

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Ciências Biológicas
Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre

Catarina Dias de Freitas

**PRAGAS, DOENÇAS E CONDIÇÕES AMBIENTAIS QUE INFLUENCIAM A
SOBREVIVÊNCIA E DISTRIBUIÇÃO DE ABELHAS**

Belo Horizonte
2022

Catarina Dias de Freitas

**PRAGAS, DOENÇAS E CONDIÇÕES AMBIENTAIS QUE INFLUENCIAM A
SOBREVIVÊNCIA E DISTRIBUIÇÃO DE ABELHAS**

Versão final

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ecologia.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Wilson
Fernandes

Belo Horizonte

2022

043

Freitas, Catarina Dias de.

Pragas, doenças e condições ambientais que influenciam a sobrevivência e distribuição de abelhas [manuscrito] / Catarina Dias de Freitas. – 2022.

150 f. : il. ; 29,5 cm.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Wilson Fernandes.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Ciências Biológicas. Programa de Pós-Graduação em Ecologia Conservação e Manejo da Vida Silvestre.

1. Ecologia. 2. Abelhas. 3. Distribuição Animal. I. Fernandes, Geraldo Wilson. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Ciências Biológicas. III. Título.

CDU: 502.7



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA, CONSERVAÇÃO E MANEJO DA VIDA SILVESTRE



Ata da Defesa de Tese

Nº 215
Entrada: 2018/1

Catarina Dias de Freitas

No dia 27 de outubro de 2022, às 14:00 horas, por videoconferência, teve lugar a defesa de Tese de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre, de autoria do(a) doutoranda(a) Catarina Dias de Freitas, orientando(a) do Professor Geraldo Wilson Fernandes, intitulada: "Pragas, doenças e condições ambientais que influenciam a sobrevivência e distribuição de abelhas". Abrindo a sessão, o(a) Presidente da Comissão, Doutor(a) Geraldo Wilson Fernandes, após dar a conhecer aos presentes o teor das normas regulamentares do trabalho final, passou a palavra para o(a) candidato(a) para apresentação de seu trabalho. Estiveram presentes a Banca Examinadora composta pelos Doutores: Tatiana Garabini Cornelissen (UFMG), Yasmine Antonini Itabaiana (UFOP), Lucas Neves Perillo (UFMG), Jean Carlos Santos (UFS) e demais convidados. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do(a) candidato(a). Após a arguição, apenas os senhores examinadores permaneceram no recinto para avaliação e deliberação acerca do resultado final, sendo a decisão da banca pela:

(X) Aprovação da tese, com eventuais correções mínimas e entrega de versão final pelo orientador diretamente à Secretaria do Programa, no prazo máximo de 30 dias;
 () Reprovação da tese - (marcar se é a primeira ou segunda reprovação): *primeira reprovação segunda reprovação

*Conforme o disposto no Artigo 80 da Resolução Complementar do CEPE/UFMG Nº 02/2017, de 04 de julho de 2017, caso seja a primeira reprovação, poderá ser concedido, a critério do Colegiado de Curso, um prazo para a realização de nova defesa de tese.

A banca indica esta tese aos Prêmios CAPES e UFMG de teses? SIM NÃO

Nada mais havendo a tratar, o Presidente da Comissão encerrou a reunião e lavrou a presente ata, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora.

Belo Horizonte, 27 de outubro de 2022

Assinaturas dos Membros da Banca Examinadora



Documento assinado eletronicamente por Milton Barbosa da Silva Junior, Usuário Externo, em 04/11/2022, às 14:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Jean Carlos Santos, Usuário Externo, em 07/11/2022, às 10:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Yasmine Antonini Itabaiana, Usuária Externa, em 07/11/2022, às 10:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Tatiana Garabini Cornelissen, Membro, em 16/11/2022, às 10:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por Geraldo Wilson Afonso Fernandes, Professor do Magistério Superior, em 18/11/2022, às 19:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_externo=0, informando o código verificador 1877458 e o código CRC EFB57BBC.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECOLOGIA, CONSERVAÇÃO E MANEJO DA VIDA SILVESTRE

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Pragas, doenças e condições ambientais que influenciam a sobrevivência e distribuição de abelhas"

CATARINA DIAS DE FREITAS

Tese de Doutorado defendida e aprovada, no dia **27 de outubro de 2022**, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

Doutor(a) Tatiana Garabini Cornelissen
(UFMG)

Doutor(a) Yasmine Antonini Itabaiana
(UFOP)

Doutor(a) Lucas Neves Perillo
(UFMG)

Doutor(a) Jean Carlos Santos
(UFS)

Doutor(a) Geraldo Wilson Fernandes
(Presidente da Banca)

Belo Horizonte, 27 de outubro de 2022.

Assinaturas dos Membros da Banca



Documento assinado eletronicamente por **Lucas Neves Perillo**, **Usuário Externo**, em 07/11/2022, às 09:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jean Carlos Santos**, **Usuário Externo**, em 07/11/2022, às 10:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Yasmine Antonini Itabaiana**, **Usuária Externa**, em 07/11/2022, às 10:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Tatiana Garabini Cornelissen**, **Membro**, em 16/11/2022, às 10:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Geraldo Wilson Afonso Fernandes**, **Professor do Magistério Superior**, em 18/11/2022, às 19:26, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1877763** e o código CRC **03C0CD23**.

AGRADECIMENTOS

A escrita de uma tese é um caminho longo e desafiador principalmente ao mesmo tempo gratificante. Graças a oportunidade de poder cursar o doutorado em Ecologia pude conhecer um pouco mais sobre as abelhas e todo o seu universo que vai muito além da produção de mel. Também pude experimentar outros tipos de atividades ligadas à pesquisa e outros tipos de artigos e acredito que todo o conhecimento que adquiri nessa jornada me auxiliou a enxergar novas possibilidades de atuação.

Agradeço ao meu orientador Dr. Geraldo Wilson Fernandes por ter me aceito como aluna, me permitindo integrar a comunidade do Leeb. Isto me proporcionou conhecer excelentes pesquisadores (as) do mundo inteiro. Sou muito grata pela confiança, pelas ideias compartilhadas, pelos artigos discutidos e pelas atividades passadas. Isto me proporcionou lidar com meus próprios desafios e evoluir como pesquisadora.

Agradeço em especial os pós-doutores do Leeb a Dra. Yumi Oki, Dr. Fernando Resende e Dr. Samuel Novais por se fazerem presentes na minha vida acadêmica e terem me auxiliado a conduzir os capítulos da tese, compartilhando experiências e ensinamentos. Agradeço ao Dr. Fernando Zamudio, meu amigo da Argentina, pela sua colaboração no primeiro artigo, trocamos muito material para discutirmos os resultados e agradeço pelas boas sugestões. Agradeço ao Dr. Mauricio Quesada do México também pela colaboração no primeiro artigo da tese. Agradeço aos professores Dr. David de Jong e a Dra. Geusa Freitas da USP que também me auxiliaram, ainda que de maneira remota, a conduzir o primeiro artigo da tese em diversas etapas da construção e submissão. Agradeço a Keila Moreira pela contribuição no primeiro artigo dessa tese, pela incansável busca por apicultores e meliponicultores.

Agradeço a todos os apicultores e meliponicultores que responderam o questionário e forneceram informações para que eu pudesse analisar. Agradeço aos moderadores dos grupos de whatsapp que permitiram a divulgação do questionário de abelhas. Agradeço ao apoio da AME-MG e demais associações de apicultores e meliponicultores que fazem um trabalho magnífico de divulgação de boas práticas e incentivo a atividade e que estão sempre de portas abertas para novas amizades.

Agradeço todo apoio recebido para conduzir o segundo capítulo da tese referente às abelhas Euglossini na Serra do Cipó. Agradeço ao ICMBio pela permissão para coleta e transporte das abelhas. Agradeço ao ICMBio-PARNA Serra do Cipó por transmitir orientações, apoio e segurança dentro do parque durante as coletas. Agradeço a Reserva Vellozia pela estadia e toda infraestrutura de laboratório que foram essenciais para conduzir as coletas. Agradeço a cordialidade e apoio da Cintia e do Lessi. Agradeço a empresa Cedro Têxtil pela autorização de entrada, apoio logístico e imensa cordialidade. Agradeço as pousadas Serra Morena e Pouso do Elefante e moradores da região que permitiram que pudesse entrar e coletar abelhas. Agradeço imensamente a ajuda da Ingrid, da Sandra e do Fernando em campo coletando as abelhas Euglossini. Foram momentos intensos de muita caminhada e com situações divertidas. Agradeço também as alunas Bárbara Rubia e Natália por me auxiliarem a produzir a coleção entomológica. Agradeço ao Dr. José Eustáquio pela identificação das abelhas Euglossini e pelo compartilhamento do seu conhecimento a respeito delas e pelas sugestões para montar o experimento. Agradeço também ao Alessandro Lima pela disposição em me ajudar e por passar modelos de etiqueta e dicas de manter coleções entomológicas.

Agradeço a todos meus colegas da pós-graduação pelos bons momentos compartilhados desde 2018 até 2022. As amizades que fiz nos cursos de campo. Agradeço aos meus professores do curso de Ecologia que transmitiram conhecimento e paixão por um tema que sempre tive muita vontade de aprofundar. Deixando um gostinho de quero mais! Agradeço também aos pós doc Lucas Perillo e Pedro Giovâni pelas sugestões de artigos e esclarecimentos de dúvidas.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre (UFMG) pelo apoio prestado, principalmente aos secretários Frederico e Cristina e às coordenações do Dr. Adriano Paglia, Dr. Ricardo Solar, Dr. Paulo Peixoto e Dr. Rafael Leitão pela atenção dedicada, pelos esclarecimentos presenciais e remotamente! Agradeço também ao colegiado e às representantes discentes Nathalia e Helena. Agradeço a CAPES pela bolsa de doutorado, graças a ela pude conduzir a tese. Agradeço ao apoio da Escuta UFMG. Graças ao projeto pude conhecer a Maria de Lourdes e posteriormente a Fernanda que me deram muitas

dicas para melhorar minha qualidade de vida em vistas dos desafios de conduzir uma tese.

Não poderia deixar de agradecer também a minha querida família, a minha mãe Ana, por todo o carinho e lanches de domingo, ao meu irmãozinho Cristóvão e toda sua doçura, a minha querida tia Marília e tio Leonardo ao qual precisei recorrer em momentos difíceis. Sou imensamente grata pelo suporte. Agradeço também ao meu marido Rodney por me auxiliar de diversas formas. Graças a ele consegui finalizar as coletas de campo. Emprestou o veículo, tirou dias de folga para coletar abelhas comigo, deixou de pedir férias, me ajudou no R e me deu muitos conselhos acadêmicos.

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a finalização desta etapa, muito obrigada!

“Quando vires um homem bom, tenta imitá-lo; quando vires um homem mau, examina-te a ti mesmo.” (Confúcio)

RESUMO

Abelhas são os principais agentes polinizadores de ecossistemas naturais e agrícolas. Elas representam um grupo relevante para manutenção da biodiversidade e produção de alimentos. No entanto, em várias partes do mundo, tem se registrado o progressivo desaparecimento de abelhas, tanto para espécies de interesse econômico como as abelhas africanizadas *Apis mellifera* e os meliponíneos, como para as abelhas nativas solitárias como as abelhas da tribo Euglossini. Entre as possíveis causas associadas a esse declínio, embora pouco estudadas no Brasil, estão relacionadas à situação sanitária das colmeias e as mudanças climáticas. Desta forma, para reduzir a lacuna de conhecimento e compreender melhor as possíveis causas que podem interferir neste declínio das abelhas no país, a pesquisa buscou investigar: Capítulo 1. Avaliar os impactos das pragas e patógenos no declínio das abelhas manejadas no Brasil e suas causas; Capítulo 2. Avaliar a influência das variações ambientais encontradas entre habitats méxicos e xéricos ao longo de uma montanha tropical na distribuição das abelhas das orquídeas. No primeiro capítulo, o estudo demonstrou que a maioria das colmeias encontradas no país apresentavam algum tipo de praga ou sintoma de doenças e essas acarretam em perdas das colmeias. As principais pragas relacionadas às maiores perdas em colmeias de *Apis mellifera* foram as formigas e vespas, enquanto para meliponíneos foram as abelhas cleptoparasitas, formigas e forídeos. O principal sintoma de doença causadora de perdas de colmeias para ambos os grupos foi a morte das operárias. Neste estudo, identificamos, também, que ambos os grupos de abelhas compartilham pragas e sintomas de doenças semelhantes. O trabalho também evidencia que o mau uso das técnicas do manejo pode influenciar negativamente na sanidade das abelhas. No segundo capítulo, observamos uma forte influência do gradiente altitudinal e da estação na composição e riqueza das espécies de Euglossini. As altitudes mais baixas, onde foram observados temperaturas e porte de vegetação maior, apresentaram uma maior riqueza de abelhas Euglossini. Durante a estação chuvosa, quando há uma maior disponibilidade de recurso floral e uma umidade de ar maior, observamos que habitats xéricos e méxicos apresentaram valores similares de riqueza e abundância de abelhas Euglossini. Notamos também que o habitat méxico é um ambiente que favorece uma similar riqueza e abundância

de espécies de abelhas entre estações do ano. Enquanto habitats xéricos, a riqueza e abundância foi menor na estação seca, quando a umidade do ar e temperatura reduzem. Em geral, neste segundo capítulo geramos um conhecimento inédito sobre a relevância dos habitats méxicos ao longo de gradientes altitudinais, predominantemente xéricos, na diversidade das abelhas Euglossini. Os ambientes méxicos conservam condições ideais para as abelhas ao longo do ano, reforçando a importância destes ambientes para a manutenção desses polinizadores de grande relevância ecossistêmica. Ambos estudos trouxeram importantes contribuições científicas, ampliando o conhecimento sobre a severidade da presença de pragas e doenças em colmeias e sobre como as comunidades de Euglossini respondem às variações ambientais, úteis para prever o impacto das mudanças climáticas, que poderão auxiliar a mitigar o desaparecimento de abelhas e na conservação de espécies.

Palavras-chave: Abelhas manejadas. Abelhas solitárias. Filtros ambientais. Sanidade apícola. Distribuição de espécies.

ABSTRACT

Bees are the main pollinating agents of natural and agricultural ecosystems. They represent an important group for maintaining biodiversity and food production. However, in many parts of the world, an increasing decline and disappearance of bees has been recorded. This disappearance has been reported both for species of economic interest such as the Africanized honeybees *Apis mellifera* and meliponines, and for native solitary bees such as the bees of the tribe Euglossini. Although understudied in Brazil, some possible causes associated with this bee decline are related to the sanitary situation of the hives and to climate change. Thus, to reduce the knowledge gap and better understand the possible causes that may interfere in this decline of bees in the country, the research sought to investigate: Chapter 1. Assess the impacts of pests and pathogens on the decline of managed bees in Brazil; Chapter 2. To evaluate the influence of environmental variations found between in mesic and xeric habitats along a tropical mountain on the distribution of orchid bees. In the first chapter, the study showed that most of the hives found in the country had some kind of pest or showed some symptoms of diseases, which leads to colony losses. The main pests related to major losses in *Apis mellifera* hives were ants and wasps, while for meliponines were robber bees, ants and phorids flies. The main disease symptom causing hive losses for both groups was worker death. In this study, we also identified that both bee groups share similar pests and disease symptoms. The work also highlights that the misuse of management techniques can negatively influence bee health. In the second chapter, we observed a strong influence of altitudinal gradient and season on the composition and richness of Euglossini species. Lower altitudes, where higher temperatures and vegetation size were observed, showed a higher richness of Euglossini bees. During the rainy season, when there is a greater availability of floral resources and higher air humidity, we observed that xeric and mesic habitats showed similar values of richness and abundance of Euglossini bees. We also noticed that the mesic habitat is an environment that favors a similar richness and abundance of bee species between seasons. While in xeric habitats, richness and abundance were lower in the dry season when air humidity and temperature reduce. Overall, in this second chapter we generated novel knowledge about the relevance of

mesic habitats along altitudinal gradients, predominantly xeric, on Euglossini bee diversity. Mesic environments maintain ideal conditions for the bees throughout the year, reinforcing the importance of these environments for the maintenance of these pollinators of great ecosystem relevance.

Both studies brought important scientific contributions, expanding the knowledge about the severity of the presence of pests and diseases in hives and about how Euglossini communities respond to environmental variations, useful to predict the impact of climate change, that can help mitigate the disappearance of bees and species conservation.

Keywords: Managed bees. Solitary bees. Environmental filters. Bee health. Species distribution

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	14
CAPÍTULO 1: Impacts of pests and diseases on the decline of managed bees in Brazil: a beekeeper perspective	22
Resumo	23
Abstract	24
Introduction	25
Methodology	27
Results	30
Discussion	39
Acknowledgments	44
References	44
Supplementary Material	50
CAPÍTULO 2: Condutores da diversidade de abelhas Euglossini em habitats xéricos e mésicos em uma montanha tropical	87
Resumo	88
Abstract	89
Introdução	90
Material e métodos	94
Resultados	100
Discussão	109
Conclusão	114
Agradecimentos	115
Referencias	116
Material complementar	128
CONCLUSÃO GERAL	140
REFERÊNCIAS	143

INTRODUÇÃO GERAL

Poucos insetos são tão vitais para a estabilidade dos ecossistemas e, ao mesmo tempo, reconhecidas como necessárias para o bem-estar humano, como é o caso das abelhas. Durante todo o estágio de vida de uma abelha ela se alimenta de recursos florais, o que ocasiona na visita diária de uma grande variedade de flores e resulta em possíveis polinizações (Michener, 2007; Vaudo *et al.*, 2015). As abelhas são responsáveis pela polinização de cerca de 78-94% das 352.000 espécies de angiospermas presentes no mundo, sendo muitas delas de interesse econômico e utilizadas na alimentação (The Plant List, 2010; Ollerton *et al.*, 2011).

Além disso, algumas espécies de planta reproduzem apenas pela ação de um determinado grupo de polinizador, chamado de síndrome de polinização (Dellinger, 2020), como é o caso de algumas espécies de orquídeas que são polinizadas exclusivamente por abelhas machos da tribo Euglossini (Pemberton *et al.*, 2006). Sem os polinizadores, muitas plantas deixariam de existir e isso causaria um efeito em cascata sob os demais herbívoros que dependem delas, tendo efeitos indiretos para outras espécies (Kearns *et al.*, 1998). Pode-se inferir, diante disso, que as abelhas atuam na base da cadeia alimentar e têm valor incalculável para a conservação (Costanza *et al.*, 1998; Imperatriz-Fonseca, 2012).

A importância das abelhas se torna ainda maior nas regiões tropicais do planeta e isso se deve a uma concentração de angiospermas na região equatorial (Hawkins *et al.*, 2011) e, conseqüentemente, uma maior dependência dos polinizadores nessas regiões (Bawa, 1990; Renner & Feil, 1993). O Brasil é um país tropical que abriga em torno de 1.965 espécies de abelhas (Moure *et al.*, 2022), 10% da diversidade de abelhas presentes no mundo (Ascher & Pickering, 2020). As abelhas podem ser classificadas pelos seus comportamentos sociais, parassociais e solitários (Crane & Visscher, 2009; Danforth *et al.*, 2019). Este grupo de polinizadores têm grande impacto na biodiversidade dos biomas brasileiros (Van Dulmen, 2001; Leal *et al.*, 2017; Rabeling *et al.*, 2019; Monteiro *et al.*, 2021) e na economia do país devido aos serviços ecossistêmicos prestados na agricultura (Imperatriz-Fonseca, 2012; Novais *et al.*, 2016; BPBES/REBIPP, 2019). As abelhas brasileiras polinizam 92%, dos 132 cultivares no Brasil, que dependem de polinizadores para frutificar, sendo 56%

dependentes exclusivamente de abelhas, e.g., tomate, a maçã, o café e a soja (Imperatriz-Fonseca, 2012; D'avila & Marchini, 2013; Viana *et al.*, 2014; Silva-Neto *et al.*, 2017; Machado *et al.*, 2020; Gazzoni *et al.*, 2022). A perda dos serviços de polinização dos 29 maiores cultivares agrícolas no Brasil representaria uma perda entre 4,86-14,56 bilhões de dólares/ano, reduzindo a contribuição da agricultura no PIB do país entre 6,46% - 19,36% (Novais *et al.*, 2016).

Além do importante papel das abelhas na produção agrícola, ainda existem os produtos de origem apícola como o mel, própolis, geoprópolis, cera, apitoxina e pólen, produzidos apenas pelas abelhas sociais (Nunes *et al.*, 2019; Durazzo *et al.*, 2021; Leite *et al.*, 2021). Somente no ano de 2020, o Brasil produziu em torno de 51 mil toneladas de mel, o que resultou em torno de US\$18,2 milhões (IBGE, 2020). No Brasil, o mel é produzido por abelhas sociais das tribos Apini e Meliponini (Crane & Visscher, 2009) e os seus criadores são divididos em dois grupos: apicultores e meliponicultores (Jaffé *et al.*, 2015). Os apicultores manejam as abelhas da espécie *Apis mellifera* (Linnaeus, 1758) introduzida no país desde 1839 vindas de Portugal (Gonçalves *et al.*, 2019), enquanto os meliponicultores cultivam abelhas nativas do Brasil, sem ferrão, também conhecidas como meliponíneos (Jaffé *et al.*, 2015; Cortopassi & Laurino *et al.*, 2006).

A meliponicultura existe no Brasil desde os seus primeiros habitantes, pelos povos indígenas (Nogueira-Neto, 1970; Cortopassi-Laurino *et al.*, 2006). Existem aproximadamente 250 espécies de meliponíneos no Brasil (Moure *et al.*, 2022) e algumas espécies estão na lista vermelha em perigo de extinção (EN), como a *Melipona capixaba*, *M. rufiventris*, *M. scutellaris* e *Partamona littoralis* (ICMBio, 2018). Alguns estudos feitos no Brasil relatam a redução de espécies de abelhas nativas e manejadas (Carvalho *et al.*, 2012; Pires *et al.*, 2016; Costa *et al.*, 2020; Castilhos *et al.*, 2019; Castilhos *et al.*, 2021). Isso tem despertado a preocupação dos criadores de abelhas, daqueles que dependem dos serviços prestados por elas, da comunidade científica e dos ambientalistas, devido aos impactos ambientais e econômicos que o desaparecimento delas pode causar (Pires *et al.*, 2016).

O desaparecimento das abelhas, manejadas e nativas, está documentada em diversos estudos pelo mundo, desde a década de 50 até o momento presente (Watanabe, 1994; Kosior *et al.*, 2007; Potts *et al.*, 2010; Potts *et al.*, 2016; Gray *et al.*, 2019; Lewinsohn *et al.*, 2022). As principais causas do desaparecimento delas estão ligadas à ação de múltiplos estressores ambientais, que interagem e resultam na

perda da saúde levando à morte das abelhas (Dolezal & Toth, 2018; Hristov *et al.*, 2021). Dentre essas estão as alterações causadas pelas mudanças climáticas, a fragmentação da paisagem, a intensificação agrícola, o uso de pesticidas e ação de pragas e doenças (Winfrey *et al.*, 2011; Hamblin *et al.*, 2018).

A interação dos fatores estressores pode interferir diretamente na saúde e sobrevivência das abelhas. Existem fortes evidências que a ação de parasitas e patógenos é intensificada quando as abelhas estão expostas a doses-subletais de agrotóxicos (Goulson *et al.*, 2015; Sánchez-Bayo *et al.*, 2016) ou a uma baixa nutrição, causada pela perda de habitat (Dolezal & Toth, 2018), por serem fatores que comprometem o sistema imunológico. Desta forma, cada vez mais tem se discutido a contribuição dos parasitas e patógenos no declínio das abelhas (Potts *et al.*, 2010; Brodschneider & Crailsheim, 2010; Meeus *et al.*, 2011; Moracho *et al.*, 2017; Maggi *et al.*, 2016; Meeus *et al.*, 2018), principalmente, o parasita ácaro *Varroa destructor* e os vírus que são transmissíveis por ele (*e.g.*, vírus da asa deformada (VAD) e vírus da paralisia lenta (SPV); Conte *et al.*, 2010; Francis *et al.*, 2013). A alta infestação de parasitas e o ataque de predadores nas colmeias podem levar as colmeias ao colapso, enquanto doenças virais, bacterianas e fúngicas são conhecidas pelo alto grau de letalidade para as abelhas (Sherman *et al.*, 1998; McMahon *et al.*, 2016).

No Brasil, as principais causas do desaparecimento das abelhas têm recaído sobre os efeitos letais e subletais do uso de agrotóxicos, uma vez que o país é um grande produtor agrícola e consumidor desses produtos (Castilhos *et al.*, 2019), subestimando o papel das pragas e doenças nas perdas. Isso se deve ao fato de que o panorama sanitário ainda é pouco estudado. Existem poucos laboratórios que fazem análises epidemiológicas e as informações disponíveis se concentram nas regiões sul e sudeste do país, onde estão a maioria dos profissionais (Message *et al.*, 2012; Pires *et al.*, 2016). Além disso, a maioria dos estudos se concentram nas *Apis mellifera*, sendo desconhecido os principais parasitas e patógenos que ocorrem em abelhas nativas do Brasil e os possíveis impactos nas atividades apícolas e na produção (Message *et al.*, 2012; Pires *et al.*, 2016). Em virtude dos importantes serviços ecossistêmicos prestados pelas abelhas e dos prejuízos econômicos e ecológicos que seriam causados pelo seu desaparecimento (*e.g.*, Novais *et al.*, 2016; Cortopassi-Laurino *et al.*, 2006), desperta-se a urgência em entender a distribuição e a ação de pragas e patógenos sobre as populações de abelhas existentes, principalmente em abelhas sociais que em abelhas solitárias e parassociais (Chen *et al.*, 2006). A

organização das abelhas sociais favorece os riscos de disseminação e persistência de pragas e patógenos devido ao adensamento populacional e comportamentos como a trofalaxia (Chen *et al.*, 2006).

Um outro aspecto relacionado ao desaparecimento das abelhas no Brasil e ainda pouco estudado no país são os efeitos das alterações climáticas sobre as comunidades de abelhas (Giannini *et al.*, 2012). As mudanças climáticas têm proporcionado novos cenários hostis à sobrevivência das abelhas (Faleiro *et al.*, 2018; Soroye *et al.*, 2020). Essas mudanças podem alterar a fisiologia das plantas reduzindo as recompensas florais para as abelhas (LeBuhn & Luna, 2021), bem como alterar a sincronia entre a floração e o surgimento da abelha jovem adulta, reduzindo a sobrevivência de abelhas solitárias e parassociais (González-Varo *et al.*, 2013; Danforth *et al.*, 2019 LeBuhn & Luna, 2021). Além disso, as mudanças climáticas podem representar o fim de algumas espécies que necessitam de determinadas faixas de temperatura para forragear, ou mesmo, o deslocamento de espécies para regiões com condições climáticas menos hostis (Pires *et al.*, 2016; Soroye *et al.*, 2020). Isto possibilitaria o aumento de competição entre abelhas pelos mesmos recursos causando uma perda da diversidade (Pires *et al.*, 2016; Soroye *et al.*, 2020). Outro aspecto relacionado é que abelhas solitárias e parassociais são mais vulneráveis às variações de temperatura e floração quando comparadas às abelhas melíferas. As abelhas melíferas são capazes de regular a temperatura na colmeia, manter condições de crescimento das larvas e estocar alimento em meio a estiagem do inverno (Fahrenholz *et al.*, 1989; Cunningham *et al.*, 2022).

A influência de variáveis climáticas como temperatura e umidade podem fornecer pistas para explicar os efeitos potenciais das mudanças climáticas em comunidades de abelhas (Burkle & Alarcón, 2011; Giannini *et al.*, 2012). Desta forma é necessário elucidar como abelhas solitárias e parassociais têm respondido às variações ambientais, para estabelecer planos de conservação em cenários de mudanças climáticas é definir as características bióticas e abióticas presentes em determinados ecossistemas, que podem afetar essas comunidades de abelhas (Moura *et al.*, 2022).

O entendimento a respeito de como as abelhas respondem às alterações climáticas envolvem análises com mudanças na distribuição de espécies ao longo do espaço e tempo e, portanto, necessita de uma base de dados de levantamentos históricos (Pereira *et al.*, 2021). Pesquisas de longo prazo envolvem um alto custo

financeiro, tornando o principal obstáculo para preenchimento desta lacuna (Burkle & Alarcón, 2011; Giannini *et al.*, 2012; Pereira *et al.*, 2021). Além disso, existe uma grande escassez de estudos de levantamentos de abelhas em biomas altamente ameaçados como Cerrado (Pereira *et al.*, 2021). Os Campos Rupestres é uma fitofisionomia composta de vegetação xérica que ocorre em altitudes acima de 900m entre em áreas de transição entre o Cerrado, a Caatinga e a Mata Atlântica, rica em endemismo e extremamente ameaçada (Fernandes *et al.*, 2016) no qual concentram poucos estudos sobre abelhas, principalmente abelhas da tribo Euglossini (Pereira *et al.*, 2021) de comportamento solitário a parassocial, importantes polinizadoras de aproximadamente 40 famílias de plantas (Rocha-Filho *et al.*, 2012), muitas delas presentes em montanhas.

Além da necessidade de se ampliar os estudos sobre abelhas em Campos Rupestres presentes em ambientes montanhosos, estudos conduzidos em montanhas também podem fornecer evidências sobre como as mudanças climáticas podem afetar as espécies. Uma vez que, os ambientes montanhosos apresentam em pequenas escalas espaciais ao longo do gradiente de altitude drásticas variações geofísicas e ambientais tornando possível analisar como as espécies respondem a estas variações (Fernandes *et al.*, 2016; Silveira *et al.*, 2019). Atualmente existem apenas dois estudos sobre como a distribuição de abelhas solitárias é moldada pelas variações ambientais, como clima, contidas em gradientes altitudinais de montanhas tropicais (Santos *et al.*, 2020; Viana *et al.*, 2021). O que dificulta o entendimento da ecologia e biogeografia da tribo. Existem algumas lacunas, como, por exemplo, as variações ambientais transversais de micro-habitat (mésico e xérico) em montanhas tropicais, que são muito heterogêneas e que podem interferir nos padrões de distribuição de abelhas ao longo do gradiente de altitude (Fernandes *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2020). Os habitats méxicos (i.e. matas ciliares e de galeria) são formações florestais próximos a cursos d'água que conservam a umidade ao longo do ano presentes em uma matriz de vegetação xérica (Faria & Silveira, 2011). Estas matas podem permitir a colonização do Cerrado (vegetação aberta) por espécies florestais, como as abelhas da tribo Euglossini, como sugerido por alguns autores (Moura & Schlindwein, 2009; Faria & Silveira, 2011). Nos levando a perguntar se os habitats méxicos seriam os ambientes que poderiam prover melhores condições para abelhas Euglossini do que os habitats xéricos e como as comunidades de abelhas nestes ambientes iriam responder às variações ambientais em um gradiente de

altitude e estações do ano. Espécies presentes apenas no topo da montanha ou mesmo em faixas específicas de altitude estão vulneráveis às mudanças climáticas pois as condições aos quais estão adaptadas podem desaparecer devido às mudanças climáticas (Field *et al.*, 2009).

Desta forma o objetivo geral desta tese foi ampliar o conhecimento sobre os fatores que estão por trás do desaparecimento das abelhas no Brasil, visando reduzir as lacunas: (i) sobre a situação sanitária das abelhas sociais manejadas; (ii) sobre a influência da variação do clima e vegetação, aqui estudada ao longo do gradiente altitudinal (variação vertical) entre habitats (mésico e xérico, variação transversal) e estações do ano (chuva e seca, variação temporal) sobre a distribuição das comunidades de abelhas Euglossini. As diferenças entre as organizações sociais de abelhas podem influenciar na responsabilidade de cada fator nos declínios das abelhas. As abelhas sociais manejadas, produtoras de mel, possuem uma estrutura social altamente organizada e com alta densidade populacional, embora as colmeias possam conferir proteção às intempéries, são ambientes com alto risco para disseminação de parasitas e patógenos. Diferentemente das abelhas solitárias que uma única fêmea constrói e habita o ninho até terminar a postura. Desta forma a disseminação de doenças para outros indivíduos é reduzida. Por outro lado, este tipo de organização social é mais suscetível às variações ambientais (Fahrenholz *et al.*, 1989; Cunningham *et al.*, 2022). Não há estoque de alimento para períodos de estiagem. O estoque feito é apenas para o desenvolvimento das larvas. Além disso, os machos precisam se abrigar em folhas ou em outros esconderijos na natureza em momentos de intempéries. Desta forma, esta tese é composta por dois capítulos que abordam diferentes temas direcionados aos fatores que podem ser determinantes no declínio das espécies de abelhas: a presença de doenças e pragas em colônias (abelhas sociais manejadas) e os fatores ambientais sobre abelhas solitárias (abelhas Euglossini) (Figura 1).

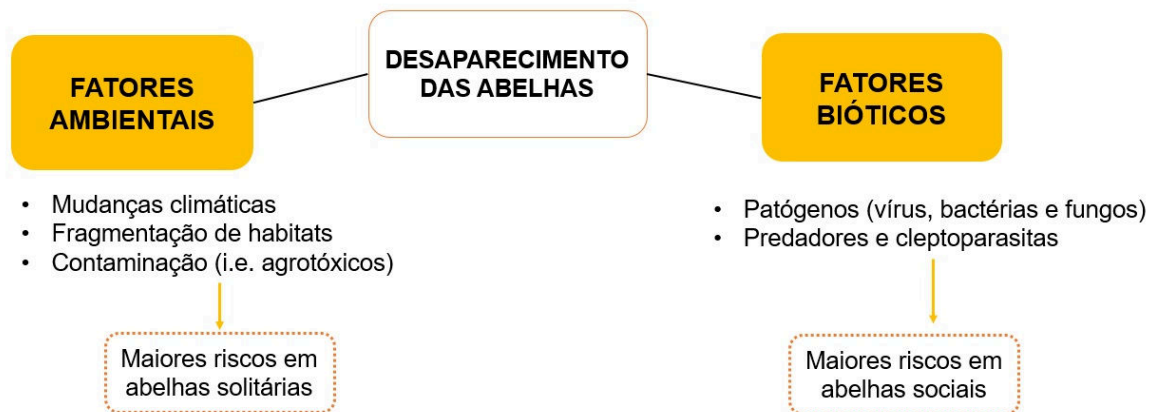


Figura 1: Fatores abordados nesta tese que estão relacionados ao desaparecimento das abelhas e o grupo mais afetado

O primeiro capítulo teve como principal objetivo avaliar os impactos das pragas e patógenos no declínio das abelhas manejadas (*A. mellifera* e abelhas sem ferrão) no Brasil, pela perspectiva do criador de abelhas. Este capítulo buscou avaliar se: (i) As pragas e doenças poderiam ser semelhantes entre *A. mellifera* e abelhas sem ferrão; (ii) A presença das pragas e doenças poderiam aumentar as perdas de colmeias; (iii) As colmeias próximas a ambientes impactados poderiam apresentar maior incidência de pragas e doenças e (iv) A qualificação e uso das técnicas de manejo poderiam reduzir a incidência de pragas e doenças. Neste capítulo foram melhor identificados os diferentes desafios que os apicultores e meliponicultores enfrentam em relação à saúde das abelhas, bem como o papel das pragas e doenças na perda de colônias e possíveis causas associadas.

O segundo capítulo da tese teve como objetivo investigar os padrões de distribuição de abelhas solitárias e parassociais conhecidas como abelhas das orquídeas em diferentes dimensões espaço-temporal (e.g., altitude, habitat e sazonal), em uma paisagem montanhosa na cordilheira do Espinhaço ao leste do Brasil. Era esperado que: (I) enquanto a riqueza e abundância de abelhas Euglossini diminuam com o aumento da altitude nos habitats xéricos (e.g., Cerrado e Campos Rupestres), as mesmas não sofrem variações no ambiente méxico (e.g., matas ciliares); (II) em uma mesma estação do ano e altitude os habitats xéricos apresentam menor diversidade e abundância que os habitats méxicos; (III) enquanto a diversidade e abundância de abelhas Euglossini diminui nos habitats xéricos na estação seca, as mesmas não sofrem variações nos habitats méxicos entre estações seca e chuvosa em uma mesma altitude; e (IV) a partição da diversidade β seria explicada

principalmente pelo padrão de *turnover* de espécies entre altitudes, habitats e estações.

