



Universidade Federal de Uberlândia

Instituto de Biologia

**Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação
de Recursos Naturais**



**SERVIÇOS DE POLINIZAÇÃO POR ABELHAS NO
TOMATEIRO (*Solanum lycopersicum* L., SOLANACEAE): A
IMPORTÂNCIA DA CONSERVAÇÃO DE ÁREAS NATURAIS
E DO MANEJO DOS CULTIVOS**

Bruno Ferreira Bartelli

2018

Bruno Ferreira Bartelli

Serviços de polinização por abelhas no tomateiro (*Solanum lycopersicum* L., Solanaceae): a importância da conservação de áreas naturais e do manejo dos cultivos

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Ecologia e Conservação de Recursos Naturais.

Orientadora

Profa. Dra. Fernanda Helena Nogueira Ferreira

Coorientadora

Dra. Poliana Mendes

UBERLÂNDIA

Fevereiro – 2018

Bruno Ferreira Bartelli

Serviços de polinização por abelhas no tomateiro (*Solanum lycopersicum* L., Solanaceae): a importância da conservação de áreas naturais e do manejo dos cultivos

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Ecologia e Conservação de Recursos Naturais.

APROVADA em 27 de fevereiro de 2018.

98833-9728

Profa. Dra. Edivani Villaron Franceschinelli – UFG

Profa. Dra. Silvia Helena Sofia – UEL

Profa. Dra. Camila Nonato Junqueira – ESTES/UFU

Profa. Dra. Solange Cristina Augusto – INBIO/UFU

Profa. Dra. Fernanda Helena Nogueira Ferreira – INBIO/UFU (Orientadora)

UBERLÂNDIA

Fevereiro – 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

B283s Bartelli, Bruno Ferreira, 1997-
2018 Serviços de polinização por abelhas no Tomateiro (*Solanum lycopersicum* L., Solanaceae): a importância da conservação de áreas naturais e do manejo dos cultivos / Bruno Ferreira Bartelli. - 2018.

Orientadora: Fernanda Helena Nogueira-Ferreira.

Coorientadora: Poliana Mendes.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação de Recursos Naturais.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2023.8029>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Ecologia. I. Nogueira-Ferreira, Fernanda Helena, 1968-, (Orient.).
II. Mendes, Poliana, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia.
Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação de Recursos
Naturais. IV. Título.

CDU: 574

A Deus, aos familiares, amigos, professores
e à minha orientadora Fernanda.

DEDICO

Aos que acreditam em um mundo melhor!

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de viver e aprender cada vez mais, por me abençoar e me proteger sempre, por permitir a realização de mais um sonho e por ter colocado as pessoas que serão mencionados aqui em meu caminho.

À minha família, que é minha base de sustentação e que sempre apoiou as minhas escolhas e decisões. Aos meus pais, Queila e Edson, e aos meus irmãos, Gabriel e Nathália, minha eterna gratidão por todo amor e carinho, por tudo que me proporcionaram ao longo desse caminho e, principalmente, por fazerem de mim uma pessoa mais feliz.

À Sara Ribeiro Pedroso e à Elizabete Maria Ribeiro por todo apoio e carinho e pela convivência ao longo desses quatro anos.

À professora Fernanda Helena Nogueira-Ferreira, que, mais que uma orientadora, é uma amiga, quase uma mãe. Uma pessoa especial que me acompanha desde a graduação e que cujas orientações ultrapassam os muros da universidade. Obrigado pela confiança depositada em mim, pelo otimismo de sempre, pela alegria e por todos os ensinamentos.

Ao professor Paulo Eugênio Alves Macedo de Oliveira e às professoras Solange Cristina Augusto e Camila Nonato Junqueira pelo suporte, por todas as sugestões dadas ao trabalho e por aceitarem participar da banca examinadora desta tese.

A todos os membros da banca examinadora desta tese pela disponibilidade e contribuição na melhora da qualidade do trabalho.

À minha coorientadora Dra. Poliana Mendes por toda ajuda e pelas sugestões dadas ao trabalho, e ao professor Vinícius Lourenço Garcia de Brito e à Desirée pela contribuição com algumas das análises estatísticas.

A todos os colegas, amigos e companheiros de trabalho do Laboratório de Ecologia e Comportamento de Abelhas (LECA), mas em especial à Camila, à Laíce, ao Alexandre, ao Thiago Henrique, à Isabel, à Jaqueline, à Bárbara e à Nicole por toda ajuda em todas as etapas do estudo, pelas alegrias e frustrações compartilhadas, por deixar os meus dias mais leves e, principalmente, pela amizade. O LECA, desde sempre, mostrou-me o quanto é bom e importante o trabalho em equipe e o quanto somos mais fortes juntos.

A todos os agricultores, que permitiram e deram todo o suporte para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia e a todos os professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação de Recursos Naturais que fizeram parte do meu processo de formação nesses quatro anos. Obrigado por todo suporte dado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão da bolsa de doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro.

Aos meus familiares, aos meus amigos e a todos aqueles que contribuíram direta ou indiretamente para que eu chegasse até aqui.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO GERAL.....	1
A importância da polinização.....	1
Abelhas: sua relevância na polinização e o declínio de suas populações.....	3
Efeitos da estrutura da paisagem sobre as abelhas em cultivos agrícolas.....	4
Os metais pesados e sua contaminação em abelhas.....	6
O cultivo e a polinização do tomateiro.....	8
OBJETIVOS E APRESENTAÇÃO DA TESE.....	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	13
Capítulo 1: Natural vegetation remnants and association with other flowering crops increase bee visitation rate and bee species richness in tomato crops.....	24
ABSTRACT.....	25
1. Introduction.....	26
2. Materials and methods.....	29
2.1. Study area.....	29
2.2. Sampling of flower visiting bees.....	29
2.3. Landscape analyses.....	30
2.4. Statistical analyses.....	32
3. Results.....	32
3.1. Sampling of flower visiting bees.....	32
3.2. Landscape analyses.....	34
4. Discussion.....	37
Acknowledgments.....	40
References.....	41
Supplementary material.....	48
Capítulo 2: Serviços de polinização em cultivos abertos de tomate (<i>Solanum lycopersicum</i> L., Solanaceae): a importância das abelhas que não vibram.....	52
RESUMO.....	53
ABSTRACT.....	54
Introdução.....	55

Material e Métodos	57
Resultados	60
Discussão	64
Agradecimentos	69
Referências bibliográficas	70
Capítulo 3: Contaminação por metais pesados em abelhas que visitam o tomateiro (<i>Solanum lycopersicum</i> L., Solanaceae)	76
RESUMO	77
ABSTRACT	78
1. Introdução	78
2. Material e Métodos	81
2.1. Área de estudo.....	81
2.2. Coleta das abelhas e análise dos metais pesados.....	83
2.3. Análise dos dados.....	84
3. Resultados	85
4. Discussão	87
Agradecimentos	92
Referências bibliográficas	92
CONSIDERAÇÕES FINAIS	98

RESUMO

Bartelli, B. F. Serviços de polinização por abelhas no tomateiro (*Solanum lycopersicum* L., Solanaceae): a importância da conservação de áreas naturais e do manejo dos cultivos. Tese de doutorado em Ecologia e Conservação de Recursos Naturais. UFU. Uberlândia-MG. 98 p.

As alterações na paisagem resultantes do uso intensivo do solo, com a consequente perda de hábitat e fragmentação, e a contaminação por metais pesados são consideradas umas das principais ameaças às abelhas e aos serviços de polinização que elas prestam. O objetivo geral deste trabalho foi avaliar os serviços de polinização prestados por esses insetos em cultivos abertos de tomate, buscando verificar fatores que influenciam a presença e manutenção desses polinizadores nos cultivos e possíveis causas do declínio dos mesmos. O estudo foi desenvolvido em 10 cultivos comerciais de tomate localizados na região do Triângulo Mineiro (sudeste do Brasil). Foram avaliados: a abundância e a riqueza de espécies de abelhas visitantes florais; seu comportamento de coleta de pólen nas flores; a paisagem de entorno e o manejo dos cultivos; a qualidade dos frutos resultantes da polinização adicional efetuada por abelhas em geral e exclusivamente por espécies que não realizam *buzz pollination*; e a concentração de metais pesados em operárias campeiras de *Apis mellifera* que visitam as flores do tomateiro. Um total de 2330 abelhas pertencentes a 24 espécies foram amostradas. Áreas de vegetação nativa no entorno dos cultivos e a associação a outras culturas com flores afetaram positivamente a taxa de visitação e a riqueza de abelhas, mostrando a importância da conservação de remanescentes de vegetação natural e do tipo de manejo realizado na cultura do tomate. Frutos com mais sementes, maiores e mais pesados foram gerados com as visitas das abelhas nas flores, reforçando a relevância dos serviços de polinização prestados por elas no tomateiro, e espécies que não realizam *buzz pollination* se mostraram atuar como polinizadores. As concentrações médias de metais pesados encontrados em *A. mellifera* foram altas, indicando que as práticas agrícolas podem ser determinantes no grau de contaminação por esses elementos em abelhas que visitam o tomateiro. Todos esses resultados evidenciam a importância da diversidade de abelhas e da conscientização dos agricultores quanto à adoção de práticas amigáveis aos polinizadores.

Palavras-chave: Polinizadores, paisagem, comportamento, *buzz pollination*, metais pesados.

ABSTRACT

Bartelli, B. F. Pollination services provided by bees in tomato (*Solanum lycopersicum* L., Solanaceae): the importance of conservation of natural areas and crop management. Doctoral thesis on Ecology and Conservation of Natural Resources. UFU. Uberlândia-MG. 98 p.

Landscape changes resulting from intensive land use, with consequent loss of habitat and fragmentation, and heavy metal contamination are considered major threats to bees and pollination services provided by them. The overall goal of this study was to evaluate pollination services provided by bees in open tomato crops, seeking to verify factors that influence the presence and maintenance of these pollinators in tomato crops and possible causes of their decline. The research was conducted in 10 commercial tomato fields located in the Triângulo Mineiro region (Southeastern Brazil). It was evaluated: abundance and species richness of flower visiting bees; their pollen collection behavior in flowers; the surrounding landscape of tomato crops and crop management; quality of fruits resulting from the additional pollination performed by bees, in general, and exclusively by species that do not perform buzz pollination; and heavy metals concentration in *Apis mellifera* foragers that visit tomato flowers. A total of 2330 bees belonging to 24 species were sampled. Areas of native vegetation around crops and association with other flowering crops positively affected bee visitation rate and species richness, showing the importance of conservation of natural vegetation remnants and of management type of tomato crop. Fruits with more seeds, larger and heavier were produced with visits of bees in flowers, reinforcing the relevance of pollination services provided by them in tomato, and species that do not perform buzz pollination showed to act as pollinators. The average concentrations of heavy metals found in *A. mellifera* were high, indicating that agricultural practices can be determinant in the degree of contamination by these elements in bees that visit tomato flowers. All of these results highlight the importance of bee diversity and farmers' awareness of the adoption of pollinator friendly practices.

Key words: Pollinators, landscape, behavior, buzz pollination, heavy metals.

INTRODUÇÃO GERAL¹

A importância da polinização

Os ecossistemas são formados por várias espécies de organismos que se relacionam direta ou indiretamente. Essas interações podem resultar em interdependência, danos ou ganhos de formas distintas para cada espécie avaliada (Ricklefs, 2010). No entanto, como resultado do rápido processo de crescimento da população humana e diante da ampliação das áreas de cultivo para uma maior produção de alimentos, muitas áreas naturais têm sido amplamente devastadas, desestabilizando diversas redes de interações ecológicas, redes estas mantenedoras da diversidade biológica. Além disso, como resultado do manejo de áreas agrícolas, o uso de agrotóxicos tem sido feito de forma acentuada, afetando drasticamente as comunidades naturais (Imperatriz-Fonseca, 2005).

Dessa maneira, a ação do homem na biosfera tem impactado muito os ecossistemas. E isso tem ocasionado, por exemplo, uma diminuição na capacidade que esses ecossistemas têm de fornecer serviços essenciais para a sobrevivência das espécies, como a do próprio ser humano (Imperatriz-Fonseca, 2005).

Os serviços ecossistêmicos são definidos como os benefícios providos pelos organismos que interagem nos ecossistemas (Daily, 1997). Dentre eles, a polinização, que é o processo de transferência dos grãos de pólen das anteras para o estigma da flor, constitui um serviço chave. Por ser importante para a reprodução sexuada das plantas, a polinização contribui para a integridade da maioria dos ecossistemas terrestres ao manter uma rede de interações entre animais e plantas (Yamamoto, 2009), além de ser fundamental para a produção de biocombustíveis (Durán et al., 2010) e para a agricultura (Ricketts et al., 2008). Tem se

¹ A formatação desta seção obedece parcialmente às normas do periódico *Agriculture, Ecosystems and Environment*

mostrado que grande parte da produção de alimentos depende direta ou indiretamente da polinização e que as culturas dependentes de polinizadores estão aumentando globalmente, principalmente nos países em desenvolvimento, como o Brasil (Aizen et al., 2009). Assim, a ausência desse serviço causaria um desequilíbrio ecossistêmico generalizado, afetando negativamente a reprodução sexuada e a diversidade genética de várias espécies vegetais e comprometendo, dessa forma, a produção de alimentos e produtos relacionados (Kremen, 2005).

Além disso, especificamente sobre a polinização biótica, um ponto relevante é que ela contribui para a manutenção de uma dieta equilibrada em termos nutricionais para o homem. Embora muitos cultivos agrícolas mundiais fontes de macronutrientes, como mandioca, milho, batata, arroz, trigo e inhame, não dependam de polinização mediada por insetos (Eilers et al., 2011; Giannini et al., 2015; Welch e Graham, 1999), estima-se que 70% das culturas fontes de micronutrientes (vitaminas, por exemplo) dependem da polinização por animais para sua produção (Eilers et al., 2011). Micronutrientes são fundamentais para que o ser humano tenha uma dieta saudável, e a deficiência desses nutrientes pode causar a “fome oculta” (*Hidden Hunger*), uma desordem nutricional que afeta mais de dois bilhões da população mundial e que apresenta complicações de ordem física, mental e cognitiva (Welch e Graham, 1999).

Com o intuito de ressaltar a necessidade da manutenção dos serviços de polinização, valores econômicos têm sido amplamente atribuídos a eles (Gallai et al., 2009; Kremen e Ostfeld, 2005). Estimativas monetárias já mostraram que os serviços ecossistêmicos geram, anualmente, cerca de 33 trilhões de dólares no mundo, sendo a polinização responsável por 117 bilhões desse valor (Costanza et al., 1997). Ainda nesse contexto, a polinização, especialmente a mediada por insetos, mostra-se como um serviço essencial, pois regula uma gama de benefícios diretos e indiretos à sociedade humana (Fisher et al., 2009), além de ser responsável por aproximadamente 35% da produção agrícola mundial (Klein et al., 2007) e ter um valor

estimado para a agricultura em 400 milhões de libras por ano no Reino Unido (Post, 2010) e em 153 bilhões de euros por ano no mundo todo (Gallai et al., 2009). Esses dados reforçam a importância dos serviços ecossistêmicos em geral e, em específico, da polinização. No entanto, vale lembrar que os valores econômicos estimados para esses serviços devem ser utilizados como uma ferramenta nas práticas conservacionistas, auxiliando na conscientização e na tomada de decisões de políticas ambientais e sociais, e não como um fim em si mesmo (Daily et al., 2000; Gallai et al., 2009; Yamamoto, 2009).

Abelhas: sua relevância na polinização e o declínio de suas populações

Dentre os polinizadores, merecem destaque as abelhas, pois esses insetos dependem exclusivamente de recursos florais para alimentação dos adultos e da cria, além de apresentarem constância floral durante o forrageamento (Rasmussen et al., 2010). A dependência e a consequente fidelidade dos polinizadores em relação às flores, especialmente a das abelhas, foi um dos fatores de maior importância na diversificação das Angiospermas (Eriksson e Bremer, 1992). Além disso, esses insetos exercem um papel fundamental em diversos ecossistemas, uma vez que são os principais responsáveis pela polinização de muitas espécies de plantas nativas e cultivadas, garantindo a manutenção da variabilidade genética das primeiras e a produtividade e qualidade dos frutos das últimas (Kremen, 2005).

Estima-se que, de um total de 40.000 espécies de polinizadores, 20.000 sejam abelhas (Michener, 2007) e que 73% das espécies vegetais cultivadas no mundo sejam polinizadas por esses insetos (FAO, 2004). No entanto, nos últimos anos, diversos estudos têm apontado um declínio nas populações desses animais e de outros grupos de polinizadores tanto em áreas agrícolas quanto em áreas naturais (Biesmeijer et al., 2006; Potts et al., 2010). Assim, a Convenção Sobre a Diversidade Biológica e a Organização para Alimentação e Agricultura das

Nações Unidas estabeleceram, no ano de 2000, a Iniciativa Internacional para a Conservação e Uso Sustentável de Polinizadores (Imperatriz-Fonseca et al., 2006), cujo principal objetivo é delinear estratégias de conservação de polinizadores autóctones.

Diante de toda essa preocupação com o declínio dos polinizadores (abelhas, principalmente), pesquisadores do mundo todo têm destinado esforços para identificar quais são as ameaças a esse grupo e quantificar os impactos desse declínio nos serviços de polinização em sistemas naturais e agrícolas (Viana et al., 2012). Nesse contexto, muitos estudos têm apontado as alterações na paisagem resultantes do uso intensivo do solo, com a consequente perda de hábitat e fragmentação, como uma das principais ameaças aos polinizadores e aos serviços de polinização (Kremen et al., 2002; Le Féon et al., 2010; Steffan-Dewenter e Westphal, 2008; Winfree et al., 2009).

Efeitos da estrutura da paisagem sobre as abelhas em cultivos agrícolas

A paisagem pode ser definida como *“um mosaico heterogêneo formado por unidades interativas, sendo esta heterogeneidade existente para pelo menos um fator, segundo um observador e numa determinada escala de observação”* (Metzger, 2001). A ecologia de paisagem corresponde, então, ao estudo de como a estrutura da paisagem - e suas alterações - afeta - os processos que determinam - a abundância e distribuição dos organismos, visto que a estrutura apresenta dois componentes: a composição (quais unidades, por exemplo, tipos de hábitat, compõem a paisagem e em que proporção) e a configuração (como essas unidades se distribuem espacialmente) (Fahrig, 2005; Metzger, 2001).

Dentre os fatores responsáveis pelas alterações na estrutura da paisagem nos ecossistemas terrestres, um dos principais é a intensificação das atividades agrícolas (principalmente para implantação de monoculturas) com a consequente perda de hábitat e

fragmentação (Tscharntke et al., 2005). Como já mencionado anteriormente, isso tem provocado uma diminuição nas populações de polinizadores, especialmente das abelhas, desestabilizando os serviços de polinização por elas prestados (Kremen et al., 2002; Winfree et al., 2009).

Dessa forma, dada a importância das abelhas e com a agricultura ficando cada vez mais dependente de polinizadores (Aizen et al., 2009), tornam-se fundamentais estudos que avaliem tanto a influência da paisagem quanto os impactos de suas mudanças sobre as populações desses insetos em cultivos agrícolas. Para várias culturas, fortes evidências do efeito da estrutura da paisagem na abundância e riqueza de abelhas já foram encontradas. Tem se mostrado, por exemplo, que a homogeneização da paisagem, com predominância de áreas agrícolas, afeta negativamente esses insetos através da perda de locais para nidificação, escassez de recursos florais e exposição a agrotóxicos (Bartomeus et al., 2014; Connelly et al., 2015).

Adicionalmente, estudos indicam também que a abundância e a riqueza de espécies de abelhas nos cultivos podem aumentar significativamente à medida que a distância até áreas naturais diminui, afetando, assim, positivamente a produção (Carvalho et al., 2010; Garibaldi et al., 2011; Klein, 2009; Steffan-Dewenter e Tscharntke, 1999). Isso acontece porque os remanescentes de vegetação natural oferecem locais para nidificação e reprodução, além de recursos alimentares para esses insetos (Steffan-Dewenter e Tscharntke, 1999). Assim, tais remanescentes, além de serem fontes de polinizadores, funcionam como um atrativo para aqueles que não nidificam nessas áreas, proporcionando recursos alternativos além daqueles oferecidos pelos cultivos.

Apesar de pesquisas abordando os efeitos da estrutura da paisagem sobre populações de abelhas terem aumentado nos últimos anos, há muito ainda a ser feito. Os dados disponíveis se concentram em um número reduzido de culturas, tais como café (De Marco e Coelho, 2004; Hipólito et al., 2018; Klein, 2009; Ricketts, 2004; Ricketts et al., 2004; Saturni et al., 2016),

maracujá (Yamamoto et al., 2012) e maçã (Blitzer et al., 2016). Pouco se sabe, entretanto, a respeito dos impactos da utilização da paisagem sobre os polinizadores na cultura do tomate (Franceschinelli et al., 2017; Gaglianone et al., 2015).

Além disso, estudos têm mostrado que o declínio populacional de abelhas não está associado somente a alterações na paisagem resultantes do uso intensivo do solo. Outros fatores incluem o uso indiscriminado de agrotóxicos (Alston et al., 2007; Brittain et al., 2010), a disseminação de doenças e parasitas (Colla et al., 2006; Goulson et al., 2015), a introgressão genética (Kraus et al., 2011) e, também, a contaminação por metais pesados (Kosior et al., 2007; Morón et al., 2012).

Os metais pesados e sua contaminação em abelhas

Atualmente, níveis crescentes de poluentes químicos são encontrados nos ecossistemas devido à urbanização, industrialização e às práticas agrícolas. Dentre esses poluentes, destacam-se os metais pesados por sua alta toxicidade e seus efeitos deletérios à saúde dos seres vivos (Serbula et al., 2013). Esses metais são utilizados como matéria-prima em diversas indústrias de bens de consumo e em fertilizantes agrícolas, além de estarem presentes na composição de vários produtos, como tintas, pilhas e agrotóxicos (Ribeiro-Filho et al., 2001).

Uma das principais propriedades dos metais pesados, também chamados de elementos traço, é a bioacumulação. Isto significa que tais elementos não são metabolizáveis, ou seja, organismos vivos não podem degradá-los, acumulando-se ao longo da cadeia alimentar (Serbula et al., 2013; Sun et al., 2010). Embora não sejam metabolizáveis, alguns desses metais são bioelementos, como cobre (Cu), ferro (Fe), zinco (Zn), manganês (Mn), cobalto (Co) e selênio (Se), sendo essenciais para diversas funções bioquímicas e fisiológicas nos organismos (Nikolić et al., 2016). O Fe, por exemplo, é importante na constituição da hemoglobina (Guyton,

1998), o Zn é fundamental para a formação da clorofila e o Cu para o metabolismo do nitrogênio nas plantas (Larcher, 2000) e favorecimento da catalisação da síntese de hemoglobina (Guyton, 1998). No entanto, altas concentrações desses elementos se tornam prejudiciais. Além disso, outros metais pesados, como cádmio (Cd), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), arsênio (As), cromo (Cr) e níquel (Ni), não possuem função dentro dos organismos e são extremamente tóxicos (Nikolić et al., 2016).

Dependendo do estado de oxidação, os metais pesados podem ser muito reativos, com sua toxicidade se manifestando de várias formas: (1) podem inativar muitas enzimas, (2) substituir íons metálicos essenciais em biomoléculas, levando à inibição ou perda de função das mesmas, e (3) interromper a homeostase redox na célula (Hossain et al., 2012; Tchounwou et al., 2012). Pouquíssimas evidências existem acerca dos efeitos da contaminação por metais pesados sobre os polinizadores, principalmente abelhas. Entretanto, alguns estudos já mostraram que: a contaminação por zinco (Zn) afeta direta e negativamente a sobrevivência de uma espécie de abelha solitária, *Osmia rufa* L. (Moroń et al., 2010); a exposição aos metais gera mudanças significativas na expressão gênica e na atividade enzimática das células em *Apis mellifera* L., 1758 (Nikolić et al., 2016); a contaminação por cádmio (Cd) altera a estrutura da fibra muscular de voo de operárias de *Bombus morio* (Swederus, 1787) (Abdalla et al., 2016); e o aumento da concentração de metais pesados provoca uma diminuição na abundância e diversidade de abelhas solitárias (Moroń et al., 2012).

Apesar da escassez de estudos relacionando os metais pesados e as abelhas, especialistas consideram a contaminação por esses elementos como uma das principais causas do declínio de populações de *Bombus* Latreille, 1802 na Europa (Kosior et al., 2007). Os metais pesados são regularmente encontrados no ar, na água e no solo. Dessa forma, as abelhas estão expostas a eles durante suas atividades de forrageamento, tanto diretamente, retendo, por exemplo, partículas atmosféricas nos pelos corporais, quanto indiretamente, sendo contaminadas por

meio de recursos alimentares (pólen e néctar) ou pela água (Johnson, 2014; Lambert et al., 2012). Assim, abelhas e as matrizes associadas (pólen, mel, cera e própolis) têm sido utilizadas para biomonitoramento de metais pesados (Formicki et al., 2013; Jones, 1987; Lambert et al., 2012; Marin et al., 2016) e estudos que avaliem a contaminação por esses metais em abelhas presentes em cultivos agrícolas, como o tomateiro, tornam-se extremamente importantes. Como mencionado anteriormente, esses elementos fazem parte da composição de agrotóxicos. Então, possivelmente, isso alertaria os agricultores sobre a adoção de práticas sustentáveis que visem à conservação dos polinizadores, especialmente nos cultivos de tomate.

