação da temperatura (Fig. 7) e, isto, poderia gerar algum tipo de perturbação nas formigas. No entanto, a análise demonstra que a variação de temperatura da superfície do corpo das formigas (Fig. 8) não é estatisticamente significativa, portanto, não seria um fator que geraria estresse a ponto de modificar o comportamento.

Portanto, é possível inferir que, as alterações observadas durante as interações ao longo dos testes com as bobinas ligadas não foram em resposta ao calor. É fato, que outros fatores fisiológicos não avaliados poderiam demonstrar que as formigas poderiam estar em algum estado de estresse que as levariam as mudanças de respostas comportamentais. Por outro lado, também é possível sugerir que, sabendo que formigas têm a capacidade de captar o CM natural (Wajnberg *et al.*, 2000) e, como outros animais (Belova & Acosta-Avalos, 2015), podem usá-lo como mais um tipo de sinal para se orientar, a alteração dos

seus valores naturais, pode ter gerado algum tipo de desorientação a ponto de não permitirem reconhecer não companheiras de ninho. O fato de que durante as sessões com a alteração de CM as formigas aumentavam a frequência de limpeza das antenas e exibiam um comportamento atípico de imobilidade, podem ser evidências de que estariam de alguma forma desorientadas. Estes resultados, demonstram que, ao menos nestas duas espécies de formiga, a alteração dos valores naturais de CM afeta sua capacidade de reconhecimento intraespecífico. Portanto, a hipótese assumida neste estudo é válida. Esta alteração parece não ser causada pelo aumento de temperatura, o que fato, acontece quando se gera um CM. Se esse fato ocorreu devido a algum tipo de estresse e ou desorientação gerado por outro tipo de fator, ainda não é possível se afirmar e, portanto, mais estudos são necessários para avaliar outras hipóteses.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta-Avalos D, Pinho AT, Barbosa JS, Belova N (2015) Alternating magnetic fields of 60 Hz affect magnetic orientation and magneto sensitivity of fire ants. *Journal of Insect Behavior* 28, 664–673. (DOI 10.1007/s10905-015-9534-0).

Altman J (1974) Observational study of behavior: sampling methods. *Behavior*, 49, 227-267.

Anderson JB, Vander Meer RK (1993) Magnetic orientation in the fire ant, *Solenopsis invicta*. *Naturwissenschaften*, 80, 568-570.

Balmori A (2014) Electrosmog and species conservation. *Science of the Total Environment*, 496, 314–316.

Belova NA, Acosta-Avalos D (2015) The effect of extremely low frequency alternating magnetic field on the behavior of animals in the presence of the geomagnetic field. *Journal of Biophysics*, vol. 2015, Article ID 423838, 8 pages. (DOI:10.1155/2015/423838).

Bonavita-Cougourdan A, Clément JL, Lange C (1987) Nestmate recognition: The role of cuticular hydrocarbons in the ant *Camponotus vagus*. *Journal of Entomological Science*, 22, 1–10.

Boulay R, Lenoir A (2001) Social isolation of mature workers affects nestmate recognition in the ant *Camponotus fellah*. *Behavioral Processes*, 55, 67-73.

Buczowski G, Silverman J (2005) Context-dependent nestmate discrimination and the effect of action thresholds on exogenous cue recognition in the Argentine ant. *Animal Behaviour*, 69, 741-749.

- Bürgi A, Scanferla D, Lehmann H (2014) Time averaged transmitter power and exposure to electromagnetic fields from mobile phone base stations. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11, 8025–8037.
- Çamlitepe Y, Aksoy V, Uren N, Yilmaz A, Becenen I (2005) An experimental analysis of the magnetic field sensitivity of the black meadow ant *Formica pratensis* Retzius (Hymenoptera: Formicidae). *Acta Biologica Hungarica*, 56, 215-224. (DOI: 10.1556/ABiol.56.2005.3-4.5).
- Çamlitepe Y, Stradling DJ (1995) Wood ants orient to magnetic fields. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 261, 37–41.
- Crozier RH, Pamilo P (1996) *Evolution of Social Insect Colonies: Sex Allocation and Kin-Selection*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Dell AI, Pawar S, Savage VM (2011) Systematic variation in the temperature dependence of physiological and ecological traits. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 10591–10596.
- Dell AI, Pawar S, Savage VM (2014) Temperature dependence of trophic interactions are driven by asymmetry of species responses and foraging strategy. *Journal of Animal Ecology*, 83, 70–84.
- d’Ettorre P, Lenoir A (2010) Nestmate recognition. In: *Ant Ecology*, (Eds) Lach L, Parr C, Abbott K. Oxford: Oxford University Press.
- Deutsch CA, Tewksbury JJ, Huey RB, Sheldon KS, Ghalambor CK, Haak DC, Martin PR (2008). Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105, 6668–6672.