Neste segundo capítulo foram identificadas as condições ambientais que propiciaram a maior riqueza e abundância de abelhas da tribo Euglossini, melhorando o entendimento dos filtros ambientais sobre estas abelhas nativas e ressaltando a importância da conservação dos habitats méxicos para garantir maior diversidade de abelhas das orquídeas em épocas de estiagem.

Ambos os capítulos trouxeram importantes contribuições científicas que poderão auxiliar a mitigar o desaparecimento de abelhas e na conservação de espécies. Na medida em que a tese amplia o conhecimento sobre a severidade da presença de pragas e doenças em colmeias e amplia o conhecimento sobre a distribuição de abelhas em habitats ameaçados e pouco estudados como os Campos Rupestres e sobre como as comunidades de Euglossini respondem às variações ambientais, úteis para predizer o impacto das mudanças climáticas.

CAPÍTULO 1: Impacts of pests and diseases on the decline of managed bees in Brazil: a beekeeper perspective



Journal of Apicultural Research >
Latest Articles

[Submit an article](#) [Journal homepage](#)

Original Research Article

Impacts of pests and diseases on the decline of managed bees in Brazil: a beekeeper perspective

Catarina Dias de Freitas , Yumi Oki , Fernando M. Resende , Fernando Zamudio , Geusa Simone de Freitas , Keila Moreira de Rezende , ...show all

Received 15 Jun 2021, Accepted 28 Apr 2022, Published online: 27 Jul 2022

 [Download citation](#)

 <https://doi.org/10.1080/00218839.2022.2099188>

 Check for updates

Autores:

Catarina Dias de Freitas, Yumi Oki, Fernando M. Resende, Fernando Zamudio, Geusa Simone de Freitas, Keila Moreira Rezende, Franklin Amaro de Souza, David De Jong, Mauricio Quesada, Andréa Siqueira Carvalho, Carmen S S Pires, Geraldo Wilson Fernandes

Revista: Journal of Apicultural Research

Classificação Qualis Capes em Biodiversidade: A2

IF: 2.584

Impacts of pests and diseases on the decline of managed bees in Brazil: a beekeeper perspective

Catarina Dias de Freitas^a, Yumi Oki^a, Fernando M. Resende^a, Fernando Zamudio^b, Geusa Simone de Freitas^c, Keila Moreira de Rezende^a, Franklin Amaro de Souza^a, David De Jong^c, Mauricio Quesada^d, Andréa Siqueira Carvalho^e, Carmen S S Pires^f, Geraldo Wilson Fernandes^a

^a Department of Genetics, Ecology and Evolution, Institute of Biological Sciences, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil.

^b Instituto Multidisciplinario de Biología Vegetal (IMBIV) (IMBIV), Ecological Interactions and Conservation, Faculty of Exact, Physical and Natural Sciences, National University of Cordoba & CONICET, Córdoba, Argentina.

^c Genetics Department, Ribeirão Preto School of Medical, Ribeirão Preto, SP, Brazil

^d Laboratorio Nacional de Análisis y Síntesis Ecológica, Escuela Nacional de Estudios Superiores - Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán, Mexico.

^e Department of Geography, Institute of Geosciences, Federal University of Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil and Federal Rural University of the Amazon, Parauapebas, Brazil.

^f Embrapa Genetic Resources & Biotechnology, Brasília, DF, Brazil.

Resumo

Nos últimos anos, os criadores de abelhas sofreram perdas maciças de colméias. As pragas e doenças estão entre as possíveis causas destas perdas, embora existam poucos estudos relevantes no país e não existam dados oficiais disponíveis. O objetivo deste trabalho foi avaliar a incidência de pragas e doenças em colméias e seu impacto no declínio das populações de abelhas no Brasil, sob a perspectiva do criador de abelhas. A pesquisa utilizou dois questionários online que incluíam sintomas de doenças para facilitar a identificação de doenças pelos participantes. Um total de 674 respostas válidas foram obtidas de criadores de *Apis mellifera* (49% do total) e abelhas sem ferrão (51%), distribuídos em 24 dos 27 estados brasileiros. A maioria dos criadores observaram pragas (média de 78,1%) e sintomas de doenças (65,5%) em suas colméias. Com base nas respostas dos criadores, pragas e doenças afetam as perdas das colméias no Brasil. A porcentagem de perda de colônia para *A. mellifera* foi maior nos apiários com formigas (19,8% de perdas de colônias) e vespas (46,7%) do que naqueles sem pragas ($p < 0,001$). Enquanto para abelhas sem ferrão, meliponários com abelhas cleptoparasitas (15,8% de perdas de colônias), formigas (14,7%) e moscas forídeos (12,5%) do que aquelas sem pragas ($p < 0,001$). Apiários e meliponários com morte de abelhas operárias tiveram perdas maiores do que aquelas saudáveis. Os resultados também indicam que o monitoramento pode reduzir as perdas de colméias em apiários e meliponários que apresentam algum tipo de pragas e doenças. Usando a perspectiva do criador, este estudo fornece informações sobre o impacto que pragas e patógenos têm nas perdas das abelhas que podem ser usadas para orientar melhores práticas de manejo.

Palavras-chave: declínio de insetos, questionário participativo, abelhas sociais, abelhas sem ferrão, sanidade apícola, desordem do colapso das colônias

Abstract

Brazilian beekeepers have experienced massive colony losses in recent years. Possible causes include bee pests and diseases, although there have been few relevant studies in the country and no official data are available. The aim of this work was to assess, from a beekeeper's perspective, the incidence of pests and diseases in colonies, and their impact on the decline of bee populations in Brazil. The research used two online questionnaires that included disease symptoms to facilitate participant identification of diseases. A total of 674 valid responses were obtained from beekeepers of *Apis mellifera* (49% of the total) and stingless bees (51%), distributed among 24 of the 27 Brazilian states. Most beekeepers observed pests (average 78.1%) and disease symptoms (65.5%) in their colonies. Based on beekeepers' responses, pests and diseases affect beehive losses in Brazil. Colony loss percentage for *A. mellifera* was higher in apiaries with ants (19.8% of colony losses) and wasps (46.7%) than in those without pests ($p < 0.001$). While for stingless bees, meliponaries with robber bees (15.8% of colony losses), ants (14.7%), and phorid flies (12.5%) than those without pests ($p < 0.001$). Apiaries and meliponaries with worker bee deaths had higher losses than those without symptoms. The results also indicate that monitoring can reduce colony losses in apiaries and meliponaries that have some kind of pests and diseases. Using a beekeeper perspective, this study provides information about the impact that pests and pathogens have on bee losses that can be used to guide improved management practices.

KEY WORDS: insect decline, participatory questionnaire, social bees, stingless bees, bee health, colony collapse disorder

Introduction

Bees are essential for maintaining biodiversity in wild and agricultural ecosystems as they are the main pollinators (Ashworth et al., 2009; IPBES, 2016; Giannini et al., 2020). However, their presence in these ecosystems has decreased, which has aroused great concern worldwide for their conservation (Potts et al., 2016; Gregorc, 2020). A reduction of 3 to 8% in world agricultural productivity would be among the main consequences of the disappearance of bees (Bretagnolle & Gaba, 2015) and countries that depend economically on food exports, such as Brazil, are more vulnerable to a pollinator crisis (Novais et al., 2016). It is estimated that the loss of pollinators in Brazil would reduce its agricultural production by up to US\$ 14.56 billion annually (Novais et al., 2016). Between 2013 and 2017, 19,296 of 37,453 inventoried bee colonies and nests in Brazil were lost (Castilhos et al., 2019). Mortality of these essential pollinators in agriculture in Brazil has been mainly attributed to pesticides (Castilhos et al., 2019). However, there is consensus that an interaction of multiple factors (such as parasites and pathogens, lack of floral resources, habitat loss and climatic change) has contributed to this bee decline (vanEngelsdorp et al., 2009; Maggi et al., 2016; Requier et al., 2019).

Besides pesticides, bee losses can also be affected by pathogens and parasites (Pires et al., 2016). Maintenance of bee colony health is extremely important in Brazil because beekeeping has a major impact on the export market of bee products (Oliveira et al., 2021). There is a lack of official records, and knowledge about bee health in Brazil is currently restricted to studies conducted in the South and Southeast regions (Message et al., 2012; Pires et al., 2016). Most studies have focused on *A. mellifera* (Pires et al., 2016), which has the greatest commercial exploitation (Paula et al., 2016). These studies have assisted *A. mellifera* beekeepers (Ap-beekeepers) in the care of their colonies. Despite the increasing number of stingless bee beekeepers (Sb-beekeepers) in recent years in Brazil, there is still little epidemiological knowledge concerning these bees (Jaffé et al., 2015). It is possible that many of the parasites and pathogens observed in *A. mellifera* also affect stingless bees. *Apis mellifera* interacts with stingless bee species when they share floral resources, thus causing pathogen spillover between species (Purkiss & Lach, 2019; Ngor et al., 2020). There are increasing reports in the literature of the occurrence of parasites and diseases of *A.*

mellifera in stingless bee colonies (e.g., Porrini et al., 2017; Toufaillia et al., 2017; Teixeira et al., 2020). Moreover, some management practices, such as nutritional supplementation with honey bee products, can facilitate the dissemination of diseases in both bee groups (Gisder & Genersch, 2017; Mallinger et al., 2017). Disease and pest resistance depend on genetic predisposition and hygienic behavioral characteristics, which differ significantly between these bee groups (Toufaillia et al., 2016). Also, stingless bees have a great diversity of genera and species (Michener, 2000). Therefore, there is a need to better understand the composition of natural enemies that occur among managed bees to develop assertive control strategies and prevent the emergence of new diseases.

Despite pests and pathogens being two of the main factors associated with the disappearance of bees worldwide (e.g. Antúnez et al., 2017; Porrini et al., 2017; Gregorc, 2020; Sharif et al., 2020; Teixeira et al., 2020), there are still few studies and there is no active monitoring in Brazil, except for some localities (e.g., Requier & Antúnez, 2019). Such studies are necessary for a better understanding of the distribution of pests and pathogens in the country and how they are shared by different bee species. To obtain information about bee health in an extensive territory such as Brazil, a citizen science approach involving the perspective of beekeepers can be a useful strategy (See Appenfeller et al., 2020). The inclusion of local knowledge of beekeepers is common in scientific investigations of bees (e.g., Brodschneider et al., 2016; Antúnez et al., 2017), and in many cases participatory research projects have produced legitimate scientific knowledge quickly and cheaply.

Another influential factor for bee health is the surrounding landscape, as it defines the food that bees obtain (Steinhauer et al., 2018; Ricigliano et al., 2019) as well as other important resources for bee health, such as resins (Requier & Leonhardt, 2020). Poor nutrition reduces the physiological defenses of bees against pathogenic infections and pest invasions (Di Pasquale et al., 2016; Dolezal et al., 2018). Low quantity and diversity of floral resources for bees have been associated with altered environments, such as areas converted for pasture, silviculture and agriculture (Smart et al., 2016). Colonies near forest remnants can provide better conditions for bees and ensure their survival (Ricigliano et al., 2019; McNeil et al., 2020). In addition, management strategies for beekeeping, such as artificial complementary feeding or even planned gardens to ensure colony health during periods of food shortage are decisive in maintaining bee health (Steinhauer et al., 2021). Knowledge acquired

through personal and interpersonal experience, courses and training in bee management can also be valuable for ensuring colony health (Jaffé et al., 2015; Jacques et al., 2017). Knowledge about some beekeeping practices, such as monitoring, queen replacement and renewal of wax and food stocks in colonies, can also help reduce the incidence of parasites and pathogens (Jacques et al., 2017).

Our study assessed the bee pests and pathogens in colonies of *A. mellifera* and stingless bees and their impacts on bee decline in Brazil, from a beekeeper perspective provided through questionnaires. Our hypotheses proved from the beekeeper's perspective were: (i) bee pests and pathogens are similar between *A. mellifera* and stingless bees; (ii) bee pests and pathogens increase losses of *A. mellifera* and stingless bees; (iii) colonies near environments altered by human activities (pasture, silviculture, agriculture and urbanization) have higher incidences of bee pests and pathogens than colonies near natural vegetation; and (iv) beekeeper qualifications and good management practices reduce the incidence of bee pests and pathogens in colonies. The information obtained from these questionnaires allowed us to better understand the status of bee health in the country and the challenges that beekeepers face in relation to bee health based on their knowledge, as well as the role pests and diseases play in the loss of colonies and possible associated causes.

Methodology

Questionnaire

Two semi-structured questionnaires were prepared in the Portuguese language: one aimed at Ap-beekeepers (Supplementary Questionnaire 1) and one for Sb-beekeepers (Supplementary Questionnaire 2). The questionnaires were developed to assess the occurrence of bee pests and pathogens, their respective impacts on colony losses and the possible causes from the perspective of beekeepers. The questionnaires were based on previous studies, such as the those developed by the COLOSS association (Van et al., 2013), the Solatina Society (Antúnez et al., 2017; Requier & Antúnez, 2019), and two studies developed in Brazil (Jaffé et al., 2015; Castilhos et al., 2019). No questionnaires addressing the specific theme of pests and diseases aimed at beekeepers, were found in the literature.

We listed the main insect groups that are related to colony loss in Brazil and classified them as parasites, cleptoparasites, cleptobiotics, predators, and others (Supplementary Table 1). Questions about the main diseases were presented to beekeepers in the form of symptoms to make questions more liable to interpretation by someone who is not knowledgeable about diseases but is able to recognize symptoms (Supplementary Table 2). The questionnaires were reviewed by national and international researchers with extensive knowledge about bees and by leaders of Brazilian beekeeping associations. In addition, pre-tests of the questionnaires were applied to a group of 10 beekeepers in the Brazilian state of Minas Gerais in 2019 to eliminate, add or reformulate the final questions.

Each questionnaire contained 30 questions. Due to the different management characteristics of Ap-beekeepers and Sb-beekeepers, specific questions were developed for each group, with adjustments to alternatives for multiple choice questions. The questions were divided into four sections: (1) Socioeconomic profile; (2) Evaluation of colony loss; (3) Characterization of the surrounding area; and (4) Management practices. The answers were collected in reference to the period from January 2017 to December 2019 for each apiary/meliponary.

Beekeepers were invited to participate by an email distributed to a list created from contacts from associations, federations, cooperatives, research institutes, NGOs and beekeeping stores. The list comprised 503 email addresses covering all Brazilian states. The email invitation included two access links to the virtual questionnaires hosted on the web page of the Federal University of Minas Gerais, a well-known Brazilian public teaching and research institution. One of the links was addressed to Ap-beekeepers, while the other to Sb-beekeepers. The questionnaires were also sent to beekeeping groups via messaging applications. Participants were invited to publicize the project at the end of the questionnaire (“snowball sampling” Goodman, 1961). Questionnaires were answered between December 2019 and December 2020 throughout Brazil. All participants gave their informed consent in writing prior to inclusion in this research. The information, even from those allowing identification, was kept confidential.

A total of 677 responses were obtained from Ap-beekeepers and 765 from Sb-beekeepers. The answers were submitted to a validation process (details in Supplementary Figure 1), which eliminated 51% of the responses from Ap-beekeepers and 55% from Sb-beekeepers, resulting in 330 and 344 valid questionnaires,

respectively. The total of 674 valid questionnaires was greater than the sample size of 246, which was considered the minimum sample size (Castilhos et al., 2019) needed to guarantee accuracy of analyses with a 95% confidence level and 5% estimated error for an estimated national beekeeper population of 350,000 (Maggi et al., 2016), according to Van der Zee et al. (2013). The spatial distribution of responses was obtained from the geographical coordinates of the centroid of the informed region (municipality/neighborhood/district) on a cartographic basis of Brazilian territorial limits at a scale of 1:250,000 (IBGE, 2010) using R software (Tennekes, 2018; R Core Team, 2020).

Statistical Analysis

Calculations of losses were made according to the average percentage losses experienced by each participant so that enterprise size (number of colonies) had less influence on loss rates (Van der Zee et al., 2013; Castilhos et al., 2019). Individual questions of the questionnaires were optional, which resulted in different numbers of answers for each question.

The Mann-Whitney U test (Mann & Whitney, 1947) was used to compare parameters that considered differences between two options (e.g., with pests and without pests, with symptoms and without symptoms). The Kruskal-Wallis non-parametric test (Kruskal & Wallis, 1952) was used to compare parameters that considered differences among more than two treatments (e.g., types of pests and symptoms, places near colonies and management techniques), with post-hoc analysis using Dunn's Pairwise Multiple Comparison Test (Dunn, 1961) to identify differences between treatments. Comparisons between two or more categorical variables were performed by the Chi-Square Independence Test.

The effects of interactions between the variable of experience and those of management techniques, as well as the effects of interactions between the variables of colony health conditions (pests presence/absence, disease symptoms presence/absence) and those of management techniques, on the response variable of colony loss were evaluated. The effects of pair-wise interactions between beekeeper experience/qualification and variables of management techniques on the response variables of colony health conditions (number of types of pests and symptoms) were also investigated. These interactions were analyzed by two-way interaction analyses

using General Linear Models (GLMs) followed by a post-hoc analysis by the Mann-Whitney U test when comparing categories of variables that had only two options and the non-parametric Kruskal-Wallis test for comparing categories of variables with more than two options. All tests considered a 95% confidence level ($\alpha=0.05$) and were performed in R (R Core Team, 2020). The results expressed in Figures or Tables are presented as means and standard error (\pm SE).

Results

General data

A total of 674 valid questionnaires were obtained, including 330 from Ap-beekeepers and 344 from Sb-beekeepers (Supplementary Table 3). Responses were from 24 of the 27 Brazilian states and were concentrated in the Southeast (50.5% of all responses), South (23.1%) and Northeast (18.4%) regions of the country (Figure 1). Most of the respondents were male (87.5% of Ap-beekeepers, 88.2% of Sb-beekeepers). The average age was 47 ± 0.7 years old for Ap-beekeepers (47.3 ± 2.8 years for women, 47.2 ± 0.79 years for men) and 43 ± 0.7 years old for Sb-beekeepers (44.1 ± 2.14 years for women, 43.4 ± 0.78 years for men). The average experience for Ap-beekeepers was 13.3 ± 0.7 years and for Sb-beekeepers 5.9 ± 0.5 years.

The total number of colonies declared by the beekeepers for between 2017 and 2019 was 85,064, including 76,886 and 8,178 colonies of *Apis mellifera* and stingless bees, respectively. Most of the participants (66.1% of Ap-beekeepers, 90.1% of Sb-beekeepers) were small-scale beekeepers (less than 50 colonies) and exercise the activity as a complement to income (81.3% of Ap-beekeepers, 99.7% of Sb-beekeepers). About one quarter (24%) of Sb-beekeepers answered that they perform the activity for recreation or interest in preserving nature without generating any financial income.

Most Sb-beekeepers (87.7% of responses) declared the common name of bees, and only 12.3% declared the scientific name of the bee species in their answers. In all, 93 common names and 36 scientific names were declared in the questionnaires. The most common species was *Tetragonisca angustula* (popular name jataí; 20.4% of all Sb-beekeeper responses) (Supplementary Table 4).

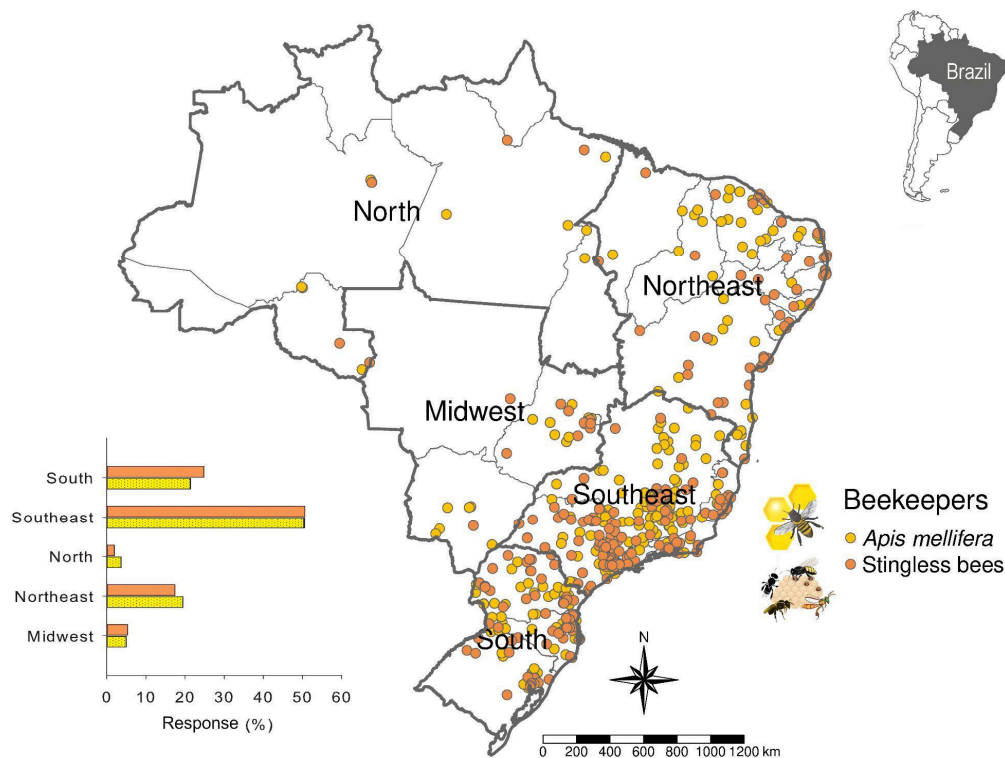


Figure 1. Distribution of questionnaire respondents. Dots represent the centroid of the locality mentioned by the beekeepers in reference to their apiaries/melinoparies. Dots in the same location are superimposed. Gray lines represent national and state boundaries.

Main bee pests and disease symptoms

Most participants reported finding bee pests (81.1% for Ap-beekeepers, 75.1% for Sb-beekeepers) and disease symptoms (64.3% for Ap-beekeepers, 66.7% for Sb-beekeepers) in their colonies (Figure 2AB). In general, the declared pest groups were common to both groups of beekeepers, but the frequencies differed (Figure 2A). The most predominant pests for *A. mellifera* were ants (53.9% of responses) and wax moths (44.5%), while for stingless bees they were phorids (59.6% of responses), ants (36.1%) and attack by other bees (20.6%). Four groups of pests were more frequent in apiaries than in meliponaries (Supplementary Table 5): 1) ants [frequency in apiaries (F_{Apis})=53.9%; frequency in meliponaries ($F_{\text{stingless}}$)=36.1%, $\chi^2=16.343$, $p<0.001$]; 2) wax moths (F_{Apis} =44.5%, $F_{\text{stingless}}$ =1.1%; $\chi^2=143.68$, $p<0.001$); 3) termites (F_{Apis} =22%; $F_{\text{stingless}}$ =6.5%; $\chi^2=25.429$; $p<0.001$); and 4) mites (F_{Apis} =12.6%; $F_{\text{stingless}}$ = 3.6%; $\chi^2=13.488$; $p<0.001$). Three groups of pests were more frequent in meliponaries than

in apiaries: 1) phorids ($F_{\text{Apis}}=12.6\%$; $F_{\text{stingless}}=59.6\%$; $\chi^2=123.25$; $p<0.001$); 2) robber bees ($F_{\text{Apis}}=9.8\%$; $F_{\text{stingless}}=20.6\%$; $\chi^2=10.886$; $p<0.001$); and 3) black soldier flies ($F_{\text{Apis}}=1.2\%$; $F_{\text{stingless}}=7.2\%$; $\chi^2=10.25$; $p=0.001$). The frequencies of beetles ($\chi^2=1.058$; $p=0.304$) and wasps ($\chi^2=0.881$; $p=0.348$) were similar between the two bee groups.

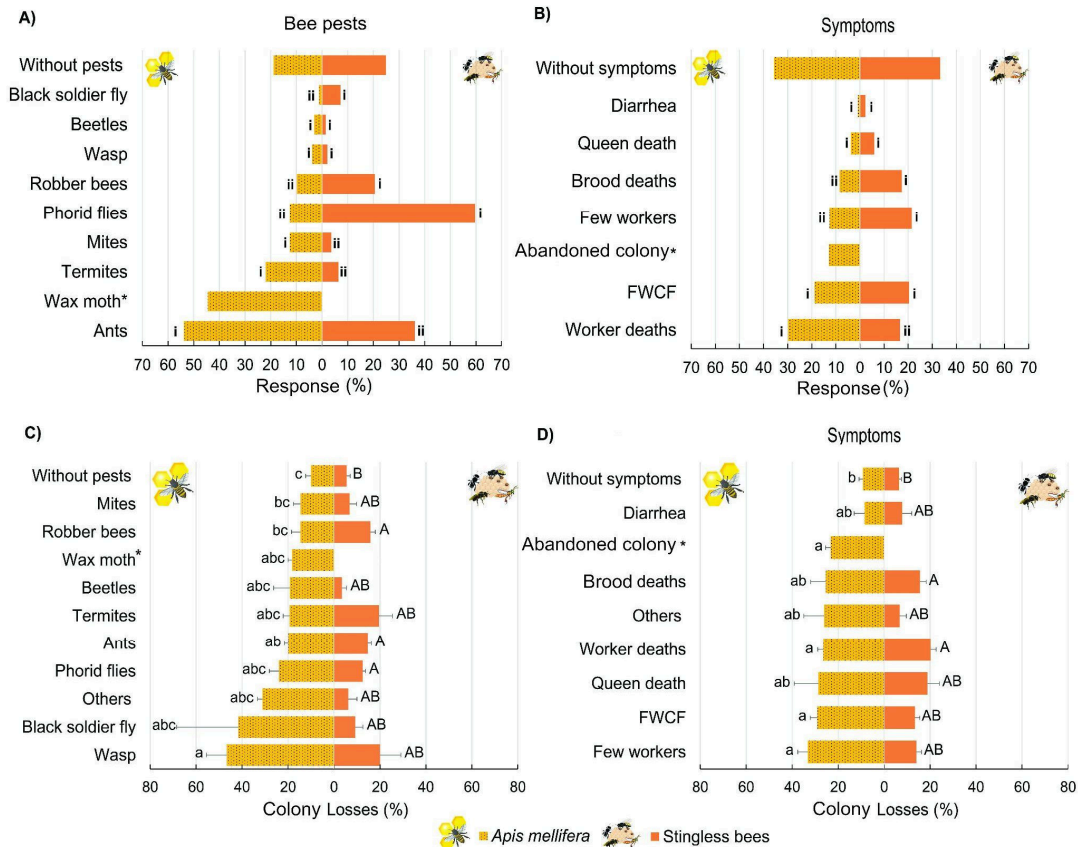


Figure 2. Occurrences of bee pests (A) and disease symptoms (B) based on beekeepers responses. Colony loss percentages due to (C) bee pests and (D) disease symptoms for *Apis mellifera* and stingless bees. Values followed by the same letter are not significantly different $\alpha=0.05$. Lower case letters compare results for *Apis mellifera* on the left and capital letters compare results for stingless bees on the right. "Others" in pests Figure (C): predators, e.g., spiders, geckos, armadillos; "Others" in symptoms Figure (D): deformed wing virus, Brazilian sacbrood virus, among others. *The wax moth option and abandoned colony was only included in the Ap-beekeeper questionnaire. FWCF = few combs, food and brood.

In general, all seven symptoms presented in the questionnaires were observed in the colonies of both Ap-beekeepers and Sb-beekeepers (Figure 2B). The most predominant disease symptoms for *A. mellifera* were "worker deaths" (29.8% of responses) and "FWCF" (few combs, food and brood, 18.9%), while for stingless bees they were "few workers" (21.5%) and "FWCF" (20.4% of responses) (Figure 2B). The symptom "worker deaths" ($\chi^2=10.196$; $p=0.001$) was more frequent in apiaries

($F_{\text{Apis}}=29.8\%$) than in meliponaries ($F_{\text{stingless}}=16.6\%$; Supplementary Table 5). Two disease symptoms were more frequently observed in stingless bees than in *A. mellifera*: 1) “few workers” ($F_{\text{Apis}}=12.6\%$; $F_{\text{stingless}}=21.5\%$; $\chi^2=6.3415$; $p=0.001$); and 2) “brood deaths” ($F_{\text{Apis}} = 8.4\%$; $F_{\text{stingless}}=17.4\%$; $\chi^2=8.0527$; $p=0.004$). There were no differences between the apiaries and meliponaries for the frequencies of “diarrhea” ($\chi^2=0.842$; $p>0.05$), “queen death” ($\chi^2=0.916$; $p>0.05$) and “FWCF” ($\chi^2=0.091$; $p>0.05$).

The results also show that 90.9% of the Ap-beekeepers ($\chi^2=65.403$; $p<0.001$) and 85.8% of the Sb-beekeepers ($\chi^2=26.354$; $p<0.001$) who mentioned having observed pests in their colonies also noted disease symptoms.

Association between colony loss and pest and disease symptom presence

During the three years analyzed (2017 to 2019), the average individual colony loss was $15.3\pm 0.99\%$ for Ap-beekeepers and $10.3\pm 0.78\%$ for Sb-beekeepers.

Colony loss (CL) for *A. mellifera* was greater with the presence of pests [CL percentage in apiaries ($\%CL_{\text{Apis}}$) with pests= $17.3\pm 1.2\%$; $\%CL_{\text{Apis}}$ without pests= $10.01\pm 2.3\%$; $W=6246.5$; $n=251$; $p<0.001$] (Supplementary Figure 2). Colony loss for stingless bees was twice as great with the presence of pests [CL percentage in meliponaries ($\%CL_{\text{stingless}}$) with pests= $12.2\pm 1.03\%$; $\%CL_{\text{stingless}}$ without pests= $5.4\pm 1.5\%$; $W=5714.5$; $n=214$; $p<0.001$]. Colony loss was also higher in apiaries and meliponaries with disease symptoms (*A. mellifera*: $\%CL_{\text{Apis}}$ with symptoms= $21.4\pm 1.5\%$; $\%CL_{\text{Apis}}$ without symptoms= $9.2\pm 1.7\%$, $W=9337.5$; $n=235$; $p<0.001$; stingless bees: $\%CL_{\text{stingless}}$ with symptoms= $13.6\pm 1.3\%$; $\%CL_{\text{stingless}}$ without symptoms= $6.5\pm 1.1\%$; $W=6356.5$; $n=203$; $p<0.001$).

Some pests significantly increased colony loss for both *A. mellifera* and stingless bees (Figure 2C). The colony loss for *A. mellifera* was higher in apiaries with ants ($\%CL_{\text{Apis}}=19.8\pm 1.7\%$) and wasps ($46.7\pm 8.9\%$) than in those without pests ($\chi^2=34.523$; $n=251$; $p<0.001$). Colony loss for stingless bees was higher in meliponaries attacked by robber bees ($\%CL_{\text{stingless}}= 15.8\pm 2.1\%$), ants ($14.7\pm 1.6\%$), and

phorid flies (12.5 ± 1.2) had higher colony losses than in those without pests ($\chi^2=36,171$, $n=214$, $p<0.001$).

Colony losses differed significantly among symptoms for Ap-beekeepers ($\chi^2=69,807$; $n=235$; $p<0.001$) and Sb-beekeepers ($\chi^2=30,394$; $n=203$; $p<0.001$) (Figure 2D). The number of types of disease symptoms causing colony loss was higher for *A. mellifera* (few workers: $33.2\% \pm 4.3$ colony loss, FWCF: $29.1 \pm 3.1\%$, worker death: $26.5\% \pm 2.4$, and colony abandonment: $23.2 \pm 2.3\%$) than for stingless bees (worker deaths: $20.2 \pm 2.4\%$ colony loss, and brood deaths: $15.6 \pm 2.7\%$).

The influence of land use and occupation around apiaries on the occurrence of bee pests and disease symptoms

Land use and occupation around apiaries did not influence the number of types of observed pests ($\chi^2=1.389$; $n=249$; $p=0.751$) or the symptoms ($\chi^2=3.368$; $n=234$; $p=0.498$) for *A. mellifera* (Figure 3). However, land use and occupation did influence the type number of pests ($\chi^2=21,573$; $n=269$; $p<0.001$) and symptoms ($\chi^2=12.44$; $n=254$; $p<0.001$) for stingless bees. Stingless bees had the lowest number of types of pests (1.26 ± 0.09) and symptoms (0.87 ± 0.09) in urban areas. The average number of types of pests and symptoms did not differ among the other environments: remaining areas of natural vegetation (pests= 1.75 ± 0.11 ; symptoms= 0.90 ± 0.10), silviculture (pests= 2.54 ± 0.31 ; symptoms= 1.7 ± 0.45) and pasture (pests= 1.9 ± 0.34 ; symptoms= 1.68 ± 0.29).

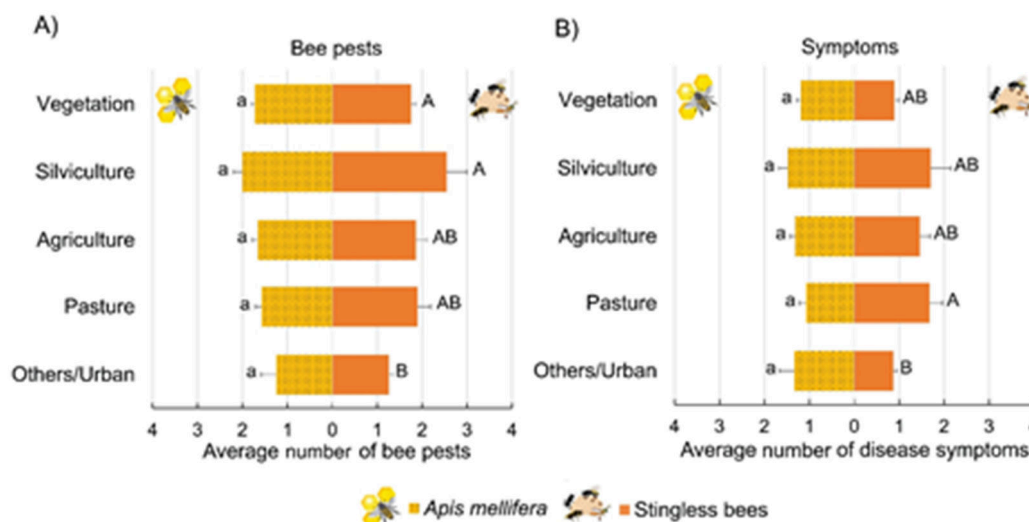


Figure 3. The influence of land use and occupation around colonies on the average number of bee pests (A) and disease symptoms (B) found for *Apis mellifera* and stingless bees. Responses from Ap-beekeepers and Sb-beekeepers are shown to the left and right, respectively, in each figure. Bars represent standard error. Vegetation = Natural vegetation. Average number of types of pests or disease

symptoms of *A. mellifera* followed by the same small-case letter do not differ significantly ($\alpha=0.05$). Average number of types of pests or disease symptoms of stingless bees followed by the same capital letter do not differ significantly $\alpha=0.05$.

The influence of experience, qualification and management techniques on the occurrence of bee pests and disease symptoms

The level of experience of Ap-beekeepers did not influence the number of types of pests ($p=0.123$) or diseases ($p=0.451$) (Supplementary Table 6). However, experienced Sb-beekeepers (more than three years experience) observed more pests in their meliponaries (1.77 ± 0.123) than those with less experience (1.29 ± 0.09) ($p=0.002$; Supplementary Table 6). The enterprise size did not affect the observations of pests and diseases for both groups of bees (Supplementary Table 6)

Ap-Beekeepers who learned their trade formally (e.g. courses, academic qualification and cooperatives) observed fewer disease symptoms (average number of types of symptoms \pm standard error = 1.05 ± 0.09 , $p=0.02$) than those who had an informal education about bees (1.47 ± 0.16) being Self-taught, Friends/Family (Supplementary Table 6). However, the form of professional qualification did not influence the number of types of pests ($\chi^2=0.246$; $n=377$; $p=0.969$) or disease symptoms ($\chi^2=0.365$; $n=349$; $p=0.365$) for stingless bees.