O cultivo e a polinização do tomateiro

O tomateiro, *Solanum lycopersicum* L. (Solanaceae), é uma das plantas olerícolas mais difundidas no mundo, sendo cultivado em praticamente todas as regiões do planeta e sob diferentes sistemas de cultivo. O maior produtor mundial de tomate é a China, seguida pela Índia e pelos Estados Unidos, com o Brasil ocupando o 14º lugar (FAOSTAT, 2016). O tomate é um alimento amplamente consumido e de grande importância ao organismo humano, principalmente pela presença do licopeno, um antioxidante que combate os radicais livres e retarda o envelhecimento (Shami e Moreira, 2004).

Estima-se que a produção anual brasileira de tomate seja de três milhões de toneladas, dos quais 77% são destinados para o consumo in natura e o restante utilizado para o processamento da polpa (SEADE, 2003). Os principais estados brasileiros responsáveis por tal produção são Goiás, São Paulo e Minas Gerais (IBGE, 2016).

O tomate pode ser produzido em áreas de cultivo abertas ou fechadas, também chamadas de ambientes protegidos, casas de vegetação ou estufas. Em áreas abertas, no Brasil, essa espécie pode ser cultivada no sistema de monocultura. No entanto, uma prática comum de

pequenos agricultores é cultivá-la de forma mista, ou seja, com diversos outros tipos de culturas com flores (abobrinha, berinjela, jiló, pepino, pimentão, vagem, entre outras) ao lado ou ao redor do plantio de tomate. Isto faz com que esses pequenos agricultores não dependam exclusivamente da renda oriunda com a produção de tomate.

Devido à perecibilidade natural do tomateiro, que é afetado por um elevado número de pragas (nematódeos, ácaros e vários tipos de insetos, como lepidópteros, tripses, afídeos (pulgões) e moscas brancas - *Bemisia tabaci* Gennadius) e doenças (especialmente viroses), emprega-se, normalmente, uma grande quantidade de agrotóxicos nos cultivos, principalmente os das classes inseticidas e fungicidas (Latorraca et al., 2008). Geralmente, são realizadas pulverizações a cada três dias (ou menos), desde a emergência das plantas até a colheita, adotando-se um combate preventivo. Uma das principais causas do uso intensivo e indiscriminado de agrotóxicos é o medo que os agricultores têm de perder suas lavouras, uma vez que o investimento é muito alto (Filho et al., 2009).

O tomateiro é uma planta autofértil, suas flores são perfeitas, não produzem néctar e apresentam anteras poricidas. Quando cultivado em áreas abertas, a liberação do pólen pode ser realizada pelo vento e/ou por polinizadores naturais, principalmente abelhas, que têm livre acesso às flores (Free, 1993). Quanto ao cultivo em casas de vegetação, como alternativa para a ausência de vento e de polinizadores naturais, a polinização é, geralmente, realizada por meio do método mecânico de vibração das flores (Ilbi et al., 1994).

Embora seja autofértil, o tomateiro possui uma alta dependência de polinizadores, tanto para uma maior produção de sementes e frutos quanto para uma melhora na qualidade destes (Giannini et al., 2015). Isso acontece porque as visitas das abelhas nas flores melhoram a polinização (autopolinização ou polinização cruzada) ao aumentar a deposição de pólen no estigma (Greenleaf e Kremen, 2006; Silva-Neto et al., 2013). Assim, a utilização desses insetos para polinizar o tomateiro tem sido uma alternativa bastante explorada. Com o aperfeiçoamento

das técnicas de manejo, por exemplo, abelhas do gênero *Bombus*, com destaque para *Bombus terrestris* (Linnaeus, 1758), têm sido amplamente empregadas como polinizadores comerciais em casas de vegetação (Morandin et al., 2001). Em 2004, no mundo todo, 40.000 ha de plantas de tomate em estufas foram polinizadas por essas abelhas, gerando um valor estimado em €12.000 milhões (Velthuis e van Doorn, 2006). Outros polinizadores do tomateiro em casas de vegetação são: *Amegilla chlorocyanea* Cockerell, 1914 (Hogendoorn et al., 2006), abelhas dos gêneros *Xylocopa* (*Lestis*) Lepeletier & Serville, 1828 (Hogendoorn et al., 2000) e as espécies de abelha sem ferrão *Nannotrigona perilampoides* Cresson, 1878 (Cauich et al., 2004; Palma et al., 2008) e *Melipona quadrifasciata* Lepeletier, 1836 (Bartelli e Nogueira-Ferreira, 2014; Bispo dos Santos et al., 2009; Del Sarto et al., 2005; Hikawa e Miyanaga, 2009).

Em áreas de cultivo aberto de tomate, a contribuição e a importância dos serviços de polinização prestados por abelhas também já foram relatadas em alguns estudos (Deprá et al., 2014; Greenleaf e Kremen, 2006; Macias-Macias et al., 2009; Santos et al., 2014; Silva-Neto et al., 2013). Entretanto, em decorrência da presença de anteras poricidas nas flores, acreditava-se até então que, além do vento, a polinização do tomateiro em ambientes abertos fosse realizada somente por abelhas que apresentam o comportamento vibratório para coleta de pólen ou *buzz pollination*. Contudo, Santos et al. (2014) e observações preliminares mostraram que *Apis mellifera* e *Paratrigona lineata* (Lepeletier, 1836), duas espécies que não vibram para a coleta de pólen e que são bastante frequentes em cultivos de tomate, podem atuar como polinizadores do tomateiro em virtude do comportamento que exibem nas flores, conhecido como *milking*. Isso porque, durante o *milking*, que é a retirada de pólen das anteras com a glossa (“língua”), as abelhas eventualmente tocam o estigma. Dessa maneira, comprovar que essas espécies que apresentam esse tipo de comportamento são polinizadores efetivos do tomateiro, além de avaliar a contribuição do *milking* para essa cultura, representaria a quebra de um paradigma.

OBJETIVOS E APRESENTAÇÃO DA TESE

A região do Triângulo Mineiro se configura como um polo de produção de alimentos no cenário estadual. Dentre esses alimentos, o tomate se destaca, movimentando uma rica cadeia produtiva. O município de Araguari-MG, por exemplo, possui aproximadamente 98.487 ha de área agricultável e uma produção estimada de 70.631 toneladas de tomate por ano. Assim, diante da importância que essa cultura apresenta para a região, uma solicitação foi feita ao nosso grupo de pesquisa por um produtor e distribuidor de tomate da cidade de Araguari, requisitando os serviços de polinização por abelhas em cultivos abertos e fechados com o intuito de aumentar sua produtividade. A partir da necessidade de iniciar estudos nessa direção, parcerias de trabalho foram, então, estabelecidas entre o nosso grupo e diversos produtores de tomate da região. Desde então, pesquisas a respeito do papel das abelhas na polinização do tomateiro têm sido realizadas, gerando informações importantes que nos permitiram traçar questionamentos e hipóteses a serem investigadas, algumas delas presentes nesta tese.

Do início das pesquisas até o presente momento, uma vez que os estudos nos cultivos abertos continuam sendo feitos, tem se notado uma redução nas populações de abelhas que visitam o tomateiro. Além disso, percebeu-se também que: a abundância e a riqueza desses insetos são diferentes de acordo com a paisagem de entorno dos cultivos, principalmente quanto à presença de vegetação natural nesse entorno; e espécies de abelhas que não realizam *buzz pollination* são também importantes para a cultura do tomate. Nesse sentido, visando à conservação das abelhas e de áreas naturais, o objetivo geral da tese é avaliar os serviços de polinização prestados por esses insetos em cultivos abertos de tomate, buscando verificar fatores que influenciam a presença e manutenção desses polinizadores nos cultivos e possíveis causas do declínio dos mesmos.

A tese está estruturada em três capítulos, que são apresentados na forma de artigos. No capítulo 1, os objetivos foram: (1) identificar as abelhas visitantes florais em cultivos abertos de tomate; e (2) avaliar a influência da estrutura da paisagem de entorno e do manejo dos cultivos sobre a taxa de visitação e a riqueza de espécies de abelhas encontradas nos mesmos. As hipóteses testadas foram: (1) a taxa de visitação e a riqueza de abelhas diminuem à medida que a distância do remanescente de vegetação natural mais próximo aumenta, mas aumentam à medida que a proporção de vegetação natural e a heterogeneidade da paisagem do entorno aumentam; e (2) a taxa de visitação e a riqueza de abelhas são maiores nos plantios de tomate manejados de forma mista quando comparados à monocultura.

No segundo capítulo, visando reforçar a importância dos serviços de polinização prestados por abelhas no tomateiro e destacar o comportamento de visita das abelhas nas flores, os objetivos foram: (1) além de identificar as abelhas visitantes florais, analisar seu comportamento de coleta de pólen nas flores do tomateiro; (2) avaliar o quanto a polinização adicional efetuada pelas abelhas melhora a qualidade dos frutos; e (3) verificar se *Apis mellifera* e *Paratrigona lineata*, espécies muito frequentes nos cultivos e que não realizam *buzz pollination*, são polinizadores efetivos. Assim, as hipóteses foram: (1) a polinização adicional realizada pelas abelhas melhora a qualidade dos frutos, resultando, por exemplo, em tomates maiores; e (2) frutos originados exclusivamente de visitas de *A. mellifera* e *P. lineata* apresentam mais sementes quando comparados aos resultantes de tratamentos de exclusão das abelhas, comprovando que tais espécies são polinizadores efetivos do tomateiro.

Por fim, o terceiro capítulo visou: (1) avaliar se existe contaminação por metais pesados e qual a concentração desses metais em abelhas que visitam o tomateiro, utilizando, para isso, *A. mellifera* como modelo de estudo; e (2) verificar se existem diferenças nas concentrações desses elementos em operárias amostradas em distintos cultivos de tomate. Além de ser bastante frequente em cultivos de tomate, já existem protocolos bem definidos para *A. mellifera* em

relação à análise de metais pesados. Com isso, espera-se que sejam encontrados elevados níveis desses metais nas abelhas, uma vez que esses elementos fazem parte da composição de diversos agrotóxicos e que estes são aplicados indiscriminadamente na cultura do tomate.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdalla, F.C., Costa, M.J., Sampaio, G., Camargo, D.A., Pedrosa, M., Nogueira, F.L.A., 2016. Efeito do cádmio e do glifosato na musculatura de mamangavas. Rev. CTA. 3, 66-72. <https://doi.org/10.21674/2448-0479.32.447-471>
- Aizen, M.A., Garibaldi, L.A., Cunningham, S.A., Klein, A.M., 2009. How much does agriculture depend on pollinators? Lessons from longterm trends in crop production. Ann. Bot. 103, 2005-2010. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp076>
- Alston, D.G., Tepedino, V.J., Bradley, B.A., Toler, T.R., Griswold, T.L., Messinger, S.M., 2007. Effects of the insecticide phosmet on solitary bee foraging and nesting in orchards of Capitol Reef National Park, Utah. Environ. Entomol. 36, 811–816. <https://doi.org/10.1093/ee/36.4.811>
- Bartelli, B.F., Nogueira-Ferreira, F.H., 2014. Pollination Services Provided by *Melipona quadrifasciata* Lepeletier (Hymenoptera: Meliponini) in Greenhouses with *Solanum lycopersicum* L. (Solanaceae). Sociobiology 61, 510-516. <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v61i4.510-516>
- Bartomeus, I., Potts, S.G., Steffan-Dewenter, I., Vaissière, B.E., Woyciechowski, M., Krewenka, K.M., Tscheulin, T., Roberts, S.P.M., Szentgyörgyi, H., Westphal, C., Bommarco, R., 2014. Contribution of insect pollinators to crop yield and quality varies with agricultural intensification. PeerJ 328, 1-20. <https://doi.org/10.7717/peerj.328>

- Biesmeijer, J.C., Roberts, S.P.M., Reemer, M., Ohlemueller, R., Edwards, M., Peeters, T., Schaffers, A.P., Potts, S.G., Kleukers, R., Thomas, C.D., Settele, J., Kunin, W.E., 2006. Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands. *Science* 313, 351–354. <https://doi.org/10.1126/science.1127863>
- Bispo dos Santos, S.A., Roselino, A.C., Hrncir, M., Bego, L.R., 2009. Pollination of tomatoes by the stingless bee *Melipona quadrifasciata* and the honey bee *Apis mellifera* (Hymenoptera, Apidae). *Genet. Mol. Res.* 8, 751-757. <https://doi.org/10.4238/vol8-2kerr015>
- Blitzer, E.J., Gibbs, J., Park, M.G., Danforth, B.N., 2016. Pollination services for apple are dependent on diverse wild bee communities. *Agric. Ecosyst. Environ.* 221, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.004>
- Brittain, C., Bommarco, R., Vighi, M., Barmaz, S., Settele, J., Potts, S.G., 2010. The implication of an insecticide on insect flower visitation and pollination in an agricultural landscape. *Agric. Forest Entomol.* 12, 259–266. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2010.00485.x>
- Carvalho, L.G., Seymour, C.L., Veldtman, R., Nicolson, S.W., 2010. Pollination services decline with distance from natural habitat even in biodiversity-rich areas. *J. Appl. Ecol.* 47, 810–820. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01829.x>
- Cauich, O., Quezada-Euán, J.J.C., Macias-Macias, J.O., Reyes-Orecel, V., Medina-Peralta, S., Parra-Tabla, V., 2004. Behavior and Pollination Efficiency of *Nannotrigona perilampoides* (Hymenoptera: Meliponini) on Greenhouse Tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) in Subtropical México. *J. Econ. Entomol.* 97, 475-481. <https://doi.org/10.1093/jee/97.2.475>
- Colla, S.R., Otterstatter, M.C., Gegear, R.J., Thomason, J.D., 2006. Plight of the bumble bee: Pathogen spillover from commercial to wild populations. *Biol. Conserv.* 129, 461–467. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.11.013>

- Connelly, H., Poveda, K., Loeb, G., 2015. Landscape simplification decreases wild bee pollination services to strawberry. *Agric. Ecosyst. Environ.* 211, 51-56. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.05.004>
- Costanza, R., D'Arge, R., Degroot, R., Farber, S., Grasso, M., 1997. The value of the world's service and natural capital. *Nature* 387, 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Daily, G.C., 1997. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Island Press, Washington, DC.
- Daily, G.C., Söderqvist, T., Aniyar, S., Arrow, K., Dasgupta, P., Ehrlich, P., Folke, C., Jansson, A-M., Jansson, B-O., Kautsky, N., Levin, S., Lubchenco, J., Mäler, K-G., Simpson, D., Starrett, D., Tilman, D., Walker, B., 2000. The value of nature and the nature of value. *Science* 289, 395-396. <https://doi.org/10.1126/science.289.5478.395>
- De Marco, P., Coelho, F.M., 2004. Services performed by the ecosystem: forest remnants influence agricultural cultures pollination and production. *Biodivers. Conserv.* 13, 1245-1255. <https://doi.org/10.1023/B:BIOC.0000019402.51193.e8>
- Del Sarto, M.C.L., Peruquetti, R.C., Campos, L.A.O., 2005. Evaluation of the Neotropical Stingless Bee *Melipona quadrifasciata* (Hymenoptera: Apidae) as Pollinator of Greenhouse Tomatoes. *J. Econ. Entomol.* 98, 260-266. <https://doi.org/10.1093/jee/98.2.260>
- Deprá, M.S., Delaqua, G.C.G., Freitas, L., Gaglianone, M.C., 2014. Pollination deficit in open-field tomato crops (*Solanum lycopersicum* L., Solanaceae) in Rio de Janeiro state, Southeast Brazil. *J. Pollinat. Ecol.* 12, 1-8. [https://doi.org/10.26786/1920-7603\(2014\)7](https://doi.org/10.26786/1920-7603(2014)7)
- Durán, X.A., Ulloa, R.B., Carrillo, J.A., Contreras, J.L., Bastidas, M.T., 2010. Evaluation of yield component traits of honeybee pollinated (*Apis mellifera* L.) Rapeseed canola (*Brassica napus* L.). *Chil. J. Agr. Res.* 70, 309-314. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392010000200014>

- Eilers, E.J., Kremen, C., Greenleaf, S.S., Garber, A.K., Klein, A.M., 2011. Contribution of pollinator-mediated crops to nutrients in the human food supply. *PLoS One* 6, 1-6. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021363>
- Eriksson, O., Bremer, B., 1992. Polination systems, dispersal modes, life forms, and diversification rates in angiosperms families. *Evolution* 46, 258-266. <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.1992.tb02000.x>
- Fahrig, L., 2005. When is a landscape perspective important? In: Wiens, J.A., Moss, M.R. (Eds.), *Issues and Perspectives in Landscape Ecology*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 3-10. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511614415.002>
- [FAO] Food and Agriculture Organization, 2004. Conservation and management of pollinators for sustainable agriculture - the international response. In: Freitas, B.M., Pereira, J.O.P. (Eds.), *Solitary bees: conservation, rearing and management for pollination*. Imprensa Universitária, Fortaleza, Brasil.
- [FAOSTAT] Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database Results, 2016. Disponível em: <http://faostat.fao.org>. Acessado em: 30 dez. 2016.
- Filho, J.S.R., Marin, J.O.B., Fernandes, P.M., 2009. Os agrotóxicos na produção de tomate de mesa na região de Goianópolis, Goiás. *Pesq. Agropec. Trop.* 39, 307-316.
- Fisher, B., Turner, R.K., Morling, P., 2009. Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecol. Econ.* 68, 634–653. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.09.014>
- Formicki, G., Gren, A., Stawarz, R., Zysk, B., Gal, A., 2013. Metal content in honey, propolis, wax, and bee pollen and implications for metal pollution monitoring. *Pol. J. Environ. Stud.* 22, 99–106.
- Franceschinelli, E.V., Elias, M.A.S., Bergamini, L.L., Silva-Neto, C.M., Sujii, E.R., 2017. Influence of landscape context on the abundance of native bee pollinators in tomato crops

- in Central Brazil. *J. Insect. Conserv.* 21, 715-726. <https://doi.org/10.1007/s10841-017-0015-y>
- Free, J.B., 1993. *Insect pollination of crops*. Academic Press, Londres.
- Gaglianone, M.C., Campos, M.J.O., Franceschinelli, E., Deprá, M.S., Silva, P.N., Montagnana, P.C., Hautequestt, A.P., Moraes, M.C.M., Campos, L.A.O., 2015. Plano de manejo para os polinizadores do tomateiro. Funbio, Rio de Janeiro, Brasil.
- Gallai, N., Salles, J.M., Settele, J., Vaissiere, B.E., 2009. Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline. *Ecol. Econ.* 68, 810–821. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.06.014>
- Garibaldi, L.A., Steffan-Dewenter, I., Kremen, C., Morales, J.M., Bommarco, R., Cunningham, S.A., Carvalheiro, L.G., Chacoff, N.P., Dudenhöffer, J.H., Greenleaf, S. S., Holzschuh, A., Isaacs, R., Krewenka, K., Mandelik, Y., Mayfield, M.M., Morandin, L.A., Potts, S.G., Ricketts, T.H., Szentgyörgyi, H., Viana, B.F., Westphal, C., Winfree, R., Klein, A.M., 2011. Stability of pollination services decreases with isolation from natural areas despite honey bee visits. *Ecol. Lett.* 14, 1062–1072. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01669.x>
- Giannini, T.C., Cordeiro, G.D., Freitas, B.M., Saraiva, A.M., Imperatriz-Fonseca, V.L., 2015. The dependence of crops for pollinators and the economic value of pollination in Brazil. *J. Econ. Entomol.* 108, 849-857. <https://doi.org/10.1093/jee/tov093>
- Goulson, D., Nicholls, E., Botías, C., Rotheray, E.L., 2015. Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science* 347, 1-16. <https://doi.org/10.1126/science.1255957>
- Greenleaf, S.S., Kremen, C., 2006. Wild bee species increase tomato production and respond differently to surrounding land use in Northern California. *Biol. Conserv.* 13, 81-87. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.05.025>
- Guyton, A.C., 1998. *Fisiologia humana*. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro.

- Hikawa, M., Miyanaga, R., 2009. Effects of pollination by *Melipona quadrifasciata* (Hymenoptera: Apidae) on tomatoes in protected culture. *Appl. Entomol. Zool.* 44, 301-307. <https://doi.org/10.1303/aez.2009.301>
- Hipólito, J., Boscolo, D., Viana, B.F., 2018. Landscape and crop management strategies to conserve pollination services and increase yields in tropical coffee farms. *Agric. Ecosyst. Environ.* 256, 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.038>
- Hogendoorn, K., Gross, C.L., Sedgley, M., Keller, M.A., 2006. Increased tomato yield through pollination by native Australian blue-banded bees (*Amegilla chlorocyanea* Cockerell). *J. Econ. Entomol.* 99, 828-833. <https://doi.org/10.1093/jee/99.3.828>
- Hogendoorn, K., Steen, Z., Schwarz, M.P., 2000. Native Australian carpenter bees as a potential alternative to introducing bumble bees for tomato pollination in greenhouses. *J. Apicult. Res.* 39, 67-74. <https://doi.org/10.1080/00218839.2000.11101023>
- Hossain, M.A., Piyatida, P., da Silva, J.A.T., Fujita, M., 2012. Molecular mechanism of heavy metal toxicity and tolerance in plants: central role of glutathione in detoxification of reactive oxygen species and methylglyoxal and in heavy metal chelation. *J. Bot.* 2012, 1-37. <https://doi.org/10.1155/2012/872875>
- [IBGE] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2016. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acessado em: 30 dez. 2016.
- Ilbi, H., Boztok, K., Cockshull, K.E., Tuzel, Y., Gul, A., 1994. The effects of different truss vibration durations on the pollination and fruit set of greenhouse grown tomatoes. *Acta Hortic.* 366, 73-78. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1994.366.6>
- Imperatriz-Fonseca, V.L., 2005. Serviços aos ecossistemas, com ênfase nos polinizadores e polinização. Disponível em: <http://www.ib.usp.br/>. Acessado em: 07 abr. 2017.
- Imperatriz-Fonseca, V.L., Saraiva, A.M., De Jong, D., 2006. Information technology and pollinators initiatives. In: Imperatriz-Fonseca, V.L., Saraiva, A.M., De Jong, D. (Eds.),

Bees as pollinators in Brazil: assessing the status and suggesting best practices. Holos Editora, Ribeirão Preto, Brasil.

Johnson, R.M., 2014. Honey bee toxicology. *Annu. Rev. Entomol.* 60, 415-434.

<https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011613-162005>

Jones, K.C., 1987. Honey as an indicator of heavy metal contamination. *Water Air Soil Poll.* 33, 179-189. <https://doi.org/10.1007/BF00191386>

Klein, A.M., 2009. Nearby rainforest promotes coffee pollination by increasing spatio-temporal stability in bee species richness. *Forest Ecol. Manag.* 258, 1838-1845. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.05.005>

Klein, A.M., Vaissiere, B.E., Cane, J.H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S.A., Kremen, C., Tscharntke, T., 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *P. Roy. Soc. B-Biol. Sci.* 274, 303-313. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721>

Kosior, A., Celary, W., Olejniczak, P., Fijał, J., Król, W., Solarz, W., Płonka, P., 2007. The decline of the bumble bees and cuckoo bees (Hymenoptera: Apidae: Bombini) of Western and Central Europe. *Oryx* 41, 79–88. <https://doi.org/10.1017/S0030605307001597>

Kraus, F.B., Szentgyörgyi, H., Rozej, E., Rhode, M., Moroń, D., Woyciechowski, M., 2011. Greenhouse bumblebees (*Bombus terrestris*) spread their genes into the wild. *Conserv. Genet.* 12, 187–192. <https://doi.org/10.1007/s10592-010-0131-7>

Kremen, C., 2005. Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? *Ecol. Lett.* 8, 468–479. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00751.x>

Kremen, C., Ostfeld, R.S., 2005. A call to ecologists: measuring, analyzing, and managing ecosystem services. *Front. Ecol. Environ.* 3, 540–548. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2005\)003\[0540:ACTEMA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2005)003[0540:ACTEMA]2.0.CO;2)

- Kremen, C., Williams, N.M., Thorp, R.W., 2002. Crop pollination from native bees at risk from agricultural intensification. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 99, 16812–16816. <https://doi.org/10.1073/pnas.262413599>
- Lambert, O., Piroux, M., Puyo, S., Thorin, C., Larhantec, M., Delbac, F., Pouliquen, H., 2012. Bees, honey and pollen as sentinels for lead environmental contamination. *Environ. Pollut.* 170, 254-259. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.07.012>
- Larcher, W., 2000. *Ecofisiologia vegetal*. Rima, São Paulo.
- Latorraca, A., Marques, G.J.G., Sousa, K.V., Fornés, N.S., 2008. Agrotóxicos utilizados na produção do tomate em Goiânia e Goianópolis e efeitos na saúde humana. *Com. Ciências Saúde* 19, 365-374.
- Le Féon, V., Schermann-Legionnet, A., Delettre, Y., Aviron, S., Billeter, R., Bugter, R., Hendrickx, F., Burel, F., 2010. Intensification of agriculture, landscape composition and wild bee communities: a large study in four European countries. *Agric. Ecosyst. Environ.* 137, 143–150. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.01.015>
- Macias-Macias, O., Chuc, J., Ancona-Xiu, P., Cauich, O., Quezada-Euán, J.J.G., 2009. Contribution of native bees and Africanized honey bees (Hymenoptera: Apoidea) to Solanaceae crop pollination in tropical Mexico *J. Appl. Entomol.* 133, 456-465. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2009.01399.x>
- Matin, G., Kargarb, N., Buyukisik, H.B., 2016. Bio-monitoring of cadmium, lead, arsenic and mercury in industrial districts of Izmir, Turkey by using honey bees, propolis and pine tree leaves. *Ecol. Eng.* 90, 331–335. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.035>
- Metzger, J.P., 2001. O que é ecologia de paisagens? *Biota Neotrop.* 1, 1-9. <https://doi.org/10.1590/S1676-06032001000100006>
- Michener, C.D., 2007. *The bees of the world*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore.