Duelli P, Duelli-Klein R (1978) Die magnetische Nestausrichtung der australischen Kompaßtermiten *Amitermes meridionalis*. Mitteilungen der Schweizerischen Entomologischen Gesellschaft, 51, 337–342.

Dunn R, Messier S (1999) Evidence for the opposite of the dear enemy phenomenon in termites. *Journal of Insect Behavior*, 12, 461–464.

Gavili A, Zabihi F, Isfahani TD, Sabbaghzadeh J (2012) The thermal conductivity of water base ferrofluids under magnetic field. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 41, 94–98.

Gilbert B, Tunney TD, McCann KS, DeLong JP, Vasseur DA, Savage V, Shurin JB, Dell AI, Barton BT, Harley CDG, Kharouba HM, Kratina P, Blanchard JL, Clements C, Winder M, Greig H S, O’Connor MI (2014) A bioenergetic framework for the temperature dependence of trophic interactions. *Ecology Letters*, 17, 902–914.

Gordon DM (1989) Ants distinguish neighbor from strangers. *Oecologia*, 81, 198–200.

Greene MJ, Gordon DM (2003) Cuticular hydrocarbons inform task decisions. *Nature*, 423, 32. (DOI:10.1038/423032a).

Gundmundsson GA, Sandberg R (2000) Sanderlings (*Calidris alba*) have a magnetic compass: orientation experiments during spring migration in Iceland. *Journal of Experimental Biology*, 203, 3137–3144.

Helanterä H, Lee YR, Drijfhout FP, Martin SJ (2011) Genetic diversity, colony chemical phenotype, and nest mate recognition in the ant *Formica fusca*. *Behavioral Ecology*, 22, 710–716.

Huey RB, Kearney MR, Krockenberger A, Holtum JA, Jess M, Williams SE (2012) Predicting organismal vulnerability to climate warming: roles of behaviour, physiology and adaptation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences*, 367, 1665–1679.

Huntingford FA, Turner AK (1987) *Animal Conflict*. New York: Chapman and Hall Ltd.

Hyland GJ (2000) Physics and biology of mobile telephony. *The Lancet*, 356, 1833–1836.

Jacklyn PM, Munro U (2002) Evidence for the use of magnetic cues in mound construction by the termite *Amitermes meridionalis* (Isoptera, Termitinae). *Australian Journal of Zoology*, 50, 357–368.

Jander R, Jander U (1998) The light and the magnetic compass of the weaver ant, *Oecophylla smaragdina* (Hymenoptera: Formicidae). *Ethology* 104, 743–758.

Jutsum AR, Saunders TS, Cherrett JM (1979) Intraspecific aggression in the leaf-cutting ant *Acromyrmex octospinosus*. *Animal Behavior*, 27, 839–844.

Liang D, Silverman J (2000) “You are what you eat”: Diet modifies cuticular hydrocarbons and nestmate recognition in the Argentine ant, *Linepithema humile*. *Naturwissenschaften*, 897, 412–416.

Lohmann KJ (1991) Magnetic orientation by hatchling loggerhead sea turtles (*Caretta caretta*). *Journal of Experimental Biology*, 155, 37–49.

Marhold S, Burda H, Wiltschko W (1997) A magnetic polarity compass for direction finding in a subterranean mammal. *Naturwissenschaften*, 84, 421–423.

Matthews RW, Matthews JR (2010) *Insect Behaviour*, London: Springer.