All management techniques (i.e., timing of monitoring colonies, ways to acquire colonies, types of complementary feeding, planting of bee-friendly gardens, movement of colonies to new locations, queen replacement, old wax replacement) that Ap-beekeepers indicated as helping the colony quality and productivity had no effect on reducing the number of types of pests and disease symptoms ($p>0.05$; Supplementary Table 6). Sb-beekeepers who did not plant a bee-friendly garden (1.53 ± 0.08) had more pests in their meliponaries than those who did (1.05 ± 0.14 ; $p<0.001$). Meliponaries that were not transported to another location (1.28 ± 0.09) had fewer pests than those that were moved to another location (1.60 ± 0.12 ; $p=0.022$). Meliponaries without any kind of complementary feeding (0.83 ± 0.18) had fewer pests than those with complementary feeding of protein (1.64 ± 0.19), honey (1.75 ± 0.11), sugar syrup (1.64 ± 0.09), and pollen (1.80 ± 0.14 ; $p<0.001$) (Supplementary Figure 3). Meliponaries with complementary feeding based on protein had the highest increased the incidence of predators ($\chi^2=10.754$; $p=0.029$). Parasites, such as mites, phorids, wax moths and beetles, were

frequently observed in meliponaries that received any type of complementary feeding ($\chi^2=29.014$; $p<0.001$), while other pests (bees and ants) were more frequently observed in meliponaries with complementary feeding of honey and pollen ($\chi^2=1,404$; $p=0.02$).

In addition, the number of disease symptoms for stingless bees was higher in meliponaries with nest division (0.65 ± 0.11) than without (0.95 ± 0.09 ; $p=0.03$; Supplementary Table 6).

The influence of beekeeper knowledge (experience and qualification) and management techniques on the quantities of pests and disease symptoms

Ap-beekeeper experience and complementary feeding type provided had no interaction effect on the number of types of pests or on the number of disease symptoms in apiaries (Supplementary Figure 4A, B; Supplementary Table 7). However, for Sb-beekeepers, inexperienced respondents who provided a mixed diet observed more pests ($X^2=10.772$; $p=0.013$) and more disease symptoms ($X^2=10.849$; $p=0.013$) than did those who did not provide such diets (Supplementary Figure 4C, D; Supplementary Table 8). AP-beekeeper qualification and complementary feeding types provided had no interaction effect on the number of types of pests or on the number of disease symptoms in apiaries (Supplementary Figure 5A, B; Supplementary Table 7). However, Sb-beekeepers with informal training who did not perform complementary feeding observed more pests ($X^2=9.005$; $p=0.029$) and more disease symptoms ($X^2=8.424$; $p=0.038$) than did those who provided protein and mixed diets (Supplementary Figure 5C, D). Sb-beekeepers with formal training who provided mixed diets observed more pests ($X^2=11.506$; $p=0.009$) than did those who provided protein or no complementary feeding.

The interaction between training type and monitoring frequency affected the number of types of pests found in apiaries ($X^2=7.022$; $p=0.030$; Supplementary Figure 6A). Among Ap-beekeepers who monitored at intervals longer than two months, those who had formal training observed fewer pests than those who were informally trained. Among Ap-beekeepers who monitored monthly, those with formal training observed fewer disease symptoms than those with informal training ($W=507.5$; $p=0.036$; Supplementary Figure 6B). For Sb-beekeepers, there was no effect of an interaction

between training and monitoring frequency on the number of types of pests or the number of disease symptoms (Supplementary Figure 6C, D; Supplementary Table 8).

The influence of pests and disease symptoms, and management techniques on the colony loss

Among Ap-beekeepers who checked apiaries weekly, those observed pests had similar losses to those who did not ($W=277.5$; $p=0.161$). When monitoring was less frequent, Ap-beekeepers reporting pests had higher losses than did those who did not (Figure 4A). Among Sb-beekeepers reporting pests, those who checked meliponaries weekly had fewer losses than those who checked less frequently ($X^2=7.2$; $p=0.027$; Figure 4B).

Among Ap-beekeepers who monitored weekly, those who observed the presence of disease symptoms had greater losses than those who did not ($W=333.5$; $p<0.001$), which was also true for those who monitored monthly ($W=333$; $p<0.001$; Figure 4C). However, when monitoring was done at intervals longer than two months, losses for Ap-beekeepers reporting symptoms were similar to those who did not ($W=18.5$; $p=0.48$; Supplementary Table 9). In contrast, among Sb-beekeepers reporting disease symptoms, those who checked weekly had fewer losses than those who checked less frequently ($X^2=7.000$, $p=0.030$; Figure 4D; Supplementary Table 10).

Among Ap-beekeepers who provided their colonies with an energetic diet (e.g., sugar), those who did not observe pests had fewer losses than those who did ($W=135.5$, $p=0.004$; Figure 4E). Sb-beekeepers had greater colony loss when complementary feeding was not provided ($W=50$, $p=0.023$) or when protein was provided (Figure 4F).

Among Ap-beekeepers who provided an energetic diet, those reporting disease symptoms had greater losses than those who did not ($W=78.5$; $p<0.001$) which was also true for those who provided a mixed diet ($W=239$; $p<0.001$; Figure 4G). For Sb-beekeepers, healthy colonies resulted in fewer losses when complementary feeding was not given ($W=24.5$; $p=0.032$) or when protein was fed ($W=23$; $p=0.05$; Figure 4H; Supplementary Table 10).

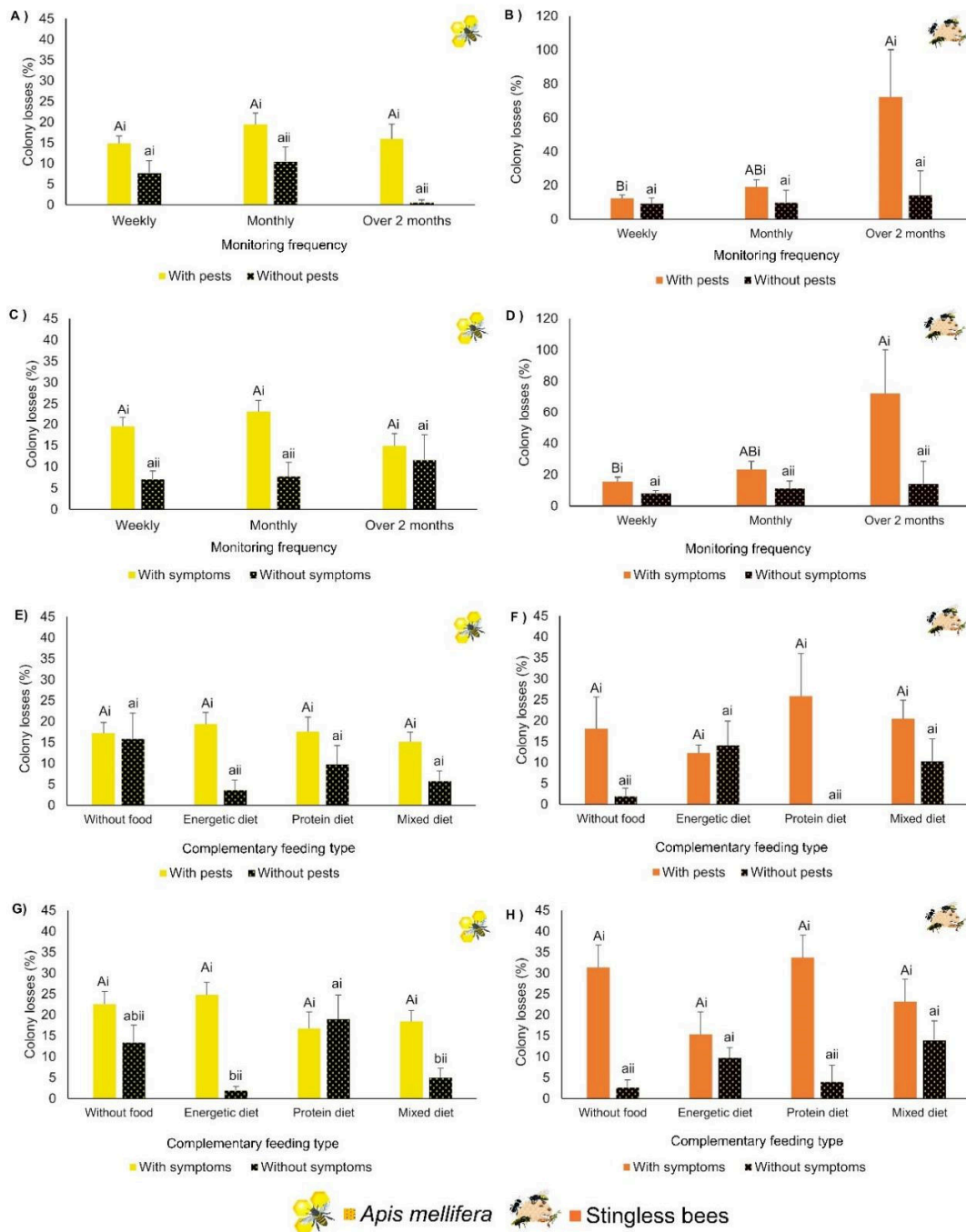


Figure 4. The interaction between colony losses when pests were present/absent as a function of monitoring frequency (A) *Apis mellifera* (B) Stingless bees. The interaction between colony losses with and without disease symptoms as a function of monitoring frequency (C) *A. mellifera* (D) Stingless bees. Colony losses as a function of type of complementary feeding when pests observed in (E) *A. mellifera* (F) Stingless bees. Colony losses as a function of type of complementary feed when disease symptoms are observed in (G) *A. mellifera* (H) Stingless bees. Uppercase letters compare colonies with pests or with disease symptoms, being yellow for *A. mellifera* and orange for stingless bees. Lowercase letters compare colonies without pests or without disease symptoms, in black for both *A. mellifera* and stingless bees. Roman numbers compare colonies with and without pests/diseases that received the same monitoring frequency (ABCD) or the same complementary feeding type (EFGH).

Discussion

This research, guided by a citizen science perspective (participation of the general public in the scientific process), was the first survey of the impacts that bee pests and pathogens have on the decline of managed bees in Brazil based on experiences shared by beekeepers. The contributions of beekeepers came from nearly all Brazilian states and included an unprecedented contribution from the Northeast, as most bee health studies have concentrated on the South and Southeast regions of the country (Pires et al., 2016). This study includes similar contributions by Ap-beekeepers and Sb-beekeepers for the assessment of the health status of Brazilian apiaries and melinoparies. This study indicates that both groups experience significant losses of colonies, with rates similar to those observed in temperate zone countries where colony loss rates of 5.8 to 32% were reported from 2018 to 2019 for *A. mellifera* (Gray et al., 2020). On the other hand, colony loss rates of 30% and 50% per year were reported for Argentina and Chile, respectively (Maggi et al., 2016), which is higher than observed here. The use of Africanized *A. mellifera* appears to be a crucial factor that positively affects the survival of the species. Beekeepers and researchers have found these bees to be more resistant to pathogens and parasites than European *A. mellifera* (De Jong, 1996). For example, *A. mellifera* in Venezuela, Brazil and some provinces in Uruguay and Argentina are able to coexist with the mite, *Varroa destructor*. Apparently, the most problematic countries in terms of bee health are Argentina and Chile, due to the fact that most of their bee populations belong to European lineages, which are highly susceptible to attacks by parasites and pathogens (Maggi et al., 2016). Colonies heavily infested with mites are sometimes treated with acaricides, which can further reduce the bee immune system (Boncristiani et al., 2012). In addition, treatment options tend to become ineffective as the mites become more resistant (Roth et al., 2021). To avoid excessive use of acaricides, selection of mite-resistant bee lines may be an alternative for control of this important parasite (Traynor et al., 2020).

Our study provides evidence, from the perspective of beekeepers, that pests and pathogens contribute to the loss of colonies in Brazil. Moreover, colonies that had pests also had, simultaneously, disease symptoms. In fact, some pests, such as mites, may favor the entry of viral infections, such as deformed wing virus (DWV), acute

paralysis virus (ABPV), and weaken colonies (Levin & Chejanovsky, 2016). Phorids are the main parasites of stingless bees and are known to transmit viruses and other diseases (Core et al., 2012; Ueira-Vieira et al., 2015). Ants were the insects most associated with higher colony loss in apiaries. Some of these diseases, depending on the extent of damage, can weaken colonies and, consequently, make them more susceptible to parasite attack (Barroso-Arévalo et al., 2019).

Abrupt reduction in the number of workers, the main symptom of colony collapse disorder (vanEngelsdorp et al., 2009), was identified in both groups of bees, but this symptom only resulted in significant colony loss for *A. mellifera*. Some studies have indicated that a combination of pesticides and pathogen infection is associated with large losses of colonies, referred to as colony collapse disorder (Doublet et al., 2015; Sánchez-Bayo et al., 2016). Daily sublethal doses of pesticides cause oxidative stress and reduces the ability of insects to produce protective peptides, which prevent the proliferation of microorganisms (James & Xu, 2012), thus reducing bee longevity and resistance of bees to diseases (Sánchez-Bayo et al., 2016). Pesticides can also reduce cognitive capacity, flight capacity, foraging activity, and can be lethal (Sánchez-Bayo et al., 2016). Therefore, and in the context of new public policies currently adopted by the Brazilian Agriculture Ministry that can lead to an increase of use of pesticides (Braga et al., 2020; Barbosa et al., 2021), it is imperative to monitor this problem to ensure the health of colonies.

Nevertheless, reduced number of workers may also be related to worker death, as observed in both *Apis mellifera* and stingless bee colonies. Some studies have indicated that the presence of ABPV klepto virus and chronic bee paralysis virus, observed by the beekeepers in both groups of bees studied here, are responsible for worker deaths (Ueira-Vieira et al., 2015), although the symptoms of these diseases can be easily mistaken for poisoning when laboratory analyses are not performed (Kiljanek, 2016). Infections with these viruses are not always apparent, but they can spread rapidly and cause significant colony loss (Chen & Siede, 2007). Periodic evaluations of colonies are essential to control and minimize the incidences of these viral diseases (Chen & Siede, 2007). Also observed that frequent monitoring (weekly and monthly) of disease or pest infested colonies can help avoid losses, particularly in stingless bees. However, colony opening for monitoring may result in increased exposure to robber bees and other enemies (i.e. phorid fly and the robber bee

Lestrimelitta limao) and lead to an increase in the use of resources needed to seal the colonies (Villas-Bôas, 2012)

The vegetation surrounding colonies locations is important as it determines the floral resources available to bees; natural vegetation normally provides a wide array of floral and non-floral resources contributing to better nutrition and increased resistance to pests and diseases (Di Pasquale et al., 2016; Dolezal et al., 2018; Kaluza et al., 2018; Steinhauer et al., 2018; Ricigliano et al., 2019; Requier & Leonhardt, 2020). Nevertheless, no significant differences were found in the incidence of pests and disease symptoms as a function of vegetation, silviculture, agriculture, and pasture surrounding colonies. Bee communities are strongly conditioned by local effects and may exhibit patterns of spatial heterogeneity at a scale as low as 500–1000 m in patches of homogeneous habitat (Torné-Noguera et al., 2014). These results have important implications for local pollination dynamics and spatial variation of plant-pollinator networks. Kremen et al., (2002) and Kim et al., (2006) found that bees are negatively influenced by agricultural activity located near areas of natural vegetation. In addition, a major current problem facing beekeeping is the use of pesticides near colonies, which can reduce bee immunity, thus increasing susceptibility to pests and pathogens (James & Xu, 2012; Doublet et al., 2015; Sánchez-Bayo et al., 2016). Our findings showed a lower incidence of pests and symptoms in urban environments for stingless bees, which is in accordance with a trend that indicates that social bees adapt well to urban environments when they are correctly managed (Banaszak-Cibicka & Źmihorski, 2012; Theodorou et al., 2020). The correct use of complementary feeding or the creation of suburban gardens makes it possible to raise stingless bees in cities. In fact, 47.2% of the beekeepers who responded to the survey raised bee colonies in cities. Kaluza et al. (2016) and Leonhardt et al. (2016) found results similar to those of our study, indicating greater foraging activity of the Australian stingless bee *Tetragonula carbonaria* in suburban gardens than in farmland. Gardens in urban areas may offer a greater supply of food resources for bees (Mouga et al., 2015; Leonhardt et al., 2016).

Colonies are often affected by a lack of floral resources, which can be mitigated if the beekeeper provides complementary food (Kulhanek et al., 2021). However, we observed that Sb-beekeepers who have informal training and provide complementary feeding informed more problems with bee diseases than those who do not provide

such diets. In addition, lack of knowledge incites some Sb-beekeepers to feed their colonies with *A. mellifera* honey and pollen (Teixeira et al., 2020). These complementary food may contain bee pathogens (e.g., *Paenibacillus* larvae, *Ascosphaera apis*, *Nosema ceranae* and *Nosema apis*) that cause disease, including American foulbrood, chalkbrood disease (brood diseases), and adult bee disease, noseiosis (Teixeira et al., 2018). A complementary feeding without adequate sterilization can increase the incidence of diseases, which would explain the problems observed. The absence of a relationship between complementary feeding and these symptoms for *A. mellifera* may be related to the inability of beekeepers to properly identify disease problems. Some health problems may be overcome by *A. mellifera* hygienic behavior (Palmer & Oldroyd, 2003; Guimarães-Cestaro et al., 2020; Spivak & Danka, 2021). Noseiosis, which was identified as diarrhea in the questionnaire, was rarely observed for both groups of bees. It is possible that this disease may be less impactful in tropical countries (Guimarães-Cestaro et al., 2020). On the other hand, further investigations are needed to establish a causal link between complementary feeding and the incidence of pests and pathogens.

Beekeeper experience and qualification apparently help reduce the frequency of diseases and pests. Beekeeper education affects their ability to identify symptoms of bee pests and diseases (Jacques et al., 2017), as well as timely sample collection and knowledge of control measures. Beekeepers should maintain records of problems encountered, control measures implemented, and information that can help determine the sources of problems, including artificial feed options used. Brazil has recently implemented sanitary guidelines for apiculture (Brazil, 2021) and so it will be interesting to follow how well these guidelines are implemented.

Though Brazil has favorable climatic conditions for beekeeping and abundant floral resources year-round (Araújo et al., 2018), it is still generally a rustic activity in the country (Ponciano et al., 2013). Also, although there has been considerable research, beekeepers tend to not use the best technological options and the bee health situation in the field has been little studied (Araújo et al., 2018). Meliponiculture faces an even a bigger challenge, since colonies and management techniques are not standardized as they are for *A. mellifera* (Jaffé et al., 2015). Training for meliponiculture is generally experience based and not objectively organized (Jaffé et al., 2015). This

trial and error approach can lead to unnecessary losses; management practices based on research would be more efficient (Kulhanek et al., 2021).

We conclude that the occurrence of pests and pathogens contributes to the loss of managed bee colonies in Brazil and that such losses can be aggravated by inadequate management practices. Greater impacts on bee production can be avoided by taking measures to control and remedy the incidence of pests and pathogens in colonies. Guidance centers and advisors that can best instruct beekeepers on practices can help with colony health. Other recommendations for pest and pathogen control include the inspection and monitoring of pests and pathogens in colonies over space and time, with surveillance being continuous (Brodschneider et al., 2016; Pires et al., 2016). The aforementioned studies, although few and restricted to certain regions of Brazil, have not indicated the isolated involvement of pathogens causing such problems. Until public policies are instituted to promote broader assessments of bee health in the country, both by animal health regulatory agencies and by research funding agencies, little progress will be made in this area of knowledge (Pires et al., 2016). In addition, we believe that colony weakening, as evidenced by the simultaneous occurrence of pests and pathogens, may have been favored by factors not evaluated in this study, such as sublethal effects of pesticides (Sánchez-Bayo et al., 2016) or breeding of stingless bee species in areas outside their natural range (Vollet-Neto & Menezes, 2018). Considering the current scenario of facilitated pesticide registrations, the vulnerability of colonies to pests and pathogens can result in even greater losses that may be reflected in the performance of production and export of bee products from Brazil via the international market. Therefore, more in depth investigations are needed into colony loss in Brazil, including the causes, as well as more extensive and continuous monitoring. Reliable and complete inventories made publicly available on virtual platforms can be used to help estimate trends and foster the support of decision makers for actions aimed at investigating and avoiding the decline of bee diversity.

In general, this work raises relevant points that can help in understanding the causes and consequences of the presence of different types of pests and diseases in the disappearance of bees that go beyond the geographic limits of the country. The results of this work can help to reduce the vulnerability of bee colonies to pests and diseases worldwide.

Acknowledgments

We thank all the Brazilian beekeepers who participated in this study, in particular representatives of the associations AME-MG, AME-ES, APIMUZ, APACAME-SP, SOS Abelhas sem ferrão, and João Pedro Cappas Souza for their contributions in disseminating the questionnaires. We thank the two anonymous reviewers and reviewers José Eugênio Côrtes Figueira, José Eustáquio dos Santos Júnior and Lucas Neves Perillo for their excellent considerations that improved the article. We are grateful for the financial support of Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), Planta, CYTED Programa IberoAmericano de Ciencia y Tecnologia para el desarrollo and Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Programa de Excelência Acadêmica (PROEX) - Finance Code 001.

References

- Antúnez, K., Invernizzi, C., Mendoza, Y., vanEngelsdorp, D, & Zunino, P. (2017). Honey bee colony losses in Uruguay during 2013–2014. *Apidologie*, 48, 364–370.
- Appenfeller, L.R., Lloyd, S. & Szendrei, Z. (2020). Citizen science improves our understanding of the impact of soil management on wild pollinator abundance in agroecosystems. *Plos One*, 15, e0230007.
- Araújo, K. S. D. S., Araújo, B. M., Viana, D. C. , Honorato, J., Hualdo, V. K. L. , Cardoso, I. R. M. , Neto, D. L. D. S. , Oliveira, L. M., Pacheco, E., Dias, C. L. , Oliveira, L. M., Nascimento, I. O., Silva, D. S., Salgado, G. M., Costa, J. R. M., Lobato, J. S. M., & Mariano, S. M. B. (2018). Beekeeping in Brazil: A bibliographic review. In R. E. R. Ranz (Ed.), *Beekeeping - New challenges. IntechOpen*, 86p.
- Ashworth, L., Quesada, M., Casas, A., Aguilar, R. & Oyama, K. (2009). Pollinator-dependent food production in Mexico. *Biological Conservation*, 142, 1050-1057.
- Barbosa, L.G., Alves, M.A.S. & Grelle, C.E.V. (2021) Actions against sustainability: Dismantling of the environmental policies in Brazil. *Land Use Policy*, 104, 1-4.
- Banaszak-Cibicka, W., & Żmihorski, M. (2012). Wild bees along an urban gradient: winners and losers. *Journal of Insect Conservation*, 16, 331-343.
- Barroso-Arévalo, S., Fernández-Carrión, E., Goyache, J., Molero, F., Puerta, F., & Sánchez-Vizcaíno, J. M. (2019). High load of deformed wing virus and *Varroa destructor* infestation are related to weakness of honey bee colonies in Southern Spain. *Frontiers in Microbiology*, 10, 1331.
- Boncristiani, H., Underwood, R. Schwarz, R. Evans J.D., Pettis, J. & van Engelsdorp, D. (2012). Direct effect of acaricides on pathogen loads and gene expression levels in honey bees *Apis mellifera*. *Journal of Insect Physiology*, 58, 613–620.

Braga, A. R. C., de Rosso, V. V., Harayashiki, C. A. Y., Jimenez, P. C. & Castro, I. B. (2020). Global health risks from pesticide use in Brazil. *Nature Food*, 1, 312–314.

Brazil. Ministry of Agriculture, Livestock and Food Supply. Ordinance n° 52, of March 15, 2021. Brasília, 2021. <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-n-52-de-15-de-marco-de-2021-310003720>.

Bretagnolle, V. & Gaba, S. (2015). Weeds for bees? A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35, 891–909.

Brodtschneider, R., Gray, A., Van der Zee, R., Adjlane, N., Brusbardis, V., Charrière, J-D, Chlebo, R., Coffey, M.F., Crailsheim, K., Dahle, B., Danihlík, J., Danneels, E., Graaf, D.C., Dražić, M.M., Fedoriak, M., Forsythe, I., Golubovski, M., Gregorc, A., Grzęda, U., Hubbuck, I., Tunca, R.I., Kauko, L., Kilpinen, O., Kretavicius, J., Kristiansen, P., Martikkala, M., Martín-Hernández, R., Mutinelli, F., Peterson, M., Otten, C., Ozkirim, A., Raudmets, A., N., Soroker, V., Topolska, G., Vallon, J., Vejsnæs, F. & Woehl, S. (2016). Preliminary analysis of loss rates of honey bee colonies during winter 2015/16 from the COLOSS survey. *Journal of Apicultural Research*, 55, 375–378.

Castilhos, D., Bergamo, G. C., Gramacho, K. P., & Gonçalves, L. S. (2019). Bee colony losses in Brazil: A 5-year online survey. *Apidologie*, 50, 263–272.

Core, A., Runckel, C., Ivers, J., Quock, C., Siapno, T., DeNault, S., Smith, Christopher D. & Hafernik, J. (2012). A new threat to honey bees, the parasitic phorid fly *Apocephalus borealis*. *Plos One*, 7, e29639.

Chen, Y.P. & Siede, R. (2007). Honey bee viruses. *Advances in Virus Research*, 70, 33–80.

De Jong, D. (1996). Africanized honey bees in Brazil, forty years of adaptation and success. *Bee World*, 77, 67–70.

Di Pasquale, G., Alaux, C., Le Conte, Y., Odoux, J.F., Pioz, M., Vaissière, B. E., Belzunces, L. P. & Decourtye, A. (2016). Variations in the availability of pollen resources affect honey bee health. *Plos One*, 11, e0162818.

Dolezal, A. G., & Toth, A. L. (2018). Feedbacks between nutrition and disease in honey bee health. *Current Opinion in Insect Science*, 26, 114–119.

Doublet, V., Labarussias, M., de Miranda, J. R., Moritz, R. F. & Paxton, R. J. (2015). Bees under stress: sublethal doses of a neonicotinoid pesticide and pathogens interact to elevate honey bee mortality across the life cycle. *Environmental Microbiology*, 17, 969-983.

Dunn, O. J. (1961). Comparisons among means. *Journal of the American Statistical Association*, 56, 52-64.

Giannini, T.C., Alves, D.A., Alves, R., Cordeiro, G. D., Campbell, A. J., Awade, M., Bento, J. M. S. & Imperatriz-Fonseca V. L. (2020). Unveiling the contribution of bee pollinators to Brazilian crops with implications for bee management. *Apidologie*, 51, 406–421.

Gisder, S. & Genersch, E. (2017). Viruses of commercialized insect pollinators. *Journal of Invertebrate Pathology*, 147, 51-59.

Goodman, L.A. (1961). Snowball Sampling. *The annals of mathematical statistics*, 1, 148-170.

Guimarães-Cestaro, L., Maia, T.S., Martins, R., Alves, M. L. T. M. F., Otsuk, I.P., Message, D. & Teixeira, E.D. (2020). *Nosema ceranae* (Microsporidia: Nosematidae) does not cause collapse of colonies of africanized *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae) in tropical climate. *Sociobiology*, 67, 408-416.

Gray, A., Adjlane, N., Arab, A., Ballis, A., Brusbardis, V., Charrière, J.D.-R., Coffey, M. F., Cornelissen, B., da Costa, C. A., Dahle, B., Danihlík, J., Dražic, M. M., Evans, G., Fedoriak, M. I., Gajda, A., de Graaf,

- D.C., Gregorc, A., Ilieva, I., Johannsen, J., Kauco, L., Kristiansen, P., Martikkala, M., Martín-Hernández, R., Medina-Flores C.A., Mutinelli F., Patalano S., Raudmets A., San Martin, G, Soroker, V., Stevanovic, J., Uzonov, A., Vejsnaes, F., Williams, A., Zammit-Mangion, M. & Brodschneider, R. (2020). Honey bee colony winter loss rates for 35 countries participating in the COLOSS survey for winter 2018–2019, and the effects of a new queen on the risk of colony winter loss. *Journal of Apicultural Research*, 59,744-751.
- Gregorc, A. (2020). Monitoring of honey bee colony losses: A special issue. *Diversity*, 12, 403.
- IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2010). Mapas do diagnóstico ambiental da Amazônia Legal. Rio de Janeiro, s.d. Available at: <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6622>. Accessed 03 Mar 2021.
- IPBES (2016). The assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production. Potts, S.G., Imperatriz-Fonseca, V. & Ngo, H.T. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on *Biodiversity and Ecosystem Services*, Bonn, Germany. 552p.
- Jacques, A., Laurent, M., Consortium, E, Ribière-Chabert, M., Saussac, M., Bougeard, S., Budge, G. E., Hendriks, P. & Chauzat, M.P. (2017). A pan-European epidemiological study reveals honey bee colony survival depends on beekeeper education and disease control. *Plos One*, 12, e0172591.
- Jaffé, R., Pope, N., Carvalho, A. T., Maia, U. M., Blochtein, B., de Carvalho, C. A. L. & Imperatriz-Fonseca, V. L. (2015). Bees for development: Brazilian survey reveals How to optimize stingless beekeeping. *Plos One*, 10, e0121157.
- James, R.R. & Xu, J. (2012). Mechanisms by which pesticides affect insect immunity, *Journal of Invertebrate Pathology*, 109, 175-182.
- Kaluza, B.F., Wallace, H., Heard, T.A., Klein, A.M. & Leonhardt, S. D. (2016). Urban gardens promote bee foraging over natural habitats and plantations. *Ecology and Evolution*, 6, 1304–1316.
- Kaluza, B.F., Wallace, H.M., Heard, T.A., Minden, V., Klein, A. & Leonhardt, S.D. (2018). Social bees are fitter in more biodiverse environments. *Scientific Reports*, 8, 12353.
- Kim, J., Williams, N. & Kremen, C. (2006). Effects of cultivation and proximity to natural habitat on ground-nesting native bees in California sunflower fields. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 79, 309-320.
- Kiljanek, T., Niewiadowska, A., & Posyniak, A. (2016). Pesticide poisoning of honeybees: A review of symptoms, incident classification, and causes of poisoning. *Journal of Apicultural Science*, 60, 5–24.
- Kremen, C., Williams, N. M. & Thorp, R. W. (2002). Crop pollination from native bees at risk from agricultural intensification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99, 16812–16816.
- Kruskal, W.H., & Wallis, W.A. (1952). Use of ranks in one-criterion variance analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47, 583–621
- Kulhanek, K, Steinhauer N, Wilkes, J., Wilson, M., Spivak, M., Sagili, R. R., Tarpy, D., McDermott, E., Garavito, A., Rennich, K. & van Engelsdorp, D. (2021) Survey-derived best management practices for backyard beekeepers improve colony health and reduce mortality. *Plos One*, 16, e0245490.
- Leonhardt, S.D., Kaluza, B.F., Wallace, H. & Heard, T.A. (2016). Resources or landmarks: which factors drive homing success in *Tetragonula carbonaria* foraging in natural and disturbed landscapes? *Journal of Comparative Physiology A*, (202), 701-708.
- Levin, S., Sela, N. & Chejanovsky, N. (2016). Two novel viruses associated with the *Apis mellifera* pathogenic mite *Varroa destructor*. *Scientific Reports*, 6, 37710.

- Maggi, M., Antúnez, K., Invernizzi, C., Aldea, P., Vargas, M., Negri, P., Brasesco, C., De Jong, D., Message, D., Teixeira, E.W., Principal, J., Barrios, C., Ruffinengo, S., Da Silva, R. R. & Eguaras, M. (2016). Honeybee health in South America. *Apidologie*, 47, 835–854.
- Mallinger, R.E., Gaines-Day, H.R. & Gratton, C. (2017). Do managed bees have negative effects on wild bees?: A systematic review of the literature. *Plos One* 12, e0189268.
- Mann, H.B. & Whitney, D.R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annals of Mathematical Statistics*, 18, 50-60.
- McNeil, D.J., McCormick, E., Heimann, A.C., Kammerer M. Douglas, M.R., Goslee, S.C., Grozinger, C. M. & Hines H.M. (2020). Bumble bees in landscapes with abundant floral resources have lower pathogen loads. *Scientific Reports*, 10, 22306.
- Message, D., Teixeira, É.W. & De Jong, D. Situação da sanidade das abelhas no Brasil. In: Fonseca, V.L.I., Canhps, D.A.L., Alves, D. A., Saraiva, A.M. (2012). Polinizadores no Brasil: contribuição e perspectivas para a biodiversidade, uso sustentável, conservação e serviços ambientais. São Paulo: Edusp, 237-256.
- Michener, C.D. (2000). The bees of the world. *The John Hopkins University Press*, Baltimore, 913p.
- Mouga, D.M.D.S., Feretti V., Sena, J.C., Warkentin, M., Santos, A.K.G. & Ribeiro, C.L. (2015). Ornamental bee plants as foraging resources for urban bees in southern Brazil. *Agricultural Sciences*, 6, 365–381.
- Ngor, L., Palmer-Young, E., Burciaga Nevarez, R., Russell, K., Leger, L., Giacomini, S., Pinilla-Gallego, M.S., Irwin, R.E & McFrederick, Q. (2020). Cross-infectivity of honey and bumble bee-associated parasites across three bee families. *Parasitology*, 147, 1290-1304.
- Novais, S.M.A., Nunes, C.A., Santos, N.B., D'Amico, A.R., Fernandes, G.W., Quesada, M. & Neves, A.C.O. (2018). Correction: Effects of a possible pollinator crisis on food crop production in Brazil. *Plos One* 13, e0197396.
- Oliveira, F.I.S., Oki, Y., Resende, F.M., Angrisano, P., Rosa, D.C.P., Arantes-Garcia, L., Fernandes, G.W. (2021). From Innovation to Market: An analysis of the propolis production chain. In: Fernandes, G.W., Oki, Y., Barbosa, M. (eds). *Baccharis - From evolutionary and ecological aspects to social uses and medicinal applications*. Springer International Publishing, 547-564.
- Palmer, K.A. & Oldroyd, B.P. (2003). Evidence for intra-colonial genetic variance in resistance to American foulbrood of honey bees (*Apis mellifera*): further support for the parasite/pathogen hypothesis for the evolution of polyandry. *Naturwissenschaften* 90, 265–268.
- Paula, M.F., Angelo, H., Santos, A.J. & Almeida, A.N. (2016). Competitiveness of Brazilian Natural Honey Exports. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 10, 171-178.
- Pires, C.S.S., Pereira, F.M., Lopes, M.T.R., Nocelli, R.C.F., Malaspina, O., Pettis, J.S. & Teixeira, É.W. (2016). Enfraquecimento e perda de colônias de abelhas no Brasil: há casos de CCD?. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51, 422–442.
- Ponciano, N. J., Golynski, A., Souza, P.M.D., Ney, M.G., & Ney, V.D.S.P. (2013). Caracterização do nível tecnológico dos apicultores do estado do Rio de Janeiro. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 51, 499-514.
- Porrini, M.P., Porrini, L.P., Garrido, P.M., Neto, C.M.S., Porrini, D.P., Muller, F., Nunez, L.A., Alvarez, L., Iriarte, P.F., & Eguaras, M.J. (2017). *Nosema ceranae* in South American Native Stingless Bees and Social Wasp. *Microbial Ecology*, 74, 761–764.
- Potts, S.G., Imperatriz-Fonseca, V.L., Ngo, H.T., Aizen, M.A., Biesmeijer, J.C., Breeze, T.D., Dicks, L. V., Garibaldi, L. A., Hill, R., Settele, J. & Vanbergen A.J. (2016) Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*, 540, 220–229.

Purkiss, T. & Lach, L. (2019). Pathogen spillover from *Apis mellifera* to a stingless bee. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 286, 20191071.

R Core Team, 2020. R: A language and environment for statistical computing version 4.0.3.

Ricigliano, V.A., Mott, B. M., Maes, P.W., Floyd, A.S., Fitz, W., Copeland, D.C., Meikle, W.G., & Anderson, K.E. (2019). Honey bee colony performance and health are enhanced by apiary proximity to US Conservation Reserve Program (CRP) lands. *Scientific Reports*, 9, 4894.