- Morandin, L.A., Lavery, T.M., Kevan, P.G., 2001. Effect of bumble bee (Hymenoptera: Apidae) pollination intensity on the quality of greenhouse tomatoes. *J. Econ. Entomol.* 94, 178-179. <https://doi.org/10.1603/0022-0493-94.1.172>
- Moroń, D., Grześ, I.M., Skórka, P., Szentgyörgyi, H., Laskowski, R., Potts, S.G., Woyciechowski, M., 2012. Abundance and diversity of wild bees along gradients of heavy metal pollution. *J. Appl. Ecol.* 49, 118-125. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02079.x>
- Moroń, D., Szentgyörgyi, H., Grześ, I., Wantuch, M., Rożej, E., Laskowski, R., Woyciechowski, M., 2010. The effect of heavy metal pollution on development of wild bees. In: Settele, J., Penev, L.D., Georgiev, T.A., Grabaum, R., Grobelnik, V., Hammen V. (Eds.), *Atlas of Biodiversity Risks – From Europe to the Globe, From Stories to Maps*. Pensoft, Sofia & Moscow.
- Nikolić, T.V., Kojić, D., Orčić, S., Batinić, D., Vukašinić, E., Blagojević, D.P., Purać, J., 2016. The impact of sublethal concentrations of Cu, Pb and Cd on honey bee redox status, superoxide dismutase and catalase in laboratory conditions. *Chemosphere* 164, 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.077>
- Palma, G., Quezada-Euán, J.J.G., Meléndez-Ramírez, V., Irigoyen, J., Valdovinos-Nunes, G.R., Rejón, M., 2008. Comparative efficiency of *Nannotrigona perilampoides*, *Bombus impatiens* (Hymenoptera: Apoidea), and mechanical vibration on fruit production of enclosed habanero pepper. *J. Econ. Entomol.* 101, 132-138. <https://doi.org/10.1093/jee/101.1.132>
- Post, 2010. *Insect Pollination POST Note 348*. Parliamentary Office of Science and Technology, London.

- Potts, S.G., Biesmeijer, J.C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O., Kunin, W.E., 2010. Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends Ecol. Evol.* 25, 345-353. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.01.007>
- Rasmussen, C., Nieh, J.C., Biesmeijer, J.C., 2010. Foraging biology of neglected bee pollinators. *Psyche* 2010, 1-2. <https://doi.org/10.1155/2010/134028>
- Ribeiro-Filho, M.R., Siqueira, J.O., Curi, N., Simão, J.B.P., 2001. Fracionamento e biodisponibilidade de metais pesados em solo contaminado, incubado com materiais orgânicos e inorgânicos. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 25, 495-507. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000200025>
- Ricketts, T.H., 2004. Tropical forest fragments enhance pollinator activity in nearby coffee crops. *Conserv. Biol.* 18, 1262-1271. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00227.x>
- Ricketts, T.H., Daily, G.C., Ehrlich, P.R., Michener, C.D., 2004. Economic value of tropical forest to coffee production. *Proc. Natl. Acad. Sci U. S. A.* 101, 12579-12582. <https://doi.org/10.1073/pnas.0405147101>
- Ricketts, T.H., Regetz, J., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S.A., Kremen, C., Bogdanski, A., Gemmill-Herren, B., Greenleaf, S.S., Klein, A.M., Mayfield, M.M., Morandin, L.A., Ochieng, A., Viana, B.F., 2008. Landscape effects on crop pollination services: are there general patterns? *Ecol. Lett.* 11, 499–515. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01157.x>
- Ricklefs, R.E., 2010. *A economia da natureza*, 6ª ed. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro.
- Santos, A.O.R., Bartelli, B.F., Nogueira-Ferreira, F.H., 2014. Potential pollinators of tomato, *Lycopersicon esculentum* (Solanaceae), in open crops and the effect of a solitary bee in fruit set and quality. *J. Econ. Entomol.* 107, 987-994. <https://doi.org/10.1603/EC13378>

- Saturni, F.T., Jaffé, R., Metzger, J.P., 2016. Landscape structure influences bee community and coffee pollination at different spatial scales. *Agric. Ecosyst. Environ.* 235, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.10.008>
- [SEADE] Fundação Seade: Sensor Rural, 2011. Disponível em: <<http://www.seade.gov.br>>. Acessado em: 30 mar. 2011.
- Serbula, S.M., Kalinovic, T.S., Ilic, A.A., Kalinovic, J.V., Steharnik, M.M., 2013. Assessment of airborne heavy metal pollution using *Pinus* spp. and *Tilia* spp. *Aerosol Air Qual. Res.* 13, 563–573. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.06.0153>
- Shami, N.J.I.E., Moreira, E.A.M., 2004. Licopeno como agente antioxidante. *Rev. Nutr.* 17, 227-236. <https://doi.org/10.1590/S1415-52732004000200009>
- Silva-Neto, C.M., Lima, F.G., Gonçalves, B.B., Bergamini, L.L., Bergamini, B.A.R., Elias, M.A.S., Franceschinelli, E.V., 2013. Native bees pollinate tomato flowers and increase fruit production. *J. Pollin. Ecol.* 11, 41-45. [https://doi.org/10.26786/1920-7603\(2013\)4](https://doi.org/10.26786/1920-7603(2013)4)
- Steffan-Dewenter, I., Tschardtke, T., 1999. Effects of habitat isolation on pollinator communities and seed set. *Oecologia* 121, 432-440.
- Steffan-Dewenter, I., Westphal, C., 2008. The interplay of pollinator diversity, pollination services and landscape change. *J. Appl. Ecol.* 45, 737-741. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2008.01483.x>
- Sun, F., Wen, D., Kuang, Y., Li, J., Li, J., Zuo, W., 2010. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in needles of Masson pine (*Pinus massoniana* L.) growing nearby different industrial sources. *J. Environ. Sci.* 22, 1006–1013. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60211-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60211-4)
- Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patlolla, A.K., Sutton, D.J., 2012. Heavy metal toxicity and the environment. *EXS* 101, 133-164. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6

- Tscharntke, T., Klein, A.M., Kruess, A., Steffan-Dewenter, I., Thies, C., 2005. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity – ecosystem service management. *Ecol. Lett.* 8, 857–874. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00782.x>
- Velthuis, H.H.W., van Doorn, A., 2006. A century of advances in bumblebee domestication and the economic and environmental aspects of its commercialization for pollination. *Apidologie* 37, 421–451. <https://doi.org/10.1051/apido:2006019>
- Viana, B.F., Boscolo, D., Neto, E.M., Lopes, L.E., Lopes, A.V., Ferreira, P.A., Pigozzo, C.M., Primo, L.M., 2012. How well do we understand landscape effects on pollinators and pollination services? *J. Pollinat. Ecol.* 7, 31-41. [https://doi.org/10.26786/1920-7603\(2012\)2](https://doi.org/10.26786/1920-7603(2012)2)
- Welch, R.M., Graham, R.D.A., 1999. A new paradigm for world agriculture: meeting human needs: Productive, sustainable, nutritious. *Field Crop. Res.* 60, 1-10. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00129-4](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00129-4)
- Winfree, R., Aguilar, R., Vazquez, D.P., LeBuhn, G., Aizen, M.A., 2009. A meta-analysis of bees' responses to anthropogenic disturbance. *Ecology* 90, 2068–2076. <https://doi.org/10.1890/08-1245.1>
- Yamamoto, M., 2009. Polinizadores do maracujá-amarelo (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* Deneger, Passifloraceae) no Triângulo Mineiro: riqueza de espécies, frequência de visitas e a conservação de áreas naturais. Tese (Doutorado em Ecologia e Conservação de Recursos Naturais) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.
- Yamamoto, M., Silva, C.I., Augusto, S.C., Barbosa, A.A.A., Oliveira, P.E., 2012. The role of bee diversity in pollination and fruit set of yellow passion fruit (*Passiflora edulis* forma *flavicarpa*, Passifloraceae) crop in Central Brazil. *Apidologie* 43, 515-526. <https://doi.org/10.1007/s13592-012-0120-6>

Capítulo 1

Natural vegetation remnants and association with other flowering crops increase bee visitation rate and bee species richness in tomato crops

Natural vegetation remnants and association with other flowering crops increase bee visitation rate and bee species richness in tomato crops

*O capítulo foi preparado para submissão na revista **Agriculture, Ecosystems and Environment** e a formatação obedece parcialmente às normas do periódico.*

ABSTRACT - Pollination is an essential ecosystem service and, among pollinators, bees stand out. Landscape changes resulting from intensive land use, with a consequent habitat loss and fragmentation, are considered one of the main threats to bee populations, but the impacts of landscape use on pollinators in tomato crops are still poorly known. This study aimed to identify flower visiting bees of tomato crops and verify if landscape structure affects bee visitation rate and species richness. We analyzed specifically the influence of proportion of natural vegetation in landscapes surrounding tomato crops, landscape heterogeneity, distance from the nearest natural vegetation remnant, and tomato crop management (mixed, in association with other flowering crops, or monoculture). The research was conducted in 10 commercial tomato fields located in the Triângulo Mineiro region (Southeastern Brazil), five with mixed management and another five in monoculture system. Landscape structure was analyzed in circular areas with 500, 1000 and 1500 m radius. *Paratrigona lineata* was the most abundant species (54.81%), followed by the group *Exomalopsis analis/minor* (20.9%), *Apis mellifera* (14.16%) and *Melipona quinquefasciata* (5.11%). Management type of tomato crop was the best predictor to explain bee metrics, and bee visitation rate and species richness were, respectively, 238% and 92% higher in tomato crops managed in the mixed system when compared to monoculture. Bee species richness was positively associated with proportion of natural vegetation and negatively associated with distance from the nearest natural vegetation remnant. Our results show the importance of (1) conservation of natural vegetation remnants in the surrounding

landscape of tomato crops and (2) association with other flowering crops for an increase in bee visitation rate and number of bee species that visit tomato flowers.

Key words: Apoidea, fragmentation, landscape, landscape structure, mixed farming, monoculture, pollination.

1. Introduction

Pollination is a key ecosystem service. It is important for sexual reproduction and fruit production in plant species, being essential for the maintenance of network of animal-plant interactions, agriculture (Ricketts et al., 2008) and biofuels production (Durán et al., 2010). It has been shown that most food production across the world depends directly or indirectly on pollination and that pollinator-dependent crops are increasing globally, especially in developing countries such as Brazil (Aizen et al., 2009).

Among pollinators, bees are prominent, since they depend exclusively on floral resources for their own feeding and breeding (Rasmussen et al., 2010). These insects play a key role in several ecosystems, because they are responsible for pollinating many species of native and cultivated plants, ensuring maintenance of genetic variability in the former and the productivity and fruits quality in the latter (Kremen, 2005). It is estimated that 73% of cultivated plant species worldwide are pollinated by bees (FAO, 2004). However, in recent years, several studies have pointed to a decline in bee's populations as well as other pollinators both in agricultural and in natural areas (Biesmeijer et al., 2006; Potts et al., 2010). Thus, the Convention on Biological Diversity and the Food and Agriculture Organization of the United Nations created the International Initiative for Conservation and Sustainable Use of Pollinators

(Imperatriz-Fonseca et al., 2006), whose main goal is to establish conservation strategies of native pollinators.

Faced with all this concern about pollinators decline (bees, mainly), researchers around the world are aiming to identify threats to pollinators and to quantify the impacts of this decline on pollination services in natural and agricultural systems (Viana et al., 2012). In this context, many studies have pointed to landscape changes resulting from intensive land use with a consequent habitat loss and fragmentation as one of the main threats to pollinators and pollination services, combined with the indiscriminate use of pesticides (Kremen et al., 2002; Steffan-Dewenter and Westphal, 2008; Winfree et al., 2009).

For several crops, strong evidences of the effect of landscape structure on bee abundance and species richness have been found (Viana et al., 2012). Studies indicate, for example, that landscape homogenization, with predominance of agricultural areas, negatively affects bees through loss of nesting habitat, lack of floral resources and pesticide exposure (Bartomeus et al., 2014; Connelly et al., 2015). In addition, bee abundance and species richness in crops can increase significantly as the distance to natural areas decreases, thus positively affecting crop production (Carvalho et al., 2010; Garibaldi et al., 2011; Klein, 2009; Steffan-Dewenter and Tschanrtke, 1999). This is because natural vegetation remnants provide nesting sites, breeding sites and/or complementary feeding resources for bees (Steffan-Dewenter and Tschanrtke, 1999). Thus, these remnants are sources of bees and attract those that do not nest in these areas, providing alternative and complementary resources beyond those offered by crops.

Although research on the effects of landscape structure on bees has increased in recent years, there is still much to be done. Available data are concentrated on limited types of crops, such as coffee (De Marco and Coelho, 2004; Hipólito et al., 2018; Klein, 2009; Ricketts, 2004; Ricketts et al., 2004; Saturni et al., 2016), passion fruit (Yamamoto et al., 2012) and apple (Blitzer et al., 2016). Little is known about the impacts of landscape use on pollinators in tomato

crops (Franceschinelli et al., 2017). Tomato, *Solanum lycopersicum* L. (Solanaceae), is one of the most widespread vegetable crops in the world. It is cultivated in practically all regions and under different cultivation and management systems. The world's largest tomato producer is China, followed by India and USA, with Brazil occupying the 14th position (FAOSTAT, 2016).

Tomato is a self-fertile plant, however, it has high dependence on pollinators for fruit set or seed set (Giannini et al., 2015), since visits of bees improve pollination (self-pollination or cross-pollination) by increasing pollen deposition on the stigma of flowers (Greenleaf and Kremen, 2006). Tomato flowers are bisexual, do not produce nectar and present poricidal anthers. In Brazil, this species can be cultivated in the monoculture system, although a common practice of small farmers is to cultivate it in a mixed way, that is, with other types of flowering crops (zucchini, eggplant, scarlet eggplant, cucumber, pepper, pod, among others) next to or around the tomato crop. Thus, small farmers do not depend only on income from tomato production.

This study aimed to identify flower visiting bees of tomato crops and to evaluate the influence of landscape structure on bee visitation rate and species richness. Hypotheses tested were: (1) bee visitation rate and species richness decrease as distance from the nearest natural vegetation remnant increases, but increase as (2) proportion of natural vegetation and (3) landscape heterogeneity increase; (4) bee visitation rate and species richness are higher in tomato crops managed in a mixed way when compared to monoculture.

2. Materials and methods

2.1. Study area

The study was conducted in the Triângulo Mineiro region (Southeastern Brazil), which is configured as a hub of food production in Minas Gerais state. The regional climate is marked by two distinct seasons, the rainy season that extends from October to March and the dry season, from April to September. Annual rainfall varies between 1,160 and 1,460 mm/year and the average annual temperature is between 23 and 25°C, being uniform throughout the year (Alves and Rosa, 2008).

The study was conducted between January 2015 and September 2016 in 10 commercial tomato fields of the varieties Carina, Débora and Saladete. Four areas were located in the municipality of Araguari-MG (18°38'45.74"S / 48°11'37.88"W), two in Cascalho Rico-MG (18°34'56.61"S / 47°52'56.14"W) and four in the municipality of Indianópolis-MG (19°02'4.59"S / 47°54'57.24"W). The areas were embedded in the Cerrado biome and were at least about three kilometers apart from each other. The management plan and frequency of pesticides application were similar and all crops were sampled under the same weather conditions (sunny days with temperatures above 20°C). In five areas, tomato crops were managed in a mixed way, and in the other five as a monoculture.

2.2. Sampling of flower visiting bees

To survey the community of flower visiting bees of tomato, one sampling was carried out in each crop during the flowering period and when plants were at least 1.5 m high. In all areas, sampling was carried out in two adjacent transects of 100 m located between the

geometric center of the crop and its border (the closest to a natural vegetation remnant, methodology adapted from Vaissière et al., 2011). Each transect was sampled by one collector. Every hour, from 7 am to 2 pm, 30 min were intended to record (collection - only when visual identification was not possible - or observation) flower visiting bees. During registration, for all areas, the species *Exomalopsis analis* Spinola, 1853 and *Exomalopsis minor* Schrottky, 1910 were grouped and counted together due to the difficulty of collecting all the individuals and the difficulty of distinguishing the two species with the naked eye, since they differ only in their pattern of punctuation of the thorax integument (Silveira et al., 2002).

Bees were collected with entomological nets and killed in lethal chambers containing ethyl acetate. Subsequently, the individuals were duly pinched, identified with the best available identification keys of Brazilian bees (such as Silveira et al., 2002) and deposited in the collection of Museu de Biodiversidade do Cerrado (MBC) of Universidade Federal de Uberlândia (UFU), in Laboratório de Ecologia e Comportamento de Abelhas (LECA).

In each tomato crop, the number of flowers per plant was counted in 20 different individuals randomly selected by the collectors along the transects. The mean number of flowers of these individuals was multiplied by the total number of plants in the transects to estimate the total number of flowers. Bee visitation rate was calculated as the number of visits by the number of flowers by the observation time (Winfrey et al., 2007), which corresponded to the 3 h and 30 min of registration in each area.

2.3. Landscape analyses

Landscapes were defined as the surrounding area of each tomato crop in circles of 500, 1000 and 1500 m radius from the sampling point (center of the transects). This multi-scale approach was chosen to reduce type II error of not finding a response to landscape structure due

to a misinterpretation of the adequate landscape size for bees in this area. The choice of those three scales was based on bee foraging ranges, considering that they may vary according to body size (Greenleaf et al., 2007) and that most bees that visit tomato flowers are small (Santos et al., 2014).

Land use was classified in loco and manually using tools of ArcGIS 10.1 software (ESRI, 2012), through high-resolution images (ArcGIS 10.1 basemap imagery from the DigitalGlobe satellites for 2016, 1 m resolution). The chosen scale for classification was 1:5,000, considered adequate for the desired degree of refinement. The number of land use classes to be identified in a landscape depends on how organisms studied (in this case, bees) respond to these different physiognomies (Ribeiro et al., 2012). Thus, the classes established in this study were: water (natural or artificial water bodies), banana, coffee, sugarcane, constructions (characterized by cities and structures in rural environments), various crops (small flowering crops used for subsistence or local trade), guariroba, vegetables (crop areas for leaf trade), cassava, corn, natural (native vegetation remnant, considering all phytophysionomies of Cerrado), pasture, road, silviculture (areas intended for extraction of wood, oil or latex), soybean, exposed soil (ravines or areas without vegetation), sorghum and tomato (evaluated crop area).

For each crop, distance (in meters) between the sampling point (center of the transects) and the nearest border of the nearest natural vegetation remnant was obtained through ArcGIS 10.1 software. Analysis of other landscape metrics, as landscape heterogeneity (Shannon diversity index for all land use classes) and natural vegetation area (proportion was calculated by dividing the area occupied by the natural class by the area occupied by the entire landscape) were performed in the three scales through Patch Analyst, an extension of ArcGIS (Elkie et al., 1999). Management type of tomato crop, either mixed or monoculture, was determined in loco at the time of sampling.

2.4. Statistical analyses

A model selection approach was done using the Akaike Information Criterion (AIC) for each landscape scale (500, 1000 and 1500 m). We used the bee metrics (bee visitation rate and species richness) as response variables and the landscape metrics (proportion of natural vegetation – Prop; landscape heterogeneity – Heterog; distance from the nearest natural vegetation remnant – Dist; and tomato crop management – Crop Manag) as predictor variables. Distance values were converted to logarithm to meet the normality assumption. Among all models with $\Delta AIC < 2$, by parsimony, models with the lowest number of variables were selected. All analyses were performed in R environment (R Development Core Team, 2015) using the package *bbmle* (Bolker, 2011).

3. Results

3.1. Sampling of flower visiting bees

A total of 2330 bees belonging to 24 species and three families were sampled, and Apidae family was the most abundant. *Paratrigona lineata* (Lepeletier, 1836) was the most abundant species (54.81%), followed by the group *E. analis/minor* (20.9%), *Apis mellifera* L., 1758 (14.16%) and *Melipona quinquefasciata* Lepeletier, 1836 (5.11%). The other species together represented the remaining 5.02% (Table 1). The group *E. analis/minor* was the only one sampled in all areas. The overall average bee visitation rate was 0.086 ± 0.081 (mean \pm SD) visit/flower for 210 min of observation in each of the 10 tomato crops analyzed. The period of greatest activity of bees was between 11 and 11:59 am ($\bar{x} = 0.018$).

Table 1

Species, abundance and relative frequency of bees sampled in open tomato crops.

Species	Abundance	Relative frequency (%)
ANDRENIDAE		
<i>Oxaea flavescens</i> Klug, 1807	5	0.22
APIDAE		
Apini		
<i>Apis mellifera</i> L., 1758	330	14.16
<i>Bombus (Fervidobombus) morio</i> (Swederus, 1787)	3	0.13
<i>Eulaema (Apeulaema) nigrita</i> Lepeletier, 1841	1	0.04
<i>Melipona (Melikerria) quinquefasciata</i> Lepeletier, 1836	119	5.11
<i>Paratrigona lineata</i> (Lepeletier, 1836)	1277	54.81
<i>Tetragonisca angustula</i> (Latreille, 1811)	1	0.04
<i>Trigona spinipes</i> (Fabricius, 1793)	14	0.6
Centridini		
<i>Centris (Hemisiella) tarsata</i> Smith, 1874	10	0.43
<i>Centris (Xanthemisia)</i> sp.	3	0.13
Emphorini		
<i>Ancyloscelis</i> sp.	1	0.04
Exomalopsini		
<i>Exomalopsis (Exomalopsis) analis</i> Spinola, 1853	487	20.9
<i>Exomalopsis (Exomalopsis) minor</i> Schrottky, 1910		
<i>Exomalopsis</i> sp.1	1	0.04
<i>Exomalopsis</i> sp.2	14	0.6
Tapinotaspidini		
<i>Paratetrapedia connexa</i> (Vachal, 1909)	1	0.04
Xylocopini		
<i>Xylocopa (Neoxylocopa) frontalis</i> Olivier, 1789	5	0.22
<i>Xylocopa (Neoxylocopa) suspecta</i> Moure and Camargo, 1988	1	0.04
HALICTIDAE		
Augochlorini		
<i>Augochlora</i> sp.	1	0.04
<i>Augochloropsis</i> sp.1	40	1.72
<i>Augochloropsis</i> sp.2	5	0.22
<i>Augochloropsis</i> sp.3	1	0.04
<i>Augochloropsis</i> sp.4	1	0.04
Halictini		
<i>Dialictus</i> sp.	9	0.39
Total	2330	100

3.2. Landscape analyses

All landscape variables analyzed here were relevant to explain bee metrics, since they all appear in at least one of the models that presented $\Delta AIC < 2$ (supplementary material). In addition, for all analyses, models with variables were always better than null models. All of these had ΔAIC greater than 2 (supplementary material).

According to AIC-based model selection procedure, only one model was considered the best to explain bee visitation rate in each landscape scale, and this model included only management type of tomato crop. For bee species richness, one model (Crop Manag + Dist) was selected in the scale of 500 m, and two models (Prop + Crop Manag; Crop Manag + Dist) were selected in 1000 and 1500 m (Table 2).

Tomato crop management proved to be the best predictor variable to explain bee metrics, being present in all selected models (Table 2). Bee visitation rate in flowers and species richness were, respectively, 238% and 92% higher in tomato crops managed in the mixed system when compared to monoculture (Fig. 1). In general, bee species richness was positively associated with proportion of natural vegetation (coefficient estimate (1000 m) = 15.475; coefficient estimate (1500 m) = 16.988; Fig. 2) and negatively associated with distance from the nearest natural vegetation remnant (coefficient estimate = -3.987; Fig. 3).

Table 2

Selected models considered to explain the landscape structure effect on bee visitation rate and species richness for each landscape scale (500, 1000 and 1500 m).