Menzel F, Schmitt T, Blüthgen N (2009) Intraspecific nestmate recognition in two parabiocotic ant species: acquired recognition cues and low inter-colony discrimination. *Insectes Sociaux*, 56, 251–260.

Mercier JL, Lenoir A, Djean A (1997) Ritualised versus aggressive behaviours displayed by *Polyrhachis laboriosa* (F. Smith) during intraspecific competition. *Behavioral Processes*, 41, 39–50.

Monnin T, Peeters C (1999) Dominance hierarchy and reproductive conflicts among subordinates in a monogynous queenless ant. *Behavioral Ecology*, 10, 323–332.

- Newey PS, Robson KSKA, Crozier RH (2010) Weaver ants *Oecophylla smaragdina* encounter nasty neighbors rather than dear enemies. *Ecology*, 9, 2366-2372.
- Nowinszky L, Puskás J (2012) Light trapping of Turnip Moth (*Agrotis segetum* Den. et Schiff.) connected with vertical component of geomagnetic field intensity. *E-Acta Naturalia Pannonica*, 3, 107–111.
- Nowinszky L, Puskás J, Kiss O (2015) Light-trap catch of the fluvial Trichoptera species in connection with the geomagnetic h-index. *Journal of Biology and Nature*, 4(4), 206-216.
- Oliveira JF, Wajnberg E, Esquivel DMS, Weinkauff S, Winklhofer M, Hanzlik M. (2010) Ant antennae: are they sites for magnetoreception?. *Journal of the Royal Society Interface* 7, 143–152.
- Pereira-Bomfim MGC, Antonialli-Junior WF, Acosta-Avalos D (2015) Effect of magnetic field on the foraging rhythm and behavior of the swarm-founding paper wasp *Polybia paulista* Ihering (Hymenoptera: Vespidae). *Sociobiology* 62(1), 99-104. (DOI: 10.13102/sociobiology.v62i1.99-104).
- Phillips JB (1986) Two magnetoreception pathways in a migratory salamander. *Science*, 233, 765–767.
- Quinn TP (1980) Evidence for celestial and magnetic compass orientation in lake migrating sockeye salmon fry. *Journal of Comparative Physiology A*, 137, 243–248.
- Ratnieks FLW, Foster KR, Wenseleers T (2006) Conflict resolution in insect societies. *Annual Review Entomology*, 51, 581-608.
- Riveros AJ, Srygley RB (2008) Do leafcutter ants, *Atta colombica*, orient their path-integrated home vector with a magnetic compass? *Animal Behavior*, 75, 1273–1281.
- Roulston TH, Buczkowski G, Silverman J (2003) Nestmate discrimination in ants: effect of bioassay on aggressive behavior. *Insectes Sociaux*, 50, 151-159.

Salili SM, Tamba MG, Sprunt SN, Welch C, Mehl GH, Jákli A, Gleeson JT (2016) Anomalous increase in nematic-isotropic transition temperature in dimer molecules induced by a magnetic field. *Physical Review Letters*, 116, 217801. (DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.217801).

Sanada-Morimura S, Minai M, Yokoyama M, Hirota T, Satoh T, Obara Y (2003) Encounter-induced hostility to neighbors in the ant *Pristomyrmex pungens*. *Behavioral Ecology*, 14, 713-718.

Sorvari J, Theodora P, Turillazzi S, Hakkarainen H, Sundsteöm L (2008) Food resources, chemical signaling, and nestmate recognition in the ant *Formica aquilonia*. *Behavioral Ecology*, 19, 441-447.

Strassmann JE, Gilbert OM, Queller DC (2011) Kin discrimination and cooperation in microbes. *Annual Review of Microbiology*, 65, 349-367.

Stuart RJ, Herbers JM (2000) Nestmate recognition in ants with complex colonies: within and between population variation. *Behavioral Ecology*, 11, 676-685.

Sturgis SJ, Gordon MD (2012) Nestmate recognition in ants (Hymenoptera: Formicidae): a review. *Myrmecological News*, 16, 101–110.

Suarez AV, Tsuitsui ND, Holway DA, Case TJ (1999) Behavioral and genetic differentiation between native and introduced populations of the Argentine ant. *Biological Invasions*, 1, 43-53.