Requier, F. (2019). Bee colony health indicators: synthesis and future directions. *CAB Reviews*, 14, 1-12.

Requier, F. & Antúnez, K. (2019). Monitoreo de pérdidas de colmenas (2019-2020). Sociedad Latinoamericana de Investigación en Abejas (SoLatinA), 1-3.

Requier, F. & Leonhardt, S.D. (2020). Beyond flowers: including non-floral resources in bee conservation schemes. *Journal Insect Conservation*, 24, 5–16.

Roth, M.A., Wilson, J.M. & Gross, A.D. (2021). Assessing *Varroa destructor* acaricide resistance in *Apis mellifera* colonies of Virginia. *Apidologie* 52, 1278–1290.

Sánchez-Bayo, F., Goulson, D., Pennacchio, F., Nazzi, F., Goka, K. & Desneux, N. (2016). Are bee diseases linked to pesticides? - A brief review. *Environment International*, 89-90, 7–11.

Sharif, M. Z., Jiang, X., & Puswal, S. M. (2020). Pests, parasitoids, and predators: Can they degrade the sociality of a honeybee colony, and be assessed via acoustically monitored systems? *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 8, 1248-1260.

Smart, M., Pettis, J., Rice, N., Browning, Z. & Spivak, M. (2016). Linking Measures of Colony and Individual Honey Bee Health to Survival among Apiaries Exposed to Varying Agricultural Land Use. *Plos One*, 11, e0152685.

Spivak, M. & Danka, R.G. (2021). Perspectives on hygienic behavior in *Apis mellifera* and other social insects. *Apidologie*, 52, 1–16.

Steinhauer, N., Kulhanek, K., Antúnez, K., Human, H., Chantawannakul, P., Chauzat, M.P., & vanEngelsdorp, D. (2018). Drivers of Colony Losses. *Current Opinion in Insect Science*, 26, 142-148.

Steinhauer, N., vanEngelsdorp, D. & Saegerman, C. (2021). Prioritizing changes in management practices associated with reduced winter honey bee colony losses for US beekeepers. *Science of The Total Environment*, 753, 141629.

Teixeira, É. W., Guimarães-Cestaro, L., Alves, M.L.T.M.F., Message, D., Martins, M. F., Luz, C.F.P. da, & Serrão, J. E. (2018). Spores of *Paenibacillus larvae*, *Ascosphaera apis*, *Nosema ceranae* and *Nosema apis* in bee products supervised by the Brazilian Federal Inspection Service. *Revista Brasileira de Entomologia*, 62, 188–194.

Teixeira, É. W., Ferreira, E. A., Luz, C.F.P., Martins, M. F., Ramos, T. A. & Lourenço, A.P. (2020). European Foulbrood in stingless bees (Apidae: Meliponini) in Brazil: Old disease, renewed threat. *Journal of Invertebrate Pathology*, 172, 107357.

Tennekes, M. (2018). tmap: Thematic Maps in R. *Journal of Statistical Software*, 84, 0-39.

Theodorou, P., Radzevičiūtė, R., Lentendu, G., Kahnt, B., Husemann, M., Bleidorn, C., Settele, J., Schweiger, O., Grosse, I., Wubet, T., Murray, T. E. & Paxton, R. J. (2020). Urban areas as hotspots for bees and pollination but not a panacea for all insects. *Nature communications*, 11, 576, 1-13.

- Torné-Noguera, A., Rodrigo, A., Arnan, X., Osorio, S., Barril-Graells, H., da Rocha-Filho, L. C., & Bosch, J. (2014). Determinants of spatial distribution in a bee community: nesting resources, flower resources, and body size. *Plos One*, 9, e97255.
- Toufalia, A.H., Alves, D. A., Bento, J. M. S., Marchini, L. C., & Ratnieks, F. L. W. (2016). Hygienic behaviour in Brazilian stingless bees. *Biology Open*, 5, 1712–1718.
- Toufalia, H. A., Alves, D. A., Bená, D. de C., Bento, J. M. S., Iwanicki, N. S. A., Cline, A. R., Ellis J.D. & Ratnieks, F. L. W. (2017). First record of small hive beetle, *Aethina tumida* Murray, in South America. *Journal of Apicultural Research*, 56, 76–80.
- Traynor, K.S., Mondet, F., Miranda, JR., Techer, M., Kowallik, V., Oddie, M. A.Y., Chantawannakul, P. & McAfee, A. (2020). *Varroa destructor*: A complex parasite, crippling honey bees worldwide. *Trends in Parasitology*, 36, 592–606.
- Ueira-Vieira, C., Almeida, L.O., de Almeida, F. C., Amaral, I.M.R., Brandeburgo, M.A.M., & Bonetti, A. M. (2015). Scientific note on the first molecular detection of the acute bee paralysis virus in Brazilian stingless bees. *Apidologie*, 46, 628–630.
- Van Der Zee, R., Gray, A., Holzmann, C., Pisa, L., Brodschneider, R., Chlebo, R., Coffey M.F., Kence, A., Kristiansen, P., Mutinelli, F., Nguyen, B.K, Nouredine, A., Peterson, M., Soroker, V., Topolska, G., Vejsnes, F. & Wilkins, S. (2013). Standard survey methods for estimating colony losses and explanatory risk factors in *Apis mellifera*. *Journal of Apicultural Research*, 52, 1-36.
- vanEngelsdorp, D., Evans, J. D., Saegerman, C., Mullin, C. Haubruge, E., Nguyen, B. K., Frazier, M., Frazier, J., Cox-Foster, D., Chen, Y., Underwood, R., Tarpy, D. R., Pettis, J. S. & Brown, J. (2009). Colony Collapse Disorder: A descriptive study. *Plos One*, 4, e6481.
- Villas-Bôas, J. (2012). Manual Tecnológico: Mel de abelhas sem ferrão. *Instituto Sociedade, População e Natureza*, Brasília, 96p.
- Vollet-Neto, A. & Menezes, C. (2018). Desafios e recomendações para o manejo e o transporte de polinizadores. *Embrapa Amazônia Oriental-Livro*. São Paulo: A.B.E.L.H.A., 100p.

- Empecilhos da lei (como obtenção selos de inspeções e autorizações)
 Problemas com doenças na colmeia (por exemplo, insetos parasitas, fungo, vírus, bactérias)
 Envenenamento com defensivos agrícolas (inseticidas ou herbicidas)
 Vandalismo e roubo
 Problemas com a rainha (postura reduzida, morte da rainha, colmeias zanganeiras)
 Redução de enxameação
 Falta de alimento no campo para as abelhas
 Climático – muita chuva (alagamentos) ou pouca chuva (seca severa)
 Queimada, desmatamento
 Falta de conhecimento
 Ataque de animais como macacos, tatus, quatis, tamanduá
 Outro. Qual? _____
- 14) Existem áreas de cultivo agrícola ao redor do seu apiário (distância de 2km)?
- | | | |
|---|--|---------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Não existem áreas agrícolas próximas | <input type="checkbox"/> Fruticultura (laranja, limão, outros) | <input type="checkbox"/> Arroz |
| <input type="checkbox"/> Algodão | <input type="checkbox"/> Horticultura | <input type="checkbox"/> Café |
| <input type="checkbox"/> Cana-de-açúcar | <input type="checkbox"/> Cacau | <input type="checkbox"/> Soja |
| <input type="checkbox"/> Fumo | <input type="checkbox"/> Milho/Sorgo | <input type="checkbox"/> Feijão |
| <input type="checkbox"/> Outra. Qual _____ | | |
- 15) Você faz reflorestamento apícola (plantio de espécies vegetais para atrair abelhas)?
- Não. Sim. Qual (is) planta (s) utiliza? _____
- 16) Você visita suas abelhas? Sim. Não.
- 17) Se você visita as abelhas qual sua frequência?
- | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Diariamente | <input type="checkbox"/> Semanalmente | <input type="checkbox"/> Mensalmente |
| <input type="checkbox"/> Anualmente | <input type="checkbox"/> Outros _____ | |
- 18) Você faz substituição regular das rainhas? Sim. Não.
- 19) Você faz substituição regular de favos de mel? Sim. Não.
- 20) Assinale qual(is) o tipo(s) de alimentação complementar você usou de janeiro de 2017 a dezembro de 2019?
- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Não faço alimentação complementar | <input type="checkbox"/> Xarope de açúcar invertido |
| <input type="checkbox"/> Mistura proteica | <input type="checkbox"/> Pólen |
| <input type="checkbox"/> Mel puro | <input type="checkbox"/> Outra. Qual? _____ |
- 21) Como você adquire novas colônias?
- Não adquire colônias Armadilhamento (da natureza) Compra Divisão de ninhos
- 22) Você costuma mover suas colmeias de lugar? Sim. Não.
- 23) Você teve problema(s) com algum(ns) desse(s) animal(is) dentro das suas colmeias de janeiro de 2017 a dezembro de 2019?
- | | | |
|---|--|---|
| <input type="checkbox"/> Não tive problemas | <input type="checkbox"/> Acaro como Varroa | <input type="checkbox"/> Traça da cera |
| <input type="checkbox"/> Outras abelhas | <input type="checkbox"/> Moscão | <input type="checkbox"/> Forídeos (mosquinha) |
| <input type="checkbox"/> Besouro | <input type="checkbox"/> Percevejo | <input type="checkbox"/> Formigas |
| <input type="checkbox"/> Cupins | <input type="checkbox"/> Vespas | <input type="checkbox"/> Outro. qual? _____ |
- 24) Qual destas infestações por animais acima mencionados causaram realmente perda das colônias de janeiro de 2017 a dezembro de 2019? _____
- 25) Você notou algum(ns) desse(s) sintoma(s) nas suas colmeias entre janeiro de 2017 a dezembro de 2019?
- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Não notei nenhum sintoma | <input type="checkbox"/> Poucas operárias |
| <input type="checkbox"/> Morte das crias | <input type="checkbox"/> Poucas operárias, poucos favos, pouco alimento |
| <input type="checkbox"/> Morte das rainhas | <input type="checkbox"/> Colmeias abandonadas com crias e alimento |
| <input type="checkbox"/> Morte das operárias em volta da colmeia | <input type="checkbox"/> Diarreias de abelhas |

- () Outro. Saberria dizer qual? _____
- 26) O que você faz para remediar quando acontece alguma doença (parasita, fungo, vírus, inseto) em suas colmeias?
- | | |
|---------------------------|--|
| () Não faço nada | () Introdução de uma rainha |
| () Higienização | () Quarentena (separação das outras) |
| () Destruição da colmeia | () Aplicação de algum produto químico artificial |
| () Divisão de ninhos | () Aplicação de algum produto natural como óleo essencial |
| () Outro. Qual? _____ | |
- 27) Você teve algum tipo de financiamento para sua produção de janeiro de 2017 a dezembro de 2019?
- () Não () Sim. Qual? _____
- 28) Caso tenha encaminhado algum material de suas colônias para laboratório de janeiro de 2017 a dezembro de 2019, qual foi o resultado?
- 29) Comente alguma situação anormal em suas colônias de janeiro de 2017 a dezembro de 2019
- 30) Gostaria de comentar algum problema que acarretou perdas de colônias de abelhas em seu bairro

Caso tenha uma colmeia doente e puder nos enviar uma foto ou amostra, ficaremos agradecidos. Para maior detalhamento de envio da amostra, entre em contato com o e-mail eucuidodasabelhas@gmail.com.

Muito obrigado por sua contribuição!

Estamos abertos para qualquer dúvida ou sugestão:

Catarina Dias de Freitas

Doutoranda em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre

Prof. Dr. Geraldo Wilson Afonso Fernandes

Orientador

Laboratório de Ecologia Evolutiva e Biodiversidade, Departamento de Genética Ecologia e Evolução, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Telefone: +55 031-3409-2580

Instituições colaboradoras:



Supplementary Questionnaire 2

Olá! Somos pesquisadores da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG e estamos avaliando as principais doenças em abelhas no Brasil. Sua contribuição será essencial para guiar a comunidade científica em busca de soluções dos principais problemas que afetam a saúde das abelhas. Você só precisa dizer o seu nome, se quiser. Nenhuma informação pessoal será divulgada. Caso não se sinta à vontade com algumas perguntas, você tem a opção de não responder e passar para a próxima. Você poderá desistir ou editar suas respostas e isto não acarretará nenhum tipo de prejuízo, dano ou constrangimento. E só levará cinco minutos do seu tempo para responder esse questionário. Daremos um retorno dos resultados dessa pesquisa por e-mail e pelas associações e cooperativas participantes.

Esse questionário tem fins apenas acadêmicos e não tem nenhum interesse comercial ou político.

Agradecemos muito a sua colaboração voluntária! Ajude-nos a ajudar você e a todo o país com a produção de alimento, geração de renda e conservação da biodiversidade.

Antes de começar, declare aqui o seu consentimento de participação.

Você concorda em participar desta pesquisa? Sim Não

Questionário de meliponicultura

- 1) Nome (opcional): _____
- 2) E-mail: _____
- 3) Qual a sua idade? _____
- 4) Qual é seu sexo? Feminino Masculino
- 5) Onde está localizado o(s) seu(s) meliponário(s). Se você tiver meliponários em várias localidades, escolha apenas uma das localidades para responder todo o questionário.
Bairro ou distrito: _____ Município: _____
- 6) Há quanto tempo você trabalha com abelhas? _____
- 7) A meliponicultura é sua principal renda? Sim Não
- 8) Como você aprendeu a cuidar das abelhas?
 Sozinho Amigo ou familiar
 Cursos Contratação de consultor
 Formação técnica ou universitária Outros. Qual? _____
- 9) Qual (is) produto (s) apícola (s) você produz a partir de suas colmeias?
 Mel Própolis Pólen
 Aluguel de abelhas Venda de enxame Outro. Qual? _____
- 10) Quais abelhas você trabalha? _____
- 11) Quantas colmeias você tem? _____
- 12) Quantas colmeias você perdeu de janeiro de 2017 a dezembro de 2019 por morte das abelhas? _____
- 13) As suas colmeias estão colocadas em:
 Áreas naturais (vegetação nativa) Áreas de silvicultura (eucalipto e/ou pinus)
 Áreas de pasto (gado, cabra) Áreas agrícolas (milho, feijão e outros tipos)
 Outro. Onde? _____
- 14) Assinale as principais dificuldades enfrentadas para cuidar de seu meliponário? _____

- Não tenho enfrentado dificuldades
 Econômica – falta de dinheiro para comprar rainhas, caixas, equipamentos de proteção etc
 Mercado – escoamento do produto
 Empecilhos da lei (como obtenção selos de inspeções e autorizações)
 Problemas com doenças na colmeia (por exemplo, insetos parasitas, fungo, vírus, bactérias)
 Envenenamento com defensivos agrícolas (inseticidas ou herbicidas)
 Vandalismo e roubo
 Problemas com a rainha (postura reduzida, morte da rainha, colmeias zanganeiras)
 Redução de enxameação
 Falta de alimento no campo para as abelhas
 Climático – muita chuva (alagamentos) ou pouca chuva (seca severa)
 Queimada, desmatamento
 Falta de conhecimento
 Ataque de animais como macacos, tatus, quatis, tamanduá
 Outro. Qual? _____
- 15) Existem áreas de cultivo agrícola ao redor de seu meliponário (distância de 2km)?
- | | | |
|---|--|---------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Não existem áreas agrícolas próximas | <input type="checkbox"/> Fruticultura (laranja, limão, outros) | <input type="checkbox"/> Arroz |
| <input type="checkbox"/> Algodão | <input type="checkbox"/> Horticultura | <input type="checkbox"/> Café |
| <input type="checkbox"/> Cana-de-açúcar | <input type="checkbox"/> Cacau | <input type="checkbox"/> Soja |
| <input type="checkbox"/> Fumo | <input type="checkbox"/> Milho/Sorgo | <input type="checkbox"/> Feijão |
| <input type="checkbox"/> Outra. Qual _____ | | |
- 16) Você faz reflorestamento apícola (plantio de espécies vegetais para atrair abelhas)?
- Não Sim. Qual (is) planta (s) utiliza? _____
- 17) Você faz o monitoramento das condições de suas colmeias? Sim Não
- 18) Qual a frequência que faz o monitoramento das condições de suas colmeias?
- Diariamente Semanalmente Mensalmente
 Anualmente Outros _____
- 19) Você faz divisão de enxame ou doação de favos de cria? Sim. Não
- 20) Como você adquire novas colônias?
- Não adquiero colônias Armadilhamento (caixas de isca)
 compra divisão de enxame
- 21) Você costuma mover suas colmeias de lugar? Sim Não
- 22) Assinale qual(is) o tipo(s) de alimentação complementar você usou de janeiro de 2017 a dezembro de 2019?
- Não faço alimentação complementar Xarope de açúcar invertido
 Mistura proteica Pólen
 Mel puro Outra. Qual? _____
- 23) Você teve problema(s) com algum(ns) desse(s) animal(is) dentro das suas colmeias de janeiro de 2017 a dezembro de 2019?
- | | | |
|---|---|---|
| <input type="checkbox"/> Não tive problemas | <input type="checkbox"/> Acaro | <input type="checkbox"/> Outras abelhas |
| <input type="checkbox"/> Moscão | <input type="checkbox"/> Forídeos (mosquinha) | <input type="checkbox"/> Besouro |
| <input type="checkbox"/> Percevejo | <input type="checkbox"/> Formigas | <input type="checkbox"/> Cupins |
| <input type="checkbox"/> Vespas | <input type="checkbox"/> Outro. Sabereria dizer qual? _____ | |
- 24) Qual destas infestações por animais acima mencionados causaram realmente perda das colônias de janeiro de 2017 a dezembro de 2019?
- 25) Você notou algum(ns) desse(s) sintoma(s) nas suas colmeias de janeiro de 2017 a dezembro de 2019?
- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> Não notei esses sintomas | <input type="checkbox"/> Poucas operárias |
| <input type="checkbox"/> Morte das crias | <input type="checkbox"/> Poucas operárias, poucos favos, pouco alimento |
| <input type="checkbox"/> Morte das rainhas | <input type="checkbox"/> Diarreias de abelhas |

() Morte das operárias em volta da colmeia () Outro. Saberá dizer qual _____

26) O que você faz para remediar quando acontece alguma doença (parasita, fungo, vírus) em suas colmeias?

- () Não faço nada () Quarentena (separação das outras)
 () Higienização () Aplicação de algum produto químico artificial
 () Destruição da colmeia () Aplicação de algum produto natural como óleo essencial
 () Divisão de enxame () Outro. Qual? _____
 () Armadilha para moscas

27) Você teve algum tipo de financiamento para sua produção de janeiro de 2017 a dezembro de 2019? () Não () Sim. Qual?

28) Caso tenha encaminhado algum material de suas colônias para laboratório de janeiro de 2017 a dezembro de 2019, qual foi o resultado?

29) Comente alguma situação anormal em suas colônias de janeiro de 2017 a dezembro de 2019

30) Comente se houve alguma outra situação anormal nas colônias cultivadas nas redondezas (bairro ou distrito) de seu apiário de janeiro de 2017 a dezembro de 2019.

Caso tenha uma colmeia doente e puder nos enviar uma foto ou amostra, ficaremos agradecidos. Para maior detalhamento de envio da amostra, entre em contato com o e-mail eucuidodasabelhas@gmail.com.

Muito obrigado por sua contribuição!

Estamos abertos para qualquer dúvida ou sugestão:

Catarina Dias de Freitas

Doutoranda em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre

Prof. Dr. Geraldo Wilson Afonso Fernandes

Orientador

Laboratório de Ecologia Evolutiva e Biodiversidade, Departamento de Genética Ecologia e Evolução, Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Telefone: +55 031-3409-2580

Instituições colaboradoras:



Supplementary Table 1: The main pests of *Apis mellifera* and stingless bees in Brazil and the damage they cause and their classification.

Option provided in the questionnaire	Damage caused to hives	Classification in this article	References for <i>Apis mellifera</i>	References for stingless bees
Mite (e.g., <i>Acarapis woodi</i> and <i>Varroa destructor</i>)	Hematophagous ectoparasite	Parasite	Octaviano-salvadé et al. (2017)	Alvarez et al. (2018)
Attack by other bees Robber bees (e.g., <i>Lestrimelitta limao</i> and <i>Apis mellifera</i>)	Theft of beehive provisions (i.e., food, wax, resin and nest cavity)	Others/ cleptobiotics	Grüter et al. (2016)	Grüter et al. (2016) Bego et al. (1991)
Besouros (e.g., <i>Aethina tumidae</i>)	Feeds on pollen and honey stored in beehives	Parasite/ cleptoparasites	Cuthbertson et al. (2013)	Toufailia et al. (2017)
Termites	Opens holes in hive boxes that facilitate the entry of pests such as wax moth, phorids and ants	Others/ tenant	Lopes et al. (2004)	
Phorid flies (e.g., <i>Pseudohyocera kerteszi</i>)	Larvae feed on honey, pollen and sometimes the brood.	Parasite/ cleptoparasites	Robinson (1981) Core et al. (2012) Brown (2004) Brown (2016)	Roubik (2006) Sharif et al. (2020) Brown (2004) Brown (2016)
Ants	Plundering of honey, pollen and brood in hives	Others/ cleptobiotics	Sharif et al. (2020)	Grüter (2020)
Black soldier fly (<i>Hermetia illucens</i>)	Feeds on decomposing organic matter in the beehive box and sometimes the pollen pots it develops in the hive alter the environment	Others/ tenant		Barreto & Castro (2007) Ivorra et al. (2020)
Thumbtack (<i>Apiomerus lanipes</i>)	Feeds on another living being for survival	Predator	Pires et al. (2016)	-
Wasp	Feeds on another living being for survival	Predator	Ken et al. (2005)	Leslie et al., (1974)
Wax Moth (e.g., <i>Galleria mellonella</i> and <i>Aphomia sociella</i>)	Larvae develop in wax and feed on honey, pollen and young	Parasite/ cleptoparasites	Kwadha et al. (2017)	Kwapong et al. (2010)
Others / attack by vertebrates and invertebrates (e.g., spiders, geckos, frogs and armadillos)	Feeds on another living being for survival	Predator		Kwapong et al. (2010)

References Supplementary Table 1

- Alvarez, L. J., Reynaldi, F. J., Ramello P. J., Garcia M. L., Sguazza G. G. H., Abrahamovich A. H., et al. (2018). Detection of honey bee viruses in Argentinian stingless bees (Hymenoptera: Apidae). *Insectes Soc.* 65 191–197.
- Barreto, L.S. & Castro, M.S. (2007). Ocorrência de larvas de *Hermetia illucens* (L., 1758) (Diptera: Stratiomyidae) em colônias de abelhas sem ferrão (HYMENOPTERA: APIDAE). *Mensagem Doce Online*, 92. Available at: <<http://www.apacame.org.br/mensagemdoce/92/artigo.htm>>. Accessed 20 abr. 2020
- Begon, M., Townsend, C.R. & Happer, J.L. (2007). *Ecologia: de indivíduos a ecossistemas*. 4 ed. Artmed, Porto Alegre.
- Bego, L.R., Zucchi, R., & Mateus, S. (1991). Notes on food strategies (cleptobiosis) in *Lestrimelitta limao* Smith (Hymenoptera, Apidae, Meliponinae). *Naturalia* 16, 119-127.
- Breed, M.D., Cook, C., & Krasnec, M. O. (2012). Cleptobiosis in Social Insects. *Psyche: A Journal of Entomology*, 2012, 1–7.
- Brown, B. (1997). Parasitic Phorid Flies: A Previously Unrecognized Cost to Aggregation Behavior of Male Stingless Bees. *Biotropica*, 29, 370-372.
- Brown, B. V. (2016). Two new bee-killing flies from Brazil (Insecta: Diptera: Phoridae: Melaloncha). *Biodiversity Data Journal*, 4, e7715.
- Core, A., Runckel, C., Ivers J., Quock, C., Siapno, T., DeNault S., et al. (2012). A new threat to honey bees, the parasitic phorid fly *Apocephalus borealis*. *Plos One* 7:e29639.
- Cuthbertson, A.G.S, Wakefield, M.E., Powell, M.E., Marris, G., Anderson, H., Budge, G.E. Mathers, J.J., Blackburn, L.F. & Brown, M.A. (2013). The small hive beetle *Aethina tumida*: A review of its biology and control measures, *Current Zoology*, 59, 644–653.
- Grüter, C., von Zuben, L.G. & Segers, F.H.I.D. (2016). Warfare in stingless bees. *Insect. Soc.* 63, 223–236.
- Ivorra, T., Hauser, M., Low, V.L., Tomberlin, J.K., Aliah, N.A.N., Cammack, J.A. & Heo, C.C. (2020). "Hermetia illucens and Hermetia fenestrata (Diptera: Stratiomyidae) Colonization of "Spoiled" Stingless Bee Geniotrigona thoracica (Hymenoptera: Apidae) Hives in Malaysia" *Insects*, 11, 737.
- Ken, T., Hepburn, H.R., Radloff, S.E. et al. (2005). Heat-balling wasps by honeybees. *Naturwissenschaften* 92, 492–495.
- Kwapong, P., Aidoo, K., Combey, R., & Karikari, A. (2010). Stingless bees: Importance, management and utilisation. A Training Manual for Stingless Beekeeping, *Unimax Macmillan*, 0-83.
- Kwadha, C.A., Ong'amo, G. O.; Ndegwa, P.N.; Raina, S. K. & Fombong, A. T. (2017). *The Biology and Control of the Greater Wax Moth, Galleria mellonella*. *Insects*, 8, 61.
- Leslie, K. J. & Stephen P. H. (1974). Aggression and Competition among Stingless Bees: *Field Studies. Ecology*, 55, 120–127.
- Lopes, M.T.R. et al. (2004). Doenças e Inimigos Naturais das Abelhas. 1. Ed. Teresina: *Embrapa*, 26 p.
- Octaviano-Salvadé, C.E., Leher, C.E., De Jong, D. (2017). A scientific note on genetic profile of the mite *Varroa destructor* infesting apiaries in Rio Grande do Sul state, Brazil. *Apidologie*, 48, 621–622.

- Palmer, K.A. & Oldroyd, B.P. (2003) Evidence for intra-colonial genetic variance in resistance to American foulbrood of honey bees (*Apis mellifera*): further support for the parasite/pathogen hypothesis for the evolution of polyandry. *Naturwissenschaften* 90, 265–268.
- Pires, C.S.S., Pereira, F.M., Lopes, M.T.R., Nocelli, R.C F., Malaspina, O., Pettis, J.S. & Teixeira, É.W. (2016). Enfraquecimento e perda de colônias de abelhas no Brasil: há casos de CCD?. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51, 422–442.
- Robinson, G.E. (1981). *Pseudohyocera kerteszi* (Enderlein) (Diptera: Phoridae), a pest of the honey bee. *Florida Entomologist*, 64, 456-457.
- Roubik, D. W. (2006). Stingless bee nesting biology. *Apidologie*, 37, 124–143.
- Sharif, M. Z., Jiang, X., & Puswal, S. M. (2020). Pests, parasitoids, and predators: Can they degrade the sociality of a honeybee colony, and be assessed via acoustically monitored systems? *Journal Of Entomology And Zoology Studies*, 8, 1248-1260.
- Toufalia, H. A., Alves, D. A., Bená, D. de C., Bento, J. M. S., Iwanicki, N. S. A., Cline, A. R., Ellis J.D. & Ratnieks, F. L. W. (2017). First record of small hive beetle, *Aethina tumida* Murray, in South America. *Journal of Apicultural Research*, 56, 76–80.
- Zahid, M.Z., Jiang, X. & Puswal, S.M. (2020). Pests, parasitoids, and predators: Can they degrade the sociality of a honeybee colony, and be assessed via acoustically monitored systems? *Journal Of Entomology And Zoology Studies*, 8, 1248-1260.

Supplementary Table 2: The relationship between symptoms presented and the corresponding diseases for *Apis mellifera* and stingless bees in Brazil.

Symptoms	Symptom-related diseases	Organism involved	Species found in Brazil	References
Brood deaths	European Brood (EFB)	Foul Bacteria	<i>Melissococcus pluton</i>	Bailey (1985) Teixeira et al. (2020)
	American foulbrood (AFB)	Bacteria	<i>Paenibacillus larvae</i>	Graaf et al. (2006)
	Sacbrood disease	Virus	Sacbrood virus (SBV) <i>Morator aetatulas</i>	Freiberg et al. (2012) Haddad et al. (2018)
	Brazilian Sacbrood Virus	Toxic pollen	<i>Stryphnodendron polyphyllum</i> ; <i>Stryphnodendron adstringens</i>	Carvalho & Message (2004)
	Ascosperosis or Chalkbrood disease	Fungal	<i>Ascospaera apis</i>	Guo et al. (2019) Castagnino et al. (2020)
Queen death	Nosemosis	Fungal	<i>Nosema ceranae</i>	Porrini et al. (2017)
			<i>Nosema apis</i>	Hassaneis (1951)
	Virus	Virus	Israeli Acute Paralysis Virus (IAPV)	Amiri et al. (2020)
	Advanced age	-	-	Butler (1957)
Worker deaths	Virus	Virus	Acute bee paralysis virus (ABPV), Black queen cell virus (BQCV), Israeli acute paralysis virus (IAPV)	Teixeira et al. (2008) Ueira-Vieira et al. (2015) Guimarães-Cestaro et al. (2020) Peixoto et al. (2021)
	Poisoning	-	-	Kiljanek (2016)
	Acarapidosis or acariosis	or		Bailey (1985) Otis et al. (1992)

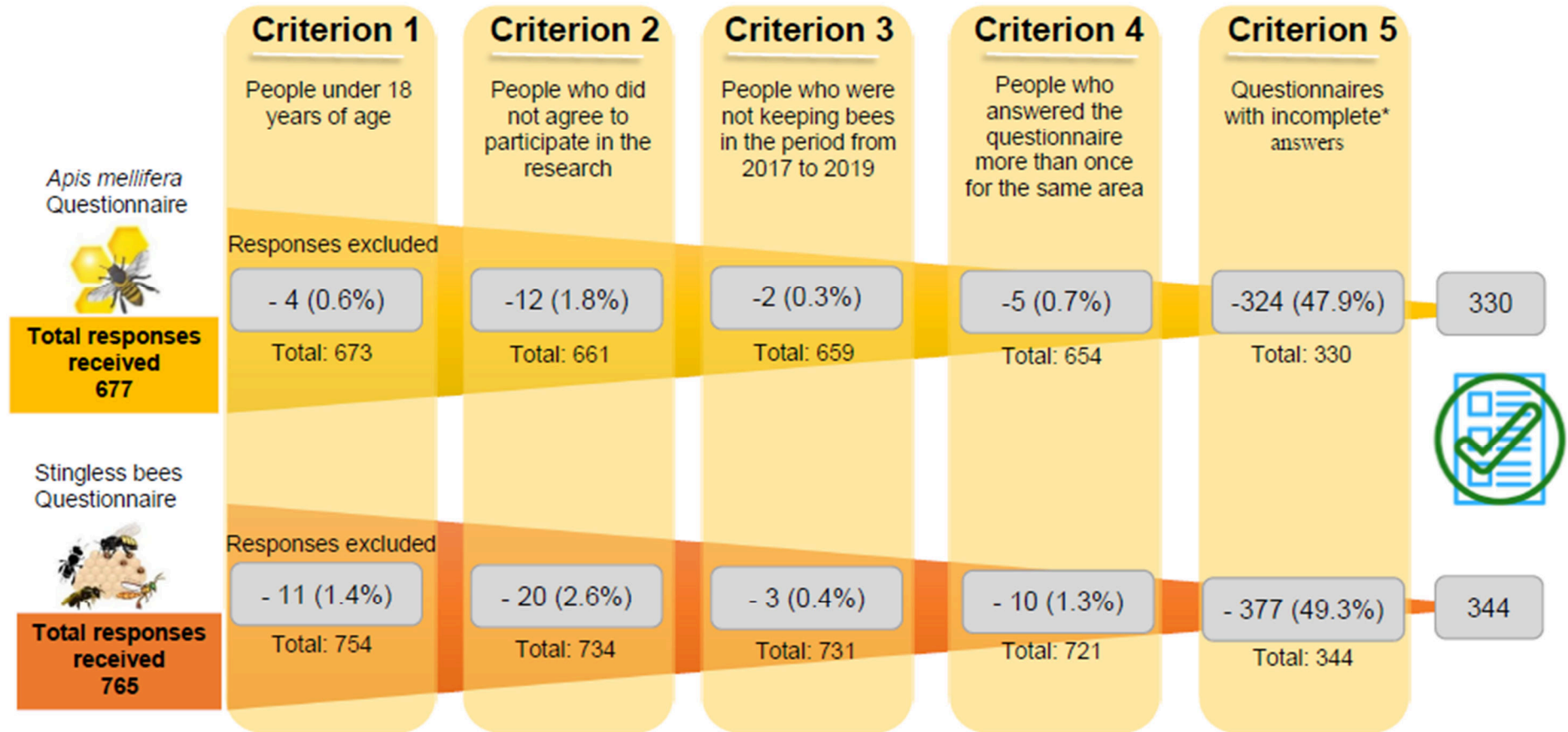
Supplementary Table 2: The relationship between symptoms presented and the corresponding diseases for *Apis mellifera* and stingless bees in Brazil.

Symptoms	Symptom-related diseases	Organism involved	Species found in Brazil	References
Few workers (only)	Colony collapse disorder	-	-	VanEngelsdorp et al. (2008); Gupta et al. (2019)
Few workers, few combs, little food	Malnutrition	-	-	Brodschneider & Crailsheim (2010)
Abandoned colony	Undergoing high stress levels (e.g., ant attack, improper handling, lack of food, excessive heat and prolonged drought)	-	-	Soares & De Jong (1992) Hepburn, (2006)
	Parasitized honey bees show hive abandonment behavior, leaving their hives at night and dying shortly thereafter.	Parasitoid phorid fly	<i>Apocephalus borealis</i>	Core et al. (2012)
Diarrhea	Nosemosis	Fungi	<i>Nosema Ceranae</i> <i>Nosema apis</i>	Lopes et al. (2004) Porrini et al. (2017) Huang et al. (2012) Teixeira et al. (2013) Teixeira et al. (2018)

References Supplementary Table 2

- Amiri E, Strand MK, Tarpay DR, Rueppell O. (2020). Honey Bee Queens and virus infections. *Viruses*, 12, 322-334.
- Bailey, L. (1985). *Melissococcus pluton* and European Foul Brood, *Bee World*, 66, 134-136.
- Brodtschneider, R., & Crailsheim, K. (2010). Nutrition and health in honey bees. *Apidologie*, 41, 278–294.
- Butler, I.A. & Dawson, C. (1957). Agriculture in the balance payments: Discussion. *Australian Journal of Agricultural Economics*, 1, 19–21.
- Carvalho, a. C. P. & Message, D. (2004). A scientific note on the toxic pollen of *Stryphnodendron polyphyllum* (Fabaceae, Mimosoideae) wich causes sacbrood-like symptoms. *Apidologie*, 35, 89-90.
- Castagnino, G. L. B., Mateos, A., Meana, A., Montejo, L., Zamorano-Iturralde, L. V. & Cutuli -Simón, M.T. (2020). Etiology, symptoms and prevention of chalkbrood disease: a literature review. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal*, 21, e210332020.
- Core, A., Runckel, C., Ivers, J., Quock, C., Siapno, T., DeNault, S., Smith, Christopher D. & Hafernik, J. (2012). A new threat to honey bees, the parasitic phorid fly *Apocephalus borealis*. *Plos One*, 7, e29639.
- Freiberg, M., De Jong, D., Message, D. & Cox-Foster, D. (2012) First report of sacbrood virus in honey bee (*Apis mellifera*) colonies in Brazil. *Genetics and Molecular Research*, 11, 3310–3314.
- Guimarães-Cestaro, L., Maia, T.S., Martins, R., Alves, M. L. T. M. F., Otsuk, I.P., Message, D. & Teixeira, E.D. (2020). *Nosema ceranae* (Microsporidia: Nosematidae) does not cause collapse of colonies of africanized *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae) in tropical climate. *Sociobiology*, 67, 408-416.
- Graaf, D.C., Alippi, A.M., Brown, M., Evans, J.D., Feldlaufer, M., Gregorc, A., Hornitzky, M., Pernal, S.F., Schuch, D.M.T., Titěra, D., Tomkies, V. & Ritter, W. (2006). Diagnosis of American foulbrood in honey bees: a synthesis and proposed analytical protocols. *Letters in Applied Microbiology*, 43, 583–590.
- Guo, R, Chen, D, Diao, Q, Xiong, C, Zheng, Y & Hou, C. (2019). Transcriptomic investigation of immune responses of the *Apis cerana cerana* larval gut infected by *Ascospaera apis*. *Journal of Invertebrate Pathology*, 166, 107210.
- Gupta, D., Chauhan, H., Gupta, S., & Gupta, R. (2019). Effect of Colony Collapse Disorder on Honeybees. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 16, 4149–4152.
- Haddad, N., Horth, L., Al-Shagour, B., Adjlane N. & Loucif-Ayad, W. (2018). Next-generation sequence data demonstrate several pathogenic bee viruses in Middle East and African honey bee subspecies (*Apis mellifera syriaca*, *Apis mellifera intermissa*) as well as their cohabiting pathogenic mites (*Varroa destructor*). *Virus Genes*, 54, 694–705.
- Hassaneis, M.H. (1951). Studies on the effect of infection with *Nosema apis* on the physiology of the queen honey-bee. *Journal of cell science*, 225–231.
- Hepburn, H.R. (2006). Absconding, migration and swarming in honeybees: An ecological and evolutionary perspective. Life Cycles in Social Insects: Behaviour, Ecology and Evolution. V. E. Kipyatkov(Ed.), St. Petersburg University Press, St. Petersburg, 121–135.
- Huang, Q., Kryger, P., Conte, I.L. & Moritz, R.F.A. (2012). Survival and immune response of drones of a Nosemosis tolerant honey bee strain towards *N. ceranae* infections. *J Invertebr Pathol*, 109, 0–302.
- Kiljanek, T., Niewiadowska, A., & Posyniak, A. (2016). Pesticide Poisoning of Honeybees: A Review of symptoms, incident classification, and causes of poisoning. *Journal of Apicultural Science*, 60, 5–24.