Response variable	Predictors	ΔAIC	Weight	p-value
(a) 500 m				
Bee visitation rate	Model 1			
	Crop Manag	0.0	0.1990	0.0641
Bee species richness	Model 1			
	Crop Manag + Dist	0.0	0.3401	0.0111
(b) 1000 m				
Bee visitation rate	Model 1			
	Crop Manag	0.0	0.1840	0.0641
Bee species richness	Model 1			
	Crop Manag + Prop	0.0	0.2934	0.0063
	Model 2			
	Crop Manag + Dist	1.6	0.1298	0.0111
(c) 1500 m				
Bee visitation rate	Model 1			
	Crop Manag	0.3	0.1360	0.0641
Bee species richness	Model 1			
	Crop Manag + Prop	0.0	0.3018	0.0080
	Model 2			
	Crop Manag + Dist	0.9	0.1878	0.0111

Δ AIC values are relative difference between the AIC of each model and the AIC of the best model. AIC weights are normalized estimates of the relative likelihood of each model.

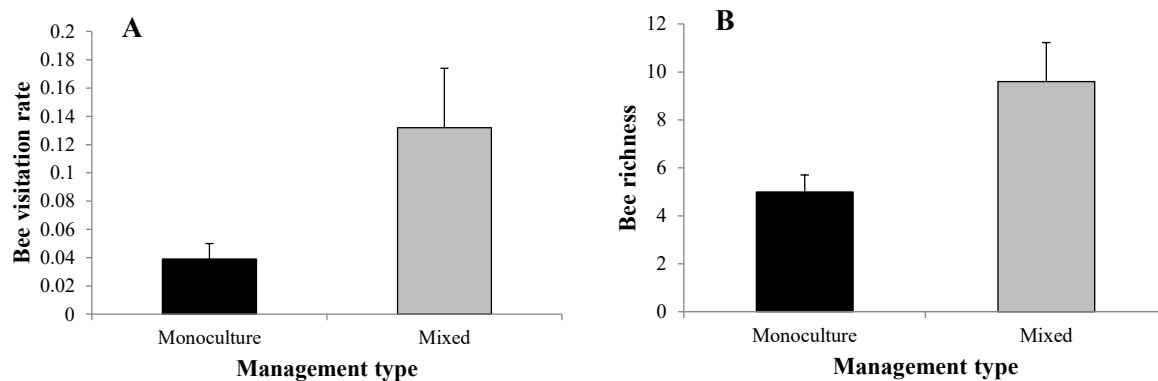


Fig. 1. Average bee visitation rate (A) and average bee species richness (B) sampled in open tomato crops managed in the monoculture and mixed systems.

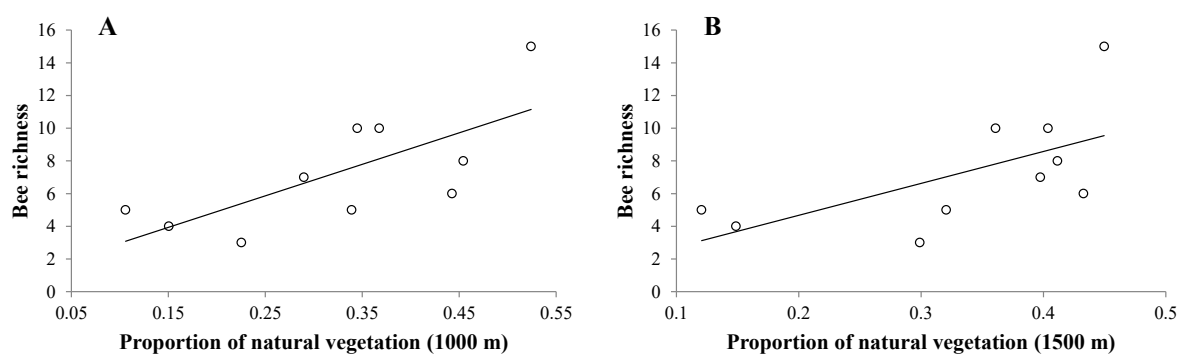


Fig. 2. Correlation between proportion of natural vegetation in 1000 (A) and 1500 m (B) scales and bee species richness found in open tomato crops.

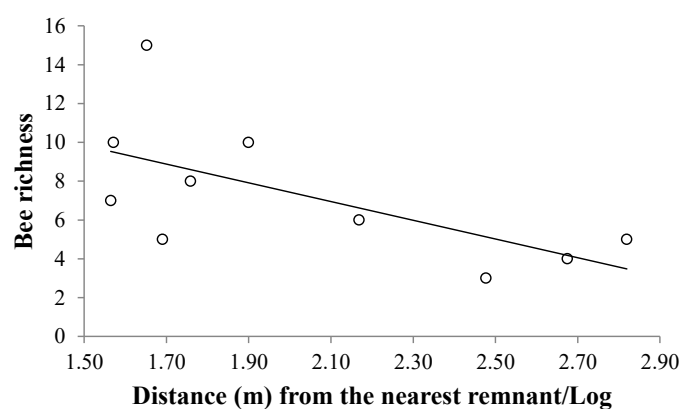


Fig. 3. Correlation between the logarithm of the distance from the nearest natural vegetation remnant and bee species richness found in open tomato crops.

4. Discussion

In relation to bees that visited tomato flowers, the high frequency of *P. lineata*, species of the genus *Exomalopsis*, *A. mellifera* and *M. quinquefasciata* has already been reported in other surveys carried out on open tomato crops inserted in the Cerrado biome (Santos et al., 2014; Silva-Neto et al., 2016). Among them, bees of the genus *Exomalopsis* are noteworthy. The group was the only one present in all the sampled areas and it was even more abundant than eusocial species, such as *M. quinquefasciata* and *A. mellifera*, which present populous colonies and recruitment of workers (Michener, 2007). Several other studies have also reported the high frequency of *Exomalopsis* in open tomato crops, evidencing the contribution and importance of pollination services provided by this group to tomato (Deprá et al., 2014; Macias-Macias et al., 2009; Santos et al., 2014; Silva-Neto et al., 2013; Silva-Neto et al., 2016). Santos et al. (2014) even call attention to the need to improve knowledge about biology of these species. As they nest in the ground, management techniques for these bees are still scarce (Imperatriz-Fonseca et al., 2006). Thus, knowing more about their biology, especially about their nesting habits, can be an important step so that these species can be managed for pollination of crops in the future (Garófalo et al., 2012).

Although this whole issue of pollinator management is extremely relevant, the most viable solution to increase agricultural production is still the presence and maintenance of natural pollinators (Kremen et al., 2004; Ricketts et al., 2004). Currently, a series of measures has been suggested to assist in the attraction and permanence of bees in agricultural areas, thus contributing to maintenance of pollination services provided by them and conservation of regional biodiversity. These measures are called pollinator-friendly practices and two of them consist of maintaining or providing sites for nest building and providing sources of food resources (Witter et al., 2014). Hence the importance of presence and maintenance of native

vegetation areas around crops. These areas offer a range of nesting, breeding and feeding sites for bees and are sources of these insects (Imperatriz-Fonseca, 2005).

Thus, results obtained in this study reinforce the importance of conservation of natural vegetation remnants, since bee species richness in tomato crops increased as the proportion of natural vegetation increased and decreased as distance from the nearest natural vegetation remnant increased. Similar results were also found in studies that were conducted in other cultures (Carvalho et al., 2010; Garibaldi et al., 2011; Klein, 2009; Steffan-Dewenter and Tschanrke, 1999). For coffee, for example, farms near forest fragments had an increase in pollinators and their pollination services, generating an increase of 14 to 50% in production (De Marco and Coelho, 2004; Ricketts et al., 2008).

Still within the context of providing sources of food resources for bees as a pollinator-friendly practice, another relevant factor was management type of tomato crop, in fact, the best predictor variable of this study. Tomato crops managed in the mixed system, that is, associated with other flowering crops, positively affected bee visitation rate and species richness when compared to monoculture. Tomato flowers are visited by high bee abundance and diversity, and this is probably related to the enormous amount of pollen that the plant offers, since pollen is essential for larvae nutrition (Silva-Neto et al., 2016). However, pollen is the only resource offered. Thus, presence of other crops that offer other types of resources, such as nectar and oil, has an even greater influence on the visitation rate and number of bee species that visit tomato. This is because co-flowering plant species commonly share flower visitors, and thus have the potential to indirectly and positively influence each other's pollination by facilitation (Carvalho et al., 2014). Food-web data of another study also suggest that maintaining diversity of flower resources within farmland can help maintain pollinator communities (Carvalho et al., 2010).

Contrary to other studies, landscape heterogeneity of the surrounding landscape was not a good predictor for bee visitation rate and species richness. Landscape heterogeneity depends a lot on the number of land use classes that is determined in a landscape. In this study, unlike others that grouped all agricultural areas into one class, it was proposed and believed to be important to distinguish and separate crops from one another as much as it possible, since bees respond differently to different crops. Thus, landscape heterogeneity does not seem to be relevant if it does not reflect in favoring the presence and maintenance of bees, offering food resources and/or nesting sites. Management type of a crop, either mixed or monoculture, for example, represents on a smaller scale different levels of heterogeneity. However, as well as natural areas, it exerts an influence on bees because it directly reflects on diversity of food resources available to these insects.

Therefore, results found in this study corroborate the hypotheses that: (1) management type of tomato crop is a good predictor to explain bee visitation rate; and (2) natural vegetation remnants and association with other flowering crops increase the number of bee species that visit tomato flowers. The importance of visitation rate seems to be clearer for farmers, who can relate a higher number of bees to higher yields and better fruits. However, there is a consensus about biodiversity benefits for ecosystem services (Hooper et al., 2005) and, specifically, for pollination services (Blitzer et al., 2016; Hipólito et al., 2018; Kremen et al., 2002). To explain this positive relationship between pollinator diversity and pollination services, four mechanisms have been suggested: (1) selection effects, in which diverse communities are more likely to include highly effective species (Loreau and Hector, 2001); (2) functional facilitation, under which some community members may enhance the effectiveness of other members (Cardinale et al., 2002), for example, causing changes in foraging behavior (Brittain et al., 2012; Carvalheiro et al., 2011); (3) functional complementarity, in which diverse pollinator communities provide more pollination services through niche partitioning in space and time

(Hoehn et al., 2008); and (4) effect of redundancy or resilience, in which diversity is essential to sustain pollination services as a result of year-to-year variation in community composition and/or disappearance of some species (Kremen et al., 2002).

For tomato crops, benefits of pollination services provided by bees, such as increase in productivity and improvement in fruit quality, have been reported in different studies (Bartelli and Nogueira-Ferreira, 2014; Deprá et al., 2014; Santos et al., 2014; Silva-Neto et al., 2013). Remains to know now how (through which mechanism mentioned above) higher bee species richness could affect pollination services in tomato crops. Nevertheless, we believe that selection effects and effect of redundancy may occur. The first because not all bee species that visit tomato perform buzz pollination (Santos et al., 2014), which is the behavior considered more efficient for flowers with poricidal anthers (Buchmann, 1983). And the second because, beyond temporal variations that may occur in community composition, bee populations have declined worldwide due to agricultural intensification, indiscriminate use of pesticides, among other factors (Biesmeijer et al., 2006; Kremen et al., 2002).

Acknowledgments

We are grateful to Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), to Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) and, mainly, to Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais (FAPEMIG) for financial support, to all farmers, who allowed and gave full support to this study, to Dr. Paulo Eugênio Alves Macedo de Oliveira and Dr. Solange Cristina Augusto for all the suggestions during the research, to Dr. Poliana Mendes for instructions in the analyses of landscape metrics, to Msc. Alexandre Oliveira Resende Santos and Dr. Laíce Souza Rabelo for identifying bees and to Msc. Isabel Farias Aidar, Jaqueline Eterna Batista, Bárbara Matos da Cunha Guimarães,

Raysa Sales Teixeira Borges de Carvalho and Nicole Cristina Machado Borges for suggestions and contributions in the field.

References

- Aizen, M.A., Garibaldi, L.A., Cunningham, S.A., Klein, A.M., 2009. How much does agriculture depend on pollinators? Lessons from longterm trends in crop production. *Ann. Bot.* 103, 2005-2010. <https://doi.org/10.1093/aob/mcp076>
- Alves, K.A., Rosa, R., 2008. Espacialização de dados climáticos do Cerrado mineiro. *Hor. Cient.* 8, 1-28.
- Bartelli, B.F., Nogueira-Ferreira, F.H., 2014. Pollination Services Provided by *Melipona quadrifasciata* Lepelletier (Hymenoptera: Meliponini) in Greenhouses with *Solanum lycopersicum* L. (Solanaceae). *Sociobiology* 61, 510-516. <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v61i4.510-516>
- Bartomeus, I., Potts, S.G., Steffan-Dewenter, I., Vaissière, B.E., Woyciechowski, M., Krewenka, K.M., Tscheulin, T., Roberts, S.P.M., Szentgyörgyi, H., Westphal, C., Bommarco, R., 2014. Contribution of insect pollinators to crop yield and quality varies with agricultural intensification. *PeerJ* 328, 1-20. <https://doi.org/10.7717/peerj.328>
- Biesmeijer, J.C., Roberts, S.P.M., Reemer, M., Ohlemueller, R., Edwards, M., Peeters, T., Schaffers, A.P., Potts, S.G., Kleukers, R., Thomas, C.D., Settele, J., Kunin, W.E., 2006. Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands. *Science* 313, 351–354. <https://doi.org/10.1126/science.1127863>
- Blitzer, E.J., Gibbs, J., Park, M.G., Danforth, B.N., 2016. Pollination services for apple are dependent on diverse wild bee communities. *Agric. Ecosyst. Environ.* 221, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.004>

- Bolker, B., R Development Core Team, 2011. *bbmle*: Tools for general maximum likelihood estimation. R package version 1.0.3. <http://CRAN.Rproject.org/package=bbmle>.
- Brittain, C., Williams, N., Kremen, C., Klein, A.M., 2012. Synergistic effects of non-*Apis* bees and honey bees for pollination services. *Proc. R. Soc. B.* 280, 1-7. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.2767>
- Buchmann, S.L., 1983. Buzz pollination in angiosperms. In: Jones, C.E., Little, R.J. (Eds.). *Handbook of Experimental Pollination Biology*. Scientific and Academic Editions, New York, USA.
- Cardinale, B.J., Palmer, M.A., Collins, S.L., 2002. Species diversity enhances ecosystem functioning through interspecific facilitation. *Nature* 415, 426–429. <https://doi.org/10.1038/415426a>
- Carvalho, L.G., Biesmeijer, J.C., Benadi, G., Fründ, J., Stang, M., Bartomeus, I., Kaiser-Bunbury, C.N., Baude, M., Gomes, S.I., Merckx, V., Baldock, K.C., Bennett, A.T., Boada, R., Bommarco, R., Cartar, R., Chacoff, N., Dänhardt, J., Dicks, L.V., Dormann, C.F., Ekroos, J., Henson, K.S., Holzschuh, A., Junker, R.R., Lopezaraiza-Mikel, M., Memmott, J., Montero-Castaño, A., Nelson, I.L., Petanidou, T., Power, E.F., Rundlöf, M., Smith, H.G., Stout, J.C., Temitope, K., Tschamntke, T., Tscheulin, T., Vilà, M., Kunin, W.E., 2014. The potential for indirect effects between co-flowering plants via shared pollinators depends on resource abundance, accessibility and relatedness. *Ecol. Lett.* 17, 1389-1399. <https://doi.org/10.1111/ele.12342>
- Carvalho, L.G., Seymour, C.L., Veldtman, R., Nicolson, S.W., 2010. Pollination services decline with distance from natural habitat even in biodiversity-rich areas. *J. Appl. Ecol.* 47, 810–820. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01829.x>

- Carvalho, L.G., Veldtman, R., Shenkute, A.G., Tesfay, G.B., Pirk, C.W.W., Donaldson, J.S., Nicolson, S.W., 2011. Natural and within-farmland biodiversity enhances crop productivity. *Ecol. Lett.* 14, 251–259. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01579.x>
- Connelly, H., Poveda, K., Loeb, G., 2015. Landscape simplification decreases wild bee pollination services to strawberry. *Agric. Ecosyst. Environ.* 211, 51-56. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.05.004>
- De Marco, P., Coelho, F.M., 2004. Services performed by the ecosystem: forest remnants influence agricultural cultures pollination and production. *Biodivers. Conserv.* 13, 1245-1255. <https://doi.org/10.1023/B:BIOC.0000019402.51193.e8>
- Deprá, M.S., Delaqua, G.C.G., Freitas, L., Gaglianone, M.C., 2014. Pollination deficit in open-field tomato crops (*Solanum lycopersicum* L., Solanaceae) in Rio de Janeiro state, Southeast Brazil. *J. Pollinat. Ecol.* 12, 1-8. [https://doi.org/10.26786/1920-7603\(2014\)7](https://doi.org/10.26786/1920-7603(2014)7)
- Durán, X.A., Ulloa, R.B., Carrillo, J.A., Contreras, J.L., Bastidas, M.T., 2010. Evaluation of yield component traits of honeybee pollinated (*Apis mellifera* L.) Rapeseed canola (*Brassica napus* l.). *Chil. J. Agr. Res.* 70, 309-314. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392010000200014>
- Elkie, P., Rempel, R., Carr, A., 1999. Patch Analyst User's Manual. Ontario Ministry of Natural Resources Northwest Science and Technology, Thunder Bay, Ontario TM-002.
- ESRI, 2012. ArcGIS ArcMap (10.1st ed.). Redlands, CA, USA. Environmental Systems Research Institute, Inc.
- FAO - Food and Agriculture Organization, 2004. Conservation and management of pollinators for sustainable agriculture - the international response. In: Freitas, B.M., Pereira, J.O.P. (Eds.). Solitary bees: conservation, rearing and management for pollination. Imprensa Universitária, Fortaleza, Brazil.

FAOSTAT - Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database Results.

Available in: <http://faostat.fao.org/site>. Access: December 30, 2016.

Franceschinelli, E.V., Elias, M.A.S., Bergamini, L.L., Silva-Neto, C.M., Sujji, E.R., 2017.

Influence of landscape context on the abundance of native bee pollinators in tomato crops in Central Brazil. *J. Insect. Conserv.* 21, 715-726. <https://doi.org/10.1007/s10841-017-0015-y>

Garibaldi, L.A., Steffan-Dewenter, I., Kremen, C., Morales, J.M., Bommarco, R., Cunningham,

S.A., Carvalheiro, L.G., Chacoff, N.P., Dudenhöffer, J.H., Greenleaf, S. S., Holzschuh, A., Isaacs, R., Krewenka, K., Mandelik, Y., Mayfield, M.M., Morandin, L.A., Potts, S.G., Ricketts, T.H., Szentgyörgyi, H., Viana, B.F., Westphal, C., Winfree, R., Klein, A.M., 2011. Stability of pollination services decreases with isolation from natural areas despite honey bee visits. *Ecol. Lett.* 14, 1062–1072. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01669.x>

Garófalo, C.A., Martins, C.F., Aguiar, C.M.L., Del Lama, M.A., Alves-dos-Santos, I. 2012. As

abelhas solitárias e perspectivas para seu uso na polinização no Brasil. In: Imperatriz Fonseca, V.L., Canhos, D.A.L., Araújo, D.A., Saraiva, A.M. (Eds.). *Polinizadores no Brasil*. Edusp, São Paulo, Brazil.

Giannini, T.C., Cordeiro, G.D., Freitas, B.M., Saraiva, A.M., Imperatriz-Fonseca, V.L., 2015.

The dependence of crops for pollinators and the economic value of pollination in Brazil. *J. Econ. Entomol.* 108, 849-857. <https://doi.org/10.1093/jee/tov093>

Greenleaf, S.S., Kremen, C., 2006. Wild bee species increase tomato production and respond

differently to surrounding land use in Northern California. *Biol. Conserv.* 13, 81-87. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.05.025>

Greenleaf, S.S., Williams, N.M., Winfree, R., Kremen, C., 2007. Bee foraging ranges and their

relationship to body size. *Oecologia* 153, 589–596. <https://doi.org/10.1007/s00442-007-0752-9>

- Hipólito, J., Boscolo, D., Viana, B.F., 2018. Landscape and crop management strategies to conserve pollination services and increase yields in tropical coffee farms. *Agric. Ecosyst. Environ.* 256, 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.09.038>
- Hoehn, P., Tschardtke, T., Tylianakis, J.M., Steffan-Dewenter, I., 2008. Functional group diversity of bee pollinators increases crop yield. *Proc. R. Soc. Lond. B Biol.* 275, 2283–2291. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.0405>
- Hooper, D., Chapin Iii, F., Ewel, J., Hector, A., Inchausti, P., Lavorel, S., Lawton, J., Lodge, D., Loreau, M., Naeem, S., 2005. Effects of biodiversity on ecosystem functioning: a consensus of current knowledge. *Ecol. Monogr.* 75, 3–35. <https://doi.org/10.1890/04-0922>
- Imperatriz-Fonseca, V.L., 2005. Serviços aos ecossistemas, com ênfase nos polinizadores e polinização. Available in: <http://www.ib.usp.br/>. Acess: April 07, 2017.
- Imperatriz-Fonseca, V.L., Saraiva, A.M., De Jong, D., 2006. Information technology and pollinators initiatives. In: Imperatriz-Fonseca, V.L., Saraiva, A.M., De Jong, D. (Eds.). *Bees as pollinators in Brazil: assessing the status and suggesting best practices*. Holos Editora, Ribeirão Preto, Brazil.
- Klein, A.M., 2009. Nearby rainforest promotes coffee pollination by increasing spatio-temporal stability in bee species richness. *Forest Ecol. Manag.* 258, 1838-1845. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.05.005>
- Kremen, C., 2005. Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? *Ecol. Lett.* 8, 468–479. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00751.x>
- Kremen, C., Williams, N.M., Bugg, R.L., Fay, J.P., Thorp, R.W., 2004. The area requirements of an ecosystem service: crop pollination by native bee communities in California. *Ecol. Lett.* 7, 1109–1119. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2004.00662.x>

- Kremen, C., Williams, N.M., Thorp, R.W., 2002. Crop pollination from native bees at risk from agricultural intensification. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 99, 16812–16816. <https://doi.org/10.1073/pnas.262413599>
- Loreau, M., Hector, A., 2001. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. *Nature* 412, 72–76. <https://doi.org/10.1038/35083573>
- Macias-Macias, O., Chuc, J., Ancona-Xiu, P., Cauich, O., Quezada-Euán, J.J.G., 2009. Contribution of native bees and Africanized honey bees (Hymenoptera: Apoidea) to Solanaceae crop pollination in tropical Mexico *J. Appl. Entomol.* 133, 456-465. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2009.01399.x>
- Michener, C.D., 2007. *The bees of the world*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore.
- Potts, S.G., Biesmeijer, J.C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O., Kunin, W.E., 2010. Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends Ecol. Evol.* 25, 345–353. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.01.007>
- R Development Core Team, 2015. *R: a language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- Rasmussen, C., Nieh, J.C., Biesmeijer, J.C., 2010. Foraging biology of neglected bee pollinators. *Psyche* 2010, 1-2. <https://doi.org/10.1155/2010/134028>
- Ribeiro, M.C., Bernardes, R., Borges, D.B., Ribeiro, J.W., Kanda, C.Z., Fregonezi, G.L., Prado, H.A., Ferreira, M.K., Maglioli, M., Setz, E.Z.F., Romeiro, A., Rodrigues, M.G., 2012. Modelagem ecológica do corredor das onças para fins de pagamento por serviços ambientais utilizando ecologia de paisagens. Relatório técnico, Rio Claro – SP.
- Ricketts, T.H., 2004. Tropical forest fragments enhance pollinator activity in nearby coffee crops. *Conserv. Biol.* 18, 1262-1271. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00227.x>

- Ricketts, T.H., Daily, G.C., Ehrlich, P.R., Michener, C.D., 2004. Economic value of tropical forest to coffee production. *Proc. Natl. Acad. Sci U. S. A.* 101, 12579-12582. <https://doi.org/10.1073/pnas.0405147101>
- Ricketts, T.H., Regetz, J., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S.A., Kremen, C., Bogdanski, A., Gemmill-Herren, B., Greenleaf, S.S., Klein, A.M., Mayfield, M.M., Morandin, L.A., Ochieng, A., Viana, B.F., 2008. Landscape effects on crop pollination services: are there general patterns? *Ecol. Lett.* 11, 499–515. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01157.x>
- Santos, A.O.R., Bartelli, B.F., Nogueira-Ferreira, F.H., 2014. Potential pollinators of tomato, *Lycopersicon esculentum* (Solanaceae), in open crops and the effect of a solitary bee in fruit set and quality. *J. Econ. Entomol.* 107, 987-994. <https://doi.org/10.1603/EC13378>
- Saturni, F.T., Jaffé, R., Metzger, J.P., 2016. Landscape structure influences bee community and coffee pollination at different spatial scales. *Agric. Ecosyst. Environ.* 235, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.10.008>
- Silva-Neto, C.M., Bergamini, L.L., Elias, M.A.S., Moreira, G.L., Morais, J.M., Bergamini, B.A.R., Franceschinelli, E.V., 2016. High species richness of native pollinators in Brazilian tomato crops. *Braz. J. Biol.* [online]. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.17515>
- Silva-Neto, C.M., Lima, F.G., Gonçalves, B.B., Bergamini, L.L., Bergamini, B.A.R., Elias, M.A.S., Franceschinelli, E.V., 2013. Native bees pollinate tomato flowers and increase fruit production. *J. Pollin. Ecol.* 11, 41-45. [https://doi.org/10.26786/1920-7603\(2013\)4](https://doi.org/10.26786/1920-7603(2013)4)
- Silveira, F.A., Melo, G.A.R., Almeida, E.A.B., 2002. *Abelhas brasileiras: sistemática e identificação*. Fundação Araucária, Belo Horizonte.
- Steffan-Dewenter, I., Tschardt, T., 1999. Effects of habitat isolation on pollinator communities and seed set. *Oecologia* 121, 432-440. <https://doi.org/10.1007/s004420050949>

- Steffan-Dewenter, I., Westphal, C., 2008. The interplay of pollinator diversity, pollination services and landscape change. *J. Appl. Ecol.* 45, 737-741. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2008.01483.x>
- Vaissière, B.E., Freitas, B.M., Gemmill-Herren, B., 2011. Protocol to detect and assess pollination deficits in crops: a handbook for its use. FAO, Rome.
- Viana, B.F., Boscolo, D., Neto, E.M., Lopes, L.E., Lopes, A.V., Ferreira, P.A., Pigozzo, C.M., Primo, L.M., 2012. How well do we understand landscape effects on pollinators and pollination services? *J. Pollinat. Ecol.* 7, 31-41. [https://doi.org/10.26786/1920-7603\(2012\)2](https://doi.org/10.26786/1920-7603(2012)2)
- Winfree, R., Aguilar, R., Vazquez, D.P., LeBuhn, G., Aizen, M.A., 2009. A meta-analysis of bees' responses to anthropogenic disturbance. *Ecology* 90, 2068–2076. <https://doi.org/10.1890/08-1245.1>
- Winfree, R., Williams, N.M., Dushoff, J., Kremen, C., 2007. Native bees provide insurance against ongoing honey bee losses. *Ecol. Lett.* 10, 1105–1113. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01110.x>
- Witter, S., Nunes-Silva, P., Blochtein, B., 2014. Abelhas na polinização da canola: benefícios ambientais e econômicos. EDIPUCRS, Porto Alegre.
- Yamamoto, M., Silva, C.I., Augusto, S.C., Barbosa, A.A.A., Oliveira, P.E., 2012. The role of bee diversity in pollination and fruit set of yellow passion fruit (*Passiflora edulis* forma *flavicarpa*, Passifloraceae) crop in Central Brazil. *Apidologie* 43, 515-526. <https://doi.org/10.1007/s13592-012-0120-6>

Supplementary material

Models of the relationship between landscape structure and bee metrics (bee visitation rate and species richness) for each landscape scale (500, 1000 and 1500 m).