Sunday JM, Bates AE, Kearney MR, Colwell RK, Dulvy NK, Longino JT, Huey RB (2014) Thermal-safety margins and the necessity of thermoregulatory behavior across latitude and elevation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111, 5610–5615.

Temeless EJ (1994) The role of neighbours in territorial systems: when are they “dear enemies”? *Animal Behaviour*, 47, 339-350.

Thomas ML, Tsutsui ND, Holway DA (2004) Intraspecific competition influences the symmetry and intensity of aggression in the Argentine ant. *Behavioral Ecology*, 16, 472-481.

Tomanova K, Vacha M (2016) The magnetic orientation of the Antarctic amphipod *Gondogeneia antarctica* is cancelled by very weak radiofrequency fields. *Journal of Experimental Biology* 219, 1717-1724. (DOI:10.1242/jeb.132878).

van Zweden JS, D’Ettorre P (2010) Nestmate recognition in social insects and the role of hydrocarbons. In: *Insect hydrocarbons biology, biochemistry, and chemical ecology*, (Eds) Blomquist GJ, Bagnères AG. Cambridge (UK): Cambridge University Press.

van Zweden JS, Dreier S, d’Ettorre P (2009) Disentangling environmental and heritable nestmate recognition cues in a carpenter ant. *Journal of Insect Physiology*, 55, 158–163.

Vasseur DA, DeLong JP, Gilbert B, Greig HS, Harley CDG, McCann KS, Savage V, Tunney TD, O’Connor MI (2014). Increased temperature variation poses a greater risk to species than climate warming. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 281, 20132612.

Vowles DM (1954) The orientation of ants. II. Orientation to light, gravity and polarized light. *Journal of Experimental Biology*, 31, 356–375.

Wajnberg E, Acosta-Avalos D, Alves OC, de Oliveira JF, Srygley RB, Esquivel DMS (2010) Magnetoreception in eusocial insects: an update. *Journal of the Royal Society Interface*, 7 (2), S207–S225.

Walcott C, Green RP (1974) Orientation of homing pigeons altered by a change in the direction of an applied magnet field. *Science*, 184, 180–182.

Walther GR, Post E, Convey P, Menzel A, Parmesan C, Beebee TJC, Fromentin JM, Hoegh-Guldberg O, Bairlein F (2002) Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416, 389-395.

Woods HA, Dillon ME, Pincebourde S (2015) The roles of microclimatic diversity and of behavior in mediating the responses of ectotherms to climate change. *Journal of Thermal Biology*, 54, 86–97.

Zinck L, Hora RR, Chaline N, Jaisson P (2008) Low intraspecific aggression level in the polydomous and facultative polygynous ant *Ectatomma tuberculatum*. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 126, 211-216.