- Otis, G.W. & Scott-dupree, C.D. (1992). Effects of *Acarapis woodi* on Overwintered Colonies of Honey Bees (Hymenoptera: Apidae) in New York. *Journal of Economic Entomology*, 85, 40–46.
- Peixoto, C. M., França, S. O., Mercês, C.daC., Correia-Oliveira, M. E. & Carvalho, C. A. L. (2021). Occurrence of pathogenic viruses in Africanized honey bees in Brazil, *Journal of Apicultural Research*. doi: 10.1080/00218839.2021.1962111.
- Porrini, M.P., Porrini, L.P., Garrido, P.M., Neto, C.M.S., Porrini, D.P., Muller, F. Nunez, L.A. Alvarez, L. Iriarte, P.F. & Eguaras, M.J. (2017). *Nosema ceranae* in South American native stingless bees and social wasp. *Microbial Ecology*, 74, 761–764.
- Soares, A.E.E. & De Jong, D. (1992). Pesquisas com Abelhas no Brasil. Revista Brasileira de Genetica, Ribeirão Preto, Brasil (In English, Spanish and Portuguese) Ribeirão Preto, *Revista Brasileira de Genética*, 73-74.
- Teixeira, É.W., Chen, Y., Message D., Pettis, J. & Evans, J.D. (2008). Virus infections in Brazilian honey bees. *Journal Invertebrate Pathology*, 99, 1–119.
- Teixeira, E. W. Santos, L. G. dos; Sattler, A., M., D.; Alves, M. L. T. M. F., Martins, M. F., Grassi-Sella, M. L. & Francoy, T. M. (2013). *Nosema ceranae* has been present in Brazil for more than three decades infecting Africanized honey bees. *Journal of Invertebrate Pathology*, 114, 250–254.
- Teixeira, É. W., Guimarães-Cestaro, L., Alves, M. L. T. M. F., Message, D., Martins, M. F., Luz, C. F. P. da & Serrão, J. E. (2018). Spores of *Paenibacillus larvae*, *Ascosphaera apis*, *Nosema ceranae* and *Nosema apis* in bee products supervised by the Brazilian Federal Inspection Service. *Revista Brasileira de Entomologia*, 62, 188–194.
- Teixeira, É. W. Ferreira, E. A., Luz, C. F. P., Martins, M. F., Ramos, T. A. & Lourenço, A.P. (2020). European Foulbrood in stingless bees (Apidae: Meliponini) in Brazil: Old disease, renewed threat, *Journal of Invertebrate Pathology*, 172, 107357.
- Ueira-Vieira, C., Almeida, L. O., de Almeida, F. C., Amaral, I. M. R., Brandeburgo, M. A. M. & Bonetti, A. M. (2015). Scientific note on the first molecular detection of the acute bee paralysis virus in Brazilian stingless bees. *Apidologie*, 46, 628–630.
- VanEngelsdorp, D., Hayes, J. Jr., Underwood, R.M. & Pettis, J. (2008). A Survey of Honey Bee Colony Losses in the U.S., Fall 2007 to Spring. *Plos One* 3, e4071.



Supplementary Figure 1. Criteria used to exclude answers from analysis. * Incomplete answers were considered those without participant socioeconomic data

Supplementary Table 3. The results for all questions of the questionnaires for Ap-beekeepers and Sb-beekeepers.

Question	Answer	<i>Apis</i> beekeepers				Stingless bee beekeepers			
		N° Answer		Percentage (%)		N° Answer		Percentage (%)	
Age	Age Classes	Female	Male	Female	Male	Female	Male	Female	Male
	18 - 23	1	4	0.4	1.4	1	22	0.3	6.8
	24 - 29	2	14	0.7	5.0	3	25	0.9	7.7
	30 - 35	1	34	0.4	12.2	6	44	1.9	13.6
	36 - 41	5	42	1.8	15.1	2	46	0.6	14.2
	42 - 47	4	29	1.4	10.4	7	44	2.2	13.6
	48 - 53	10	39	3.6	14.0	6	27	1.9	8.3
	54 - 59	7	44	2.5	15.8	5	33	1.5	10.2
	60 - 65	3	21	1.1	7.6	2	29	0.6	9.0
	66 - 71	0	11	0.0	4.0	0	17	0.0	5.2
	72 - 77	0	3	0.0	1.1	0	3	0.0	0.9
78 - 83	0	4	0.0	1.4	0	2	0.0	0.6	
Gender	Female	41		12.5		40		12.5	
	Male	287		87.5		300		87.5	
Local	Midwest	16		5.0		17		5.3	
	Northeast	63		19.5		56		17.4	
	North	12		3.7		6		1.9	
	Southeast	163		50.5		163		50.6	
	South	69		21.4		80		24.8	
How long have you been working with bees?	Inexperienced (Up to 3 years)	87		27.7		203		61.9	
	Experienced (Above 3.1 years)	227		72.3		125		38.1	
Is beekeeping your main income?	Yes	59		19.0		11		3.4	
	No	256		81.3		314		99.7	
How did you learn beekeeping?	Self-taught	78		24.3		128		49.0	
	Friends/Family	136		42.4		140		53.6	
	Courses	180		56.1		140		53.6	
	Hiring consultant	11		3.4		0		0	
	Academic qualification	70		21.8		40		15.3	
	Others	48		15.0		73		28.0	
Which bee product(s) do you produce from your hives?	Wax	177		55.0		-		-	
	Honey	314		97.5		179		75.8	
	Propolis	148		46.0		68		28.8	
	Pollen	17		5.3		31		13.1	
	Royal jelly	2		0.6		-		-	
	Bee rental	11		3.4		7		3.0	
	Sale	41		12.7		113		47.9	
	Apitoxin	7		2.2		-		-	
		7		2.2		91 *		38.6	
		Others					(hobby = 74)		
How many hives do you have?	Small (0 – 50 hives)	209		66.1		292		90.1	
	Medium (51 – 200 hives)	78		24.7		25		7.7	
	Large (More than 200 hives)	29		9.21		7		2.2	
Did you have any type of financing for your production?	Yes	15		6.4		1		0.4	
	No	219		93.6		245		99.6	

Supplementary Table 3. The results for all questions of the questionnaires for Ap-beekeepers and Sb-beekeepers (continuation).

Question	Answer	Apis beekeepers		Stingless bee beekeepers	
		N°Answer	Percentage	N° Answer	Percentage
Their hives are placed in:	Native vegetation	261	54.9	136	36.7
	Pasture	65	13.7	21	5.7
	Forestry	64	13.5	14	3.8
	Agricultural	56	11.8	25	6.7
	Others/Urban	29	6.10	163	47.2
Are there agricultural cultivation areas around your apiary (2km distance)?	No agricultural areas nearby	76	17.8	129	16.1
	Cotton	4	0.9	34	4.3
	Sugar cane	30	7.0	60	7.5
	Fumo	8	1.9	39	4.9
	Fruticulture	43	10.0	76	9.5
	Horticulture	30	7.0	77	9.6
	Cocoa	3	0.7	36	4.5
	Corn/Sorghum	89	20.8	88	11.0
	Rice	6	1.4	39	4.9
	Coffee	30	7.0	53	6.6
	Soy	43	10.0	64	8.0
	Bean	40	9.3	63	7.9
	Others	26	6.1	41	5.1
How many hives have you lost from January 2017 to December 2019 due to the death of the bees?	0 – 19%	199	65.7	190	75.7
	20 – 39%	78	25.7	50	19.9
	40 – 59%	18	5.9	10	4.0
	60 – 79%	6	2.0	1	0.4
	80 – 99%	2	0.7	0	0.0
Mark the main difficulties faced to take care of your apiary?	I have not faced difficulties	18	2.2	82	7.8
	Economy	100	12.2	96	9.1
	Market	87	10.7	54	5.1
	Hindrances of the law	101	12.4	93	8.8
	Problems with diseases in the hive	55	6.7	73	6.9
	Poisoning with crop protection	64	7.8	105	10.0
	Vandalism and theft	52	6.4	56	5.3
	Problems with the queen	30	3.7	59	5.6
	Swarming reduction	37	4.5	52	4.9
	Lack of food in the field for bees	87	10.7	123	11.7
	Climatic	61	7.5	72	6.8
	Fire, deforestation	57	7.0	72	6.8
	Lack of knowledge	21	2.6	71	6.7
Attack of animals such as monkeys	19	2.3	47	4.5	
Others	27	3.3			
Did you have a problem(s) with any of these animal(s) inside your hives from January 2017 to December 2019?	I had no problems	45	9.9	58	15.5
	Mite	31	6.8	10	2.7
	Wax moth	113	24.9	*(OUT 2)	
	Robber bees	24	5.3	53	14.2
	Black soldier fly	3	0.7	18	4.8
	Phorid flies	30	6.6	155	41.6
	Beetles	7	1.5	5	1.3
	Thumbtack	1	0.2	0	0.0
	Ants	129	28.4	94	25.2
	Termites	52	11.5	16	4.3
	Wasp	9	2.0	5	1.3
Others	10	2.2	12	3.2	
Which of the aforementioned animal infestations actually caused colony loss from January 2017 to December 2019?	Robber bees	12	8.7	25	19.4
	Mites	9	6.5	-	
	Beetles	2	1.4	1	0.8
	Phorid flies	10	7.2	73	56.6
	Ants	68	49.3	26	20.2
	Wax moth	37	26.8		
Black soldier fly	-	-	4	3.1	

Supplementary Table 3. The results for all questions of the questionnaires for Ap-beekeepers and Sb-beekeepers (continuation).

Question	Answer	Apis beekeepers		Stingless bee beekeepers	
		N°Answer	Percentage(%)	N° Answer	Percentage
Did you notice any of these symptom(s) in your hives from January 2017 to December 2019?	I did not notice any symptoms	80	26.4	110	33.3
	Larva deaths	19	6.3	42	12.7
	Queen death	9	3.0	16	4.8
	Worker deaths	67	22.1	37	11.2
	Bee diarrhea	2	0.7	6	1.8
	Few workers (only)	30	9.9	52	15.8
	Few workers, combs, food and brood	44	14.5	54	16.4
	Abandoned hives	39	12.9		
	Others	13	4.3	13	3.9
Do you do beekeeping reforestation (planting of plant species to attract bees)?	Yes	127	50.3	216	74.7
	No	125	49.6	73	25.3
Do you monitor the conditions of your hives?	Yes	232	98.92	276	94.8
	No	26	10.07	15	5.2
How often do you monitor your hives?	12 months	7	5.6	4	1.5
	6 months	3	2.4	0	0
	3 months	4	3.2	0	0
	2 months	6	4.8	3	1.1
	Monthly	92	74.2	61	22.3
	Biweekly	12	9.7	13	4.8
	Weekly	94	75.8	138	50.5
	Daily	10	8.1	54	19.8
Do you replace queens?	Yes	85	33.3	-	-
	No	170	66.7	-	-
Do you replace the frames with old wax?	Yes	231	90.2	-	-
	No	25	9.8	-	-
How do you acquire new colonies?	I do not get colonies	7	2.6	3	1.4
	Trap (bait boxes)	216	81.5	211	98.1
	Buy	25	9.4	155	72.1
	Beehive division	149	56.2	194	90.2
	Others (rescue)	40	15.1	18	8.4
Do you move your hives out of place?	Yes	91	34.73	96	32.0
	No	171	65.27	204	68.0
Do you divide hives or donate brood combs?	Yes	-	-	196	67.8
	No	-	-	93	32.2
Check which type(s) of complementary food have you used from January 2017 to December 2019?	I do not do complementary feeding	78	29.2	40	13.3
	Protein mix	98	36.7	49	16.3
	Pure honey	37	13.9	135	44.9
	Sugar syrup	143	53.6	195	64.8
	Pollen	11	4.1	97	32.2
	Others (*orange peel/kibble)	2*	0.7	18	6.4
What do you do to remedy when a disease (parasite, fungus, virus, insect) occurs in your hives?	I do nothing to remedy	66	28.2	48	19.3
	Sanitation	114	48.7	142	57.0
	Destruction of the hive	17	7.3	12	4.8
	Beehive division	11	4.7	3	1.2
	Introduction of a new queen	16	6.8		
	Quarantine	29	12.4	53	21.3
	Application of artificial chemical	10	4.3	1	0.4
	Application of natural product	18	7.7	27	10.8
	Others	27	11.5	28	11.2
	Fly trap	-	-	101	40.6

Supplementary Table 4. List of bee species provided by beekeepers identified by popular or scientific name.

Name	Report count
Abelha limão	1
Arapua	1
Aripua	1
Beiju	1
Benjoi	4
Bicolor	1
Boca de renda	8
Boca de renda preta	1
Boca de sapo	6
Borá	19
Borá manso	1
Caga fogo	1
Canudo	14
Caracu	1
Caraí	1
<i>Cefhalotrigona capitata</i>	1
Cupinheiras	1
Cupira	8
Droryana	3
Ermerina	1
<i>Frieseomelitta doederleini</i>	1
<i>Frieseomelitta flavicornis</i>	1
<i>Frieseomelitta sp.</i>	1
Guaraipo	30
<i>Guaraipo bicolor</i>	1
Guiuruçu	2
Iraí	58
Irão	2
Jandaira	19
Jataí	232
Jataí acreana	1
Jatai da terra	1
Jatí	3
Jati (mosquito verdadeiro)	1
Jupara	1
Lambe olhos	9
<i>Leurotrigona muelleri</i>	1
Mandaçaia	135
Mandaçaia maquel	1
Mandaçaia mqa	25
Mandaçaia mqq	7
<i>Mandaçaia quadrifasciata anthidioides</i>	1

Supplementary Table 4. List of bee species provided by beekeepers identified by popular or scientific names (continuation).

Name	Report count
Mandaguari	44
Mandaguari amarela	6
Mandaguari preta	9
Mandei	1
Manduri	38
Manduri amarela	1
Manduri asilvai	1
Manduri carioca	1
Manduri preta	1
Manduri rajada	4
Manduri torcida	1
Manduri vermelha	1
Mandurim	1
Marginata	1
Marmelada	33
Marmelada amarela	3
Marmelada preta	1
Meipona asilvai	1
Melipona	11
<i>Melipona bicolor</i>	1
<i>Melipona bicolor bicolor</i>	1
<i>Melipona capixaba</i>	1
<i>Melipona compressipes</i>	1
<i>Melipona flavolineata</i>	1
<i>Melipona fulva</i>	2
<i>Melipona interrupta</i>	1
<i>Melipona laterales</i>	1
<i>Melipona mandacaia smith</i>	1
<i>Melipona marginata</i>	4
Melipona marginata carioca	1
Melipona mondury	1
<i>Melipona quadrfaciata quadrfaciata</i>	5
<i>Melipona quadrfasciata</i>	4
<i>Melipona quinquefasciata</i>	1
<i>Melipona rufiventris mondury</i> (bugia)	21
<i>Melipona scutellaris</i>	4
<i>Melipona seminigra</i>	1
<i>Melipona seminigra merrillae</i>	1
Merenda	1
Mirim	62
Mirim droryana	26

Supplementary Table 4. List of bee species provided by beekeepers identified by popular or scientific names (continuation).

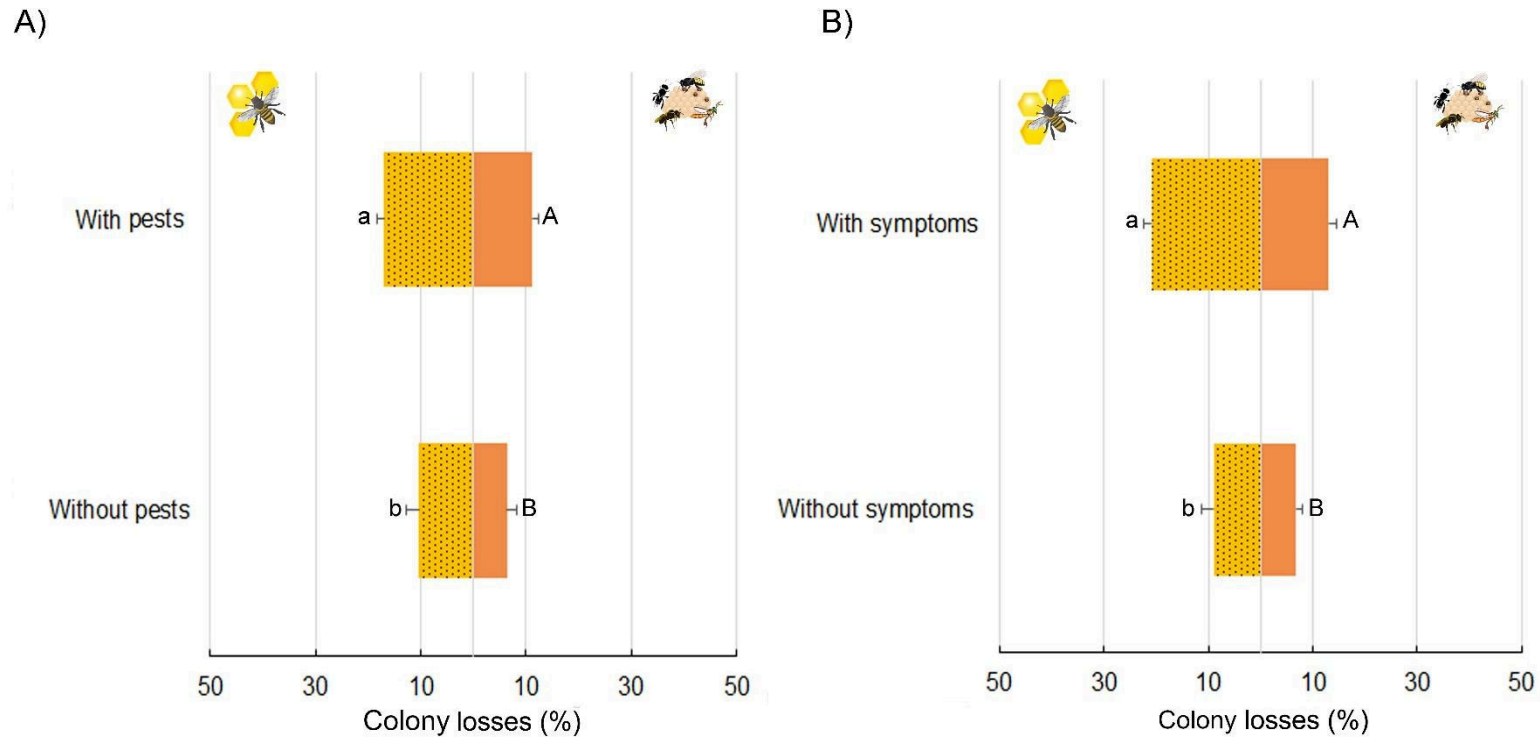
Name	Report count
Mirim emerina	4
Mirim guaçu amarela	13
Mirim lambe olhos	1
Mirim luci	3
Mirim nigriceps	1
Mirim preguiça	17
Mirim saiqui	2
Moça branca	16
Moça preta	9
Mosquito	2
Mumbucão	4
<i>Nannotrigona testaceicornis</i>	2
Plebeia	2
<i>Plebeia droryana</i>	5
<i>Plebeia mirim</i>	1
<i>Plebeia nigriceps</i>	5
<i>Plebeia remota</i>	3
<i>Plebeia saiqui</i>	1
<i>Plebeia sp</i>	3
<i>Plebeia witimanni</i>	1
Quinquefasciata	1
Rajada	2
Sanharao	1
Scaptotrigona	5
<i>Scaptotrigona bipunctata</i>	1
<i>Scaptotrigona postica</i>	2
Scutellaris	2
Tataira	1
Tetragonisca angustula	6
Timirim	1
Tiúba	10
Tiúba do maranhão	2
Trigona	6
Tubi	2
Tubiba	3
Tubuna	44
Uruçu	13
Uruçu amarela	30
Uruçu boi	1
Uruçu capixaba	1
Uruçu cinzento	7
Uruçu de chão	1

Uruçu nordestina	26
Uruçu roxa	1
Uruçu tiuba	1
Vigia	1

Supplementary Table 5. Frequency of pests and disease symptoms found in hives of *Apis mellifera* and stingless bees.

	Observation n°(%)	<i>Apis mellifera</i>	Stingless bees	Chi-square test
PESTS				
Ants	presence	137 (53.9%)	100 (36.1%)	$\chi^2 = 16.343$, $p < 0.001$
	absence	117 (46.1%)	177 (63.9%)	
Beetles	presence	8 (3.2%)	4 (1.4%)	$\chi^2 = 1.0583$, $p = 0.304$
	absence	246 (96.8%)	273 (98.6%)	
Black soldier fly	presence	3 (1.2%)	20 (7.2%)	$\chi^2 = 10.25$, $p = 0.001$
	absence	251 (98.8%)	257 (92.8%)	
Mites	presence	32 (12.6%)	10 (3.6%)	$\chi^2 = 13.488$, $p < 0.001$
	absence	222 (87.4%)	267 (96.4%)	
Phorids	presence	32 (12.6%)	165 (59.6%)	$\chi^2 = 123.25$, $p < 0.001$
	absence	222 (87.4%)	112 (40.4%)	
Robber bees	presence	25 (9.8%)	57 (20.6%)	$\chi^2 = 10.886$, $p < 0.001$
	absence	229 (90.2%)	220 (79.4%)	
Termites	presence	56 (22.0%)	18 (6.5%)	$\chi^2 = 25.429$, $p < 0.001$
	absence	198 (78.0%)	259 (93.5%)	
Wasps	presence	10 (3.9%)	6 (2.2%)	$\chi^2 = 0.88054$, $p = 0.348$
	absence	244 (96.1%)	271 (97.8%)	
Wax moth	presence	113 (44.5%)	3 (1.1%)	$\chi^2 = 143.68$, $p < 0.001$
	absence	141 (55.5%)	274 (98.9%)	
DISEASE SYMPTOMS				
Diarrhea	presence	2 (0.8%)	6 (2.3%)	$\chi^2 = 0.84176$, $p = 0.359$
	absence	236 (99.2)	259 (97.7%)	
Few workers	presence	30 (12.6%)	57 (21.5%)	$\chi^2 = 6.3415$, $p = 0.012$
	absence	208 (87.4%)	208 (78.5%)	
*FWCF	presence	45 (18.9%)	54 (20.4%)	$\chi^2 = 0.09098$, $p = 0.763$
	absence	193 (81.1%)	211 (79.6%)	
Larva deaths	presence	20 (8.4%)	46 (17.4%)	$\chi^2 = 8.0527$, $p < 0.001$
	absence	218 (91.6%)	219 (82.6%)	
Queen death	presence	9 (3.8%)	16 (6.0%)	$\chi^2 = 0.91593$, $p = 0.338$
	absence	229 (96.2%)	249 (94.0%)	
Worker deaths	presence	71 (29.8%)	44 (16.6%)	$\chi^2 = 10.196$, $p = 0.001$
	absence	167 (70.2%)	221 (83.4%)	

Note: FWCF= Few workers, combs, food and brood.



Supplementary Figure 2. Comparison of percentage average colony losses between with and without bee pests for *Apis mellifera* (yellow/left) and stingless bees (orange/right) (A). Comparison of percentage average colony losses between with and without disease symptoms for *Apis mellifera* and stingless bees (B). Mann-Whitney test at $\alpha = 0.05$. Bars represent standard error.

Supplementary Table 6. The influence of socioeconomic characteristics and management techniques on the number (average \pm SE) of bee pests and disease symptoms found for *Apis mellifera* and stingless bees. Comparison among treatments (rows) of characteristics. Different letters within the same column are significantly different at the 5% level ($p < 0.05$).

Socioeconomic characteristics	<i>Apis mellifera</i>		Stingless bees	
	Pest number	Symptom number	Pest number	Symptom number
Beekeeper experience	p=0.123	p=0.451	p= 0.002	p=0.369
Inexperienced (Up to 3 years)	1.58 \pm 0.19 a	1.12 \pm 0.20 a	1.29 \pm 0.09 b	0.84 \pm 0.09 a
Experienced (Above 3.1 years)	1.79 \pm 0.10 a	1.16 \pm 0.09 a	1.77 \pm 0.12 a	0.98 \pm 0.11 a
Enterprise size	p=0.742	p=0.224	p=0.063	p=0.720
Small (less than 50 hives)	1.63 \pm 0.09 a	1.07 \pm 0.09 a	1.41 \pm 0.08 a	0.90 \pm 0.07 a
medium-sized (51 to 200 hives)	1.82 \pm 0.18 a	1.37 \pm 0.16 a	1.95 \pm 0.29 a	0.88 \pm 0.27 a
Large (over 201 hives)	1.63 \pm 0.26 a	1.18 \pm 0.29 a	2.14 \pm 0.51 a	1.14 \pm 0.40 a
Beekeeper qualification	p=0.394	p= 0.02	p=0.31	p=0.56
Formal (courses and academic qualification)	1.63 \pm 0.13 a	1.05 \pm 0.09 b	1.57 \pm 0.11 a	0.96 \pm 0.10 a
Informal (Self-taught, Friends/Family)	1.81 \pm 0.17 a	1.47 \pm 0.16 a	1.41 \pm 0.10 a	0.84 \pm 0.09 a
Management techniques				
Monitoring frequency	p=0.375	p= 0.647	p=0.335	p=0.412
Without monitoring	0.56 \pm 0.13 a	1.13 \pm 0.24 a	0.93 \pm 0.27 a	0.73 \pm 0.24 a
Daily	1.60 \pm 0.37 a	0.78 \pm 0.36 a	1.41 \pm 0.16 a	0.67 \pm 0.14 a
Weekly	1.88 \pm 0.15 a	1.15 \pm 0.13 a	1.42 \pm 0.11 a	0.96 \pm 0.10 a
Biweekly	1.67 \pm 0.31 a	1.09 \pm 0.39 a	2.00 \pm 0.38 a	0.67 \pm 0.33 a
Monthly	1.62 \pm 0.15 a	1.23 \pm 0.14 a	1.48 \pm 0.14 a	0.87 \pm 0.14 a
2 months	1.00 \pm 0.58 a	0.00 \pm 0.00 a	0.00 \pm 0.00 a	0.00 \pm 0.00 a
3 months	2.00 \pm 0.32 a	1.00 \pm 0.41 a	1.50 \pm 0.50 a	2.50 \pm 1.50 a
6 months	0.33 \pm 0.33 a	1.00 \pm 1.00 a	0.00 \pm 0.00 a	0.00 \pm 0.00 a
12 months	2.00 \pm 0.58 a	1.00 \pm 0.32 a	1.25 \pm 1.25 a	1.00 \pm 0.58 a
Beehive acquisition	p=0.986	p=0.857	p= 0.014	p= 0.091
Did not purchase	1.57 \pm 0.30 a	1.00 \pm 0.32 a	1.00 \pm 0.58 ab	1.67 \pm 0.33 a
Purchase	1.86 \pm 0.30 a	1.19 \pm 0.09 a	1.40 \pm 0.10 b	1.09 \pm 0.10 a
Traps	1.67 \pm 0.09 a	1.10 \pm 0.31 a	1.45 \pm 0.09 b	0.86 \pm 0.08 a
Division	1.75 \pm 0.12 a	1.16 \pm 0.11 a	1.58 \pm 0.09 ab	0.96 \pm 0.08 a
Others (rescue)	1.58 \pm 0.19 a	1.30 \pm 0.20 a	2.39 \pm 0.29 a	1.24 \pm 0.25 a

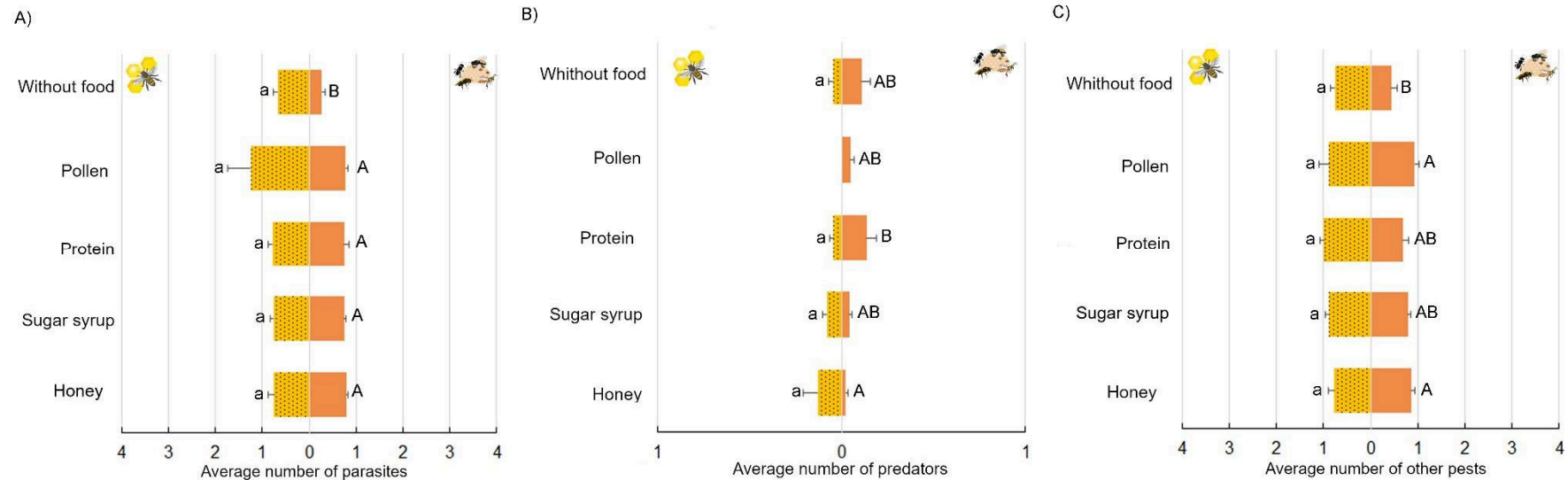
OBS: The social and economic characteristics of the beekeepers were first classified according to enterprise size. Small apiaries were considered as those with less than 50 hives, medium-sized as those with 51 to 200 hives and large as those with over 201 hives (Castilhos et al., 2019). Beekeepers were then categorized by level of experience, with experienced breeders being those who worked with bees for more than 3.1 years and inexperienced breeders being those who worked less than 3 years. The Mann – Whitney U test was used for comparisons of parameters that considered differences between two options. The Kruskal-Wallis non-parametric test was used for comparisons of parameters that considered differences among more than two options, with a post hoc analysis using Dunn's Pairwise Multiple Comparison Test to identify differences between treatments. All tests considered the 95% confidence level ($\alpha=0.05$) and were performed in R.

Supplementary Table 6. The influence of socioeconomic characteristics and management techniques on the number (average \pm SE) of bee pests and disease symptoms found for *Apis mellifera* and stingless bees. Comparison among treatments (rows) of characteristics. Different letters within the same column are significantly different at the 5% level ($p < 0.05$) (continuation).