Response variable	Predictors	Δ AIC	Weight
(d) 500 m			
Bee visitation rate	Crop Manag	0.0	0.1990
	Crop Manag + Dist	0.3	0.1753
	Crop Manag + Heterog	1.5	0.0957
	Crop Manag + Prop	1.7	0.0841
	Crop Manag + Prop + Dist	1.9	0.0767
	Crop Manag + Dist + Heterog	2.1	0.0704
	Dist	2.5	0.0570
	Null	2.5	0.0557
	Crop Manag + Prop + Heterog	3.3	0.0376
	Prop	3.6	0.0336
	Full	3.7	0.0316
	Heterog	4.5	0.0213
	Dist + Heterog	4.5	0.0210
	Prop + Dist	4.5	0.0210
	Prop + Heterog	5.5	0.0124
Prop + Dist + Heterog	6.5	0.0077	
Bee species richness	Crop Manag + Dist	0.0	0.3401
	Crop Manag + Prop + Dist	1.4	0.1675
	Crop Manag + Prop	2.0	0.1273
	Crop Manag + Dist + Heterog	2.0	0.1272
	Full	3.4	0.0636
	Crop Manag + Prop + Heterog	4.0	0.0468

Crop Manag	4.8	0.0312
Dist	5.6	0.0205
Prop	5.6	0.0202
Prop + Dist	6.5	0.0134
Crop Manag + Heterog	6.5	0.0130
Dist + Heterog	7.2	0.0091
Prop + Heterog	7.4	0.0083
Prop + Dist + Heterog	8.0	0.0062
Null	8.9	0.0041
Heterog	10.9	0.0015

(e) 1000 m

Bee visitation rate	Crop Manag	0.0	0.184
	Crop Manag + Dist	0.3	0.162
	Crop Manag + Prop	0.8	0.124
	Crop Manag + Heterog	2.0	0.069
	Crop Manag + Dist + Heterog	2.0	0.066
	Crop Manag + Prop + Dist	2.2	0.061
	Dist	2.5	0.053
	Null	2.5	0.052
	Prop	2.6	0.051
	Crop Manag + Prop + Heterog	2.7	0.047
	Dist + Heterog	3.8	0.028
	Full	4.0	0.025
	Heterog	4.2	0.022
	Prop + Dist	4.2	0.022
	Prop + Heterog	4.2	0.022
	Prop + Dist + Heterog	5.6	0.011
Bee species richness	Crop Manag + Prop	0.0	0.2934
	Crop Manag + Prop + Dist	0.9	0.1843
	Crop Manag + Dist	1.6	0.1298
	Crop Manag + Prop + Heterog	1.7	0.1256
	Full	2.1	0.1002

Crop Manag + Dist + Heterog	2.6	0.0815
Prop	5.2	0.0220
Prop + Heterog	6.3	0.0123
Crop Manag	6.4	0.0119
Prop + Dist	6.7	0.0101
Dist	7.2	0.0078
Prop + Dist + Heterog	7.4	0.0072
Dist + Heterog	7.5	0.0070
Crop Manag + Heterog	8.3	0.0046
Null	10.5	0.0015
Heterog	12.0	<0.001

(f) 1500 m

Bee visitation rate	Crop Manag + Prop	0.0	0.159
	Crop Manag	0.3	0.136
	Crop Manag + Heterog	0.5	0.127
	Crop Manag + Dist	0.6	0.120
	Crop Manag + Dist + Heterog	1.5	0.075
	Crop Manag + Prop + Heterog	1.6	0.070
	Crop Manag + Prop + Dist	2.0	0.060
	Prop	2.7	0.041
	Dist	2.8	0.039
	Heterog	2.9	0.038
	Null	2.9	0.038
	Full	3.5	0.028
	Dist + Heterog	3.7	0.024
	Prop + Heterog	4.2	0.019
	Prop + Dist	4.5	0.017
	Prop + Dist + Heterog	5.7	0.009
Bee species richness	Crop Manag + Prop	0.0	0.3018
	Crop Manag + Dist	0.9	0.1878
	Crop Manag + Prop + Dist	1.2	0.1631
	Crop Manag + Prop + Heterog	1.6	0.1331

Crop Manag + Dist + Heterog	2.7	0.0789
Full	3.1	0.0638
Crop Manag	5.7	0.0172
Crop Manag + Heterog	6.4	0.0124
Dist	6.6	0.0113
Prop	6.8	0.0100
Prop + Dist	8.0	0.0056
Dist + Heterog	8.2	0.0050
Prop + Heterog	8.8	0.0037
Null	9.8	0.0022
Prop + Dist + Heterog	9.9	0.0021
Heterog	10.3	0.0017

Capítulo 2

Serviços de polinização em cultivos abertos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.,
Solanaceae): a importância das abelhas que não vibram

**Serviços de polinização em cultivos abertos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.,
Solanaceae): a importância das abelhas que não vibram**

*O capítulo foi preparado para submissão na revista **Journal of Economic Entomology** e a formatação obedece parcialmente às normas do periódico.*

RESUMO. Foram identificadas as abelhas visitantes florais em cultivos abertos de tomate, analisando seu comportamento de coleta de pólen nas flores. Foi avaliado o quanto a polinização adicional efetuada pelas abelhas melhora a qualidade dos frutos e foi verificado se *Paratrigona lineata* (Lepeletier, 1836) e *Apis mellifera* L., 1758 são polinizadores efetivos do tomateiro. O estudo foi realizado em 10 cultivos comerciais de tomate localizados na região do Triângulo Mineiro (sudeste do Brasil) e experimentos de polinização foram conduzidos em duas dessas áreas. Um total de 2330 abelhas pertencentes a 24 espécies foram amostradas. *Paratrigona lineata* foi a espécie mais abundante (54,8%), seguida pelo agrupamento *Exomalopsis analis/minor* (20,9%), *A. mellifera* (14,2%) e *Melipona quinquefasciata* (5,1%). De modo geral, a polinização adicional efetuada pelas abelhas nas flores que ficaram livres para visita (grupo controle) gerou frutos com mais sementes, maiores e mais pesados. Frutos originados de flores dos testes de primeira visita com *P. lineata* e *A. mellifera* apresentaram, respectivamente, 30,4% e 20,9% mais sementes quando comparados aos tomates dos tratamentos de exclusão das abelhas. Os resultados reforçam a importância dos serviços de polinização prestados pelas abelhas no tomateiro e mostram que espécies que não realizam *buzz pollination*, como *P. lineata* e *A. mellifera*, atuam como polinizadores dessa cultura.

PALAVRAS-CHAVE: comportamento, polinizadores, *buzz pollination*, qualidade de frutos, sementes

ABSTRACT. Flower visiting bees of open tomato crops were identified and their pollen collection behavior in flowers was analyzed. It was evaluated how additional pollination performed by bees improves fruit quality and it was verified if *Paratrigona lineata* (Lepelletier, 1836) and *Apis mellifera* L., 1758 are effective pollinators of tomato. The study was carried out on 10 commercial tomato fields located in the Triângulo Mineiro region (Southeastern Brazil) and pollination experiments were conducted in two of these areas. A total of 2330 bees belonging to 24 species were sampled. *Paratrigona lineata* was the most abundant species (54.8%), followed by the group *Exomalopsis analis/minor* (20.9%), *Apis mellifera* (14.2%) and *Melipona quinquefasciata* (5.1%). In general, additional pollination performed by bees in flowers that were free for visitation (control group) generated fruits with more seeds, larger and heavier. Fruits originated from flowers of first visit tests with *P. lineata* and *A. mellifera* showed, respectively, 30.4% and 20.9% more seeds when compared to tomatoes of bee exclusion treatments. Our results reinforce the importance of pollination services provided by bees in tomato and show that species that do not perform buzz pollination, such as *P. lineata* and *A. mellifera*, act as pollinators of this crop.

KEY WORDS: behavior, pollinators, buzz pollination, fruit quality, seeds

Introdução

Os ecossistemas naturais e as espécies que os compõem sustentam a vida humana por meio de condições e processos denominados serviços ecossistêmicos (Daily 1997). Dentre estes serviços, destaca-se a polinização, que, por ser importante para a reprodução sexuada das plantas com flores, é essencial para a conservação da diversidade biológica, para a produção de biocombustíveis (Durán et al. 2010) e para produção de alimentos na agricultura (Imperatriz-Fonseca 2005, Ricketts et al. 2008). Estimativas monetárias já mostraram que os serviços ecossistêmicos geram, anualmente, cerca de 33 trilhões de dólares, sendo a polinização responsável por 117 bilhões desse valor (Costanza et al. 1997).

Em relação aos polinizadores, as abelhas são consideradas o principal grupo. Por dependerem de recursos florais para alimentação dos adultos e da cria, além de apresentarem constância floral durante o forrageamento (Rasmussen et al. 2010), esses insetos são os principais responsáveis pela polinização de diversas espécies de plantas nativas e cultivadas (Kremen 2005). Estima-se que 73% das espécies vegetais cultivadas no mundo sejam polinizadas pelas abelhas (FAO 2004). Além disso, diferentes estudos já evidenciaram que a polinização realizada por esses insetos gera um aumento considerável na produção de frutos e sementes até mesmo em culturas em que a autopolinização ocorre, como café (De Marco e Coelho 2004, Ricketts 2004, Klein 2009), canola (Durán et al. 2010), soja (Milfont et al. 2013) e tomate (Silva-Neto et al. 2013, Bartelli e Nogueira-Ferreira 2014, Deprá et al. 2014, Santos et al. 2014, Gaglianone et al. 2015).

O tomateiro, *Solanum lycopersicum* L. (Solanaceae), é cultivado em praticamente todas as regiões do planeta e sua produção mundial duplicou nos últimos 30 anos (Carvalho e Pagliuca 2007). O fruto é amplamente consumido e representa um alimento funcional devido aos altos teores de vitamina A e C, além de ser rico em licopeno, um antioxidante que combate

os radicais livres e retarda o envelhecimento (Shami e Moreira 2004). No Brasil, considerado o 14º maior produtor mundial de tomate (FAOSTAT 2016), com aproximadamente 55 mil hectares de área colhida em 2016, a produção foi estimada em mais de três milhões de toneladas. Os principais estados brasileiros responsáveis por tal produção são Goiás, São Paulo e Minas Gerais (IBGE 2016).

O tomate pode ser produzido em áreas de cultivo abertas ou fechadas. A planta é autofértil, suas flores são perfeitas, não produzem néctar e apresentam anteras poricidas. Embora seja autofértil, como já mencionado anteriormente, o tomateiro possui uma alta dependência de polinizadores, tanto para uma maior produção de sementes e frutos quanto para uma melhora na qualidade destes (Giannini et al. 2015). Isso acontece porque as visitas das abelhas nas flores melhoram a polinização ao aumentar a deposição de pólen no estigma (Greenleaf e Kremen 2006).

Em áreas de cultivo aberto de tomate, a contribuição e a importância dos serviços de polinização prestados por abelhas já foram relatadas em alguns estudos (Greenleaf e Kremen 2006, Macias-Macias et al. 2009, Silva-Neto et al. 2013, Deprá et al. 2014, Santos et al. 2014). Entretanto, em decorrência da presença de anteras poricidas nas flores, acreditava-se até então que, além do vento, a polinização do tomateiro em ambientes abertos fosse realizada somente por abelhas que apresentam o comportamento vibratório para coleta de pólen ou *buzz pollination*. Contudo, Santos et al. (2014) e observações preliminares mostraram que *Apis mellifera* L., 1758 e *Paratrigona lineata* (Lepeletier, 1836), duas espécies que não vibram para a coleta de pólen e que são bastante frequentes em cultivos de tomate, podem atuar como polinizadores do tomateiro em virtude do comportamento que exibem em suas visitas às flores, conhecido como *milking*.

Nesse sentido, visando reforçar a importância dos serviços de polinização prestados por abelhas no tomateiro e com o intuito de quebrar um paradigma a respeito do necessário

comportamento de visita das abelhas nas flores para a polinização dessa cultura, os objetivos deste estudo foram: (1) identificar as abelhas visitantes florais em cultivos abertos de tomate; (2) analisar seu comportamento de coleta de pólen nas flores; (3) avaliar o quanto a polinização adicional efetuada pelas abelhas melhora a qualidade dos frutos; e (4) verificar se *P. lineata* e *A. mellifera*, espécies que não realizam *buzz pollination*, são polinizadores efetivos do tomateiro.

Material e Métodos

Área de estudo. O trabalho foi desenvolvido na região do Triângulo Mineiro (Sudeste do Brasil), que se configura como um polo de produção de alimentos em Minas Gerais. O clima da região é marcado por duas estações bem definidas, uma chuvosa que se estende de outubro a março e outra seca de abril a setembro. A precipitação anual varia entre 1160 a 1460 mm/ano e a temperatura média anual está entre 23 e 25°C, sendo uniforme ao longo do ano (Alves e Rosa 2008).

O estudo foi realizado em 10 áreas comerciais de cultivo aberto de tomate (variedades Carina, Débora, Dominador e Saladete), quatro localizadas no município de Araguari-MG (18°38'45,74"S / 48°11'37,88"O), duas em Cascalho Rico-MG (18°34'56,61"S / 47°52'56,14"O) e quatro no município de Indianópolis-MG (19°02'4,59"S / 47°54'57,24"O). As áreas estão inseridas no bioma Cerrado. O plano de manejo e a frequência de aplicação de agrotóxicos eram semelhantes e todas elas foram amostradas sob as mesmas condições climáticas (dias ensolarados com temperaturas acima de 20°C).

Amostragem e avaliação do comportamento de abelhas visitantes florais. Entre janeiro de 2015 e setembro de 2016, para realizar o levantamento da comunidade de abelhas visitantes do tomateiro, foi efetuada uma coleta em cada cultivo durante o período de floração

e quando as plantas apresentavam pelo menos 1,5 m de altura. Em todas as áreas, a coleta foi realizada em dois transectos adjacentes de 100 m localizados entre o centro geométrico do cultivo e sua borda (a mais próxima de um remanescente de vegetação natural; metodologia adaptada de Vaissière et al. 2011). Cada transecto foi percorrido por um coletor. A cada hora, das 07h00min às 14h00min, foram destinados 30 min para o registro (coleta – quando não era possível a identificação visual – ou observação) de abelhas visitantes florais e 30 min para avaliação do comportamento (principalmente para coleta de pólen) desses insetos nas flores, por meio de observação direta e realização de registros fotográficos e filmagens. Durante o registro, para todas as áreas, as espécies *Exomalopsis analis* Spinola, 1853 e *Exomalopsis minor* Schrottky, 1910 foram agrupadas e contabilizadas juntas em decorrência da dificuldade de coletar todos os indivíduos e de diferenciar a olho nu as duas espécies, uma vez que elas se distinguem apenas no seu padrão de pontuação presente no integumento do tórax (Silveira et al. 2002).

As abelhas foram coletadas com o auxílio de redes entomológicas e sacrificadas em câmaras mortíferas contendo acetato de etila. Posteriormente, os indivíduos foram devidamente alfinetados, identificados e depositados na coleção do Museu de Biodiversidade do Cerrado (MBC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), no Laboratório de Ecologia e Comportamento de Abelhas (LECA).

Experimentos de polinização e análise dos frutos. Para responder às perguntas relativas à polinização do tomateiro por abelhas, os experimentos foram realizados em duas áreas de cultivo (1 e 2). Na área de cultivo 1 (variedade de tomate Dominador), os experimentos foram realizados entre fevereiro e maio de 2016. Com o intuito de avaliar o quanto a polinização adicional efetuada pelas abelhas melhora a qualidade dos frutos e para verificar se *A. mellifera* é um polinizador efetivo do tomateiro, em três linhas de cultivo adjacentes, 180 botões florais em pré-antese de plantas distintas (selecionadas aleatoriamente) foram marcados. Para garantir

a padronização do estágio de desenvolvimento e facilitar o manuseio durante os experimentos, foram selecionados apenas botões florais a cerca de um metro de altura do solo, dando preferência aos botões da porção terminal das inflorescências. Em uma das linhas de cultivo, 60 botões florais foram marcados e suas flores ficaram expostas e livres para visitação (grupo controle). Em outra, 60 botões foram isolados individualmente com sacos de organza, permanecendo protegidos até a formação do fruto (tratamento de exclusão). Na terceira linha de cultivo, 60 botões florais foram isolados com sacos de organza e desensacados, um a um, no início da antese para permitir a visita de uma única abelha da espécie *A. mellifera* (teste de primeira visita). Após a visita, a flor era imediatamente reensacada e assim permanecia até a formação do fruto.

Na área de cultivo 2 (variedade de tomate Saladete), os mesmos procedimentos descritos acima foram adotados entre dezembro de 2016 e março de 2017. No entanto, na terceira linha de cultivo, o teste de primeira visita foi realizado com *P. lineata*, para investigar se esta espécie é um polinizador efetivo do tomateiro.

Todos os frutos foram colhidos em um estágio intermediário de maturação (assim que exibissem por completo a cor amarela) e analisados no início da fase avermelhada. A qualidade de cada fruto foi avaliada por meio dos seguintes parâmetros: tamanho (medida dos diâmetros equatorial e longitudinal), utilizando um paquímetro digital; massa, mediante a utilização de uma balança digital; e número de sementes, contadas de forma direta.

Análise dos dados. Análises de variância (ANOVAs) seguidas do teste de Tukey foram realizadas para cada um dos parâmetros relativos à qualidade dos frutos para verificar se a qualidade depende da polinização adicional efetuada pelas abelhas e investigar se *A. mellifera* e *P. lineata* são polinizadores efetivos do tomateiro, avaliando o número de sementes dos frutos em relação ao tratamento de exclusão. As análises foram feitas com o auxílio do software R (R Development Core Team, 2015).

Resultados

Amostragem e avaliação do comportamento de abelhas visitantes florais. Um total de 2330 abelhas pertencentes a 24 espécies e a três famílias foram amostradas, sendo que a família Apidae foi a mais abundante. *Paratrigona lineata* foi a espécie mais abundante (54,8%), seguida pelo agrupamento *E. analis/minor* (20,9%), *A. mellifera* (14,2%) e *Melipona quinquefasciata* Lepeletier, 1836 (5,1%). As outras espécies representaram juntas os 5% restantes (Tabela 1). O agrupamento *E. analis/minor* foi o único amostrado em todas as áreas.

Em decorrência da presença de anteras poricidas, a maioria das espécies de abelhas que visitou o tomateiro utilizou a vibração corporal para obter o pólen das flores, ou seja, realizou o *buzz pollination* (Tabela 1). Dentre elas, as mais abundantes foram *E. analis/minor*, *M. quinquefasciata* e abelhas da família Halictidae. Essas abelhas envolviam os estames apicalmente e lateralmente, girando o corpo e vibrando o tórax para retirar o pólen das anteras. O pólen ficava aderido à porção ventral do corpo e depois era transferido para a escopa ou corbícula com o auxílio das pernas médias.

Paratrigona lineata e *A. mellifera* foram bastante frequentes nas flores do tomateiro, mas não realizavam o *buzz pollination*. As abelhas dessas espécies pousavam diretamente nas anteras. Com as pernas médias e posteriores, elas fixavam-se em posição ventral em relação às anteras e inseriam a glossa no orifício apical, um comportamento conhecido como *milking* (Tabela 1, Fig. 1A). O pólen se aderiu às estruturas da cabeça e também ao tórax, sendo movido, posteriormente, para as corbículas. Ao realizarem esse comportamento, as abelhas eventualmente tocavam o estigma da flor com a cabeça e a glossa, evidenciando sua potencial atuação como polinizadores do tomateiro. *Paratrigona lineata*, no entanto, também apresentou um comportamento de pilhagem, visto que, muitas vezes, perfurava o cone de anteras lateralmente por toda sua extensão para obter o pólen das flores (Tabela 1, Fig. 1B).

Tabela 1. Espécies, abundância e comportamento de visita das abelhas amostradas em áreas de cultivo aberto de tomate

Espécies	Abundância	Comportamento de visita
ANDRENIDAE		
<i>Oxaea flavescens</i> Klug, 1807	5	<i>Buzz pollination</i>
APIDAE		
Apini		
<i>Apis mellifera</i> L., 1758	330	<i>Milking</i>
<i>Bombus (Fervidobombus) morio</i> (Swederus, 1787)	3	<i>Buzz pollination</i>
<i>Eulaema (Apeulaema) nigrita</i> Lepeletier, 1841	1	<i>Buzz pollination</i>
<i>Melipona (Melikerria) quinquefasciata</i> Lepeletier, 1836	119	<i>Buzz pollination</i>
<i>Paratrigona lineata</i> (Lepeletier, 1836)	1277	<i>Milking / pilhagem</i>
<i>Tetragonisca angustula</i> (Latreille, 1811)	1	<i>Milking</i>
<i>Trigona spinipes</i> (Fabricius, 1793)	14	<i>Milking</i>
Centridini		
<i>Centris (Hemisiella) tarsata</i> Smith, 1874	10	<i>Buzz pollination</i>
<i>Centris (Xanthemis) sp.</i>	3	<i>Buzz pollination</i>
Emphorini		
<i>Ancyloscelis sp.</i>	1	CNO
Exomalopsini		
<i>Exomalopsis (Exomalopsis) analis</i> Spinola, 1853	487	<i>Buzz pollination</i>
<i>Exomalopsis (Exomalopsis) minor</i> Schrottky, 1910		
<i>Exomalopsis sp.1</i>	1	<i>Buzz pollination</i>
<i>Exomalopsis sp.2</i>	14	<i>Buzz pollination</i>
Tapinotaspidini		
<i>Paratetrapedia connexa</i> (Vachal, 1909)	1	<i>Buzz pollination</i>
Xylocopini		
<i>Xylocopa (Neoxylocopa) frontalis</i> Olivier, 1789	5	<i>Buzz pollination</i>
<i>Xylocopa (Neoxylocopa) suspecta</i> Moure & Camargo, 1988	1	<i>Buzz pollination</i>
HALICTIDAE		
Augochlorini		
<i>Augochlora sp.</i>	1	<i>Buzz pollination</i>
<i>Augochloropsis sp.1</i>	40	<i>Buzz pollination</i>
<i>Augochloropsis sp.2</i>	5	<i>Buzz pollination</i>
<i>Augochloropsis sp.3</i>	1	<i>Buzz pollination</i>
<i>Augochloropsis sp.4</i>	1	<i>Buzz pollination</i>
Halictini		
<i>Dialictus sp.</i>	9	<i>Buzz pollination</i>
Total	2330	

CNO, comportamento não observado.



Fig. 1. A) Operária campeira da espécie *A. mellifera* realizando *milking* em uma flor do tomateiro; B) Operária campeira da espécie *P. lineata* perfurando o cone de anteras, ou seja, realizando o comportamento de pilhagem em uma flor no cultivo de tomate.