ANEXOS

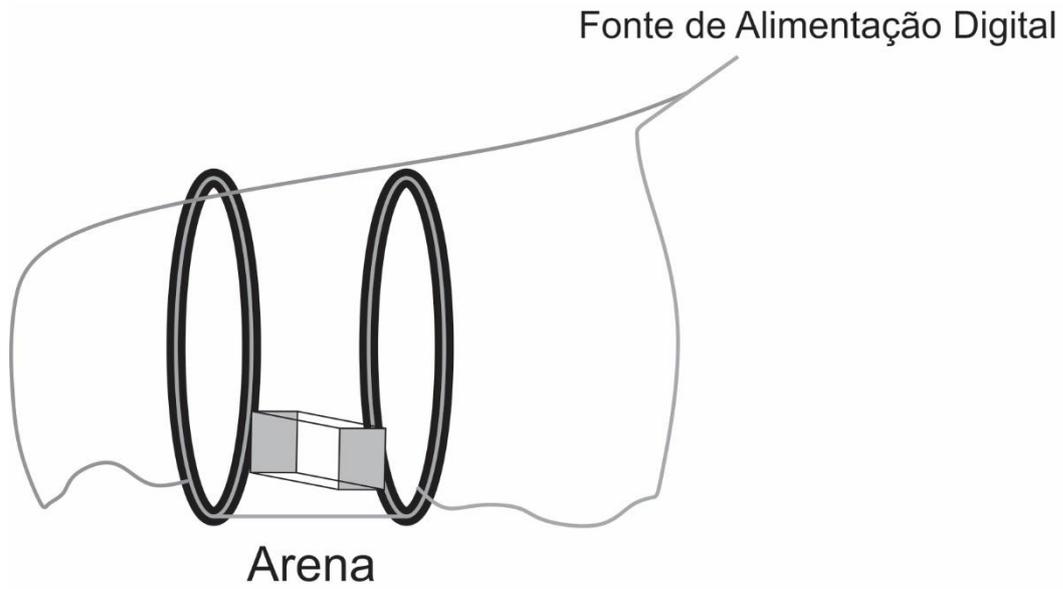


Figura 1. Modelo das bobinas de hellmholtz utilizada no experimento para gera um CM alterado na arena de encontros.

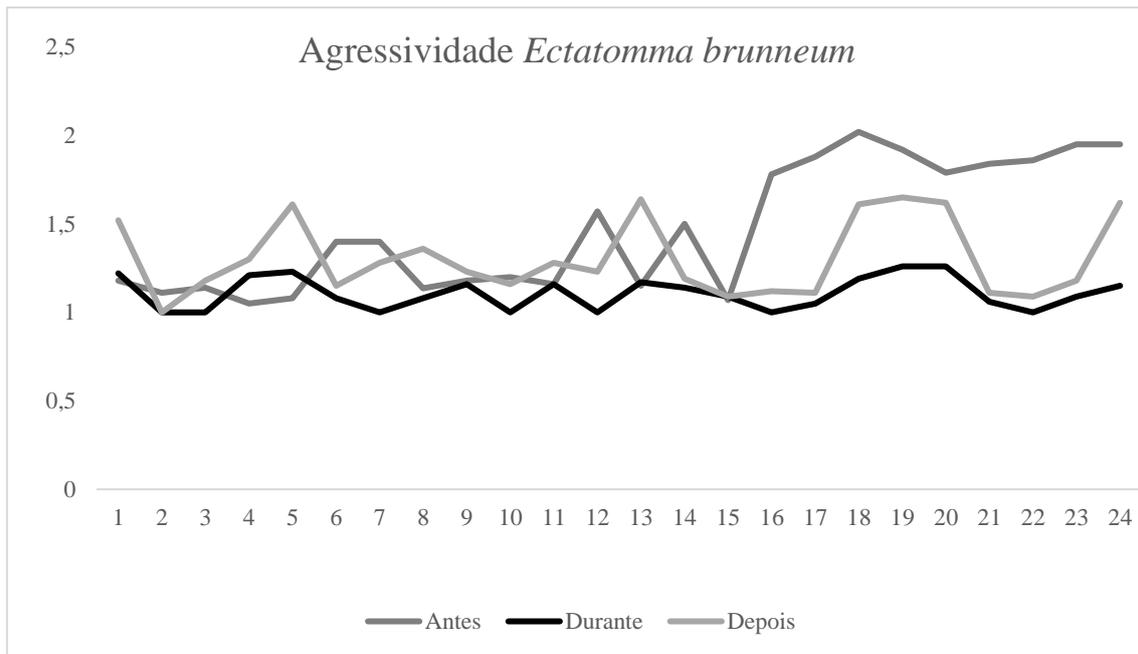


Figura 2. Níveis de agressividade exibidos durante encontros induzidos entre operárias de diferentes colônias de *Ectatomma brunneum*, antes do CM ser alterado, durante a alteração do CM e depois da alteração do CM.