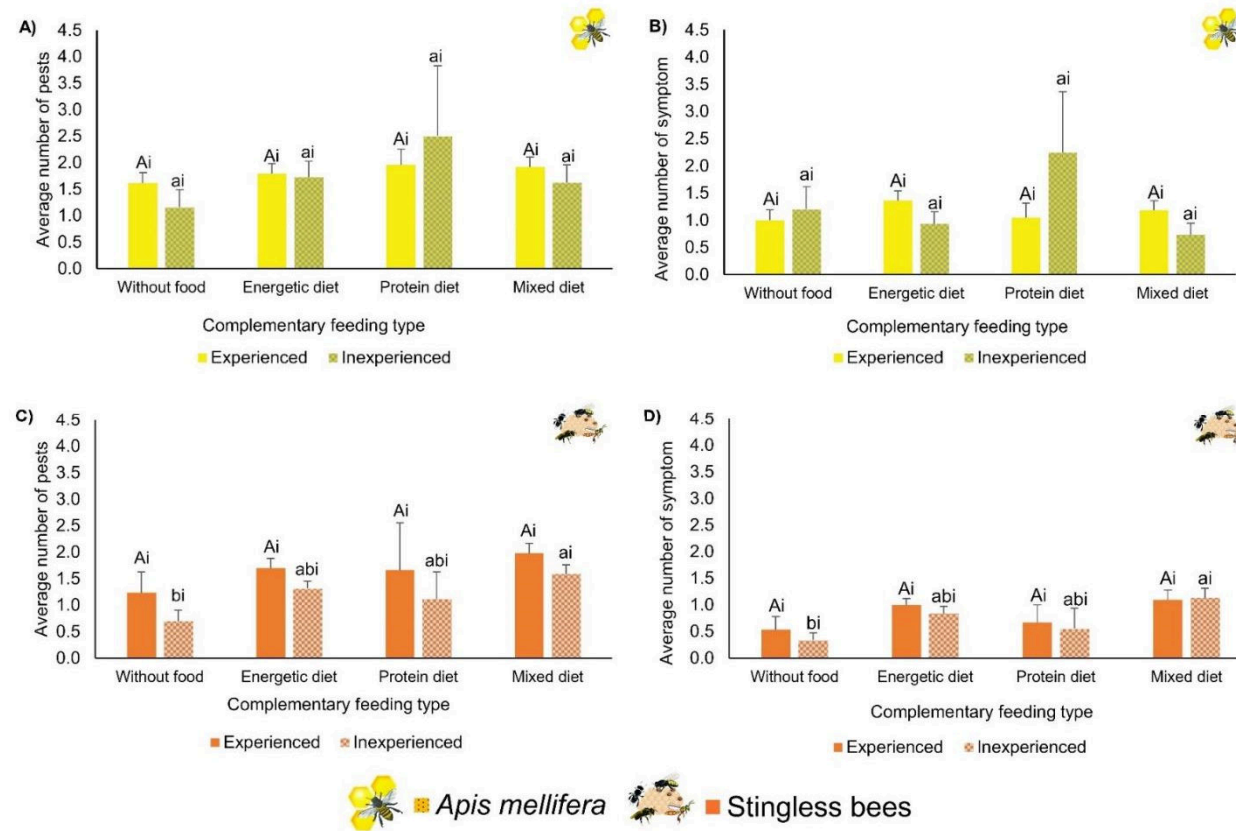
Management techniques	<i>Apis mellifera</i>		Stingless bees	
	Pest number	Symptom number	Pest number	Symptom number
Complementary feeding p=0.006	p=0.339		p=0.604	
			p<0.001	
Without food	1.47 \pm 0.16 b	1.05 \pm 0.17 a	0.83 \pm 0.18 b	0.43 \pm 0.12 b
Protein	1.81 \pm 0.14 a	1.15 \pm 0.13 a	1.64 \pm 0.19 a	1.27 \pm 0.19 a
Honey	1.65 \pm 0.21 a	0.94 \pm 0.16 a	1.75 \pm 0.11 a	1.12 \pm 0.11 a
Sugar syrup	1.72 \pm 0.11 a	1.18 \pm 0.10 a	1.64 \pm 0.09 a	1.10 \pm 0.09 a
Pollen	2.13 \pm 0.61 a	1.00 \pm 0.17 a	1.80 \pm 0.14 a	1.07 \pm 0.13 a
Plant bee-friendly garden	p=0.833		p=0.845	
			p<0.001	
No planting	1.72 \pm 0.13 a	1.14 \pm 0.12 a	1.05 \pm 0.14 b	1.14 \pm 0.12 a
Planting	1.60 \pm 0.10 a	1.14 \pm 0.10 a	1.53 \pm 0.08 a	1.05 \pm 0.10 a
Move hive to new location 66	p=0.250		p=0.103	
			p=0.022	
Without movement	1.61 \pm 0.10 a	1.05 \pm 0.10 a	1.28 \pm 0.09 b	0.78 \pm 0.08 a
Movement	1.80 \pm 0.14 a	1.24 \pm 0.13 a	1.60 \pm 0.12 a	1.05 \pm 0.13 a
Queen replacement	p=0.143		p=0.387	
No queen exchange	1.6 \pm 0.10 a	1.12 \pm 0.11 a	-	-
Queen exchange	1.84 \pm 0.15 a	1.14 \pm 0.12 a	-	-
Old wax replacement	p=0.951		p=0.160	
No beeswax exchange	1.73 \pm 0.28 a	1.57 \pm 0.34 a	-	-
Beeswax exchange	1.67 \pm 0.09 a	1.08 \pm 0.08 a	-	-
Nest division 0.03			p<0.001	
			p=	
No division	-	-	1.05 \pm 0.12 b	0.65 \pm 0.11 b
Division	-	-	1.55 \pm 0.09 a	0.95 \pm 0.09 a

References Supplementary Table 6

Castilhos, D., Bergamo, G. C., Gramacho, K. P. & Gonçalves, L. S. (2019). Bee colony losses in Brazil: a 5-year online survey. *Apidologie*, 50, 263–272



Supplementary Figure 3. The influence of complementary feeding type on the number of parasites (mites, beetles, phorids and wax moth) for *Apis mellifera* (yellow/left) and stingless bees (orange/right) (A). The influence of complementary feeding type on the number of predators (wasps, bedbugs, spiders, frogs, etc.) for *Apis mellifera* and stingless bees (B). The influence complementary feeding type on the number of other pests (bees, ants, termites and black soldier fly) for *Apis mellifera* and stingless bees (C). Kruskal-Wallis test at $\alpha=0.05$. Bars represent standard error. Hive loss percentages followed by the same letter do not differ by Dunn's Pairwise Test for Multiple Comparisons of Mean Rank Sums at $\alpha=0.05$.



Supplementary Figure 4. Effects of the interaction between complementary feeding type and beekeeper experience on the number of (A) pests and (B) disease symptoms for *Apis mellifera*, and the number of (C) pests and (D) disease symptoms for stingless bees. Uppercase letters compare different complementary feeding types for experienced beekeepers and lowercase letters compare feeding types of inexperienced beekeepers, while roman letters compare experienced and inexperienced beekeepers within for same complementary feeding type. Same letters do not differ statistically $\alpha=0.05$.

Supplementary Table 7. Two-way interaction analyses of Ap-beekeeper management techniques with beekeeper experience and with beekeeper qualification to explain the number of types of pests and the number of types of disease symptoms.

Response variables	Predictor variables	Est.	S.E.	Z val.	p-value
Number of types of pests	Experience (Inexperienced/Experienced) : Complementary feeding				
	Intercept	0.583	0.108	5408	<0.001*
	Inexperienced	-0.039	0.210	-0.189	0.850
	Complementary feeding (mixed)	0.068	0.149	0.458	0.647
	Complementary feeding (without)	-0.105	0.161	-0.653	0.514
	Complementary feeding (protein)	0.087	0.187	0.466	0.641
	Inexperienced:Comp. feeding (mix)	-0.126	0.305	-0.415	0.678
	Inexperienced:Comp. feeding (without)	-0.292	0.322	-0.909	0.363
	Inexperienced:Comp. feeding (protein)	0.286	0.409	0.699	0.485
Number of types of disease symptoms	Experience (Inexperienced/Experienced) : Complementary feeding				
	Intercept	0.309	0.125	2.470	0.014*
	Inexperienced	-0.373	0.287	-1.301	0.193
	Complementary feeding (mixed)	-0.137	0.182	-0.752	0.452
	Complementary feeding (without)	-0.309	0.200	-1.543	0.123
	Complementary feeding (protein)	-0.262	0.247	-1.061	0.288
	Inexperienced:Comp. feeding (mix)	-0.109	0.437	-0.249	0.803
	Inexperienced:Comp. feeding (without)	0.556	0.403	1.379	0.168
	Inexperienced: Comp. feed (protein)	11.377	0.489	2.328	0.020*
Number of types of pests	Qualification (Formal/Informal): Complementary feeding				
	Intercept	0.564	0.124	4.543	<0.001*
	Qualification (informal)	0.021	0.186	0.110	0.912
	Complementary feeding (mixed)	0.012	0.161	0.074	0.941
	Complementary feeding (without)	-0.283	0.189	-1.494	0.135
	Complementary feeding (protein)	0.078	0.204	0.384	0.701
	Informal:Comp. feeding (mixed)	0.135	0.286	0.471	0.637
	Informal:Comp, feeding (without)	0.269	0.277	0.971	0.928
	Informal:Compl. feeding (protein)	0.031	0.341	0.090	0.928
Number of types of disease symptoms	Qualification (Formal/Informal): Complementary feeding				
	Intercept	0.158	0.156	1.013	0.311
	Qualification (informal)	0.173	0.224	0.774	0.439
	Complementary feeding (mixed)	-0.068	0.204	-0.334	0.739
	Complementary feeding (without)	-0.312	0.240	-1.300	0.194
	Complementary feeding (protein)	-0.270	0.288	-0.934	0.350
	Informal:Comp. feeding (mix)	0.024	0.360	0.068	0.946
	Informal:Comp, feeding (without)	0.356	0.339	1.051	0.293
	Informal:Compl. feeding (protein)	0.631	0.414	1.525	0.127

Supplementary Table 7. Two-way interaction analyses of Ap-beekeeper management techniques with beekeeper experience and with beekeeper qualification to explain the number of types of pests and the number of types of disease symptoms(continuation).

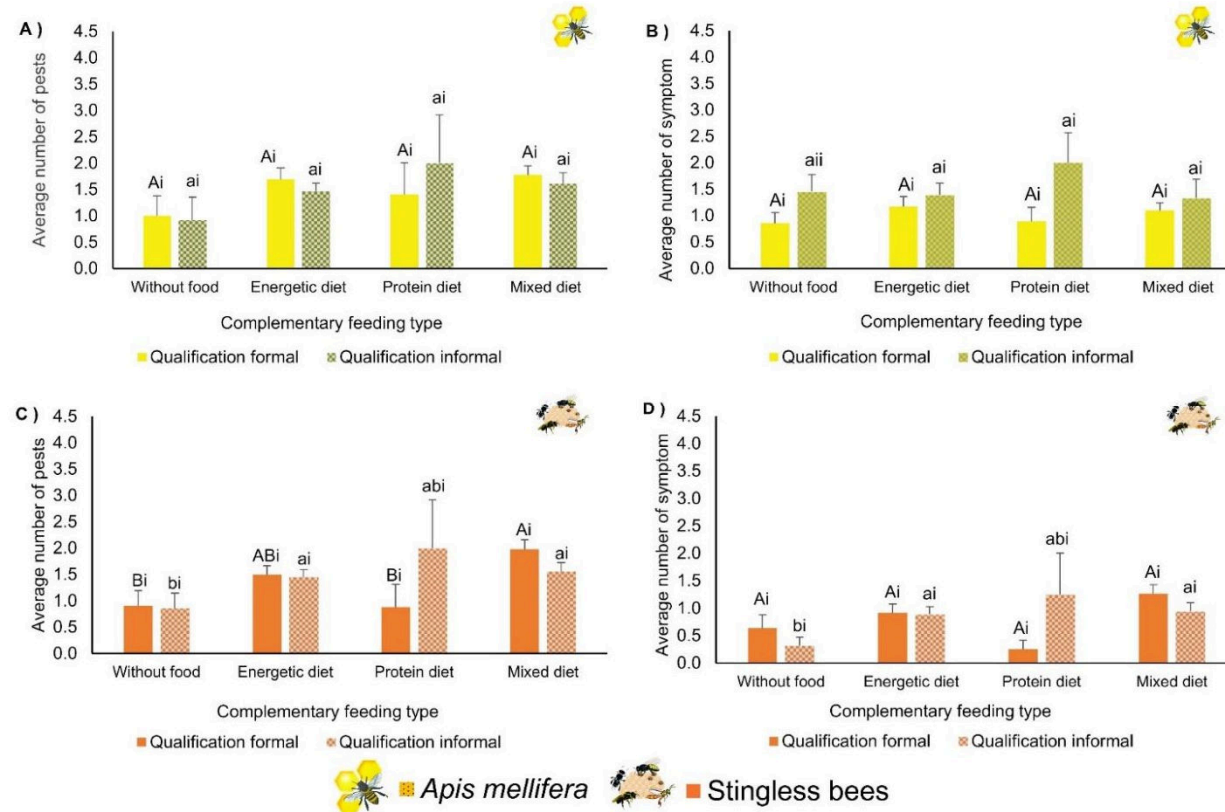
Response variables	Predictor variables	Est.	S.E.	Z val.	p-value
Experience (Inexperienced/Experienced) : Monitoring frequency					
Number of types of pests	Intercept	0.496	0.208	2.381	0.017*
	Inexperienced	-0.496	0.737	0.673	0.501
	Monitoring frequency (monthly)	-0.050	0.231	-0.217	0.828
	Monitoring frequency (weekly)	0.230	0.227	1.012	0.311
	Inexperienced:Monitoring frequency (monthly)	0.689	0.762	0.904	0.366
	Inexperienced:Monitoring frequency (weekly)	0.273	0.758	0.360	0.719
Experience (Inexperienced/Experienced) : Monitoring frequency					
Number of types of disease symptoms	Intercept	-0.182	0.316	-0.577	0.564
	Inexperienced	-15.120	902.094	-0.017	0.987
	Monitoring frequency (monthly)	0.286	0.338	0.847	0.397
	Monitoring frequency (weekly)	0.406	0.338	1.199	0.230
	Inexperienced:Monitoring frequency (monthly)	15.463	902.094	0.017	0.986
	Inexperienced:Monitoring frequency (weekly)	14.696	902.094	0.016	0.987
Qualification (Formal/Informal): Monitoring frequency					
Number of types of pests	Intercept	-0.134	0.378	-	0.724
	Qualification (informal)	0.945	0.445	2.120	0.034*
	Monitoring frequency (monthly)	0.561	0.392	1.431	0.153
	Monitoring frequency (weekly)	0.810	0.389	2.080	0.038*
	Informal:Monitoring frequency (monthly)	-0.784	0.481	-1.630	0.103
	Informal:Monitoring frequency (weekly)	-0.963	0.474	-2.030	0.042*
Qualification (Formal/Informal): Monitoring frequency					
Number of types of disease symptoms	Intercept	-0.560	0.500	-1.119	0.263
	Qualification (informal)	0.406	0.646	0.628	0.530
	Monitoring frequency (monthly)	0.625	0.516	1.213	0.225
	Monitoring frequency (weekly)	0.648	0.517	1.255	0.210
	Informal:Monitoring frequency (monthly)	0.014	0.677	0.021	0.983
	Informal:Monitoring frequency (weekly)	-0.226	0.681	-0.332	0.740

Supplementary Table 8. Two-way interaction analyses of Sb-beekeeper management techniques with beekeeper experience and with beekeeper qualification to explain the number of types of pests and the number of types of disease symptoms.

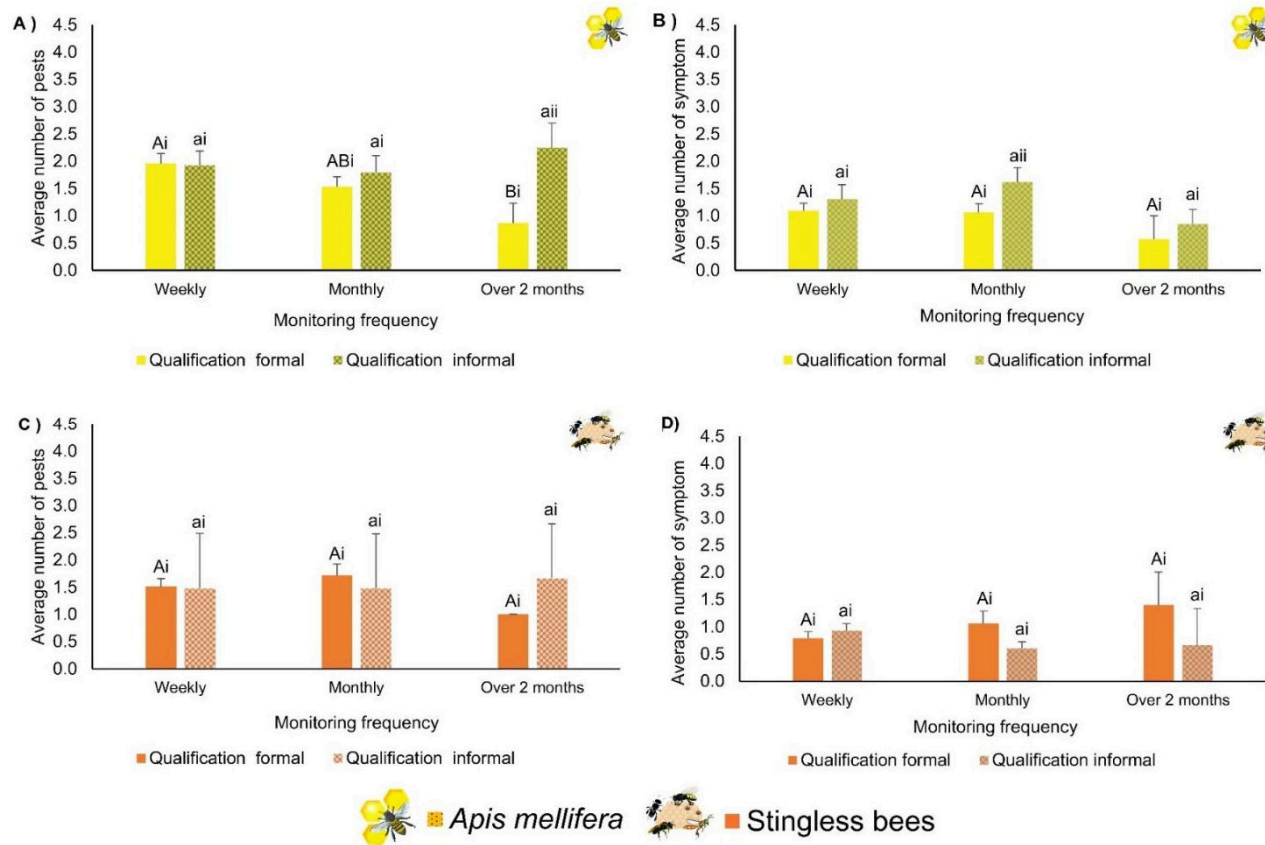
Response variables	Predictor variables	Est.	S.E.	Z val.	p-value
	Experience (Inexperienced/Experienced) : Complementary feeding				
Number of types of pests	Intercept	0.531	0.121	4.376	<0.001*
	Inexperienced	-0.254	0.162	-1.572	0.116
	Complementary feeding (mix)	0.150	0.165	0.914	0.361
	Complementary feeding (without)	-0.323	0.278	-1.162	0.245
	Complementary feeding (protein)	-0.020	0.463	-0.043	0.966
	Inexperienced: Comp. feeding (mixed)	0.038	0.230	0.164	0.869
	Inexperienced: Comp. feeding (without)	-0.310	0.400	-0.775	0.439
	Inexperienced: Comp. feeding (protein)	-0.151	0.571	-0.265	0.791
	Experience (Inexperienced/Experienced) : Complementary feeding				
Number of types of disease symptoms	Intercept	-1,11E-13	1,62E+02	0.000	1.000
	Inexperienced	-1,73E+02	2,13E+02	-0.813	0.416
	Complementary feeding (mixed)	9,31E+01	2,20E+02	0.423	0.673
	Complementary feeding (without)	-6,19E+02	4,11E+02	-1.505	0.132
	Complementary feeding (protein)	-4,06E+02	7,26E+02	-0.559	0.576
	Inexperienced:Comp. feeding (mixed)	2,07E+02	3,02E+02	0.684	0.494
	Inexperienced:Comp. feeding (without)	-3,07E+02	5,96E+02	-0.515	0.607
	Inexperienced:Comp. feeding (protein)	-9,48E+00	8,63E+02	-0.011	0.991
	Qualification (Formal/Informal): Complementary feeding				
Number of types of pests	Intercept	0.406	0.113	3581	0.001*
	Qualification (informal)	-0.036	0.159	-0.229	0.819
	Complementary feeding (mixed)	0.276	0.157	1760	0.078
	Complementary feeding (without)	-0.501	0.336	-1491	0.136
	Complementary feeding (protein)	-0.539	0.394	-1366	0.172
	Informal:Comp. feeding (mix)	-0.202	0.228	-0.885	0.376
	Informal:Comp. feeding (without)	-0.023	0.425	-0.053	0.958
	Informal:Comp. feeding (protein)	0.863	0.541	1594	0.111
	Qualification (Formal/Informal): Complementary feeding				
Number of types of disease symptoms	Intercept	0.087	0.151	-0.577	0.564
	Qualification (informal)	-0.029	0.208	-0.137	0.891
	Complementary feeding (mixed)	0.325	0.205	1.585	0.113
	Complementary feeding (without)	-0.365	0.407	-0.897	0.369
	Complementary feeding (protein)	-129.928	0.723	-1.797	0.072
	Informal:Comp. feeding (mixed)	-0.263	0.300	-0.877	0.381
	Informal:Comp. feeding (without)	-0.672	0.594	-1.132	0.258
	Informal:Comp. feeding (protein)	163.794	0.862	1.900	0.057
	Qualification (Formal/Informal): Monitoring frequency				
Number of types of pests	Intercept	3,63E-11	1,00E+03	0.000	1.000
	Qualification (informal)	5,11E+02	1,10E+03	0.466	0.641
	Monitoring frequency (monthly)	5,42E+02	1,01E+03	0.537	0.591
	Monitoring frequency (weekly)	4,15E+02	1,01E+03	0.413	0.680
	Informal:Monitoring frequency (monthly)	-6,59E+02	1,11E+03	-0.591	0.555
	Informal:Monitoring frequency (weekly)	-5,29E+02	1,10E+03	-0.479	0.632

Supplementary Table 8. Two-way interaction analyses of Sb-beekeeper management techniques with beekeeper experience and with beekeeper qualification to explain the Number of types of pests and the Number of types of disease symptoms (continuation).

Response variables	Predictor variables	Est.	S.E.	Z val.	p-value
	Qualification (Formal/Informal): Monitoring frequency				
Number of types of disease symptoms	Intercept	13.863	0.5000	2.773	0.006*
	Qualification (informal)	-17.918	0.8659	-2.069	0.038*
	Monitoring frequency (monthly)	-13.238	0.5294	-2.500	0.012*
	Monitoring frequency (weekly)	-16.207	0.5185	-3.126	0.002*
	Informal:Monitoring frequency (monthly)	12.302	0.9160	1.343	0.179
	Informal:Monitoring frequency (weekly)	19.531	0.8854	2.206	0.027*
	Experience (Inexperienced/Experienced) : Monitoring frequency				
Number of types of pests	Intercept	0.916	0.447	2.049	0.040
	Inexperienced	-0.916	10.954	-0.836	0.403
	Monitoring frequency (monthly)	-0.307	0.466	-0.659	0.510
	Monitoring frequency (weekly)	-0.406	0.459	-0.884	0.377
	Inexperienced:Monitoring frequency (monthly)	0.620	11.144	0.556	0.578
	Inexperienced:Monitoring frequency (weekly)	0.726	11.039	0.658	0.511
	Experience (Inexperienced/Experienced) : Monitoring frequency				
Number of types of disease symptoms	Intercept	1,61E-07	707,1	0.000	1.000
	Inexperienced	1386	866	1601	0.109
	Monitoring frequency (monthly)	-138,2	732,8	-0.189	0.850
	Monitoring frequency (weekly)	-56,09	720,6	-0.078	0.938
	Inexperienced:Monitoring frequency (monthly)	-1489	912,4	-1632	0.103
	Inexperienced:Monitoring frequency (weekly)	-1563	885,8	-1764	0.077



Supplementary Figure 5. Effects of the interaction between complementary feeding type and beekeeper qualification on the number of (A) pests and (B) disease symptoms for *Apis mellifera*, and the number of (C) pests and (D) disease symptoms for stingless bees. Bars represent standard error. Uppercase letters compare complementary feeding types for formally qualified beekeepers and lowercase letters compare complementary feeding types for informally qualified beekeepers, while roman letters compare formally and informally qualified beekeepers for the same feeding type. Same letters do not differ statistically $\alpha=0.05$.



Supplementary Figure 6. Effects of the interaction between monitoring frequency and beekeeper qualification on the number of (A) pests and (B) disease symptoms for *Apis mellifera*, and on the number of (C) pests and (D) disease symptoms for stingless bees. Bars represent standard error. Uppercase letters compare different monitoring frequencies for formally qualified beekeepers and lowercase letters compare different monitoring frequencies for informally qualified beekeepers, while roman letters compare formally qualified and informally qualified beekeepers for the same monitoring frequency. Same letters do not differ statistically $\alpha=0.05$.

Supplementary Table 9. *Apis mellifera* colony losses in the presence and absence of pests and disease symptoms interacting with responses variables.

Response variables	Predictor variables	Est.	S.E.	Z val.	p-value
	Pests (presence/absence): Monitoring frequency				
Colony losses (%)	Intercept	0.006	0.088	0.070	0.945
	Pests(presence)	0.155	0.101	1.516	0.131
	Monitoring frequency (Monthly)	0.099	0.095	1.039	0.300
	Monitoring frequency (Weekly)	0.071	0.104	0.686	0.494
	Pests presence:Freq.monitoring (Monthly)	-0.064	0.110	-0.582	0.561
	Pests presence:Freq.monitoring(Weekly)	-0.082	0.117	-0.696	0.487
	Disease (presence/absence): Monitoring frequency				
Colony losses (%)	Intercept	0.1165	0.064	1.809	0.072
	Disease(presence)	0.0328	0.091	0.361	0.719
	Monitoring frequency (Monthly)	-0.0389	0.072	-0.538	0.591
	Monitoring frequency (Weekly)	-0.0460	0.073	-0.634	0.527
	Disease: Monitoring frequency (Monthly)	0.1195	0.099	1.201	0.231
	Disease: Monitoring frequency (Weekly)	0.092	0.100	0.917	0.360
	Experience (Inexperienced or Experienced) : Monitoring frequency				
Colony losses (%)	Intercept	0.146	0.044	3.345	<0.001*
	Inexperienced	-0.064	0.109	-0.584	0.560
	Monitoring frequency (Monthly)	0.008	0.048	0.167	0.868
	Monitoring frequency (Weekly)	0.033	0.049	0.674	0.501
	Inexperienced:Monitoring frequency (Monthly)	0.135	0.118	1.139	0.256
	Inexperienced:Monitoring frequency (Weekly)	-0.033	0.117	-0.284	0.777
		Pests (presence/absence): Complementary feeding			
Colony losses (%)	Intercept	0.036	0.054	0.680	0.497
	Pests(presence)	0.157	0.059	0.294	0.007*
	Complementary feeding (Mixed)	0.022	0.074	0.294	0.769
	Complementary feeding (Without food)	0.123	0.070	1.740	0.083
	Complementary feeding (Protein)	0.062	0.096	0.645	0.519
	Pests(presence):Comp. feeding (Mixed)	-0.064	0.081	-0.783	0.434
	Pests(presence):Without food	-0.145	0.079	-1.834	0.068
	Pests(presence):Comp. feeding (Protein)	-0.080	0.105	-0.764	0.446
	Disease (presence/absence): Complementary feeding				
Colony losses (%)	Intercept	0.020	0.040	0.495	0.621
	Disease(presence)	0.229	0.047	4.831	<0.001*
	Complementary feeding (Mixed)	0.030	0.054	0.563	0.574
	Complementary feeding (Without food)	0.115	0.053	2.176	0.031*
	Complementary feeding (Protein)	0.170	0.067	2.549	0.012*
	Disease(presence): Feeding (Mixed)	-0.094	0.065	-1.452	0.148
	Disease(presence): Without food	-0.138	0.066	-2.102	0.037*
	Disease(presence): Feeding (Protein)	-0.251	0.083	-3.028	0.002*

Supplementary Table 9. Hive loss in the presence and absence of pests and diseases in *Apis mellifera* hives and interacting variables responses (continuation).

Response variables	Predictor variables	Est.	S.E.	Z val.	p-value
	Experience (Inexperienced or Experienced) : Complementary feeding				
Colony losses (%)	Intercept	0.191	0.025	7.687	<0.001*
	Inexperienced	-0.048	0.048	-0.998	0.320
	Complementary feeding (Mixed)	-0.048	0.035	-1.357	0.176
	Complementary feeding (Without food)	-0.033	0.036	-0.917	0.360
	Complementary feeding (Protein)	-0.013	0.045	-0.287	0.774
	Inexperienced:Comp. feeding (Mixed)	-0.036	0.070	-0.503	0.615
	Inexperienced: Without food	0.076	0.066	1.143	0.254
	Inexperienced:Comp. feeding (Protein)	0.027	0.107	0.251	0.802
	Pests (presence/absence): Qualification (formal/informal)				
Colony losses (%)	Intercept	0.100	0.031	3.228	0.001*
	Pests(presence)	0.065	0.035	1.870	0.063
	Qualification (informal)	0.002	0.064	0.035	0.972
	Pests(presence):Qualification(informal)	0.017	0.070	0.245	0.806
	Disease (presence/absence): Qualification (formal/informal)				
Colony losses (%)	Intercept	0.089	0.022	4.018	<0.001*
	Disease(presence)	0.115	0.029	3.985	<0.001*
	Qualification (informal)	-0.011	0.050	-0.213	0.832
	Disease(presence): Qualification(informal)	0.035	0.058	0.593	0.554

Supplementary Table 10. Stingless bee colony losses in the presence and absence of pests and disease symptoms interacting with responses variables.

Response variables	Predictor variables	Est.	S.E.	Z val.	p-value
	Pests (presence/absence): Monitoring frequency				
Colony losses (%)	Intercept	0.143	0.148	0.964	0.336
	Pests(presence)	0.579	0.209	2.766	0.006*
	Frequency of monitoring (Monthly)	-0.043	0.168	-0.250	0.799
	Frequency of monitoring (Weekly)	-0.050	0.153	-0.320	0.747
	Pests presence: monitoring (Monthly)	-0.486	0.226	-2150	0.033*
	Pests presence:Frequency of monitoring (Weekly)	-0.548	0.214	-2559	0.011*
	Disease (presence/absence): Monitoring frequency				
Colony losses (%)	Intercept	0.143	0.150	0.950	0.343
	Disease(presence)	0.579	0.213	2.724	0.007*
	Monitoring frequency (Monthly)	-0.029	0.159	-0.183	0.855
	Monitoring frequency (Weekly)	-0.060	0.154	-0.393	0.695
	Disease: Monitoring frequency (Monthly)	-0.460	0.222	-2067	0.040*
	Disease: Monitoring frequency (Weekly)	-0.507	0.217	-2342	0.020*
	Experience (Inexperienced or Experienced) : Monitoring frequency				
Colony losses (%)	Intercept	0.643	0.145	4.435	<0.001*
	Inexperienced	-0.198	0.251	-0.790	0.431
	Monitoring frequency (Monthly)	-0.399	0.150	-2.661	0.008*
	Monitoring frequency (Weekly)	-0.477	0.148	-3.221	0.001*
	Inexperienced: Monitoring frequency (Monthly)	0.060	0.257	0.235	0.814
	Inexperienced: Monitoring frequency (Weekly)	0.137	0.254	0.541	0.589
	Pests (presence/absence): Complementary feeding				
Colony losses (%)	Intercept	0.141	0.065	2.185	0.031*
	Pests(presence)	-0.018	0.070	-0.25	0.799
	Complementary feeding (Mixed)	-0.037	0.100	-0.37	0.705
	Complementary feeding (Without food)	-0.122	0.093	-1.30	0.193
	Complementary feeding (Protein)	-0.141	0.153	-0.91	0.359
	Pests(presence):Comp. feeding (Mixed)	0.119	0.109	1.096	0.274
	Pests(presence):Without food	0.179	0.116	1.532	0.127
	Pests(presence):Comp. feeding (Protein)	0.276	0.184	1.494	0.137
	Disease (presence/absence): Complementary feeding				
Colony losses (%)	Intercept	0.098	0.045	2.160	0.032*
	Disease(presence)	0.056	0.057	0.983	0.327
	Complementary feeding (Mixed)	0.042	0.078	0.542	0.589
	Complementary feeding (Without food)	-0.070	0.075	-0.939	0.349
	Complementary feeding (Protein)	-0.057	0.119	-0.481	0.631
	Disease(presence):Comp.feeding (Mixed)	0.036	0.093	0.389	0.698
	Disease(presence):Without food	0.230	0.131	1.765	0.079
	Disease(presence):Comp. feeding (Protein)	0.241	0.175	1.377	0.170

Supplementary Table 10. Hive loss and presence and absence of pests and diseases in Stingless bees hives and interacting variables responses (continuation).

Response variables	Predictor variables	Est.	S.E.	Z val.	p-value
	Experience (Inexperienced or Experienced) : Complementary feeding				
	Intercept	0.219	0.041	5.350	<0.001*
	Inexperienced	-0.137	0.050	-2.738	0.007*
	Complementary feeding (Mixed)	-0.029	0.058	-0.503	0.615
Colony losses (%)	Complementary feeding (Without food)	-0.061	0.081	-0.755	0.451
	Complementary feeding (Protein)	0.147	0.140	1.051	0.294
	Inexperienced:Comp. feeding (Mixed)	0.143	0.074	1.937	0.05*
	Inexperienced: Without food	0.064	0.102	0.630	0.529
	Inexperienced:Comp.feeding (Protein)	-0.160	0.159	-1.00	0.316
	Pests (presence/absence): Qualification (formal/informal)				
	Intercept	0.1098	0.0556	1.972	0.050*
Colony losses (%)	Pests(presence)	0.0773	0.0627	1.233	0.219
	Qualification(informal)	-0.0412	0.0760	-0.542	0.588
	Pests(presence):Qualification(informal)	0.0042	0.0855	0.049	0.961
	Disease (presence/absence): Qualification (formal/informal)				
	Intercept	0.112	0.046	2.414	0.017*
Colony losses (%)	Disease(presence)	0.113	0.057	1.970	0.051*
	Qualification (informal)	-0.037	0.062	-0.593	0.554
	Disease(presence):Qualification(informal)	-0.003	0.078	-0.041	0.967

CAPÍTULO 2: Condutores da diversidade de abelhas Euglossini em habitats xéricos e méxicos em uma montanha tropical

Autores:

Catarina Dias de Freitas, Samuel Novais, José Eustáquio dos Santos Júnior, Yumi Oki, Fernando M. Resende, Geraldo Wilson Fernandes

Artigo a ser submetido para o periódico:

Revista: Ecological Entomology

Classificação Qualis Capes em Biodiversidade: A2

IF: 2.465

Condutores da diversidade de abelhas Euglossini em habitats xéricos e méxicos em uma montanha tropical

Catarina Dias de Freitas^a, Samuel Novais^b, José Eustáquio dos Santos Júnior^a, Yumi Oki^a, Fernando M. Resende^a, Geraldo Wilson Fernandes^a

^aDepartamento de Genética, Ecologia e Evolução, Instituto de Ciências Biológicas,, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil.

^bRed de Interacciones Multitróficas, Instituto de Ecología A.C., Carretera Antigua a Coatepec 351, El Haya, Xalapa, Veracruz, 91073 México

Resumo

1. Geralmente, os estudos em montanhas se concentram na avaliação das comunidades em função das variações climáticas associadas à altitude desconsiderando aquelas associadas aos diferentes tipos de habitats. Habitats méxicos presentes em montanhas predominantemente de vegetação xérica podem conferir condições favoráveis para abelhas das orquídeas (Apidae, Euglossini) que são espécies de florestas úmidas.

2. Buscamos entender os padrões de diversidade das abelhas das orquídeas (Apidae: Euglossini) entre habitats xéricos e méxicos ao longo de um gradiente altitudinal no leste do Brasil, considerando a variação sazonal.

3. Ao todo, foram coletados 4873 indivíduos pertencentes a 3 gêneros e 15 espécies de abelhas Euglossini. A riqueza de espécies diminuiu com o aumento da altitude, independentemente do tipo de habitat e estação. Habitats xéricos apresentaram menor riqueza e abundância de abelhas na estação seca do que os habitats méxicos. A riqueza e abundância de abelhas não diferiram estatisticamente nas estações seca e chuvosa nos habitats méxicos, enquanto nos habitats xéricos entre as estações foi registrado uma menor riqueza e abundância na estação seca.

4. A maior riqueza de Euglossini se encontra em locais de temperaturas elevadas e maior porte da vegetação, ao mesmo tempo muitas são sensíveis ao estresse hídrico presente em ambientes xéricos na estação seca, reforçando a importância dos ambientes méxicos para a manutenção desses polinizadores de grande relevância ecossistêmica.

Palavras-chave: Gradiente altitudinal, Diversidade beta, Cordilheira do Espinhaço, Matas ciliares, Padrões espaço temporais

Abstract

1. Generally, studies in mountains focus on the evaluation of communities according to climatic variations associated with altitude, disregarding those associated with different habitat types. Mesic habitats present in mountains predominantly with xeric vegetation can provide favorable conditions for orchid bees (Apidae, Euglossini) which are species of humid forests.
2. We sought to understand the diversity patterns of orchid bees (Apidae: Euglossini) between xeric and mesic habitats along an altitudinal gradient in eastern Brazil, considering seasonal variation.
3. Overall, 4873 individuals belonging to 3 genera and 15 species of Euglossini bees were collected. Species richness decreased with increased altitude, regardless of habitat type and season. Xeric habitats showed lower bee richness and abundance than mesic habitats. In the dry season, bee richness and abundance did not differ statistically in the dry and rainy seasons in mesic habitats, while in xeric habitats lower richness and abundance was recorded in the dry season.
4. Euglossini bees need high temperatures while they cannot withstand the water stress present in xeric environments during the dry season, reinforcing the importance of mesic environments for the maintenance of these pollinators of great ecosystemic relevance.