Experimentos de polinização e análise dos frutos. Na área de cultivo 1, do total de 180 botões florais marcados, 120 resultaram em tomates que puderam ser avaliados, sendo 55 do grupo controle, 35 do tratamento de exclusão e 30 do teste de primeira visita com *A. mellifera*. As flores restantes não formaram frutos ou eles foram perdidos no decorrer do experimento devido ao manejo das plantas no cultivo.

Os tomates submetidos aos distintos tratamentos foram significativamente diferentes entre si, sendo que as flores que ficaram livres para a visita das abelhas (grupo controle) originaram frutos maiores e mais pesados. Em relação ao diâmetro equatorial, a polinização adicional efetuada pelas abelhas gerou frutos 17,4% (grupo controle; $P < 0,001$) e 8,1% (teste de primeira visita; $P = 0,021$) maiores quando comparados aos oriundos do tratamento de exclusão, e houve um acréscimo de 8,5% nos tomates do grupo controle em relação aos do teste de primeira visita ($P = 0,003$). Para o diâmetro longitudinal, o grupo controle obteve um incremento de 11,5% em relação aos frutos resultantes do tratamento de exclusão ($P < 0,001$).

Tomates originados do teste de primeira visita obtiveram um valor médio intermediário e não significativamente diferente dos outros dois tratamentos (Tabela 2).

Quanto à massa, as flores que ficaram livres para visitação resultaram em frutos 51,5% e 25,3% mais pesados quando comparadas às flores que foram completamente isoladas ($P < 0,001$) e que receberam uma única visita de *A. mellifera* ($P = 0,001$), respectivamente. Não houve diferença significativa entre o teste de primeira visita e o tratamento de exclusão ($P = 0,064$). Em rela o ao número de sementes, os três tratamentos foram significativamente diferentes entre si. O grupo controle apresentou 40,1% e 15,9% mais sementes quando comparado ao tratamento de exclusão ($P < 0,001$) e ao teste de primeira visita ($P = 0,008$), respectivamente. Observou-se também um aumento de 20,9% no número de sementes dos tomates originados de flores que receberam uma única visita de *A. mellifera* em rela o aos de flores que foram completamente isoladas ($P = 0,009$; Tabela 2).

Tabela 2. Valores médios (\pm desvio padrão) de cada um dos parâmetros relacionados à qualidade dos frutos nos tratamentos de exclusão, teste de primeira visita (com *A. mellifera*) e controle

Atributo do fruto	Tratamento		
	Exclusão	Teste 1 ^a visita	Controle
Diâmetro equatorial (mm)	52,02 (\pm 6,53)a	56,26 (\pm 6,92)b	61,05 (\pm 5,73)c
Diâmetro longitudinal (mm)	45,63 (\pm 5,66)a	48,57 (\pm 5,62)ab	50,9 (\pm 4,5)b
Massa (g)	74,62 (\pm 24,05)a	90,24 (\pm 26,39)a	113,06 (\pm 30,29)b
Número de sementes	137,66 (\pm 29,07)a	166,43 (\pm 29,67)b	192,91 (\pm 46,49)c

Médias seguidas por letras distintas são significativamente diferentes ($P < 0,05$).

Na  rea de cultivo 2, dos 180 botões florais marcados no experimento, 64 resultaram em frutos que puderam ser avaliados, sendo 20 do grupo controle, 27 do tratamento de exclusão e 17 do teste de primeira visita com *P. lineata*. Com rela o ao tamanho dos tomates, não houve

diferença significativa entres os tratamentos para o diâmetro equatorial ($F = 0,7$; $P = 0,502$), porém, para o diâmetro longitudinal, os frutos resultantes do tratamento de exclusão foram maiores quando comparados aos do grupo controle ($P = 0,013$) e do teste de primeira visita ($P = 0,011$). Quanto à massa, o tratamento de exclusão gerou frutos 22,7% mais pesados em relação ao teste de primeira visita ($P = 0,013$), e tomates originados do grupo controle obtiveram um valor médio intermediário e não significativamente diferente dos outros dois tratamentos. Em relação ao número de sementes, não houve diferença significativa entre o grupo controle e o teste de primeira visita ($P = 0,533$), e tomates originados de flores que receberam uma única visita de *P. lineata* apresentaram 30,4% mais sementes em relação aos de flores que foram completamente isoladas ($P = 0,022$; Tabela 3).

Tabela 3. Valores médios (\pm desvio padrão) de cada um dos parâmetros relacionados à qualidade dos frutos nos tratamentos de exclusão, teste de primeira visita (com *P. lineata*) e controle

Atributo do fruto	Tratamento		
	Exclusão	Teste 1ª visita	Controle
Diâmetro equatorial (mm)	54,11 (\pm 3,61)a	52,8 (\pm 3,8)a	54,01 (\pm 4,08)a
Diâmetro longitudinal (mm)	73,87 (\pm 7,36)a	67,84 (\pm 5,25)b	68,27 (\pm 6,18)b
Massa (g)	107,56 (\pm 22,64)a	87,65 (\pm 17,72)b	92,15 (\pm 23,95)ab
Número de sementes	89,67 (\pm 27,3)a	116,94 (\pm 29,99)b	128,35 (\pm 39,27)b

Médias seguidas por letras distintas são significativamente diferentes ($P < 0,05$).

Discussão

Dentre as abelhas que visitaram as flores do tomateiro, as pertencentes ao gênero *Exomalopsis* merecem destaque. O grupo foi o único presente em todas as áreas amostradas e foi mais abundante até que espécies eussociais, como *M. quinquefasciata* e *A. mellifera*, que

apresentam colônias populosas e recrutamento de operárias (Michener 2007). Diversas outras pesquisas também relataram a alta frequência de abelhas do gênero *Exomalopsis* em áreas de cultivo aberto de tomate, evidenciando a contribuição e a importância dos serviços de polinização prestados por esse grupo ao tomateiro (Macias-Macias et al. 2009, Silva-Neto et al. 2013, Deprá et al. 2014, Santos et al. 2014, Silva-Neto et al. 2016). Santos et al. (2014) ainda chamam atenção para a necessidade de aprimorar o conhecimento sobre a biologia dessas espécies. Como nidificam no solo, técnicas de manejo para essas abelhas ainda são escassas (Imperatriz-Fonseca et al. 2006). Assim, conhecer mais sobre a biologia das mesmas, principalmente sobre seus hábitos de nidificação, pode ser um passo importante para que, futuramente, essas espécies possam ser manejadas para a polinização de cultivos (Garófalo et al. 2012).

Outras espécies que merecem destaque são *P. lineata*, *A. mellifera* e *M. quinquefasciata*, que foram, respectivamente, a primeira, a terceira e a quarta com maior número de indivíduos registrados neste estudo. A alta frequência dessas espécies, todas eussociais, também foi relatada em outros levantamentos realizados em cultivos abertos de tomate inseridos no bioma Cerrado (Santos et al. 2014, Silva-Neto et al. 2016). Entretanto, como parte do senso comum, *P. lineata* e *A. mellifera* são geralmente negligenciadas quando se trata da polinização do tomateiro, visto que não são consideradas polinizadores. Como já mencionado, para a coleta de pólen nas flores do tomateiro, essas duas espécies não realizam *buzz pollination*, um comportamento antes considerado fundamental para a polinização dessa cultura em virtude da presença de anteras poricidas (Buchmann 1983), típicas das solanáceas e de outras famílias de plantas (Lorenzi 2014).

A julgar apenas pelo comportamento que as operárias exibem em suas visitas às flores, é razoável dizer que *P. lineata* e *A. mellifera* (e, eventualmente, outras espécies que também não vibram para a coleta de pólen, como *T. spinipes*) polinizam o tomateiro. Isso porque,

durante o *milking*, que é a retirada de pólen das anteras com a glossa, as abelhas eventualmente tocam o estigma das flores. E, de fato, os resultados encontrados neste estudo com os experimentos de polinização corroboram a hipótese de que as duas espécies são polinizadores efetivos da cultura do tomate. Frutos originados de flores dos testes de primeira visita com *P. lineata* e *A. mellifera* apresentaram, respectivamente, 30,4% e 20,9% mais sementes quando comparados aos tomates dos tratamentos de exclusão. Isso evidencia a importância dessas e outras espécies que não realizam *buzz pollination* para a polinização do tomateiro, além de abrir novas possibilidades quanto a estratégias de manejo de polinizadores em áreas de cultivo de tomate com déficit de polinização.

Paratrigona lineata é uma abelha sem ferrão que nidifica no solo, podendo ser encontrada em ninhos com até três metros de profundidade e, por isso, sendo chamada popularmente de “Jataí da terra” (Camargo e Moure 1994). As abelhas sem ferrão são consideradas as mais promissoras no uso como polinizadores comerciais (Cruz e Campos 2009). Isso porque elas são facilmente domesticadas, possuem ninhos populosos e perenes, apresentam estratégias de recrutamento de operárias e estocam uma grande quantidade de alimento, forrageando continuamente (Heard 1999). Entretanto, a escassez de técnicas de manejo e de divisão de ninhos dificulta a disponibilização dessas abelhas para uso na agricultura em larga escala, principalmente quando se trata de espécies que nidificam no solo (Imperatriz-Fonseca et al. 2006). Além disso, apesar de comprovada a sua atuação como polinizador do tomateiro, *P. lineata* deve ser tratada com cuidado para essa finalidade, uma vez que também apresentou o comportamento de pilhagem nas flores. Dessa forma, uma avaliação mais detalhada e um balanço entre os comportamentos de pilhagem e polinização realizados por essa espécie seriam necessários.

Em relação à *A. mellifera*, diferentemente das abelhas sem ferrão, a espécie já é bastante utilizada na polinização de vários cultivos agrícolas, principalmente nos Estados Unidos, visto

que apresenta a vantagem de possuir colônias populosas que podem ser instaladas e removidas do campo de cultivo rapidamente (De Jong et al. 2006, Morais et al. 2012). Ainda assim, o Brasil não apresenta uma tradição no emprego dessas abelhas para a polinização de cultivos, utilizando-as majoritariamente para obtenção de seus produtos, como mel, cera e própolis (De Jong et al. 2006). Adicionalmente, por não realizar o *buzz pollination*, a espécie sempre foi rotulada como não sendo um polinizador de flores com anteras poricidas (Abak et al. 2000, Banda e Paxton 1991, Cervancia e Bergonia 1991, Silva-Neto et al. 2016). Nesse sentido, diante dos resultados encontrados neste estudo, pode-se dizer que existe potencial no emprego da abelha melífera para a polinização do tomateiro, já que as técnicas de manejo para a espécie estão bem estabelecidas.

Mesmo que o *milking* seja um comportamento que leva à polinização das flores do tomateiro, é provável que o *buzz pollination* seja mais eficaz para essa finalidade (Bispo dos Santos et al. 2009). Para verificar essa questão, testes adicionais que comparem o desempenho de espécies de abelhas que apresentam os distintos comportamentos na cultura do tomate são necessários. Isso, porém, não inviabiliza e não descarta a possibilidade da utilização de forma complementar e sinérgica de diferentes polinizadores para suprir a demanda de polinização de um cultivo (Santos et al. 2014). Na verdade, aproveitar da biodiversidade é extremamente positivo no sentido de, por exemplo, evitar que a exploração comercial recaia apenas sobre uma espécie (Venturieri et al. 2012).

Diferentes estudos já mostraram os benefícios da diversidade de polinizadores para os serviços de polinização (Kremen et al. 2002, Blitzer et al. 2016). E isso se confirma mais uma vez com os resultados obtidos neste estudo por meio dos experimentos de polinização. Na área de cultivo 1, a polinização adicional efetuada pelas abelhas nas flores que ficaram livres para visitação gerou frutos com mais sementes, maiores e mais pesados. Isso acontece porque, comparadas ao efeito exclusivo do estímulo mecânico provocado pelo vento em flores

ensacadas, as visitas das abelhas melhoram a polinização ao aumentar a deposição de grãos de pólen no estigma (Greenleaf e Kremen 2006, Macias-Macias et al. 2009), aumentando, assim, a quantidade de sementes dos frutos (Hogendoorn et al. 2000). Por esta razão, os tomates do grupo controle foram maiores e mais pesados, já que existe uma correlação positiva entre o número de sementes e os parâmetros relativos à qualidade dos mesmos (Hogendoorn et al. 2010). Através da produção de hormônios, como auxinas, o número de sementes pode interferir e estimular os processos de divisão e expansão celular, aumentando, dessa forma, o tamanho e o peso dos frutos, bem como a capacidade de armazenamento de sólidos solúveis das células (Prudent et al. 2009).

Nesse sentido, os resultados encontrados para o teste de primeira visita com *A. mellifera* demonstraram que, apesar da melhora na qualidade dos frutos com a polinização adicional efetuada pelas abelhas, uma única visita dessa espécie nas flores não é suficiente para que os tomates atinjam patamares mais elevados em relação aos seus parâmetros de qualidade. Isso porque os frutos oriundos do teste de primeira visita apresentaram valores intermediários em relação ao tratamento de exclusão e o grupo controle. Resultados semelhantes foram obtidos também com abelhas que realizam *buzz pollination* em experimentos executados em cultivos fechados de tomate (Morandin et al. 2001).

Em relação à área de cultivo 2, os resultados também confirmam a importância das abelhas para a polinização do tomateiro, uma vez que os frutos originados do grupo controle e do teste de primeira visita com *P. lineata* apresentaram mais sementes quando comparados aos tomates do tratamento de exclusão. No entanto, ao contrário do esperado, as flores do tratamento de exclusão, de modo geral, geraram frutos maiores e mais pesados. No decorrer dos experimentos de polinização, o cultivo foi acometido por uma doença e esta pode ter afetado o desenvolvimento dos frutos de modo diferencial entre os tratamentos. Isso possivelmente

explicaria esses resultados inconclusivos que foram obtidos para os parâmetros relacionados à qualidade dos tomates nessa área.

Por fim, os resultados encontrados neste estudo evidenciam, então, a necessidade de se considerar, no contexto da polinização do tomateiro, as abelhas que não vibram para a coleta de pólen nas flores, ou seja, que não realizam *buzz pollination*, tendo em vista que *P. lineata* e *A. mellifera* se mostraram polinizadores efetivos dessa cultura. Além disso, com a produção de frutos com mais sementes, maiores e mais pesados, reforça-se, aqui, a importância das abelhas para a polinização do tomateiro. Nesse sentido, a adoção de práticas amigáveis, como o manejo da paisagem agrícola de modo a manter suas bordas com vegetação nativa e o uso racional de agrotóxicos (Imperatriz-Fonseca 2005), deve se tornar uma prioridade para a conservação dos polinizadores e dos serviços de polinização prestados por eles.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e, principalmente, à Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro, aos agricultores, que permitiram e deram todo o suporte para a realização deste trabalho, ao Dr. Paulo Eugênio Alves Macedo de Oliveira, à Dra. Solange Cristina Augusto e à Dra. Camila Nonato Junqueira pelas sugestões dadas ao longo da pesquisa, ao Me. Alexandre Oliveira Resende Santos e à Dra. Laíce Souza Rabelo pela identificação das abelhas e aos colegas Isabel Farias Aidar, Jaqueline Eterna Batista, Bárbara Matos da Cunha Guimarães, Raysa Sales Teixeira Borges de Carvalho e Nicole Cristina Machado Borges pelas sugestões e contribuições em campo.

Referências bibliográficas

- Abak, K., A. O. Ozdogan, H. Y. Dasgan, K. Derin, e O. Kaftanoglu. 2000.** Effectiveness of bumble bees as pollinators for eggplants grown in unheated greenhouses. *Acta Hortic.* 514: 197-203. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.514.22>
- Alves, K. A., e R. Rosa. 2008.** Espacialização de dados climáticos do Cerrado mineiro. *Hor. Cient.* 8: 1-28.
- Banda, H. J., e R. J. Paxton. 1991.** Pollination of greenhouse tomatoes by bees. *Acta Hortic.* 288: 194-198. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1991.288.28>
- Bartelli, B. F., e F. H. Nogueira-Ferreira. 2014.** Pollination Services Provided by *Melipona quadrifasciata* Lepeletier (Hymenoptera: Meliponini) in Greenhouses with *Solanum lycopersicum* L. (Solanaceae). *Sociobiology* 61: 510-516. <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v61i4.510-516>
- Bispo dos Santos, S. A., A. C. Roselino, M. Hrcir, e L. R. Bego. 2009.** Pollination of tomatoes by the stingless bee *Melipona quadrifasciata* and the honey bee *Apis mellifera* (Hymenoptera, Apidae). *Genet. Mol. Res.* 8: 751-757. <https://doi.org/10.4238/vol8-2kerr015>
- Blitzer, E. J., J. Gibbs, M. G. Park, e B. N. Danforth. 2016.** Pollination services for apple are dependent on diverse wild bee communities. *Agric. Ecosyst. Environ.* 221: 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.004>
- Buchmann, S. L. 1983.** Buzz pollination in angiosperms, pp. 73-113. *In* C. E. Jones e R. J. Little (eds.), *Handbook of Experimental Pollination Biology*. Scientific and Academic Editions, Nova York, EUA.
- Camargo, J. M. F., e J. S. Moure. 1994.** Meliponinae neotropicais: os gêneros *Paratrigona* Schwarz, 1938 e *Aparatrigona* Moure, 1951 (Hymenoptera, Apidae). *Arq. Zoo.* 32: 33-109. <https://doi.org/10.11606/issn.2176-7793.v32i2p33-109>

- Carvalho, J. L., e L. G. Pagliuca. 2007.** Tomate, um mercado que não pára de crescer globalmente. Hortifruti Brasil 6: 6-14.
- Cervancia, C. R., e E. A. Bergonia. 1991.** Insect pollination of cucumber (*Cucumis sativus*) in the Philippines. Acta Hort. 288, 278-282. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1991.288.43>
- Costanza, R., R. D'Arge, R. Degroot, S. Farber, e M. Grasso. 1997.** The value of the world's service and natural capital. Nature 387: 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
- Cruz, D. O., e L. A. O. Campos. 2009.** Polinização por abelhas em cultivos protegidos. R. Bras. Agroc. 15: 5-10.
- Daily, G. C. 1997.** Nature's services: societal dependence on natural ecosystems. Island Press, Washington, DC.
- De Jong, D., L. S. Gonçalves, F. Ahmad, K. P. Gramacho, R. C. R. Camargo, U. Partap, e V. B. Filho. 2006.** Honey Bee. In V. L. Imperatriz-Fonseca, A. M. Saraiva, e D. De Jong (eds.), Bees as pollinators in Brazil: assessing the status and suggesting best practices. Holos Editora, Ribeirão Preto.
- De Marco, P., e F. M. Coelho. 2004.** Services performed by the ecosystem: forest remnants influence agricultural cultures pollination and production. Biodivers. Conserv. 13: 1245-1255. <https://doi.org/10.1023/B:BIOC.0000019402.51193.e8>
- Deprá, M. S., G. C. G. Delaqua, L. Freitas, e M. C. Gaglianone. 2014.** Pollination deficit in open-field tomato crops (*Solanum lycopersicum* L., Solanaceae) in Rio de Janeiro state, Southeast Brazil. J. Pollinat. Ecol. 12: 1-8. [https://doi.org/10.26786/1920-7603\(2014\)7](https://doi.org/10.26786/1920-7603(2014)7)
- Durán, X. A., R. B. Ulloa, J. A. Carrillo, J. L. Contreras, e M. T. Bastidas. 2010.** Evaluation of yield component traits of honeybee pollinated (*Apis mellifera* L.) Rapeseed canola (*Brassica napus* L.). Chil. J. Agr. Res. 70: 309-314. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392010000200014>

- [FAO] Food and Agriculture Organization. 2004.** Conservation and management of pollinators for sustainable agriculture - the international response. *In* B. M. Freitas e J. O. P. Pereira (eds.), Solitary bees: conservation, rearing and management for pollination. Imprensa Universitária, Fortaleza, Brasil.
- [FAOSTAT] Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database Results. 2016.** Disponível em: <<http://faostat.fao.org>>. Acessado em: 30 dez. 2016.
- Gaglianone, M. C., M. J. O. Campos, E. Franceschinelli, M. S. Deprá, P. N. Silva, P. C. Montagnana, A. P. Hautequestt, M. C. M. Moraes, e L. A. O. Campos. 2015.** Plano de manejo para os polinizadores do tomateiro. Funbio, Rio de Janeiro, Brasil.
- Garófalo, C. A., C. F. Martins, C. M. L. Aguiar, M. A. Del Lama, e I. Alves-dos-Santos. 2012.** As abelhas solitárias e perspectivas para seu uso na polinização no Brasil. *In* V. L. Imperatriz Fonseca, D. A. L. Canhos, D. A. Araújo, e A. M. Saraiva (eds.), Polinizadores no Brasil. Edusp, São Paulo, Brazil.
- Giannini, T. C., G. D. Cordeiro, B. M. Freitas, A. M. Saraiva, e V. L. Imperatriz-Fonseca. 2015.** The dependence of crops for pollinators and the economic value of pollination in Brazil. *J. Econ. Entomol.* 108: 849-857. <https://doi.org/10.1093/jee/tov093>
- Greenleaf, S. S., e C. Kremen. 2006.** Wild bee species increase tomato production and respond differently to surrounding land use in Northern California. *Biol. Conserv.* 13: 81-87. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.05.025>
- Heard, T. A. 1999.** The role of stingless bees in crop pollination. *Annu. Rev. Entomol.* 44: 183-206. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.44.1.183>
- Hogendoorn, K., F. Bartholomaeus, e M. A. Keller. 2010.** Chemical and sensory comparison of tomatoes pollinated by bees and by a pollination wand. *J. Econ. Entomol.* 103: 1286-1292. <https://doi.org/10.1603/EC09393>

- Hogendoorn, K., Z. Steen, e M. P. Schwarz. 2000.** Native Australian carpenter bees as a potential alternative to introducing bumble bees for tomato pollination in greenhouses. *J. Apicult. Res.* 39: 67-74. <https://doi.org/10.1080/00218839.2000.11101023>
- [IBGE] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2016.** Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acessado em: 30 dez. 2016.
- Imperatriz-Fonseca, V. L. 2005.** Serviços aos ecossistemas, com ênfase nos polinizadores e polinização. Disponível em: <<http://www.ib.usp.br/>>. Acessado em: 07 abr. 2017.
- Imperatriz-Fonseca, V. L., A. M. Saraiva, e D. De Jong. 2006.** Information technology and pollinators initiatives. *In* V. L. Imperatriz-Fonseca, A. M. Saraiva, e D. De Jong (eds.), *Bees as pollinators in Brazil: assessing the status and suggesting best practices*. Holos Editora, Ribeirão Preto, Brasil.
- Klein, A. M. 2009.** Nearby rainforest promotes coffee pollination by increasing spatio-temporal stability in bee species richness. *Forest Ecol. Manag.* 258: 1838-1845. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.05.005>
- Kremen, C. 2005.** Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? *Ecol. Lett.* 8: 468–479. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00751.x>
- Kremen, C., N. M. Williams, e R. W. Thorp. 2002.** Crop pollination from native bees at risk from agricultural infestation. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 99: 16812-16816. <https://doi.org/10.1073/pnas.262413599>
- Lorenzi, H. 2014.** Árvores Brasileiras - Manual de Identificação e Cultivo de Plantas Arbóreas Nativas do Brasil. Plantarum, Nova Odessa.
- Macias-Macias, O., J. Chuc, P. Ancona-Xiu, O. Cauich, e J. J. G. Quezada-Euán. 2009.** Contribution of native bees and Africanized honey bees (Hymenoptera: Apoidea) to Solanaceae crop pollination in tropical México. *J. Appl. Entomol.* 133: 456-465. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0418.2009.01399.x>
- Michener, C. D. 2007.** The bees of the world. The Johns Hopkins University Press, Baltimore.