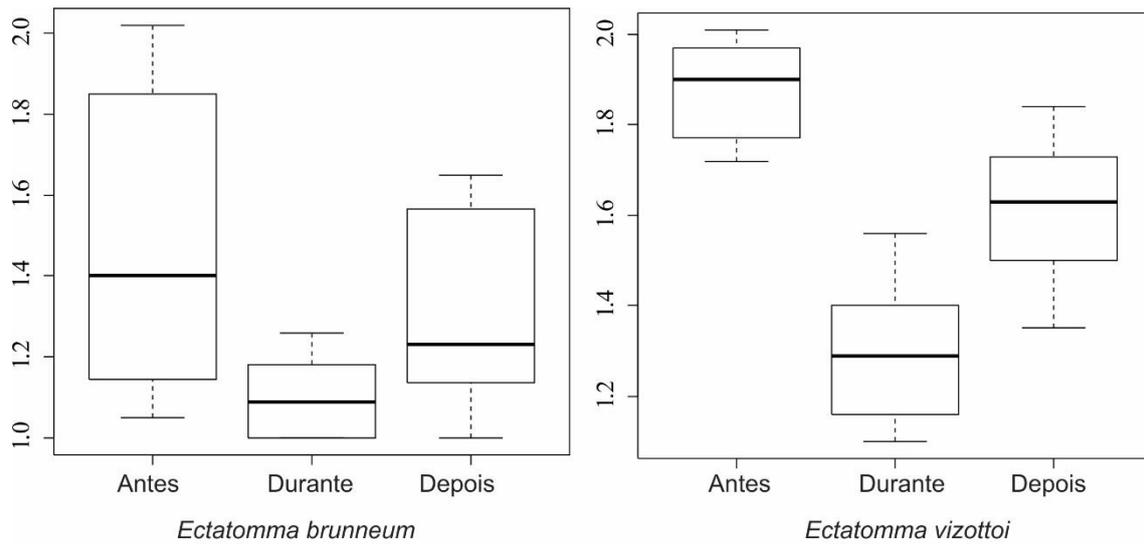


Figura 3. Médias dos níveis de agressividade exibidos em encontros induzidos por operárias de *Ectatomma brunneum* e *Ectatomma vizottoi*, antes, durante e depois da alteração dos valores de CM.

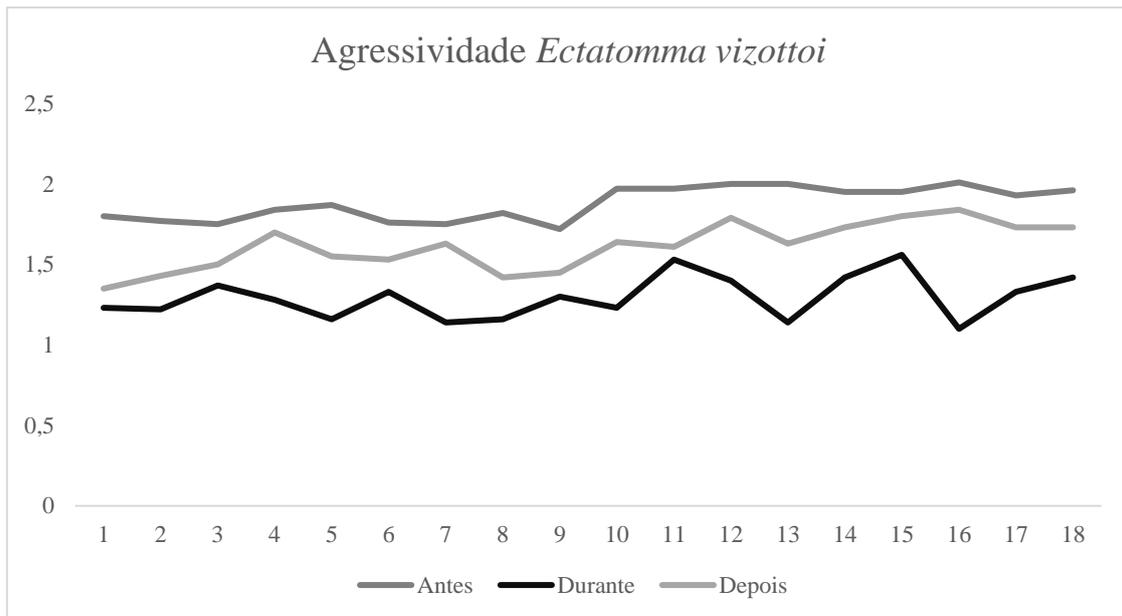


Figura 4. Níveis de agressividade exibidos durante encontros induzidos entre operárias de diferentes colônias de *Ectatomma vizottoi*, antes do CM ser alterado, durante a alteração do CM e depois da alteração do CM.