Keywords: Altitudinal gradient, Beta diversity, Community structure, Espinhaço mountain range, Riparian forests, Spatio-temporal patterns

Introdução

A distribuição dos organismos é moldada por fatores bióticos e abióticos cujas pressões mudam geograficamente. A compreensão de como as populações e espécies variam espacialmente e temporalmente continua sendo um dos principais temas na ecologia desde os primeiros estudos de naturalistas no século XIX (*e.g.*, Humboldt & Bonplan, 1807; Darwin, 1858; Warming, 1892; Merriam, 1894), sendo as montanhas um dos ambientes mais estudados ao redor do mundo (*e.g.*, Rahbek *et al.*, 2005; Ohsawa & Ide, 2008; McChain & Grytnes, 2010; Dar *et al.*, 2022). Isso se deve porque no ambiente montanhoso as condições climáticas, estrutura da vegetação e outros recursos mudam rapidamente em curtas distâncias, afetando a distribuição das espécies e resultando em padrões mais claros em sua geografia (Janzen, 1967; Fernandes & Price, 1991; Körner, 2007; Silveira *et al.*, 2019). Desta forma, as mudanças ambientais presentes nas montanhas fornecem um cenário experimental adequado para estudar quais são os principais mecanismos por detrás de padrões de distribuição de espécies. Por esta razão grande parte dos estudos conduzidos em montanhas tem dedicado a analisar a distribuição de espécies em função da altitude (dimensão vertical), desconsiderando as variações em dimensões horizontais e temporais presentes em montanhas (Mota *et al.*, 2018; Silveira *et al.*, 2019; Conrad *et al.*, 2021; Dar *et al.*, 2022).

Montanhas são reservatórios de biodiversidade e podem abrigar grande heterogeneidade de habitats em uma mesma faixa de altitude (Li & Reynolds, 1994; Perrigo *et al.*, 2019). Paisagens com diferentes níveis de heterogeneidade de habitat apresentam variações na intensidade de luminosidade, temperatura e umidade (Li & Reynolds, 1994). Essas características podem ser determinantes ou limitantes para ocorrência de espécies, pois estão relacionadas as condições necessárias para forrageamento, nidificação e desenvolvimento (August, 1983; Franklin *et al.*, 2005; Jiménez-Valverde & Lobo, 2007) proporcionando novos padrões de diversidade e mudanças na composição de espécies. Estudos conduzidos com insetos galhadores na região tropical e temperada ilustram claramente como as diferenças entre habitats são importantes na geografia das espécies e podem apresentar distintos padrões ao longo de um gradiente de altitude (Fernandes & Price, 1988, 1991).

As plantas que crescem em altitudes elevadas nas montanhas tropicais muitas vezes apresentam características escleromórficas devido à alta radiação solar e baixa

temperatura (Leuschner, 2000) e contrastam com as plantas presentes ao longo dos cursos d'água, onde os solos são férteis e encharcados, conferem maior desenvolvimento das plantas (Brinson & Verhoeven, 1999). A paisagem presente nas montanhas da Cordilheira do Espinhaço, no leste do Brasil, é marcada por uma vegetação estresse-tolerante às condições extremas da montanha, predominante esclerófila, xérica apresentando alta diversidade e endemismo de espécies e habitats relictos e ao mesmo tempo ameaçada devido às mudanças climáticas e uso e ocupação do solo (Negreiros *et al.*, 2014; Fernandes *et al.*, 2018, 2020). Enquanto essa vegetação xérica, composta por Cerrado e Campos Rupestres sofrem grandes alterações na composição de espécies, na estrutura e formas de vida ao longo do gradiente altitudinal (Mota *et al.*, 2018), variações menos drásticas são observadas na vegetação méstica que ocorre ao longo das margens de cursos d'água e cânions (matas fluviais, ciliares ou de galeria), formando corredores de vegetação que interconectam as metacomunidades presentes no gradiente altitudinal (Fernandes & Price, 1991; Coelho *et al.*, 2016). A vegetação ripária é capaz de amortecer as grandes flutuações diárias de temperatura e radiação típicas dos ambientes xéricos conservando maior umidade ao longo do dia (e.g., Fernandes & Price, 1991; Callisto *et al.*, 2012; Fernandes *et al.*, 2016a; Silveira *et al.*, 2019). Assim, os insetos galhadores e outros grupos de insetos respondem à essas características de forma distinta entre habitats xéricos e mésticos no gradiente de altitude na região da Serra do Cipó, localizada na porção sul da Cadeia do Espinhaço (e.g., Carneiro *et al.*, 1995; Ribeiro *et al.*, 1998; Lara *et al.*, 2002; Araújo & Fernandes, 2003).

As abelhas representam um grupo importante para estudos envolvendo padrões de diversidade pois desempenham significantes funções ecossistêmicas e suas comunidades estão em risco devido às mudanças climáticas e uso da terra (veja Potts *et al.*, 2010; Drossart & Gérard, 2020; Althaus *et al.*, 2021). Dentre as abelhas, merece destaque a subtribo de Euglossini por serem polinizadoras de aproximadamente quarenta famílias de plantas (Dressler, 1968; Rech & Brito, 2012; Rocha-Filho *et al.*, 2012) e sensíveis às variações climáticas, sendo mais diversas e abundantes em ambientes florestais (e.g., Nemésio & Silveira, 2007; Antonini *et al.*, 2016). As abelhas das orquídeas, como são popularmente conhecidas as espécies de Euglossini, ocorrem do sul da região Neártica até o sul da região Neotropical. No Brasil, as Euglossini são mais diversas nas florestas tropicais úmidas da Amazônia e da Mata Atlântica (Roubik, 2004; Cameron, 2004; Zimmermann, *et al.*, 2011; Nemésio

& Santos-Júnior, 2014; Santos-Júnior *et al.*, 2014) em comparação com habitats abertos e secos, como o Cerrado (Nemésio, 2016) e Caatinga (Carneiro *et al.*, 2018). No Cerrado, a vegetação ripária possibilita a ocorrência de espécies de Euglossini sensíveis às altas temperaturas e baixa umidade presente em ambientes xéricos (Nemésio, 2016; Martins *et al.*, 2018; Viana *et al.*, 2021) onde elas são mais abundantes nas estações chuvosas do ano (Dressler, 1982; Andrade-Silva *et al.*, 2012; McCravy *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2020). Apesar da maior diversidade de Euglossini em ambientes florestais, existem espécies que possuem preferência por ambientes dominados por vegetação aberta, como *Eufriesea nigrohirta*, *Eulaema nigrita* e *Euglossa melanotricha* (Silveira & Cure, 1993; Viotti *et al.*, 2013; Nemésio, 2016; Carneiro *et al.*, 2018).

Nas últimas seis décadas poucos estudos foram conduzidos com abelhas Euglossini no Bioma Cerrado (Pereira *et al.*, 2021), desta forma ainda é incipiente o conhecimento dos padrões de distribuição desta tribo, principalmente as diferenças na composição de espécies entre habitats xéricos e méxicos. Adicionalmente, existem ainda poucos estudos que relatam sobre a distribuição da diversidade de abelhas Euglossini ao longo de gradientes altitudinais (e.g., Nemésio, 2008; Dec & Santos, 2019; Pinto *et al.*, 2019; Santos *et al.*, 2020; Viana *et al.*, 2021). Especificamente, Santos *et al.* (2020) avaliaram a influência da vegetação e clima na diversidade de Euglossini no ambiente xérico na porção sul da Cadeia do Espinhaço e postularam que elas poderiam ser mais diversas no ambiente méxico da região montanhosa estudada. Desta forma, procuramos suprir essa lacuna de conhecimento e investigar comparativamente a distribuição das abelhas Euglossini entre habitats xéricos e méxicos considerando os efeitos da altitude e estação sobre estes ambientes na porção sul da Cadeia do Espinhaço. Além disso, buscamos compreender as mudanças na composição de espécies através da decomposição da diversidade em seus dois componentes principais: *turnover* (substituição de espécies) e *nestedness* (perda ou ganho de espécies) (e.g., Baselga, 2010; Barton *et al.*, 2013). Estes dois componentes melhoram a descrição da diversidade espacial e auxiliam na análise sobre os processos formadores da biodiversidade. Uma vez que a substituição de espécies ocorre como consequência de filtros ambientais ou restrições espaciais e históricas (Baselga, 2010), as montanhas representam ambientes propícios para o surgimento de comunidades com alta substituição de espécies, justamente devido às mudanças na paisagem ao longo do gradiente de altitude, à coexistência de tipos de

habitats e aos filtros ambientais que mudam direcionalmente, ou seja, negativamente ou positivamente. Em geral, o *turnover* é o principal mecanismo gerador da β -diversidade para plantas (Mota *et al.*, 2018), insetos ganhadores (Coelho *et al.*, 2018), abelhas e vespas (Perillo *et al.*, 2017) e formigas (Nunes *et al.*, 2020) no gradiente altitudinal do Espinhaço. Além disso, as variações climáticas sazonais também proporcionam alta substituição de espécies entre estações (e.g., formigas: Castro *et al.*, 2020 e abelhas: Santos *et al.*, 2020).

Neste contexto, este trabalho buscou ampliar o conhecimento sobre a dinâmica da comunidade de abelhas Euglossini no gradiente altitudinal no Bioma Cerrado sendo testada a hipótese de que a maior complexidade estrutural da vegetação e condições climáticas amenas (maior temperatura e umidade) favorecem as populações e espécies de Euglossini. Para isso, foram avaliados os padrões de diversidade (riqueza, abundância e composição da comunidade) nas diferentes dimensões espaço-temporais (altitude, habitat e sazonal) da região. Desta forma, esperamos que: (I) enquanto a riqueza e abundância de abelhas Euglossini diminuem com o aumento da altitude nos habitats xéricos, as mesmas não sofrem variações no ambiente méxico; (II) em uma mesma estação do ano e altitude os habitats xéricos apresentam menor diversidade e abundância que os habitats méxicos; (III) enquanto a diversidade e abundância de abelhas Euglossini diminui nos habitats xéricos na estação seca, as mesmas não sofrem variações nos habitats méxicos entre estações seca e chuvosa em uma mesma altitude; e (IV) a partição da diversidade β seria explicada principalmente pelo padrão de *turnover* de espécies entre altitudes, habitats e estações.

Material e métodos

Área de estudo

O estudo foi realizado na Serra do Cipó (19°16' – 19°21'S; 43°32' – 43°36'O), localizada na porção sul da Cadeia do Espinhaço, Minas Gerais, Brasil, ao longo de um gradiente de elevação de 800 a 1400 m acima do nível do mar, durante os meses de setembro a outubro de 2019 e fevereiro a abril de 2020. A área abrange duas unidades de conservação: a Área de Proteção Ambiental Morro da Pedreira (APA Morro da Pedreira) e o Parque Nacional da Serra do Cipó (PARNA Serra do Cipó). O clima da região é mesotérmico com invernos secos e verões chuvosos (Cwb Köppen-Geiger), precipitação média anual variando entre 1.300 e 1.500 mm e temperatura média de 20°C (Madeira & Fernandes, 1999). Ao longo do gradiente observa-se que a vegetação é composta principalmente por espécies esclerófilas e sempre verdes, havendo uma clara distinção entre a ocorrência de tipos vegetacionais ao longo da altitude (Fernandes *et al.*, 2016b). Nas altitudes baixas (até 800m) ocorre predominantemente o Cerrado *stricto sensu*; a partir de 900m de altitude inicia o ecossistema de Campo Rupestre se torna frequente. As faixas altitudinais de 900 a 1.100 m correspondem a uma região de ecótono, onde as espécies de Cerrado *stricto sensu* ocorrem em solos profundos enquanto as espécies de Campo Rupestre em solos rasos e pedregosos e arenosos. Nas altitudes elevadas entre 1300 e 1.400 m há presença de ilhas de Matas Nebulares, localmente conhecidas como Capões de Mata, imersas na matriz de Campo Rupestre (Coelho *et al.*, 2016; Fernandes *et al.*, 2016b) (Figura S1). Os habitats xéricos foram definidos neste estudo como as formações de Cerrado *stricto sensu* e Campo Rupestre. Enquanto os habitats méxicos foram definidos como matas ciliares, ou de galeria. Nas altitudes de 1.300 a 1.400 os habitats méxicos estavam adjacentes as matas nebulares. As áreas amostradas foram estabelecidas próximas aos sítios permanentes do Projeto de Pesquisa Ecológica de Longo Prazo Campos Rupestres (Projeto PELD-CRSC/CNPq), onde existem torres de monitoramento climatológico a cada 100 metros de elevação (800-1.400 m.a.s.l. distantes geograficamente em 2 km) (veja Fernandes *et al.*, 2016b).

Desenho amostral e variáveis ambientais exploratórias

A amostragem das abelhas Euglossini foi realizada em habitats xéricos e méxicos de forma pareada a cada 100 m de elevação acima do nível do mar entre 800m a 1400m, totalizando sete faixas altitudinais amostradas (Figura 1a). Dentro de cada faixa de altitude foram selecionados três sítios amostrais xéricos (e.g., Cerrado *stricto sensu*) e três sítios amostrais méxicos (e.g., mata ciliar e mata de galeria) respeitando a distância mínima entre eles de 500m (Figura 1b). Assim, foram amostrados no total 42 sítios (21 sítios em habitats xéricos e 21 sítios em habitats méxicos) durante o período de seca (setembro a outubro de 2019) e chuva (fevereiro a abril de 2020), com um total de 84 sítios.

As amostragens das abelhas Euglossini ocorreram com o auxílio de armadilhas de isca aromáticas, sendo que cada conjunto possui sete armadilhas com sete compostos aromáticos diferentes, são eles: *cineole*, *vanillin*, *methyl salicylate*, *eugenol*, β -*ionone*, *methyl acetate* e *methyl cinnamate* (veja Figura 1e). Esses compostos são comumente utilizados em estudos ecológicos com Euglossini (e.g., Santos *et al.*, 2020; Viana *et al.*, 2021; Packer & Darla-West, 2021). As armadilhas foram penduradas em árvores, há uma distância do solo de 1,5 metros. A distância entre as armadilhas foi de 1,5m. As armadilhas permaneceram no campo por 48h, com reposição das iscas aromáticas após as primeiras 24h de exposição (e.g., Santos *et al.*, 2020). Os exemplares capturados foram coletados no final das 48h, sendo separados e devidamente identificados com as informações de cada armadilha e data, entretanto para efeito de análise consideramos o total de indivíduos coletado por sítio amostral (habitat).

Em cada habitat foram colocados o total de nove conjuntos de armadilhas, distribuídos em grupos de três e colocados a 100 metros um do outro (Figura 1d), totalizando 63 armadilhas por sítio amostral, 378 armadilhas em cada faixa de altitude (189 armadilhas no habitat xérico e 189 armadilhas no habitat méxico) e 2646 no total geral (378 armadilhas x 7 altitudes) por estação e 672 horas de coletas no total. As abelhas foram identificadas usando a chave disponível em Nemésio (2009) e foram depositadas no acervo entomológico do Laboratório de Ecologia Evolutiva e Biodiversidade da Universidade Federal de Minas Gerais.

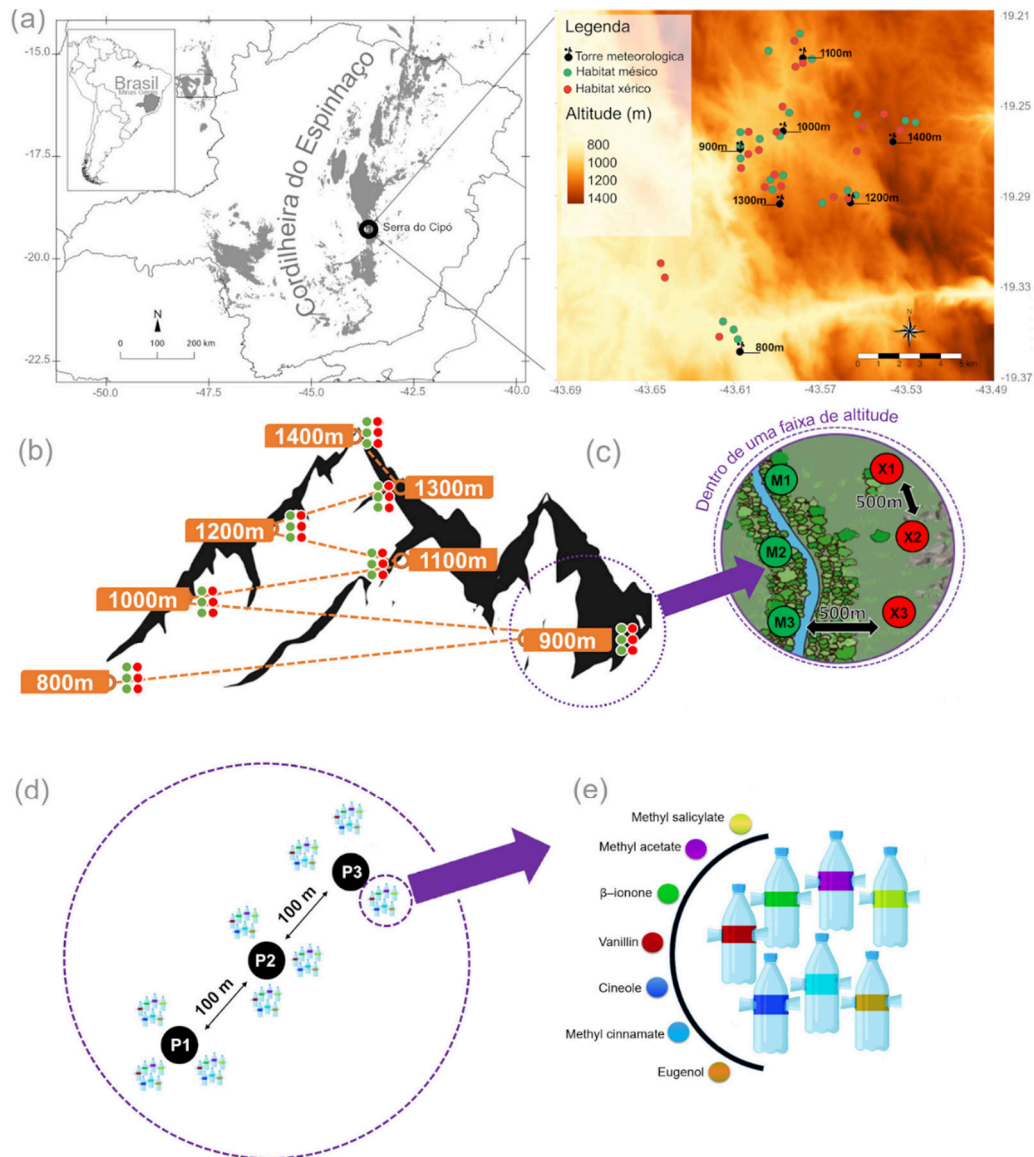


Figura 1: (a) Distribuição dos pontos amostrais em relação ao gradiente de altitude na Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil. (b) desenho amostral (c) disposição dos habitats (xéricos e mésicos) com três réplicas em cada altitude, (d) distribuição dos conjuntos de armadilhas em cada habitat, e (e) conjunto de armadilhas aromáticas com sete tipos de iscas para captura de Euglossini.

Para explorar os mecanismos que influenciam a diversidade de Euglossini, foram obtidos dados primários sobre fatores climáticos e de vegetação presentes nas áreas de coleta. As variáveis temperatura do ar, umidade relativa do ar, e precipitação foram selecionadas por serem conhecidas na literatura por influenciar padrões ecológicos (Thornton *et al.*, 2021) e distribuição e abundância de abelhas (Markl, 1974; Conrad *et al.*, 2021; Perillo *et al.*, 2021) e estarem correlacionadas ao aumento da altitude. As variáveis climáticas foram obtidas através de sete torres de monitoramento meteorológico (equipada com um registrador de dados *datalogger Onset HOBO® U30*), presentes em habitats xéricos nas sete altitudes incluídas no

presente estudo (800 a 1.400m de altitude) (veja Fernandes *et al.* 2016b). Para as variáveis temperatura do ar e umidade relativa do ar foram calculados o valor médio da mesma em cada estação do ano durante o período de janeiro de 2018 a dezembro de 2019 (veja Tabela S1). Para a precipitação foi utilizado o valor acumulado referente ao mesmo período das demais variáveis. A estação chuvosa corresponde aos meses de janeiro a abril e a estação seca entre os meses de julho a outubro (Fernandes *et al.*, 2016b). A estrutura da vegetação de cada sítio amostral (xérico, méxico) e estação do ano foi caracterizada pelo índice de NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*. Este índice avalia indiretamente a produtividade primária, o crescimento da vegetação e estrutura/complexidade vertical do habitat a partir da cobertura vegetal capturada por imagem de satélite da área. O índice de NDVI foi calculado de acordo com Flores *et al.* (2018); assim, para cada sítio, foi calculado uma matriz NDVI utilizando um raio de 150 metros ao redor do sítio amostral (veja Tabela S2). Para isso, foi utilizado o software QGIS 3.22.8, a partir de imagens de satélite LANDSAT8 do município de Santana do Riacho, Minas Gerais, Brasil com resolução espacial de 30 m² disponíveis na base de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (<http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>). Para distinguir o NDVI entre estações do ano foram utilizadas imagens de cada período de coleta das abelhas (estação seca: setembro 2019; estação chuvosa: janeiro 2020).

Análise estatística

A estrutura da comunidade de abelhas da tribo Euglossini foi avaliada através da riqueza e abundância (e.g., Moreira *et al.*, 2017), calculadas para cada habitat amostrado. A suficiência de amostras para cada altitude foi avaliada através do cálculo da estabilização da curva de acumulação de espécies por unidade amostral (Hsieh *et al.*, 2016). A curva de acumulação de espécies e convergência foi gerada considerando a riqueza de espécies (*Hill Numbers*, $q = 0$) através da biblioteca iNEXT (*iNterpolation/EXTrapolation*). Os pontos amostrais por altitude foram considerados como unidades amostrais, assim para cada altitude foi realizada a interpolação (*Rarefaction*). Os intervalos de confiança foram criados utilizando reamostragens ($nboot=50$) geradas por técnicas de *bootstraps* disponíveis na biblioteca iNEXT.

Para validar a hipótese (H:I) da influência do gradiente altitudinal, considerando as variações entre habitat e estação do ano, na abundância e riqueza da comunidade

de Euglossini, foram gerados dois modelos lineares generalizado misto (*Generalised Linear Mixed Models* - GLMMs) usando a função *glmer* da biblioteca 'lme4' do software R (Bates *et al.*, 2015). Para cada variável resposta, abundância e riqueza, foi gerado um modelo GLMM, considerando a altitude como variável explicativa e interação desta com os fatores habitat (xérico, méxico) e sazonalidade (seca, chuvosa). As repetições dentro de uma mesma altitude, habitat e estação foram consideradas como efeito aleatório. Para cada modelo foi gerada uma análise *post hoc* através de modelos de regressão linear. Os modelos de regressão linear foram gerados separados por habitat e sazonalidade a fim de explicar as interações entre os fatores.

Para avaliar a influência do habitat (H:II) e estação (H:III) na estrutura da comunidade de abelhas Euglossini independente da altitude, foram realizadas análises por modelos GLMMs avaliando a interação entre os fatores de habitat (xérico e méxico) e estações do ano (seca e chuvosa) nas variáveis resposta abundância e riqueza. A fim de remover os efeitos do padrão altitudinal da análise, a altitude foi considerada como uma variável aleatória, assim como as três réplicas dentro de uma mesma altitude, habitat e estação. Para os casos em que foram identificadas diferenças estatísticas significativas ($\alpha = 0,05$) e/ou interações entre os fatores avaliados, foi realizado o detalhamento da análise através do teste *post hoc* pareado de Tukey's HSD, através das *Estimated Marginal Means* utilizando a biblioteca 'emmeans' do software R (Bates *et al.*, 2015). Os resultados presentes nas figuras e no texto são apresentados como médias e erro padrão (\pm SE) estimados.

Para avaliar a influência dos fatores altitudinal, habitat e sazonalidade na diversidade global de Euglossini nesse estudo, foi realizada a partição da diversidade (H:IV). A diversidade global, γ , foi dividida em diversidade α (local) e diversidade β , sendo que β é sub particionada em três dimensões: β_1 – Vertical (Elevação), β_2 – Horizontal (Habitat, Xérico/México) e β_3 – Sazonal (Estações seca e chuvosa). A contribuição de cada dimensão foi calculada pela análise 'adipart' (*Additive Diversity Partitioning, for Raxonomic Approach*) através da biblioteca 'vegan' (Oksanen *et al.*, 2013) do software R. Para o cálculo pela função *adipart* foi utilizado o índice de riqueza como descritor da diversidade. Para comparar a contribuição de cada componente de diversidade na diversidade total, os valores de diversidade foram transformados em percentuais da diversidade total e apresentados em um gráfico de barra empilhado. Por fim, para verificarmos se a diversidade β é ocasionada por perda (*nestedness*) ou substituição (*turnover*) de espécies. O índice de dissimilaridade dos componentes de

turnover e *nestedness* foi calculado para cada subpartição da diversidade β (β_1 , β_2 e β_3). O cálculo foi realizado através da função '*beta.multi*' da biblioteca '*betapart*' do software R (Baselga *et al.*, 2013), utilizando o índice de dissimilaridade de Jaccard.

A investigação dos mecanismos que influenciam a estrutura da comunidade de abelhas Euglossini através de variáveis climáticas foi realizada apenas para os ambientes xéricos pelo fato de não haver estações meteorológicas nos ambientes méxicos. Inicialmente, avaliou-se a correlação entre as variáveis temperatura do ar média, umidade relativa do ar média, precipitação acumulada e NDVI dos sítios amostrais xéricos através da correlação de Person. Nenhuma variável apresentou alta correlação ($r > 0,70$) entre si (Dormann *et al.*, 2012). Para cada variável resposta (riqueza e abundância), foram construídos quatro modelos GLMMs, cada um destinado a uma das quatro variáveis ambientais avaliadas. Para modelos que foram identificadas diferenças estatísticas significativas ($\alpha = 0,05$) foi realizada uma análise *post hoc* através de modelos de regressão linear. Também foram avaliados o efeito conjunto das variáveis ambientais sobre a riqueza e abundância. Para cada par de variáveis ambientais foi gerado um modelo GLMMs avaliando o efeito combinado do par de variáveis na riqueza e abundância. Modelos que apresentaram diferenças estatísticas significativas ($\alpha = 0,05$) foram utilizados para gerar *Heatmaps* através da biblioteca "*lattice*" do software R. Os *Heatmaps* foram utilizados para entender o comportamento combinado das duas variáveis ambientais na estrutura da comunidade de abelhas Euglossini em ambientes xéricos. Por fim, para os ambientes méxicos foi avaliado somente a influência da estrutura da vegetação (NDVI) sobre a riqueza e abundância das abelhas Euglossini, pois as torres de monitoramento do clima captaram as condições apenas de habitats xéricos. Para isto foram gerados dois modelos GLMMs, um para cada variável resposta, seguindo a mesma metodologia utilizada em ambientes xéricos descrita acima.

Para todos os modelos presentes neste estudo foram checados os erros de distribuição e *over-dispersion* dos dados. Todos os testes consideraram um nível de confiança de 95% ($\alpha = 0,05$) e foram realizados em R versão 4.2.1. (R Core Team, 2022).

Resultados

Um total de 4.873 indivíduos identificados em três gêneros (*Euglossa* Latreille 1802, *Eufriesea* Cockerell 1908 e *Eulaema* Lepeletier 1841) e 15 espécies de abelhas foram coletados (veja Tabela S3). O gênero mais amostrado e com maior número de espécies foi *Euglossa* (3.085 indivíduos de 14 espécies, ou seja 63,3% do total de indivíduos coletados e 82,3% do total de espécies), seguido por *Eulaema* com 1.768 indivíduos e duas espécies distintas, que corresponderam a 36,3% do total de indivíduos coletados e por *Eufriesea* com 21 indivíduos pertencentes a uma espécie: *Eufriesea auriceps* (Friese, 1899), correspondendo a 0,4% do total de indivíduos coletados. As espécies mais abundantes foram *Eulaema nigrita* (Lepeletier, 1841) com 1630 indivíduos coletados (33,4% do total), *Euglossa melanotricha* (Moure, 1967) com 1519 indivíduos (31,2% do total), *Eg. leucotricha* com 865 indivíduos (17,7% do total) e *Euglossa securigera* (Dressler, 1982) com 367 indivíduos representando 7,5% do total (Tabela S3).

As espécies *Euglossa aratingae* (Nemésio, 2009), *Euglossa imperialis* (Cockerell, 1922) e *Euglossa townsendi* (Cockerell, 1904), ocorreram apenas nas altitudes mais baixas (800 até 1000m). A espécie *Eg. townsendi* foi registrada apenas uma vez (*singleton*) no habitat méxico de 800m de altitude na estação seca. A espécie *Ef. auriceps* ocorreu apenas na estação chuvosa, enquanto a espécie *Eg. aratingae* ocorreu apenas na estação seca na altitude de 1000m, registrada duas vezes (*doubleton*) em méxico e xérico (Tabela S3). As proporções para cada espécie de acordo com o habitat e estação estão representadas respectivamente na Figura S2a,b. As curvas de acumulação de espécies nas diferentes altitudes apresentaram uma cobertura amostral com valores acima dos 90% (Figura S3 a,b), indicando a solidez da amostragem da comunidade de abelhas Euglossini.

Efeito da altitude sobre Euglossini

A riqueza de espécies de abelhas Euglossini diminuiu em função do aumento da altitude nos habitats xérico e nos habitats méxico em ambas as estações do ano (Figura 2; Tabela S4). No gradiente de altitude xérico 72% da variação na riqueza de espécies de abelhas Euglossini foi explicada pela altitude no período chuvoso ($r^2=0,72$; $p<0,001$), enquanto no período seco tal valor caiu para 43% ($r^2=0,43$; $p=0,002$,

Figura 2a). No gradiente de altitude méxico a riqueza de espécies diminuiu com o aumento da altitude nas duas estações do ano (Figura 2a). No período chuvoso 41% da riqueza de Euglossini foi explicada pela variação da altitude ($r^2= 0,41$; $p=0,002$), enquanto para o período seco o valor caiu para 31% ($r^2=0,31$; $p=0,011$).

A abundância de espécies de Euglossini não foi influenciada pela altitude ($p=0,08$, Tabela S4), pelo habitat ou mesmo pela sazonalidade (xérico chuva: $r^2= 0,125$; $p=0,126$; xérico seca $r^2=0,184$; $p=0,058$; méxico chuva: $r^2= 0,043$; $p=0,378$; méxico seca: $r^2 = 0,126$; $p=0,125$) (Figura 2b).

Os valores médios de riqueza e abundância de abelhas Euglossini por altitude para cada habitat e estação estão presentes respectivamente na Figura S4 e Figura S5.

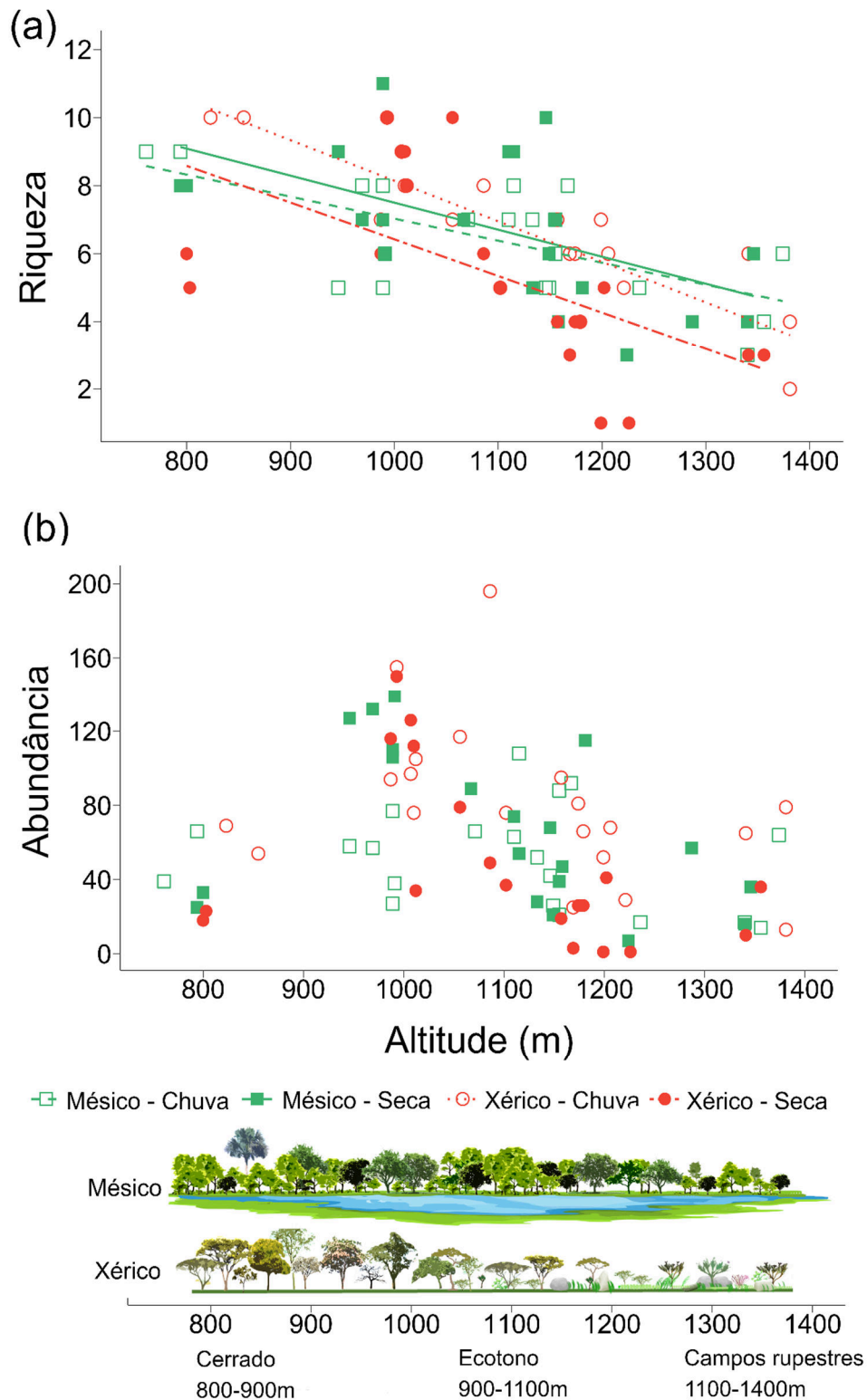


Figura 2. Riqueza (a) e abundância (b) de abelhas Euglossini ao longo de um gradiente altitudinal na Serra do Cipó, Brasil. Cada ponto no gráfico representa um habitat amostrado (unidade amostral) com três réplicas por altitude entre estações seca e chuvosa. As regressões são: Riqueza(a): Mésico Chuva: $y = -0.006x + 13.5$; Mésico seca: $y = -0.008x + 15.4$; Xérico Chuva: $y = -0.012x + 20.06$; Xérico seca: $y = -0.012x + 18.52$ Abundância (b): (Mésico chuva: $y = -0.034x + 89.15$; Mésico seca: $y = -0.098x + 173.64$; Xérico chuva: $y = -0.097x + 188.99$; Xérico seca: $y = -0.124x + 182.70$) (c) representação da variação da vegetação.

Efeito dos habitats numa mesma estação

Na estação seca, a riqueza de espécies de Euglossini foi menor nos habitats xéricos quando comparada aos habitats méxicos (Xérico = $5,00 \pm 0,69$; México = $6,62 \pm 0,85$; $n = 84$; $z = 2,141$; $p = 0,032$; Figura 3a; Tabela S4). Todavia, na estação chuvosa a riqueza de Euglossini não diferiu estatisticamente entre os habitats xéricos e méxicos (Xérico = $6,62 \pm 0,85$; México = $6,28 \pm 0,81$; $n = 82$; $z = -0,433$; $p = 0,665$; Figura 3a; Tabela S4).

Na estação seca foi registrada uma menor abundância de abelhas Euglossini nos habitats xéricos comparado aos habitats méxicos (Xérico = $29,2 \pm 7,73$; México = $55,5 \pm 14,31$; $n = 82$; $z = 3,054$; $p = 0,012$; Figura 3b). Já durante a estação chuvosa a abundância de Euglossini não diferiu estatisticamente em os habitats xéricos e méxicos (Xérico = $73,6 \pm 18,89$; México = $47,6 \pm 12,25$; $n = 82$; $z = -2,034$; $p = 0,176$; Figura 3b).