- Milfont, M. D. O., E. E. M. Rocha, A. O. N. Lima, e B. M. Freitas. 2013.** Higher soybean production using honeybee and wild pollinators, a sustainable alternative to pesticides and autopollination. *Environ. Chem. Lett.* 11: 335-341. <https://doi.org/10.1007/s10311-013-0412-8>
- Morais, M. M., D. De Jong, D. Massage, e L. S. Gonçalves. 2012.** Perspectivas e Desafios para o Uso das Abelhas *Apis mellifera* como Polinizadores no Brasil. In V. L. Imperatriz Fonseca, D. A. L. Canhos, D. A. Araújo, e A. M. Saraiva (orgs.), *Polinizadores no Brasil*. Edusp, São Paulo, Brasil.
- Morandin, L. A., T. M. Laverty, e P. G. Kevan. 2001.** Bumble bee (Hymenoptera: Apidae) activity and pollination levels in commercial tomato greenhouses. *J. Econ. Entomol.* 94: 462-467. <https://doi.org/10.1603/0022-0493-94.2.462>
- Prudent, M., M. Causse, M. Genard, P. Tripodi, S. Grandillo, e N. Bertin. 2009.** Genetic and physiological analysis of tomato fruit weight and composition: influence of carbon availability on QTL detection. *J. Exp. Bot.* 60: 923-937. <https://doi.org/10.1093/jxb/ern338>
- R Development Core Team. 2015.** R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- Rasmussen, C., J. Nieh, e J. C. Biesmeijer. 2010.** Foraging biology of neglected bee pollinators. *Psyche* 2010: 1-2. <https://doi.org/10.1155/2010/134028>
- Ricketts, T. H. 2004.** Tropical forest fragments enhance pollinator activity in nearby coffee crops. *Conserv. Biol.* 18: 1262-1271. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00227.x>
- Ricketts, T. H., J. Regetz, I. Steffan-Dewenter, S. A. Cunningham, C. Kremen, A. Bogdanski, B. Gemmill-Herren, S. S. Greenleaf, A. M. Klein, M. M. Mayfield, L. A. Morandin, A. Ochieng, e B. F. Viana. 2008.** Landscape effects on crop pollination services: are there general patterns? *Ecol. Lett.* 11: 499–515. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01157.x>

- Santos, A. O. R., B. F. Bartelli, e F. H. Nogueira-Ferreira. 2014.** Potential pollinators of tomato, *Lycopersicon esculentum* (Solanaceae), in open crops and the effect of a solitary bee in fruit set and quality. *J. Econ. Entomol.* 107: 987-994. <https://doi.org/10.1603/EC13378>
- Shami, N. J. I. E., e E. A. M. Moreira. 2004.** Licopeno como agente antioxidante. *Rev. Nutr.* 17: 227-236. <https://doi.org/10.1590/S1415-52732004000200009>
- Silva-Neto, C. M., F. G. Lima, B. B. Gonçalves, L. L. Bergamini, B. A. R. Bergamini, M. A. S. Elias, e E. V. Franceschinelli. 2013.** Native bees pollinate tomato flowers and increase fruit production. *J. Pollin. Ecol.* 11: 41-45. [https://doi.org/10.26786/1920-7603\(2013\)4](https://doi.org/10.26786/1920-7603(2013)4)
- Silva-Neto, C. M., L. L. Bergamini, M. A. S. Elias, G. L. Moreira, J. M. Morais, B. A. R. Bergamini, e E. V. Franceschinelli. 2016.** High species richness of native pollinators in Brazilian tomato crops. *Braz. J. Biol.* [online]. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.17515>
- Silveira, F. A., G. A. R. Melo, e E. A. B. Almeida. 2002.** Abelhas brasileiras: sistemática e identificação. Fundação Araucária, Belo Horizonte.
- Vaissière, B. E., B. M. Freitas, e B. Gemmill-Herren. 2011.** Protocol to detect and assess pollination deficits in crops: a handbook for its use. FAO, Rome.
- Venturieri, G. C., D. A. Araújo, J. K. Villas-Boas, C. A. L. Carvalho, C. Menezes, A. Vollet-Neto, A. L. Contrera, M. Cortopassi-Laurino, P. Nogueira-Neto, e V. L. Imperatriz-Fonseca. 2012.** Meliponicultura no Brasil: Situação Atual e Perspectivas Futuras para Uso na Polinização Agrícola. *In* V. L. Imperatriz Fonseca, D. A. L. Canhos, D. A. Araújo, e A. M. Saraiva (orgs.), Polinizadores no Brasil. Edusp, São Paulo, Brasil.

Capítulo 3

Contaminação por metais pesados em abelhas que visitam o tomateiro (*Solanum lycopersicum*
L., Solanaceae)

Contaminação por metais pesados em abelhas que visitam o tomateiro (*Solanum lycopersicum* L., Solanaceae)

*O capítulo foi preparado para submissão na revista **Science of the Total Environment** e a formatação obedece parcialmente às normas do periódico.*

RESUMO – Apesar da escassez de estudos relacionando os metais pesados e as abelhas, a contaminação por esses elementos é considerada uma das principais causas do declínio de populações desses insetos. Assim, analisar essa contaminação em abelhas presentes em cultivos agrícolas, como o tomateiro, torna-se importante. Este estudo visou avaliar as concentrações de cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobre (Cu), cromo (Cr), manganês (Mn) e zinco (Zn) em operárias campeiras de *Apis mellifera* que visitam as flores do tomateiro e verificar se existem diferenças nas concentrações desses elementos nas abelhas amostradas em distintos cultivos de tomate. O trabalho foi realizado em cinco áreas comerciais de cultivo aberto de tomate localizadas na região do Triângulo Mineiro (Sudeste do Brasil). A concentração média total para os metais pesados analisados foi relativamente alta: Cd = 0,06 mg/kg; Pb = 7,50 mg/kg; Cu = 11,34 mg/kg; Cr = 139,74 mg/kg; Mn = 87,25 mg/kg; e Zn = 293,83 mg/kg. Com exceção do cádmio, houve uma diferença significativa entre as áreas quanto aos teores dos metais, mas não houve um padrão entre elas. Os resultados obtidos indicam que as práticas agrícolas podem ser

determinantes no grau de contaminação por metais pesados em abelhas que visitam as flores do tomateiro.

Palavras-chave: Cádmio, chumbo, cobre, cromo, manganês, zinco, práticas agrícolas.

ABSTRACT – Despite the lack of studies relating heavy metals and bees, contamination by these elements is considered a major cause of populations' decline of these insects. Thus, analyzing this contamination in bees present in agricultural crops, like tomato, becomes important. This study aimed to evaluate the concentrations of cadmium (Cd), lead (Pb), copper (Cu), chromium (Cr), manganese (Mn) and zinc (Zn) in *Apis mellifera* foragers that visit tomato flowers and verify if there are differences in concentrations of these elements in bees sampled in different tomato crops. The research was conducted in five commercial tomato fields located in the Triângulo Mineiro region (Southeastern Brazil). Total mean concentration for heavy metals analyzed was relatively high: Cd = 0.06 mg/kg; Pb = 7.50 mg/kg; Cu = 11.34 mg/kg; Cr = 139.74 mg/kg; Mn = 87.25 mg/kg; and Zn = 293.83 mg/kg. With the exception of cadmium, there was a significant difference between areas regarding metal content, but there was no pattern among them. Results indicate that agricultural practices can be determinant in the degree of heavy metals contamination in bees that visit tomato flowers.

Key words: Cadmium, lead, copper, chromium, manganese, zinc, agricultural practices.

1. Introdução

As abelhas desempenham um papel chave nos ecossistemas, uma vez que polinizam diversas espécies de plantas nativas e cultivadas (Kremen, 2005). Contudo, nos últimos anos,

estudos têm apontado um declínio global nas populações desses insetos e de outros grupos de polinizadores tanto em áreas agrícolas quanto em áreas naturais, ameaçando a produção de alimentos e a manutenção da biodiversidade (Biesmeijer et al., 2006; Potts et al., 2010). Para abelhas melíferas, programas de monitoramento na Europa e na América do Norte têm evidenciado taxas elevadas de perda de colônias (Laurent et al., 2015; Steinhauer et al., 2017), e constatações similares também têm sido obtidas em outras partes do mundo (IPBES, 2016).

Os fatores que afetam as abelhas são de natureza e origem diversas e não são mutuamente exclusivos entre si, podendo atuar de forma conjunta. Eles podem ser caracterizados como nutricionais, biológicos, físicos e químicos. Os fatores nutricionais podem ser expressos como mudanças no estado nutricional do inseto (proteínas, vitaminas, minerais, etc.), enquanto os biológicos incluem pragas e doenças exóticas. Quanto aos fatores físicos, estes estão relacionados a mudanças ambientais, como fragmentação e perda de hábitat, enquanto os químicos incluem contaminantes de ocorrência natural (micotoxinas, alcaloides de plantas, etc.) e, principalmente, compostos de natureza antropogênica, oriundos, por exemplo, da agricultura, de atividades urbanas e de outras fontes (Rortais et al., 2017).

Atualmente, níveis crescentes de poluentes químicos são encontrados nos ecossistemas devido à urbanização, industrialização e às práticas agrícolas. Dentre esses poluentes, destacam-se os metais pesados por sua alta toxicidade e seus efeitos deletérios à saúde dos seres vivos (Serbula et al., 2013). Esses metais são utilizados como matéria-prima em diversas indústrias de bens de consumo e em fertilizantes agrícolas, além de estarem presentes na composição de vários produtos, como tintas, pilhas e agrotóxicos (Ribeiro-Filho et al., 2001).

Dependendo do estado de oxidação, os metais pesados podem ser muito reativos, sendo que sua toxicidade se manifesta de várias formas: (1) podem inativar muitas enzimas, (2) substituir íons metálicos essenciais em biomoléculas, levando à inibição ou perda de função das mesmas, e (3) interromper a homeostase redox na célula (Hossain et al., 2012; Tchounwou et

al., 2012). Pouquíssimas evidências existem acerca dos efeitos da contaminação por metais pesados sobre os polinizadores, principalmente abelhas. Entretanto, alguns estudos já mostraram que: a contaminação por zinco (Zn) afeta direta e negativamente a sobrevivência de uma espécie de abelha solitária, *Osmia rufa* L. (Moroń et al., 2010); a exposição aos metais gera mudanças significativas na expressão gênica e na atividade enzimática das células em *Apis mellifera* L., 1758 (Nikolić et al., 2016); a contaminação por cádmio (Cd) altera a estrutura da fibra muscular de voo de operárias de *Bombus morio* (Swederus, 1787) (Abdalla et al., 2016); e o aumento da concentração de metais pesados provoca uma diminuição na abundância e diversidade de abelhas solitárias (Moroń et al., 2012).

Apesar da escassez de estudos relacionando os metais pesados e as abelhas, especialistas consideram a contaminação por esses elementos como uma das principais causas do declínio de populações de *Bombus* Latreille, 1802 na Europa (Kosior et al., 2007). Os metais pesados são regularmente encontrados no ar, na água e no solo. Dessa forma, as abelhas estão expostas a eles durante suas atividades de forrageamento, tanto diretamente, retendo, por exemplo, partículas atmosféricas nos pelos corporais, quanto indiretamente, sendo contaminadas por meio de recursos alimentares (pólen e néctar) ou através da água (Johnson, 2014; Lambert et al., 2012). Assim, abelhas e as matrizes associadas (pólen, mel, cera e própolis) têm sido utilizadas para biomonitoramento de metais pesados (Formicki et al., 2013; Jones, 1987; Lambert et al., 2012; Marin et al., 2016) e estudos que avaliem a contaminação por esses metais em abelhas presentes em cultivos agrícolas, como o tomateiro, tornam-se extremamente importantes.

O tomateiro, *Solanum lycopersicum* L. (Solanaceae), é uma das plantas olerícolas mais difundidas no mundo, sendo cultivado em praticamente todas as regiões do planeta. O fruto é um alimento amplamente consumido e de grande importância ao organismo humano, principalmente pela presença do licopeno, um antioxidante que combate os radicais livres e

retarda o envelhecimento (Shami & Moreira, 2004). Em decorrência da enorme quantidade de pólen que a planta oferece e tendo em vista que esse recurso é essencial para a nutrição das larvas, as flores do tomateiro são visitadas por uma alta diversidade de abelhas, dentre elas, *A. mellifera* (Santos et al., 2014; Silva-Neto et al., 2016). No entanto, devido à perecibilidade natural da cultura do tomate, que é afetada por um elevado número de pragas e doenças, emprega-se, normalmente, uma grande quantidade de agrotóxicos nos cultivos, principalmente os das classes inseticidas e fungicidas (Latorraca et al., 2008). Contudo, esse uso de agrotóxicos é feito adotando-se um combate preventivo e de forma indiscriminada, em virtude, principalmente, do medo que os agricultores têm de perder suas lavouras, uma vez que o investimento é muito alto (Filho et al., 2009).

Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivos: (1) avaliar se existe contaminação por metais pesados – cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobre (Cu), cromo (Cr), manganês (Mn) e zinco (Zn) – e qual a concentração desses metais em abelhas que visitam o tomateiro, utilizando, para isso, *A. mellifera*; e (2) verificar se existem diferenças nas concentrações desses elementos em operárias amostradas em distintos cultivos de tomate. Espera-se que elevados níveis de metais pesados sejam encontrados nessas abelhas, uma vez que, como mencionado anteriormente, esses elementos fazem parte da composição de diversos agrotóxicos e que estes são aplicados indiscriminadamente na cultura do tomate. Entretanto, apesar de possíveis diferenças entre as práticas agrícolas executadas nos cultivos, espera-se que áreas mais próximas sejam mais similares quanto às concentrações dos metais nas abelhas em virtude também das outras fontes de contaminação, como ar e água.

2. Material e Métodos

2.1. Área de estudo

O trabalho foi desenvolvido na região do Triângulo Mineiro (Sudeste do Brasil), que se configura como um polo de produção de alimentos em Minas Gerais. O clima da região é marcado por duas estações bem definidas, uma chuvosa que se estende de outubro a março e outra seca de abril a setembro. A precipitação anual varia entre 1160 a 1460 mm/ano e a temperatura média anual está entre 23 e 25°C, sendo uniforme ao longo do ano (Alves & Rosa, 2008).

O estudo foi realizado em cinco áreas comerciais de cultivo aberto de tomate, três localizadas no município de Araguari-MG (18°38'45,74"S / 48°11'37,88"O; ARA1, ARA2 e ARA3) e duas no município de Cascalho Rico-MG (18°34'56,61"S / 47°52'56,14"O; CAR1 e CAR2). Estas eram distantes aproximadamente 2,8 km uma da outra e, em média, cerca de 15 km distantes das áreas de Araguari. Neste município, duas áreas (ARA1 e ARA2) eram localizadas a uma distância de 250 m entre elas e ambas a uma distância média de 3 km da terceira (Fig. 1). Todas as áreas, que estão inseridas no bioma Cerrado, eram caracterizadas principalmente pela presença de pastagens, milho, café, soja e áreas de vegetação nativa na paisagem de entorno da cultura de tomate, porém, com proporções diferentes para cada uma dessas classes. Em Cascalho Rico, os cultivos apresentavam ainda rodovias e uma área urbana nas proximidades.

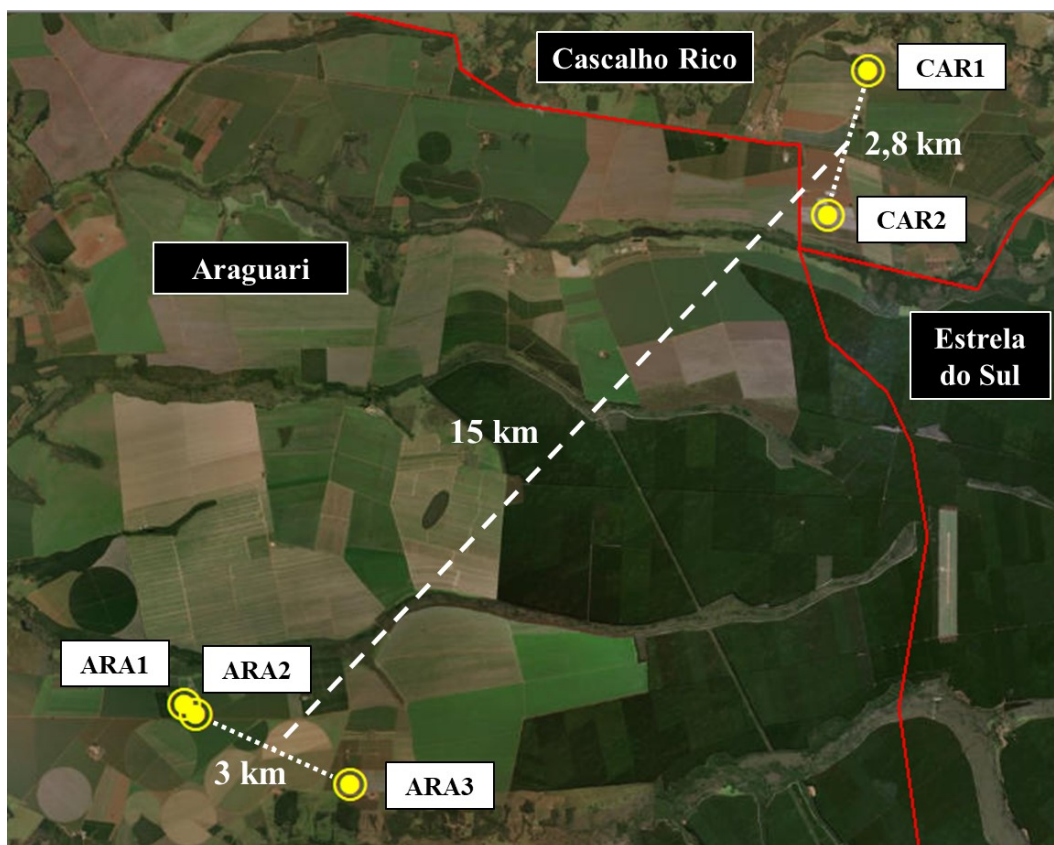


Fig. 1. Localização das áreas de cultivo aberto de tomate estudadas (ARA1, ARA2, ARA3, CAR1 e CAR2) e as respectivas distâncias entre elas.

2.2. Coleta das abelhas e análise dos metais pesados

Com o intuito de avaliar a contaminação por Cd, Pb, Cu, Cr, Mn e Zn em abelhas que visitam as flores do tomateiro, entre julho de 2015 e março de 2016, foram coletadas 15 abelhas da espécie *A. mellifera* em cada área de cultivo, totalizando 75 indivíduos. Em um único dia de amostragem para cada área, durante o período de floração, as abelhas foram coletadas com o auxílio de redes entomológicas enquanto visitavam as flores e, em seguida, sacrificadas em câmaras mortíferas contendo acetato de etila. Posteriormente, no Laboratório de Ecologia e Comportamento de Abelhas (LECA) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), os

indivíduos foram armazenados em potes de plástico no freezer a -20°C , até o processamento e análise dos mesmos.

No Laboratório de Biocombustível e Tecnologia Ambiental (LaBTA) da ESTES/UFU, as amostras foram pesadas e, a elas, foram adicionados 7 ml de ácido nítrico (HNO_3) ultrapuro a 65% e 1 ml de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a 30% (Merck, ISO). As amostras foram deixadas em pré-digestão por cerca de 18 h com os frascos fechados em sistema de exaustão. Em seguida, o processo de digestão foi finalizado em micro-ondas sob 200°C durante 30 min. Após resfriamento, as soluções ácidas foram completadas com água deionizada até o volume de 12 ml. Os teores dos metais pesados foram estimados por espectrofotometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES - Agilent-725).

2.3. Análise dos dados

Testes de Kruskal-Wallis (H) seguidos do teste Tukey-Type de comparações múltiplas foram realizados para cada um dos metais pesados avaliados para verificar se existem diferenças entre as concentrações desses elementos presentes nas abelhas que visitaram os distintos cultivos de tomate. Com o intuito de investigar a similaridade entre as áreas com base nas concentrações dos metais nas abelhas, foi feita uma análise de agrupamento UPGMA. As análises foram realizadas com o auxílio do software R (R Development Core Team, 2015).

3. Resultados

Na tabela 1, estão apresentados os valores médios e a amplitude das concentrações de cada metal pesado avaliado nas abelhas amostradas nas diferentes áreas de cultivo de tomate. Em relação ao cádmio (Cd), este não foi detectado em nenhuma das amostras analisadas em ARA1. Em ARA2, ARA3, CAR1 e CAR2, o elemento foi encontrado, respectivamente, em 6,7%, 33,3%, 13,3% e 6,7% das amostras. Quanto ao chumbo (Pb), este elemento foi encontrado em 100% das amostras analisadas em praticamente todas as áreas, com exceção de ARA2, em que o metal foi detectado em 80% das amostras. Em relação aos outros metais pesados (Cu, Cr, Mn e Zn), 100% das amostras obtiveram esses elementos em todas as áreas.

Tabela 1

Valores médios e amplitude das concentrações dos metais pesados avaliados em operárias de *A. mellifera* amostradas nas diferentes áreas de cultivo de tomate.

Metal pesado	Concentração (mg/kg)				
	ARA1	ARA2	ARA3	CAR1	CAR2
Cádmio (Cd)	0	0,09 (0-1,42)	0,19 (0-1,74)	0,02 (0-0,16)	0,02 (0-0,24)
Chumbo (Pb)	5,84 (0,55-13,78)	5,48 (0-38,17)	11,07 (1,83-47,89)	9,40 (5,91-16,13)	5,69 (1,85-14,53)
Cobre (Cu)	9,96 (6,98-14,48)	11,20 (6,73-20,95)	9,18 (7,82-11,80)	11,77 (8,20-15,63)	14,60 (10,02-50,97)
Cromo (Cr)	136,73 (109,44-165,08)	117,81 (87,31-154,42)	141,70 (120,49-172,45)	144,74 (106,39-168,86)	157,74 (136,83-181,30)
Manganês (Mn)	72,71 (32,72-151,81)	90,52 (48,17-132,83)	75,12 (37,62-106,52)	111,98 (48,44-239,72)	85,92 (44,83-134,92)
Zinco (Zn)	157,83 (40,93-711,73)	213,66 (53,01-990,94)	331,49 (52,74-1055,77)	640,21 (89,61-1430,44)	125,98 (54,90-293,27)

A concentração média total para os metais pesados analisados foi: Cd = 0,06 mg/kg; Pb = 7,50 mg/kg; Cu = 11,34 mg/kg; Cr = 139,74 mg/kg; Mn = 87,25 mg/kg; e Zn = 293,83 mg/kg.

As concentrações de Cd entre as distintas áreas não foram significativamente diferentes entre si ($H = 8,947$; $P = 0,062$; Fig. 2A). No entanto, houve uma diferença significativa entre as áreas quanto aos teores dos metais encontrados em *A. mellifera* para Pb ($H = 17,058$; $P = 0,002$; Fig. 2B), Cu ($H = 20,512$; $P < 0,001$; Fig. 2C), Cr ($H = 26,156$; $P < 0,001$; Fig. 2D), Mn ($H = 11,898$; $P = 0,018$; Fig. 2E) e Zn ($H = 19,661$; $P = 0,001$; Fig. 2F).

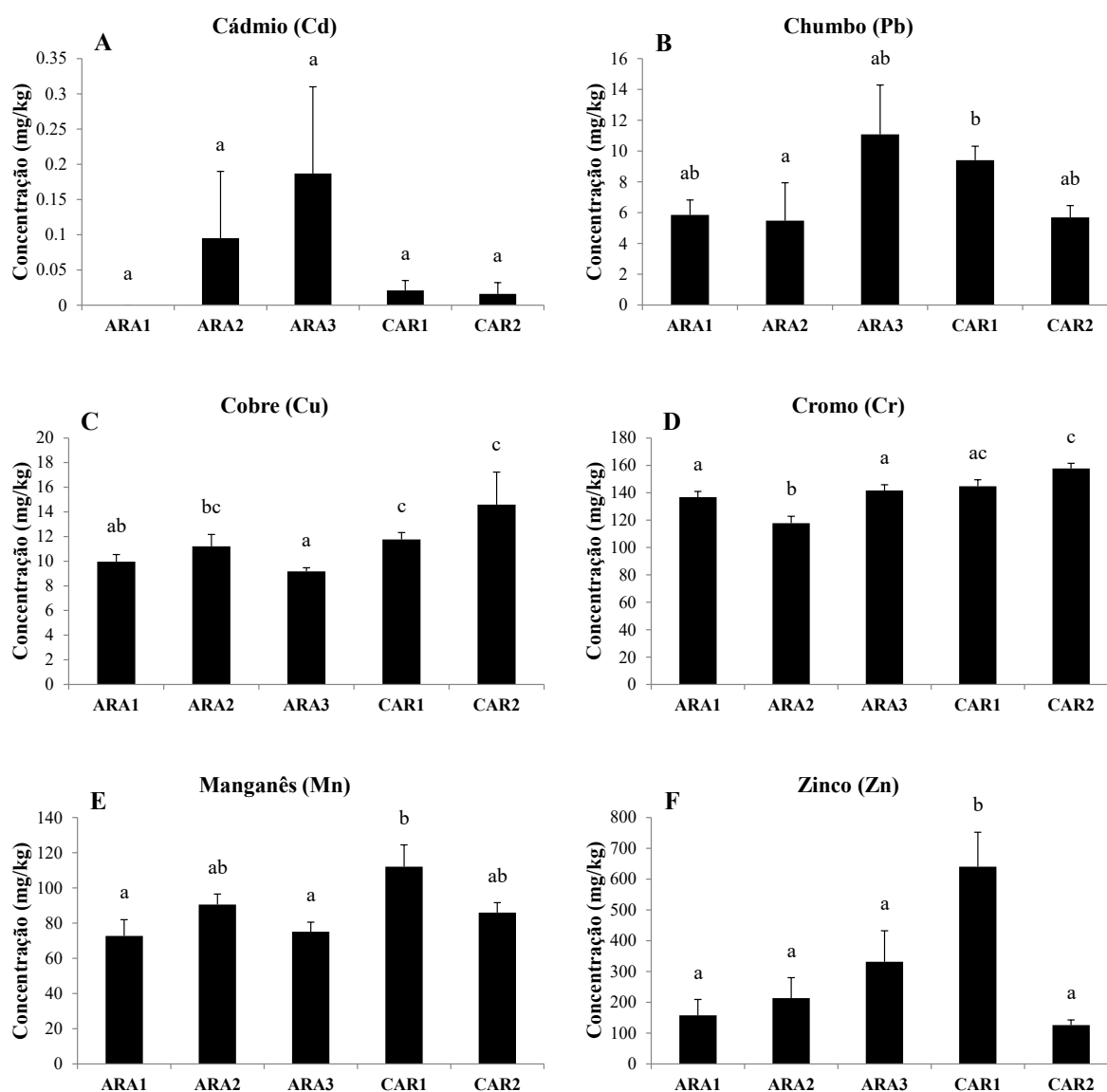


Fig. 2. Concentrações médias de Cd (A), Pb (B), Cu (C), Cr (D), Mn (E) e Zn (F) obtidas em operárias de *A. mellifera* amostradas nas diferentes áreas de cultivo de tomate. Letras distintas indicam diferenças significativas entre as áreas ($P < 0,05$).