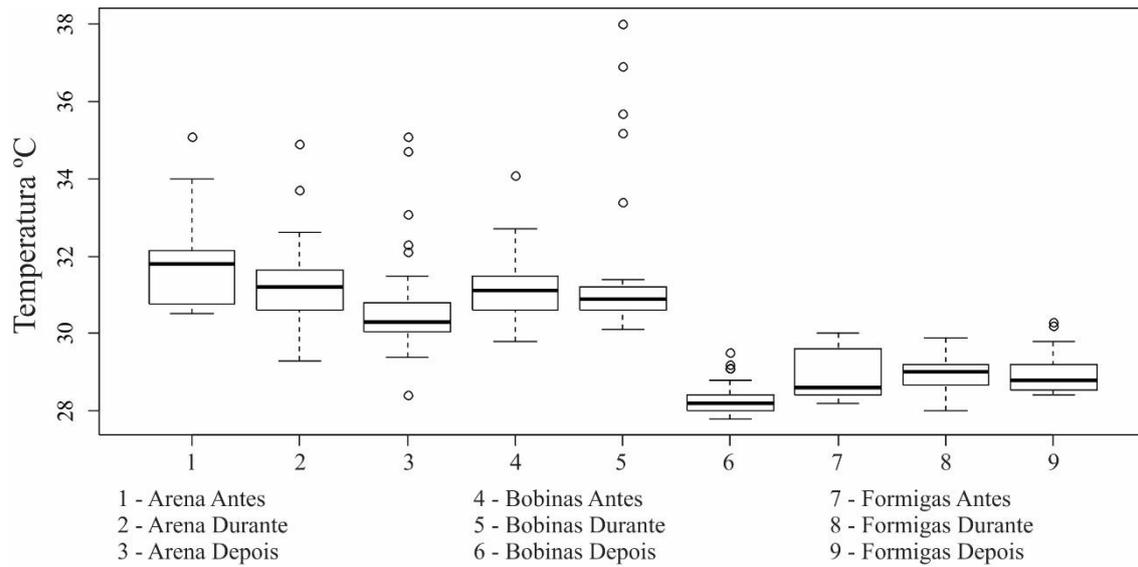


Figura 5. Médias de temperaturas de pontos aleatórios da arena, das bobinas e dos corpos das operárias de *Ectatomma brunneum*, antes, durante e depois a alteração dos valores de CM.

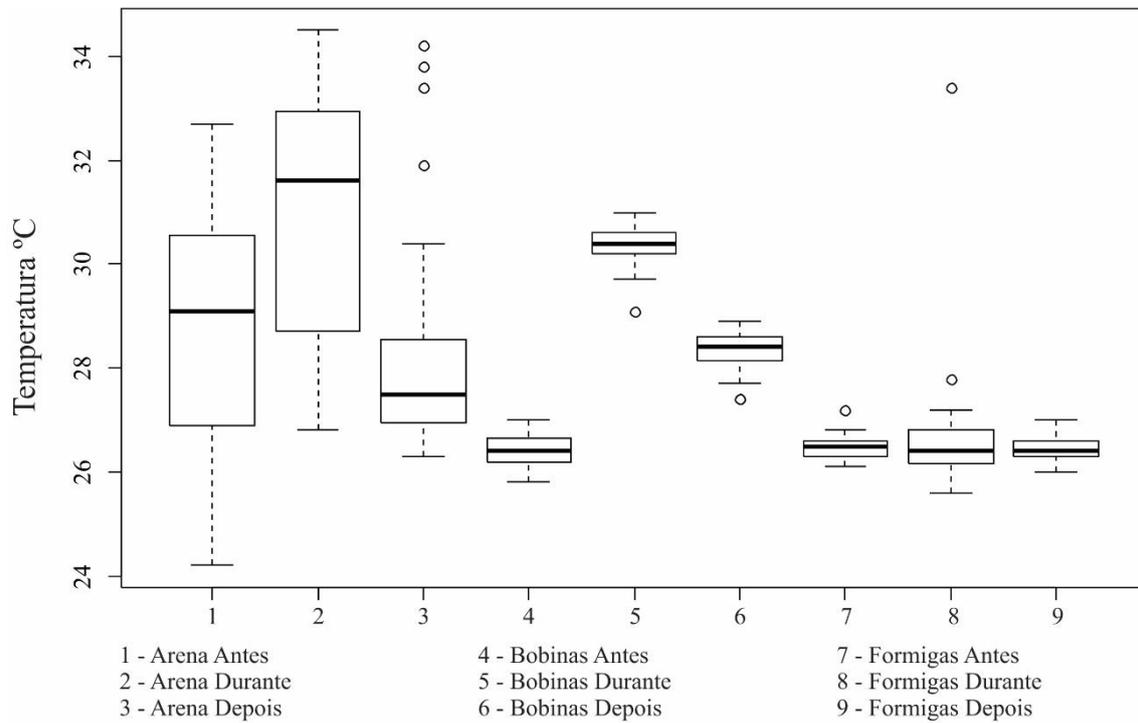


Figura 6. Médias de temperaturas de pontos aleatórios da arena, das bobinas e dos corpos das operárias de *Ectatomma vizottoi*, antes, durante e depois a alteração dos valores de CM.

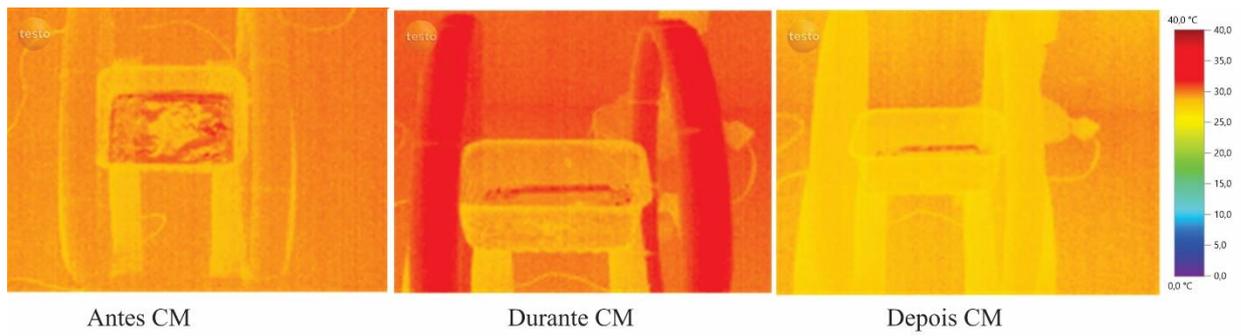


Figura 7. Fotos termais da arena e bobinas, antes, durante de depois da alteração dos valores de CM.

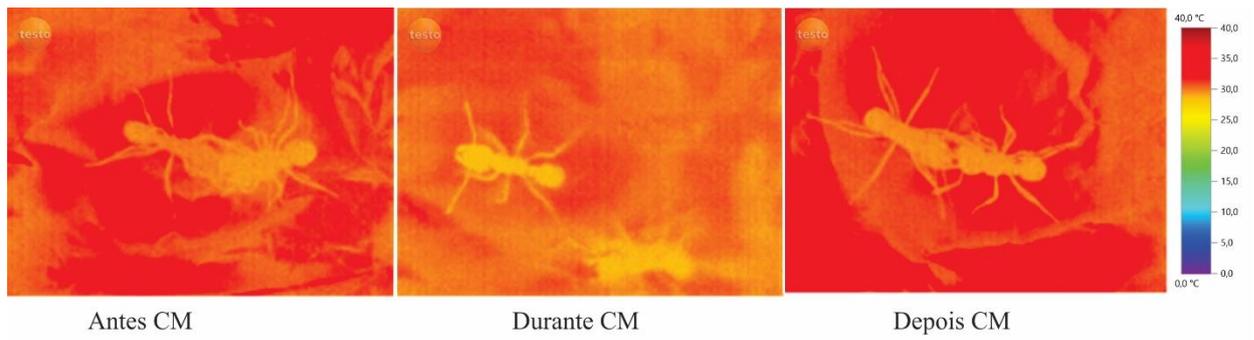


Figura 8. Foto termais de operárias de *Ectatomma brunneum*, na arena, antes, durante e depois da alteração dos valores de CM.