A análise de agrupamento UPGMA apresentou uma forte correlação cofenética (0,886), ou seja, a formação dos grupos foi fortemente associada às concentrações dos metais pesados. As áreas ARA1 e CAR2 foram mais similares entre si e o grupo formado pelas duas foi mais próximo de ARA2, seguido de ARA3 e, posteriormente, de CAR1 (Fig. 3).

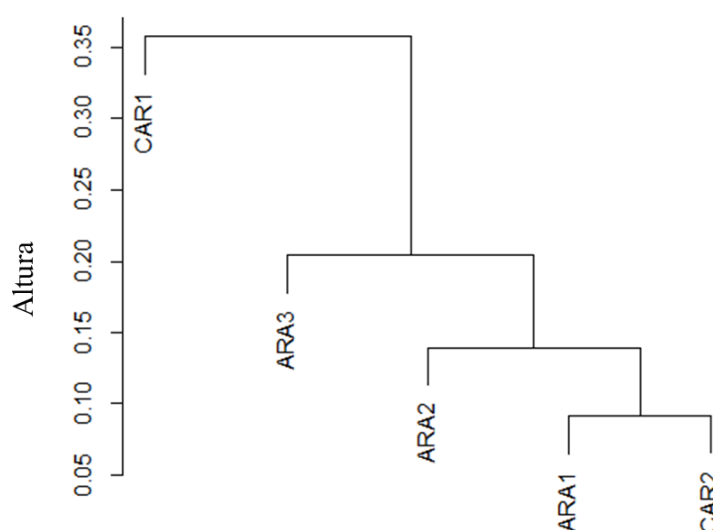


Fig. 3. Dendrograma UPGMA com base nas concentrações dos metais pesados avaliados em operárias de *A. mellifera* amostradas nas diferentes áreas de cultivo de tomate.

4. Discussão

O emprego de abelhas do gênero *Apis* e seus produtos como bioindicadores e biomonitores ambientais em relação à poluição, em especial à contaminação por metais pesados, vem sendo apresentado em diversos estudos, principalmente na Europa (Altunatmaz et al., 2017; Formicki et al., 2013; Lambert et al., 2012; Leita et al., 1996; Martin et al., 2016; Perugini et al., 2011; Satta et al., 2012). No Brasil, apesar de ter crescido nos últimos anos, essa prática ainda não é muito explorada e poucos trabalhos foram desenvolvidos nesse sentido até

então (Santos et al., 2008). Além disso, não se tem registros de análises da contaminação por metais pesados em abelhas presentes em cultivos agrícolas enquanto forrageiam nas flores.

De modo geral, os resultados obtidos neste estudo com as análises dos metais pesados encontrados em operárias campeiras de *A. mellifera* são preocupantes, visto que os valores médios observados para as concentrações dos metais avaliados foram bem maiores do que o esperado. Com relação ao chumbo (Pb), por exemplo, a concentração média das abelhas analisadas no presente estudo foi aproximadamente 174 vezes maior quando comparada às abelhas amostradas em uma aldeia, na Turquia, localizada em um distrito industrial e envolta por indústrias petroquímicas, fábricas de ferro e aço, refinarias, entre outras fontes de metais (Matin et al., 2016).

Uma das principais propriedades dos metais pesados, também chamados de elementos traço, é a bioacumulação. Isto significa que tais elementos não são metabolizáveis (organismos vivos não podem degradá-los), acumulando-se ao longo da cadeia alimentar (Serbula et al., 2013; Sun et al., 2010). Embora não sejam metabolizáveis, alguns desses metais são bioelementos (cobre (Cu), zinco (Zn), manganês (Mn), etc.), sendo essenciais para diversas funções bioquímicas e fisiológicas nos organismos (Nikolić et al., 2016). No entanto, altas concentrações desses elementos se tornam prejudiciais. Estudos que avaliaram o efeito de Cu em *A. mellifera*, por exemplo, mostraram que: (1) a exposição a concentrações subletais pode levar a mudanças significativas na expressão gênica, nos níveis de atividade enzimática e no estado redox das células (Nikolić et al., 2016); e (2) a mortalidade ($LC_{50} = 6,97$ mg/L) aumenta tanto em larvas quanto campeiras expostas a esse metal de forma dose-dependente (Di et al., 2016). Além disso, levando-se em consideração que o cobre tem um limite estabelecido para os alimentos consumidos pelo homem de 10 mg/kg por conta dos seus efeitos deletérios em grandes quantidades (Brasil, 1998), acredita-se que a concentração média de 11,34 mg/kg encontrada nas abelhas avaliadas neste estudo seja bastante danosa para esses insetos. O alto

teor desse elemento pode estar associado ao oxiclureto de cobre ($\text{Cl}_2\text{Cu}_2\text{H}_3\text{O}_3^-$), um fungicida de contato do grupo químico inorgânico comumente utilizado na cultura de tomate (Latorraca et al., 2008).

Em relação a Mn e Zn, pouco se sabe sobre os efeitos que quantidades mais elevadas desses metais geram nas abelhas. Contudo, o aumento da concentração de Zn esteve associado a uma diminuição na abundância e diversidade de abelhas solitárias em países da Europa (Moroñ et al., 2012) e evidências mostraram que a contaminação por esse metal pesado afetou direta e negativamente a sobrevivência de *Osmia rufa*. Neste estudo, os altos teores de Mn e Zn podem estar relacionados ao uso frequente do mancozeb ($\text{C}_8\text{H}_{12}\text{MnN}_4\text{S}_8\text{Zn}$) em cultivos de tomate, um fungicida/acaricida de contato do grupo químico ditiocarbamato (Latorraca et al., 2008). Isso explicaria, por exemplo, os padrões similares que ambos os metais tiveram nas comparações entre as áreas, com CAR1 obtendo os maiores valores médios de concentração dos dois elementos.

Quanto ao cromo (Cr), este metal pode ser liberado para a atmosfera tanto por processos naturais quanto antropogênicos, como fabricação de aço, curtimento de couro, utilidades industriais, preservação de madeira, produção de cromagem e combustão de combustíveis fósseis (Perugini et al., 2011). Não se sabe exatamente os efeitos de quantidades mais elevadas desse elemento sobre as abelhas. Entretanto, se levar em consideração que o limite de concentração de Cr estabelecido para os alimentos consumidos pelo homem é de 0,1 mg/kg (Brasil, 1998), os resultados obtidos (em média, 139,74 mg/kg) a partir das abelhas analisadas neste estudo são bem preocupantes.

Ao contrário dos bioelementos, alguns metais pesados, como cádmio (Cd), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), entre outros, não possuem função dentro dos organismos e são extremamente tóxicos (Nikolić et al., 2016). Dentre eles, Cd e Pb são os mais avaliados no que se refere à contaminação por metais pesados em abelhas e matrizes associadas (Altunatmaz et

al., 2017; Formicki et al., 2013; Lambert et al., 2012; Leita et al., 1996; Marin et al., 2016). Quanto ao cádmio, o aumento do acúmulo desse metal nos ecossistemas se deve à ação antrópica, principalmente a partir da fundição e refino de metais não ferrosos, combustão de combustíveis fósseis e incineração de resíduos (Perugini et al., 2011). Dessa forma, a ausência de atividades desse tipo nas proximidades dos cultivos de tomate avaliados poderia explicar a baixa ocorrência de Cd nas amostras e o baixo teor desse metal quando comparado a outros estudos (Leita et al., 1996; Marin et al., 2016). Mesmo assim, a concentração média de Cd encontrada em *A. mellifera* neste trabalho foi de 0,06 mg/kg. O consumo de xarope com teores mais baixos que esse mostraram afetar a capacidade antioxidante não enzimática em *A. mellifera* (Gauthier et al., 2016) e concentrações também mais baixas que essa causaram sérios danos aos órgãos internos de *Bombus morio* (Abdalla & Domingues, 2015), além de provocar alterações na estrutura da fibra muscular de voo desta espécie, comprometendo suas atividades de voo e de polinização (Abdalla et al., 2016).

Com relação a Pb, a contaminação ambiental pode ser atribuída, principalmente, a atividades antropogênicas, como combustão de gasolina, atividades industriais, utilização de fertilizantes, corretivos e uso generalizado de inseticidas com elevadas concentrações deste elemento (Paiva et al., 2002). Por estarem próximas a rodovias e a uma área urbana, era de se esperar que, nas áreas de Cascalho Rico (CAR1 e CAR2), as abelhas amostradas apresentassem maiores concentrações quando comparadas às das outras áreas, mas isso não ocorreu. Resultados similares foram encontrados em um estudo que avaliou as concentrações de Pb em abelhas presentes em distintos contextos de paisagem (Van der Steen et al., 2011). Assim, os valores obtidos neste estudo para as diferentes áreas avaliadas poderiam estar relacionados a outros fatores, como a maneira com que são manejados os cultivos de tomate.

Apesar disso, a concentração média de Pb observada neste trabalho (7,50 mg/kg) foi bem superior a de outras pesquisas que também analisaram a contaminação deste metal em

operárias de *A. mellifera* (Lambert et al., 2012; Matin et al., 2016). Depois do cádmio, o chumbo é considerado um dos metais pesados mais tóxicos (Di et al., 2016). Adicionalmente, grande parte dos efeitos deletérios que os metais causam nas abelhas, já mencionados no texto, está associada também à presença e/ou ao aumento de Pb no ambiente, como, por exemplo, alterações na atividade das principais enzimas antioxidativas e sua expressão gênica (Nikolić et al., 2016).

De modo geral, não houve um padrão entre os metais pesados para as comparações entre as áreas, uma vez que os diferentes elementos podem ter tido maiores ou menores concentrações em áreas distintas. Além disso, ao contrário do esperado, áreas distantes entre si se mostraram mais similares quanto à concentração dos metais e foram colocadas juntas na análise de agrupamento. Nesse sentido, os resultados encontrados neste estudo indicam, então, que as práticas agrícolas, ou seja, as variações na forma com que os cultivos de tomate são manejados (por exemplo, quanto ao uso de agrotóxicos), podem ser determinantes no grau de contaminação por metais pesados em abelhas que visitam as flores dessa cultura.

Assim, frente aos altos teores de metais pesados obtidos nas operárias de *A. mellifera* e aos efeitos desses elementos sobre as abelhas, fica evidente: (1) a necessidade de compartilhar com os agricultores o conhecimento produzido pelas pesquisas científicas, conscientizando-os sobre o seu papel no meio ambiente; (2) a importância da adoção de práticas amigáveis aos polinizadores, e, dentre elas, o uso racional de agrotóxicos; e (3) a relevância da diversidade de abelhas para a manutenção dos serviços de polinização no tomateiro, em virtude do possível desaparecimento de espécies que polinizam a cultura. Dessa forma, estudos que avaliem a contaminação por metais pesados e os efeitos desses metais também em espécies de abelhas nativas se tornam necessários.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e, principalmente, à Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro, aos agricultores, que permitiram e deram todo o suporte para a realização deste trabalho, à Dra. Solange Cristina Augusto e à Dra. Camila Nonato Junqueira pelas sugestões dadas ao longo da pesquisa e pelo suporte nas análises dos metais pesados, à equipe do Laboratório de Biocombustível e Tecnologia Ambiental (LaBTA) da ESTES/UFU pela enorme contribuição com os processos de digestão das amostras e as análises dos metais e aos colegas Isabel Farias Aidar, Jaqueline Eterna Batista, Bárbara Matos da Cunha Guimarães, Raysa Sales Teixeira Borges de Carvalho e Nicole Cristina Machado Borges pelas sugestões e contribuições em campo.

Referências bibliográficas

- Abdalla, F.C., Costa, M.J., Sampaio, G., Camargo, D.A., Pedrosa, M., Nogueira, F.L.A., 2016. Efeito do cádmio e do glifosato na musculatura de mamangavas. Rev. CTA. 3, 66-72. <https://doi.org/10.21674/2448-0479.32.447-471>
- Abdalla, F.C., Domingues, C.E.C., 2015. Hepato-Nephrotic System: a novel model of biomarkers for analysis of the ecology of stress in environmental biomonitoring. PLoS One 10, 1-9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132349>
- Altunatmaz, S.S., Tarhan, D., Aksu, F., Barutçu, U.B., Or, M.E., 2017. Mineral element and heavy metal (cadmium, lead and arsenic) levels of bee pollen in Turkey. Food Sci. Tech-Brazil [online]. <https://doi.org/10.1590/1678-457x.36016>

- Alves, K.A., Rosa, R., 2008. Espacialização de dados climáticos do Cerrado mineiro. *Hor. Cient.* 8, 1-28.
- Biesmeijer, J.C., Roberts, S.P.M., Reemer, M., Ohlemueller, R., Edwards, M., Peeters, T., Schaffers, A.P., Potts, S.G., Kleukers, R., Thomas, C.D., Settele, J., Kunin, W.E., 2006. Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands. *Science* 313, 351–354. <https://doi.org/10.1126/science.1127863>
- Brasil, 1998. Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância Sanitária. Portaria n. 685, de 27 de agosto de 1998. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. D.O.U. 29 agosto 1998.
- Di, N., Hladun, K.R., Zhang, K., Liu, T.X., Trumble, J.T., 2016. Laboratory bioassays on the impact of cadmium, copper and lead on the development and survival of honeybee (*Apis mellifera* L.) larvae and foragers. *Chemosphere* 152, 530-538. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.03.033>
- Filho, J.S.R., Marin, J.O.B., Fernandes, P.M., 2009. Os agrotóxicos na produção de tomate de mesa na região de Goianópolis, Goiás. *Pesq. Agropec. Trop.* 39, 307-316.
- Formicki, G., Gren, A., Stawarz, R., Zysk, B., Gal, A., 2013. Metal content in honey, propolis, wax, and bee pollen and implications for metal pollution monitoring. *Pol. J. Environ. Stud.* 22, 99–106.
- Gauthier, M., Aras, P., Jumarie, C., Boily, M., 2016. Low dietary levels of Al, Pb and Cd may affect the non-enzymatic antioxidant capacity in caged honey bees (*Apis mellifera*). *Chemosphere* 144, 848-854. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.09.057>
- Hossain, M.A., Piyatida, P., da Silva, J.A.T., Fujita, M., 2012. Molecular mechanism of heavy metal toxicity and tolerance in plants: central role of glutathione in detoxification of reactive oxygen species and methylglyoxal and in heavy metal chelation. *J. Bot.* 2012, 1-37. <https://doi.org/10.1155/2012/872875>
- IPBES (Intergovernmental Platform on Biodiversity and Ecosystem Services), 2016. Summary for policymakers of the assessment report of the Intergovernmental Platform on

- Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) on pollinators, pollination and food production. In: Potts, S.G., Imperatriz-Fonseca, V.L., Ngo, H.T., Biesmeijer, J.C., Breeze, T.D., Dicks, L.V., Garibaldi, L.A., Hill, R., Settele, J., Vanbergen, A.J., Aizen, M.A., Cunningham, S.A., Eardley, C., Freitas, B.M., Gallai, N., Kevan, P.G., Kovács-Hostyánszki, A., Kwapong, P.K., Li, J., Li, X., Martins, D.J., Nates-Parra, G., Pettis, J.S., Rader, R., Viana, B.F. (Eds.), Secretariat of the Intergovernmental Science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany. Disponível em: <http://www.ipbes.net/sites/default/files/downloads/pdf/SPM_Deliverable_3a_Pollination.pdf>. Acessado em: 30 dez. 2017
- Johnson, R.M., 2014. Honey bee toxicology. *Annu. Rev. Entomol.* 60, 415-434. . <https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011613-162005>
- Jones, K.C., 1987. Honey as an indicator of heavy metal contamination. *Water Air Soil Poll.* 33, 179-189. <https://doi.org/10.1007/BF00191386>
- Kosior, A., Celary, W., Olejniczak, P., Fijał, J., Król, W., Solarz, W., Płonka, P., 2007. The decline of the bumble bees and cuckoo bees (Hymenoptera: Apidae: Bombini) of Western and Central Europe. *Oryx* 41, 79–88. <https://doi.org/10.1017/S0030605307001597>
- Kremen, C., 2005. Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? *Ecol. Lett.* 8, 468–479. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00751.x>
- Lambert, O., Piroux, M., Puyo, S., Thorin, C., Larhantec, M., Delbac, F., Pouliquen, H., 2012. Bees, honey and pollen as sentinels for lead environmental contamination. *Environ. Pollut.* 170, 254-259. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.07.012>
- Latorraca, A., Marques, G.J.G., Sousa, K.V., Fornés, N.S., 2008. Agrotóxicos utilizados na produção do tomate em Goiânia e Goianópolis e efeitos na saúde humana. *Com. Ciências Saúde* 19, 365-374.

- Laurent, M., Hendrikx, P., Ribiere-Chabert, M., Chauzat, M.P., 2015. A pan-European epidemiological study on honeybee colony losses 2012–2014. Disponível em: <http://ec.europa.eu/food/animals/live_animals/bees/docs/beereport_2012_2014_en.pdf>. Acessado em: 30 dez. 2016.
- Leita, L., Muhlbachova, G., Cesco, S., Barbattini, R., Mondini, C., 1996. Investigation of the use of honey bees and honey bee products to assess heavy metals contamination. *Environ. Monit. Assess.* 43, 1-9. <https://doi.org/10.1007/BF00399566>
- Matin, G., Kargarb, N., Buyukisik, H.B., 2016. Bio-monitoring of cadmium, lead, arsenic and mercury in industrial districts of Izmir, Turkey by using honey bees, propolis and pine tree leaves. *Ecol. Eng.* 90, 331–335. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.035>
- Moroń, D., Grześ, I.M., Skórka, P., Szentgyörgyi, H., Laskowski, R., Potts, S.G., Woyciechowski, M., 2012. Abundance and diversity of wild bees along gradients of heavy metal pollution. *J. Appl. Ecol.* 49, 118-125.
- Moroń, D., Szentgyörgyi, H., Grześ, I., Wantuch, M., Rozej, E., Laskowski, R., Woyciechowski, M., 2010. The effect of heavy metal pollution on development of wild bees. In: Settele, J., Penev, L.D., Georgiev, T.A., Grabaum, R., Grobelnik, V., Hammen V. (Eds.), *Atlas of Biodiversity Risks – From Europe to the Globe, From Stories to Maps*. Pensoft, Sofia & Moscow. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02079.x>
- Nikolić, T.V., Kojić, D., Orčić, S., Batinić, D., Vukašinović, E., Blagojević, D.P., Purać, J., 2016. The impact of sublethal concentrations of Cu, Pb and Cd on honey bee redox status, superoxide dismutase and catalase in laboratory conditions. *Chemosphere* 164, 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.077>
- Paiva, H.N., Carvalho, J.G., Siqueira, J.O., 2002. Influência da aplicação de doses crescentes de chumbo sobre o teor e o conteúdo de nutrientes em mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.). *Sci. For.* 61, 40-8.

- Perugini, M., Manera, M., Grotta, L., Abete, M.C., Tarasco, R., Amorena, M., 2011. Heavy metals (Hg, Cr, Cd and Pb) contamination in urban areas and wildlife reserves: honeybees as bioindicators. *Biol. Trace Elem. Res.* 140, 170-176. <https://doi.org/10.1007/s12011-010-8688-z>
- Potts, S.G., Biesmeijer, J.C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O., Kunin, W.E., 2010. Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends Ecol. Evol.* 25, 345–353. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.01.007>
- R Development Core Team, 2015. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna.
- Ribeiro-Filho, M.R., Siqueira, J.O., Curi, N., Simão, J.B.P., 2001. Fracionamento e biodisponibilidade de metais pesados em solo contaminado, incubado com materiais orgânicos e inorgânicos. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 25, 495-507. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000200025>
- Rortais, A., Arnold, G., Dorne, J.L., More, S.J., Sperandio, G., Streissl, F., Szentes, C., Verdonck, F., 2017. Risk assessment of pesticides and other stressors in bees: Principles, data gaps and perspectives from the European Food Safety Authority. *Sci. Total Environ.* 587–588, 524–537. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.127>
- Santos, A.O.R., Bartelli, B.F., Nogueira-Ferreira, F.H., 2014. Potential pollinators of tomato, *Lycopersicon esculentum* (Solanaceae), in open crops and the effect of a solitary bee in fruit set and quality. *J. Econ. Entomol.* 107, 987-994. <https://doi.org/10.1603/EC13378>
- Santos, J.S.D., Santos, N.S.D., Santos, M.L.P.D., Santos, S.N.D., Lacerda, J.J.D.J., 2008. Honey classification from semi-arid, Atlantic and transitional forest zones in Bahia, Brazil. *J. Brazil. Chem. Soc.*, 19, 502-508. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532008000300018>
- Satta, A., Verdinelli, M., Ruiu, L., Buffa, F., Salis, S., Sassu, A., Floris, I., 2012. Combination of beehive matrices analysis and ant biodiversity to study heavy metal pollution impact in a

- post-mining area (Sardinia, Italy). *Environ. Sci. Pollut. R.* 19, 3977-3988.
<https://doi.org/10.1007/s11356-012-0921-1>
- Serbula, S.M., Kalinovic, T.S., Ilic, A.A., Kalinovic, J.V., Steharnik, M.M., 2013. Assessment of airborne heavy metal pollution using *Pinus* spp. and *Tilia* spp. *Aerosol Air Qual. Res.* 13, 563–573. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0921-1>
- Shami, N.J.I.E., Moreira, E.A.M., 2004. Licopeno como agente antioxidante. *Rev. Nutr.* 17, 227-236. <https://doi.org/10.1590/S1415-52732004000200009>
- Silva-Neto, C.M., Bergamini, L.L., Elias, M.A.S., Moreira, G.L., Morais, J.M., Bergamini, B.A.R., Franceschinelli, E.V., 2016. High species richness of native pollinators in Brazilian tomato crops. *Braz. J. Biol.* [online]. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.17515>
- Steinhauer, N., Rennich, K., Caron, D.M., Ellis, J.D., Koenig, P., Kulhanek, K., Klepps, J., Lee, K., Milbrath, M., Rangel, J., Rose, R., Sagili, R., Sallmann, B., Skinner, J., Snyder, R., Topitzhofer, E., Wilkes, J.T., Wilson, M.E., Williams, G.R., Wyns, D., vanEngelsdorp, D., 2017. Colony Loss 2016-2017: Preliminary Results. Disponível em: <<https://beeinformed.org/results/colony-loss-2016-2017-preliminary-results/>>. Acessado em: 30 jan. 2018.
- Sun, F., Wen, D., Kuang, Y., Li, J., Li, J., Zuo, W., 2010. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in needles of Masson pine (*Pinus massoniana* L.) growing nearby different industrial sources. *J. Environ. Sci.* 22, 1006–1013.
[https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60211-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60211-4)
- Tchounwou, P.B., Yedjou, C.G., Patlolla, A.K., Sutton, D.J., 2012. Heavy metal toxicity and the environment. *EXS* 101, 133-164. https://doi.org/10.1007/978-3-7643-8340-4_6
- Van der Steen, J.J.M., de Kraker, J., Grotenhuis, T., 2011. Spatial and temporal variation of metal concentrations in adult honeybees (*Apis mellifera* L.). *Environ. Monit. Assess.* [online]. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2248-7>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos no primeiro capítulo da tese mostraram que remanescentes de vegetação natural e a associação a outras culturas com flores (sistema misto) aumentam a taxa de visitação e a riqueza de espécies de abelhas que visitam as flores do tomateiro. Frente a esse aumento, o segundo capítulo evidenciou a contribuição das abelhas para a polinização da cultura do tomate e mostrou ainda que, ao contrário do que é postulado, espécies que não realizam *buzz pollination* podem atuar como polinizadores. Em relação ao terceiro capítulo, a partir das altas concentrações de metais pesados encontrados em *Apis mellifera*, os resultados obtidos indicaram que as práticas agrícolas podem ser determinantes no grau de contaminação por esses elementos em abelhas que visitam as flores do tomateiro.

Dessa maneira, com todos os resultados encontrados nesta tese, fica evidente: (1) a importância da diversidade de abelhas para a polinização do tomateiro e da conservação de áreas naturais, principalmente na paisagem de entorno dos cultivos; e (2) a relevância do tipo de manejo que é realizado pelos agricultores nas propriedades rurais. Assim, conscientizar essas pessoas sobre a adoção de práticas amigáveis aos polinizadores é fundamental para a conservação das abelhas e, conseqüentemente, dos serviços de polinização que elas prestam tanto no tomateiro quanto em outras culturas agrícolas.