Efeito entre estações sobre cada habitat

Uma menor riqueza de abelhas foi registrada nos habitats xéricos na estação seca do que na estação chuvosa (Seca = $5,00 \pm 0,69$; Chuva = $6,62 \pm 0,85$; $n = 82$; $z = 2,141$ $p = 0,032$; Figura 3a). Nos habitats méxicos a riqueza de abelhas não a diferiu significativamente entre as estações seca e chuvosa (Seca = $6,62 \pm 0,85$; Chuva = $6,28 \pm 0,81$; $n = 82$; $z = -0,432$; $p = 0,665$; Figura 3a).

A abundância de Euglossini na estação seca nos habitats xéricos foi estatisticamente menor do que na estação chuvosa (Seca = $29,2 \pm 7,73$; Chuva = $73,6 \pm 18,89$; $n = 82$; $z = 4,405$; $p < 0,001$; Figura 3b). Nos habitats méxicos a abundância de abelhas Euglossini não apresentou diferença significativa entre as estações seca e chuvosa (Seca = $55,5 \pm 14,31$; Chuva = $47,6 \pm 12,25$; $n = 82$; $z = -0,658$; $p = 0,913$; Figura 3b).

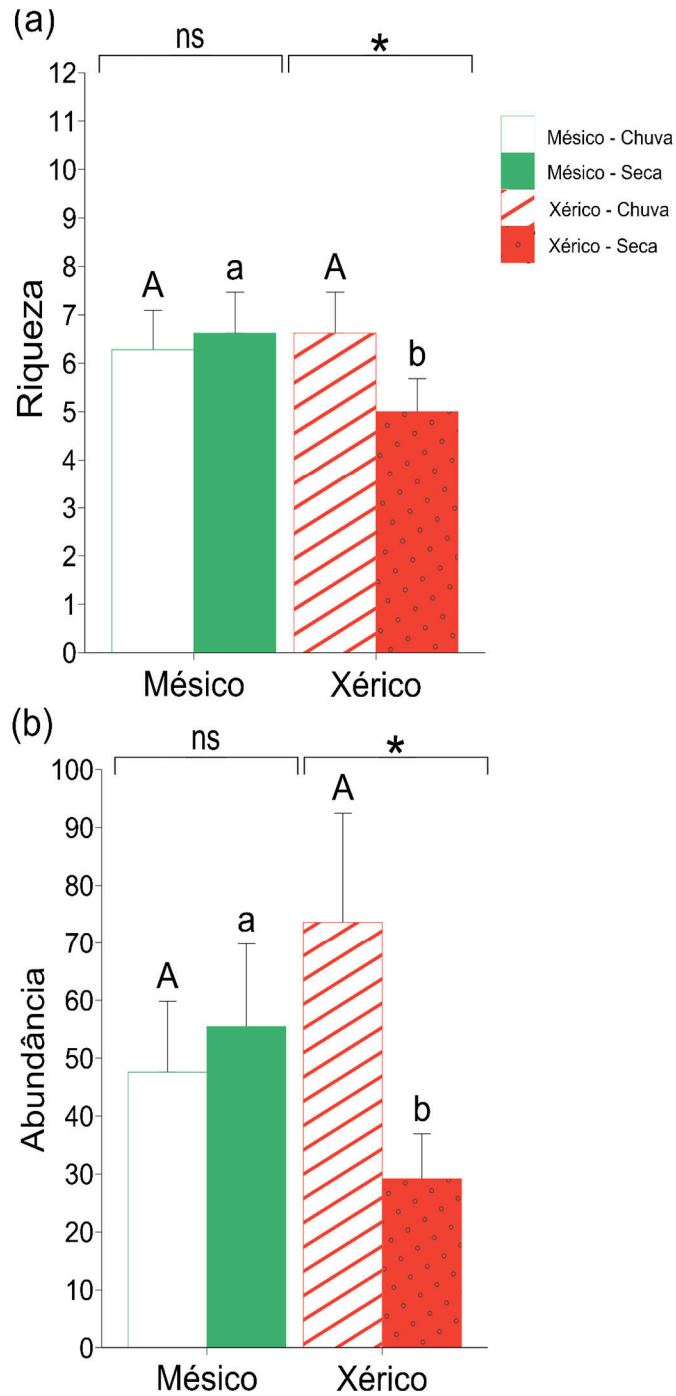


Figura 3. Riqueza (a) e abundância (b) de abelhas Euglossini considerando o efeito do habitat (xérico e mésico) e estação do ano (chuva e seco) na Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil. Barra representa os valores médios e a linha o erro padrão. Letra maiúscula (A) compara habitats na estação chuvosa, letra minúscula (a) compara habitat na estação seca (a) Valores seguidos da mesma letra não são significativamente diferentes $\alpha=0,05$. Símbolo “*” significa diferença estatística entre estações para um mesmo habitat e (ns) sem diferença entre estações para um mesmo habitat.

Partição da diversidade

A figura 4a ilustra a contribuição dos componentes α e β para a diversidade γ e a figura 4b mostra a contribuição do *turnover* e *nestedness* para a partição da diversidade de abelhas entre β 1-elevação, β 2-habitat e β 3-sazonal. A contribuição relativa do componente β 2-Habitat explicou 3,33% da variação na composição de abelhas Euglossini, indicando que há pouca diferença na composição entre as comunidades entre os habitats xéricos e méxicos. Por outro lado, 21,90% da diversidade γ é causada pelo componente β 1-elevação, o que significa que existem diferentes composições de comunidades ao longo do gradiente altitudinal. Além disso, 66,65% do β 1-elevação foi causada pelo componente de *turnover* e 33,35% *nestedness*, enquanto a partição β 2-habitat aparece unicamente devido ao componente de *nestedness* (Figura 4b). O componente β 3-Sazonal contribuiu 10,00% para variação da diversidade total γ , indicando que a variação da diversidade entre as estações seca e chuvosa é maior do que a variação entre habitats (β 2-Habitat). A partição da diversidade entre estações (β 3-Sazonal) apresentou 71,43% *turnover* e 28,57% *nestedness*.

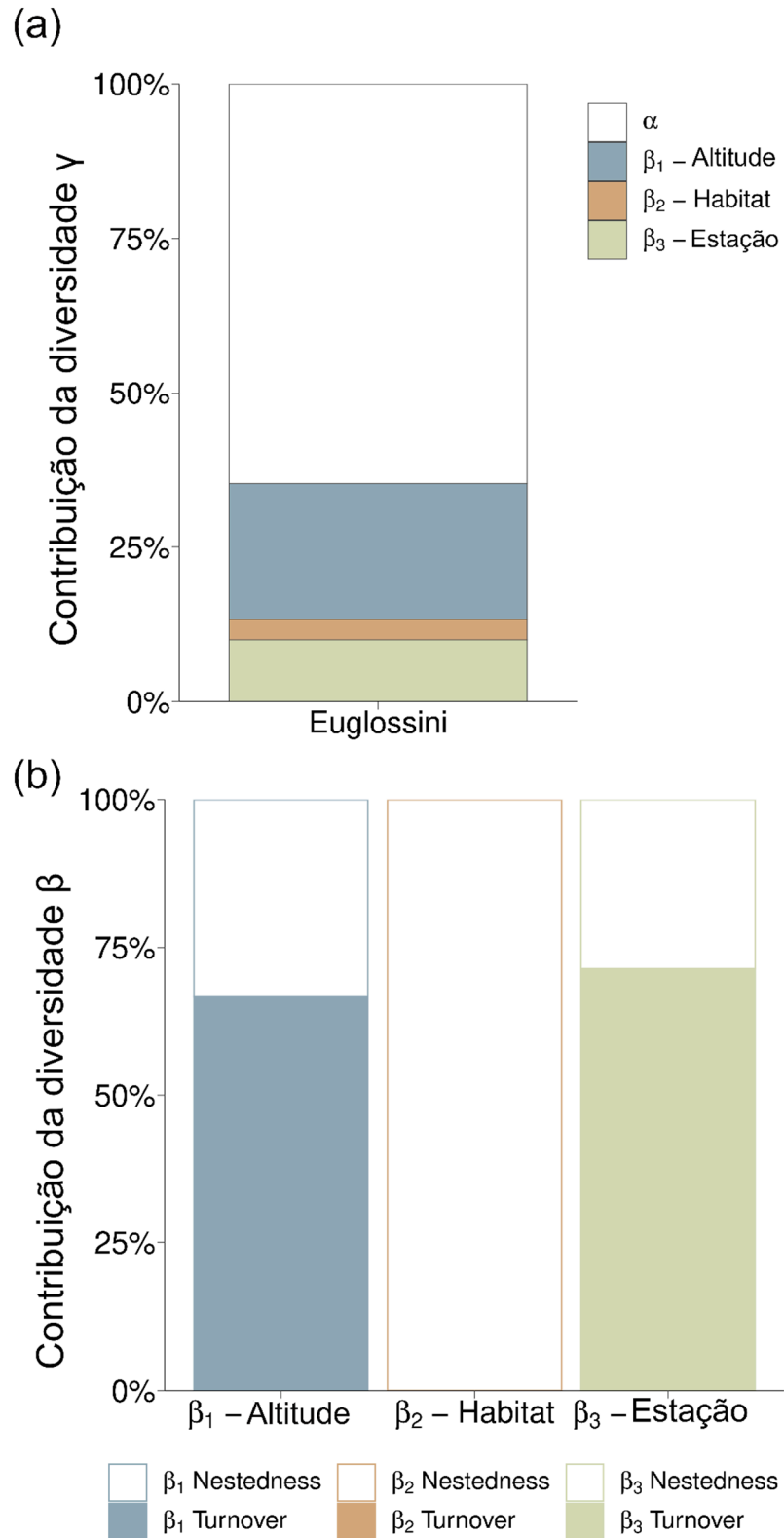


Figura 4. (a) O particionamento da diversidade regional e as contribuições de α , β_1 , β_2 e β_3 (b) A contribuição relativa de *turnover* e *nestedness* para a diversidade de abelhas Euglossini na Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil considerando as dimensão espaço-temporal avaliadas. Para diversidade β_1 -Elevação = dimensão vertical; β_2 Habitat = dimensão horizontal β_3 Sazonal= dimensão temporal.

As variáveis climáticas e NDVI

A umidade relativa do ar presente nos habitats xéricos respondeu positivamente ao aumento da altitude ($r= 0,84$; $p<0,001$; Figura S6a), enquanto a temperatura estava negativamente relacionada ao aumento da altitude ($r= -0,68$; $p<0,001$; Figura S6 b). Quanto a cobertura vegetal (NDVI) observamos que nos habitats xéricos apresentam menor NDVI que os méxicos em uma mesma estação, indicando menor cobertura e complexidade da vegetação como pode ser observado na figura (Figura S7 a). O index NDVI diminuiu em função do aumento da altitude no habitat xérico (xérico chuva $R^2= 0,46$ $p<0,001$; xérico seca: $R^2=0,45$ $p<0,001$; Figura S7b), enquanto não sofreu alteração com o aumento da altitude no habitat méxico (méxico chuva: $R^2= 0,17$ $p=0,058$ méxico seca: $R^2=0,18$ $p=0,053$; Figura S7 b).

Das três variáveis independentes testadas (temperatura, umidade relativa e precipitação), a riqueza de abelhas Euglossini respondeu positivamente apenas ao aumento da temperatura nos habitats xéricos, sendo 35% da variação da riqueza foi explicada pela temperatura ($r^2= 0,35$; $p<0,001$; Figura 6a; Tabela S5). A riqueza de abelhas Euglossini nos habitats xéricos também indicou estar positivamente relacionada ao aumento da cobertura vegetal (NDVI), sendo que 14% da variação da riqueza foi explicada por esta variável ($r^2= 0,14$ $p<0,016$, Figura 6 b; Tabela S5). Além disso, foi observado um efeito conjunto da cobertura vegetal (NDVI) com a umidade relativa do ar sobre a riqueza de abelhas Euglossini (Figura 6c; Tabela S5). A riqueza de abelhas Euglossini foi impactada positivamente pelo incremento conjunto do NDVI e umidade relativa do ar, entretanto, o incremento da umidade relativa em regiões de baixo NDVI não indicaram efeito positivo sobre a riqueza de abelhas Euglossini. Este efeito em conjunto do NDVI com a umidade relativa do ar explicou 38% da variação da riqueza em habitats xéricos ($r^2= 0,38$; $p<0,001$). Nos habitats méxicos, a riqueza de abelhas Euglossini não foi explicada pela cobertura vegetal (NDVI) (Tabela S5).

Não foi possível explicar a abundância de abelhas Euglossini em regiões xéricas através das variáveis climáticas (Tabela S5). Além disto, a abundância também não foi explicada pela cobertura vegetal (NDVI) para ambos os habitats (Tabela S5).

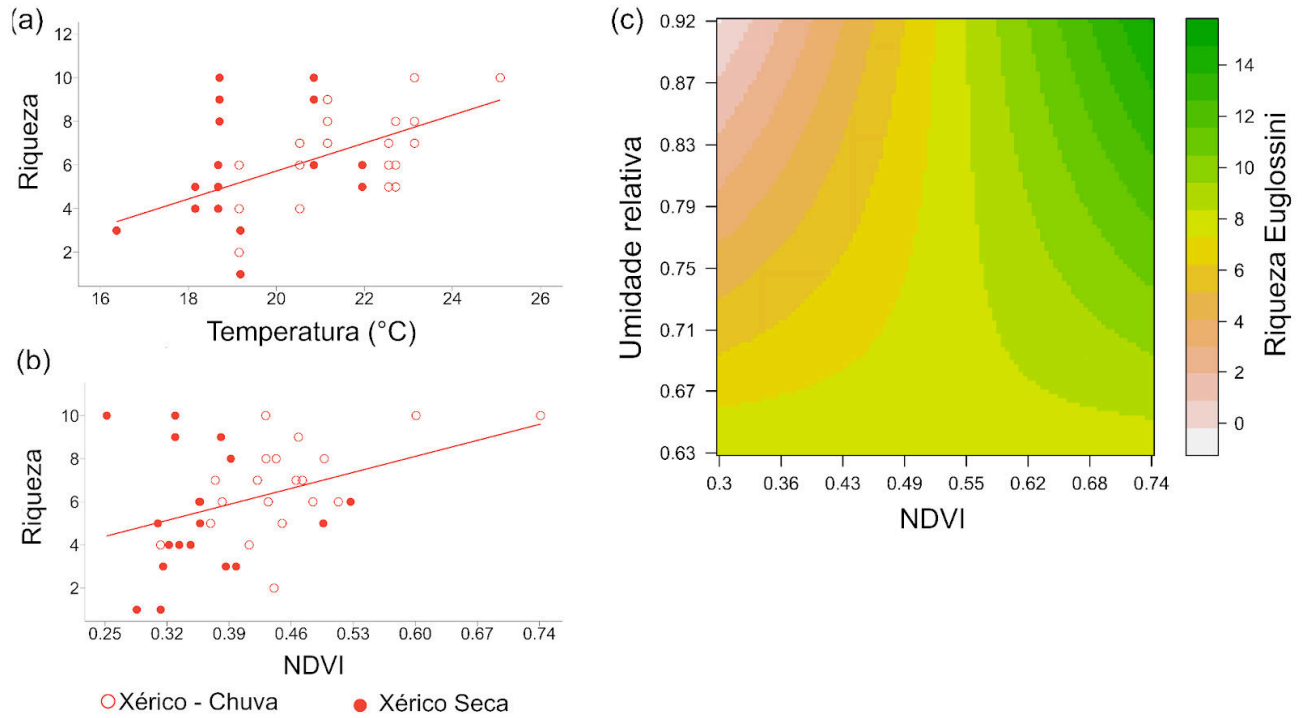


Figura 6. (a) (Riqueza de abelhas em habitats xéricos e sua relação com (a) temperatura (b) NDVI na Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil. As regressões são: Temperatura (a): $Riqueza = 0,7115 * Temperatura - 8,620$ NDVI (b): $Riqueza = 10,987 * NDVI + 1,442$. (c) *Heatmap* da riqueza de Euglossini em habitats xéricos explicada pela variação da humidade relativa e NDVI na Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil. OBS: *Heatmap* gerado através do modelo $Riqueza = -65,28 * HR - 76,36 * NDVI + 120,56 * HR * NDVI + 49,30$

Discussão

O presente estudo relatou a distribuição da riqueza, abundância e composição de abelhas Euglossini na segunda maior cordilheira da América do Sul, a Serra do Espinhaço, no leste do Brasil (Chemale-Jr *et al.*, 2012). Trata-se de uma região na qual o papel da polinização pelas abelhas é essencial para a manutenção da vegetação rica em espécies endêmicas e ameaçadas (Fernandes *et al.*, 2018; Monteiro *et al.*, 2021). Nossos resultados ampliam o conhecimento da distribuição de abelhas Euglossini encontrado em outros estudos realizados no ecossistema (Antonini *et al.*, 2016; Nemésio, 2016; Santos *et al.*, 2020; Viana *et al.*, 2021), incorporando a amostragem em habitats méxicos.

A riqueza de abelhas diminuiu com o aumento da altitude nos habitats xéricos e méxicos tanto na estação seca quanto na estação chuvosa. Esse resultado reforça o padrão de redução da riqueza com o aumento da altitude para abelhas nativas em montanhas de diversos países e regiões biogeográficas (Nemésio, 2008; Hoiss *et al.*, 2012; Classen *et al.*, 2015; Perillo *et al.*, 2017; Medeiros *et al.*, 2017; Pinto *et al.*, 2019; Dec & Santos, 2019). O padrão de redução da riqueza de espécies é frequentemente associado às variações climáticas e mudanças da estrutura da vegetação que ocorrem com o aumento da elevação e que funcionam com filtros ambientais. De fato, no gradiente estudado da base (800 m a.s.l.) ao topo (1.400 m a.s.l.) da Serra do Cipó, a temperatura reduz em média 0,5°C a cada 100m de altitude, enquanto a precipitação e umidade do ar aumentam (Mota *et al.*, 2018). Assim, a base desta montanha é mais seca e quente que o topo (Fernandes & Price, 1991; Fernandes *et al.*, 2016b). Temperaturas mais baixas e maiores rajadas de vento presentes em altitudes mais elevadas da montanha podem influenciar negativamente na capacidade de voo para as abelhas (*e.g.*, Perillo *et al.*, 2021), e até gerar déficits energéticos (Stabentheiner *et al.*, 2003; Classen *et al.*, 2015) restringindo a exploração de recursos (Classen *et al.*, 2015). Abelhas do gênero *Euglossa*, comuns no presente estudo, geralmente possuem baixa capacidade de termorregulação (Inouye, 1975; May & Casey, 1983). As condições ótimas de temperatura para estas abelhas têm sido sugeridas em torno de 22°C a 27°C (Martins *et al.*, 2018) justamente as condições encontradas nas altitudes mais baixas da montanha onde encontramos maior riqueza de abelhas.

Outro aspecto ambiental muito associado à estrutura da comunidade de abelhas Euglossini é a umidade relativa do ar (Aguiar *et al.*, 2014; Machado *et al.*,

2018). O aumento simultâneo entre a umidade relativa do ar e estrutura vegetal, medida através do NDVI, influenciaram positivamente a riqueza de abelhas Euglossini em habitats xéricos. Geralmente ambientes xéricos têm a densidade, riqueza e complexidade vegetal reduzida com o aumento da altitude (Fernandes & Price, 1988, 1991; Michalet *et al.*, 2014). Assim como em outras regiões do globo, nos ambientes xéricos da região estudada, a vegetação é mais rica e densa na base da montanha e a medida em que a altitude aumenta ocorre a redução da riqueza e porte da vegetação (Mota *et al.*, 2018). Os resultados evidenciam que uma maior estrutura vegetal influencia diretamente na distribuição das abelhas Euglossini provavelmente devido ao uso da vegetação como substrato de nidificação e principal fonte de alimento (Nemésio & Silveira, 2007; Viana *et al.*, 2021).

Esperávamos que a riqueza de abelhas Euglossini não iria apresentar alterações significativas em habitats méxicos ao longo do gradiente de altitude, como observado para insetos galhadores (e.g., Fernandes & Price, 1988, 1991), em virtude da cobertura vegetal (NDVI) nestes ambientes não sofrer alterações com a altitude e serem ambientes florestais úmidos propícios para abelhas Euglossini (Nemésio & Silveira, 2007; Faria & Silveira, 2011; Silveira *et al.*, 2015). Entretanto, a riqueza de abelhas Euglossini foi negativamente afetada pelo efeito da elevação. Assim, os resultados indicaram que o efeito da elevação e consequente redução da temperatura podem agir como um poderoso filtro ambiental, reduzindo a riqueza de Euglossini até mesmo em habitats méxicos presentes nos topos das montanhas. Além disso, também deve-se considerar que embora as florestas ripárias e capões de mata, que compõem os habitats méxicos deste estudo, mantenham a estrutura da vegetação ao longo do gradiente, estes podem não oferecer as condições necessárias para espécies que dependem de formações florestais e maior heterogeneidade da paisagem, e.g., *Eg. hemichlora* e *Eg. imperialis* (Janzen *et al.*, 1982; Moura & Schlindwein, 2009; Silveira *et al.*, 2015; Bravo *et al.*, 2021). As vegetações méxicas com o aumento da altitude tem sua área total reduzida e fragmentada, muitas vezes não passando de 100m de um ponta a outra (Ribeiro & Walter, 1998). Isso faria com que todo o ambiente dentro dessas florestas fosse afetado por efeitos de borda (ver Begon *et al.*, 1990; Murcia, 1995), não preservando condições de umidade, temperatura e luminosidade necessárias para espécies exclusivamente florestais (Faria & Silveira, 2011). Paisagens em contextos envolvendo maior cobertura florestal

associadas a alta heterogeneidade tem abrigado maior abundância e riqueza de Euglossini (Carneiro *et al.*, 2022).

Ao desconsiderarmos o efeito da altitude e compararmos a riqueza e a abundância de abelhas Euglossini entre habitats méxicos e xéricos em uma mesma faixa de altitude e mesma estação do ano (gradiente transversal), esperávamos que os habitats méxicos conferissem maior riqueza e abundância de abelhas Euglossini. Ao longo do dia os habitats xéricos podem alcançar temperaturas altas e uma baixa umidade do ar (Fernandes *et al.*, 2016a), e estes fatores são conhecidos por limitar as atividades de forrageamento e nidificação da tribo Euglossini (Vilhena *et al.* 2017). Nossos resultados mostraram que este padrão foi observado na estação seca. Estes resultados corroboram com a hipótese deste trabalho e de estudos anteriores realizados com outros grupos de insetos (Fernandes & Price, 1988, 1992; Ribeiro *et al.*, 1998). A menor riqueza e abundância encontrada nos habitats xéricos do que méxicos, ambos na estação seca, pode estar relacionado a baixos valores de umidade relativa do ar. Os autores Hoffmann *et al.* (2012) constataram que o orvalho presente em habitats xéricos se torna menos frequente e desaparece à medida que a estação seca avançava. Durante a estação seca na região da Serra do Cipó foi observada umidade relativa do ar variando entre de 60% a 70% no cerrado (Fernandes *et al.*, 2016a). Os valores ideais de umidade relativa do ar para a maioria das espécies de Euglossini tem sido considerado entre 71,8% a 75,6% (Martins *et al.*, 2018). Nos habitats méxicos na estação seca na região da Serra do Cipó, as matas ciliares geram um efeito tampão sobre a umidade, permanecendo entre de 70% a 80% (Fernandes *et al.*, 2016a). Isto permite que os habitats méxicos mantenham as condições de umidade ideais para as abelhas Euglossini ao longo do ano e não somente na estação chuvosa, como em habitats xéricos. Assim, na estação chuvosa, ambientes méxicos e xéricos não apresentaram diferenças significativas na estrutura da comunidade de abelhas Euglossini. Além disto, uma vez as condições extremas da vegetação xérica tenha sido atenuado pelas condições climáticas da estação chuvosa, é possível que algumas espécies de abelhas Euglossini se deslocam entre a paisagem xéricas e méxicas em busca de recursos florais como sugerido por Faria & Silveira, (2011), e Brito *et al.*, (2017a) e Martins *et al.*, (2018). Por exemplo, a abelha *Eg. pleosticta*, frequentemente presentes em habitats méxicos (Martins *et al.*, 2018), foi observada em nosso estudo em habitats xéricos apenas na estação chuvosa.

Uma redução na riqueza e abundância de abelhas na estação seca nos habitats xéricos também pode ser explicada em partes pelo padrão de floração na região da cadeia do Espinhaço, que é fortemente marcado pela sazonalidade e reflete na distribuição de outros insetos polinizadores (e.g., borboletas (Beirão et al., 2020); formigas (Castro et al., 2020)). Embora existam plantas que florescem durante o ano inteiro, a maioria das espécies vegetais tendem a florir na estação chuvosa em ambos os habitats (Silva et al., 2011; Ramos et al., 2014), tanto pelas melhores condições ambientais, quanto pela disponibilidade de polinizadores (Fernandes et al., 2016b; Le Stradic et al., 2017; Brito et al., 2017b). Geralmente, o aumento da floração de plantas coincide com flutuações sazonais na abundância de Euglossini (Janzen, 1971; Rêbello & Garófalo, 1991; Ackerman, 1983; Ospina-Torres et al., 2015). O aumento da emergência de jovens adultos está relacionado à maior oferta energética de néctar e pólen que possibilita atividades custosas como a nidificação (Rêbello & Garófalo, 1991; Torné-Noguera et al., 2014). Nossos resultados indicaram um aumento na abundância de algumas espécies durante a estação chuvosa em ambientes xéricos (e.g., *El. nigrita*) e ocorrência da *Ef. auriceps* em ambos os ambientes, como esperado para espécies do gênero que são sazonais, univoltine e possuem grande capacidade de deslocamento (Andrade-Silva et al., 2012; Silva & Marco, 2014; Mateus et al., 2015).

Ao analisarmos a composição de espécies entre as áreas estudadas encontramos uma alta substituição de espécies (*turnover*) entre altitudes e estações e a perda de espécies (*nestedness*) entre habitats. Estes resultados reforçam padrões encontrados para abelhas em gradientes de altitudes (Perillo et al., 2017; Santos et al., 2020; Conrad et al., 2021), entre gradientes sazonais (Viotti et al., 2013; Margatto et al., 2019; Dzekashu et al., 2022) e entre habitats xéricos e mésicos (Faria & Silveira, 2011; Martins et al., 2018). Encontramos *singletons* e *doubleton* nas altitudes de 800 e 1.000 m que podem ter influenciado no padrão *turnover* entre altitudes e estações. *Singletons* é comumente visto em abelhas Euglossini (Antonini et al., 2016; Santos et al., 2020), para o grupo Aculeata (Perillo et al., 2017) e outros artrópodes tropicais (Coddington et al., 2009). Geralmente a alta taxa de substituição de espécies com o aumento da elevação em montanhas ocorre em virtude da redução da temperatura e riqueza e complexidade da vegetação que podem impor barreiras para a dispersão de espécies filtrando espécies que possuem pré-adaptações para sobreviver em diferentes lugares (Rahbek, 1995; Hoiss et al., 2012; Peters et al., 2016) ou mesmo

favorecendo composições distintas em determinadas faixas de altitude (Tello *et al.*, 2015; Perillo *et al.*, 2021).

A maior parte das espécies encontradas neste estudo são generalistas de habitats e recursos polínicos e, portanto, conseguem se deslocar entre áreas métricas de vegetação fechada para áreas abertas e xéricas, como por exemplo as espécies *El. nigrita*, *El. cingulata*, *Eg. leucotricha*, *Eg. melanotricha*, *Eg. securigera*, presentes ao longo de todo o gradiente altitudinal (Nemésio, 2009; Andrade-Silva *et al.*, 2012; Nemésio, 2016; Faleiro *et al.*, 2018; Sousa *et al.*, 2022). Estas espécies poderão ser beneficiadas ou sofrerão pouco efeito negativo das mudanças climáticas (Faleiro *et al.*, 2018). Entretanto, algumas espécies generalistas foram encontradas apenas em determinadas faixas de altitude com temperaturas mais elevadas, *e.g.*, *Eg. carolina*, e *Ef. auriceps*. Estas evidências podem indicar que em futuros cenários de aquecimento global, o aumento da temperatura possa proporcionar o deslocamento dessas populações em direção ao topo da montanha. Por outro lado, espécies como a *Eg. hemichlora* e *Eg. imperialis* que estão associadas a ambientes florestais (Janzen *et al.*, 1982; Moura & Schlindwein, 2009; Bravo *et al.*, 2021) podem ter sua distribuição restrita as altitudes mais baixas. Isto porque o aumento da altitude afeta negativamente o porte e riqueza da vegetação em ambientes xéricos enquanto as áreas métricas como capões de mata ficam imersos em matriz de Campos Rupestres (Coelho *et al.*, 2017). Assim, espécies ligadas a habitats florestais podem ser incapazes de deslocar para condições climáticas adequadas, se tornando mais vulneráveis às mudanças climáticas (Crossman *et al.*, 2012). Desta forma os resultados levantados neste estudo ampliaram o conhecimento sobre a distribuição de abelhas Euglossini considerando as variações transversais presentes em gradientes altitudinais e reforça a necessidade de estudos de longo prazo para avaliar os efeitos das mudanças climáticas sobre a distribuição da comunidade de abelhas Euglossini em montanhas tropicais.

Conclusão

Os registros de declínio nas populações e comunidades de polinizadores vem aumentando em todas as regiões geográficas (Potts *et al.*, 2010; Drossart & Gérard, 2020; Althaus *et al.*, 2021). Os impactos desses declínios nos serviços de polinização de espécies de interesse econômico seriam catastróficos para a econômica e bem-estar da humanidade e tem sido também reportado ao redor do mundo, como no Brasil (Novais *et al.*, 2018; Freitas *et al.*, 2022), México (Ashworth *et al.*, 2009), Europa (Potts *et al.*, 2010). Por outro lado, os impactos para as comunidades de plantas nativas seriam ainda maiores, mas os relatos ou cenários não são ainda conhecidos (Conrad *et al.*, 2021). Assim, este trabalho contribuiu para o ampliar o entendimento dos padrões e mecanismos que regulam as comunidades de abelhas Euglossini, um dos principais grupos de polinizadores dos Campos Rupestres (Monteiro *et al.*, 2021). Identificamos que as comunidades de abelhas Euglossini são influenciadas principalmente pelo efeito da altitude e pelo mosaico de habitats que compõem a montanha tropical. A composição de espécies de Euglossini de habitats xéricos e méxicos, apesar de similares, respondem diferentemente entre as estações do ano. Os habitats méxicos mantêm a riqueza e abundância de espécies entre estações, sendo considerados como fonte de espécies de abelhas Euglossini para habitats xéricos que se igualam aos méxicos na riqueza e abundância de abelhas durante a estação chuvosa. Desta forma os resultados levantados neste estudo reforçam a importância da conservação de habitats méxicos em ambientes montanhosos para a manutenção da biodiversidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem a R.O.M. Diana, I. N. Gomes e S. Ludwig pela ajuda no campo; Reserva Vellozia, Cedro Têxtil, ICMBio-PARNA Serra do Cipó, Pousada Serra Morena e Pousada Pouso do Elefante pelo apoio logístico em campo. Agradecemos o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (PELD-CRSC), Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), Planta, CYTED Programa IberoAmericano de Ciencia y Tecnologia para o desarrollo e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Programa de Excelência Acadêmica (PROEX) - Código de Finanças 001. Este estudo atendeu parcialmente aos requisitos para obtenção do título de Doutor em ECMVS da C.D. Freitas pela Universidade Federal de Minas Gerais. Agradecemos também aos dois revisores anônimos por suas sugestões sobre o manuscrito.

Referências

- Ackerman, J.D. (1983) Specificity and the mutual dependency of the orchid euglossine bee interaction. *Biological Journal of the Linnean Society*, **20**, 301–314.
- Aguiar, W.M., Melo, G.A.R. & Gaglianone, M.C. (2014) Does forest physiognomy affect the structure of orchid bee (Hymenoptera, Apidae, Euglossini) communities? A study in the Atlantic forest of Rio de Janeiro state, Brazil. *Sociobiology*, **61**, 68–77. DOI: 10.13102/sociobiology.v61i1.68-77.
- Althaus, S.L., Berenbaum, M.R., Jordana, J. & Shalmona, D.A. (2021) No buzz for bees: Media coverage of pollinator decline. *PNAS*, **118**, e20025521. DOI: 10.1073/pnas.2002552117.
- Andrade-Silva, A.C.R., Nemésio, A., Oliveira, F.F. & Nascimento, F.S. (2012) Spatial-temporal variation in orchid bee communities (Hymenoptera: Apidae) in remnants of arboreal caatinga in the Chapada Diamantina region, state of Bahia, Brazil. *Neotropical Entomology*, **41**, 296–305. DOI:10.1007/s13744-012-0053-9.
- Antonini, Y., Silveira, R.A., Oliveira, M., Martins, C. & Oliveira, R. (2016) Orchid bee fauna responds to habitat complexity on a savanna area (cerrado) in Brazil. *Sociobiology*, **63**, 819–825. DOI:10.13102/sociobiology.v63i2.1038.
- Araújo, L.M. & Fernandes, G.W. (2003) Padrões altitudinais em uma comunidade de formigas e a variação em riqueza de espécies entre habitats. *Lundiana: International Journal of Biodiversity*, **4**, 103–109. DOI:10.35699/2675-5327.2003.21860
- Ashworth, L., Quesada, M., Casas, A., Aguiar, R. & Oyama, K. (2009) Pollinator-dependent food production in Mexico. *Biological Conservation*, **142**, 1050–1057. DOI:10.1016/j.biocon.2009.01.016.
- August, P.V. (1983) The role of habitat complexity and heterogeneity in structuring tropical mammal communities. *Ecology*, **64**, 1495-1507.
- Barton, P.S., Cunningham, S.A., Manning, A.D., Gibb, H., Lindenmayer, D.B. & Didham, R.K. (2013) The spatial scaling of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*, **22**, 639–647. DOI:org/10.1111/geb.12031.
- Baselga A. (2010) Partitioning the turnover and nestedness components of beta diversity. *Global Ecology and Biogeography*, **19**, 134–143. DOI:10.1111/j.1466-8238.2009.00490.x.
- Baselga, A., Orme, D., Villegger, S., Bortoli, J. De, & Leprieur, F. (2013) Package ‘betapart’. R 621 package version 15.1. Available: <https://cran.r-project.org/web/packages/betapart/index.html>.

- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B.M. & Walker, S.C. (2015) Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, **67**, 1–48. DOI: 10.18637/jss.v067.i01.
- Beirão, M.V.; Neves, F.S. & Fernandes, G.W. (2020) Climate and plant structure determine the spatiotemporal butterfly distribution on a tropical mountain. *Biotropica*, **53**, 191–200. DOI:10.1111/btp.12860.
- Begon, M., Harper, J.L. & Townsend, C.R. (1990) *Ecology: individuals, populations and communities*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, UK.
- Bravo, Y., Hanson, P.E., Chacón-Madriral, E. & Lobo-Segura, J. (2021) Long-term comparison of the orchid bee community in the tropical dry forest of Costa Rica. *Biotropica*, **54**, 467–477. DOI: 10.1111/btp.13067
- Brinson, M.M. & Verhoeven J. (1999) Riparian forest In *Maintaining biodiversity in forest ecosystems* (ed. by Hunter-Jr.,M.L.) Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 256–299.
- Brito, T.F., Phifer, C.C., Knowlton, J.L., Fiser, C.M., Becker, N.M., Barros, F.C., Contrera, F.A., *et al.* (2017) Forest reserves and riparian corridors help maintain orchid bee (Hymenoptera: Euglossini) communities in oil palm plantations in Brazil. *Apidologie*, **48**, 575–587.
- Brito, V.L.G., Maia, F.R., Silveira, F.A.O., Fracasso, C.M., Lemos-Filho, J.P., Fernandes, G.W. Goldenberg, R. *et al.* (2017b) Reproductive phenology of Melastomataceae species with contrasting reproductive systems: contemporary and historical drivers. *Plant biology*, **19**, 806–817
- Brown Jr., K.S., (2000) Insetos indicadores da história, composição, diversidade e integridade de matas ciliares. In: *Matas ciliares, conservação e recuperação* (ed. by Rodrigues, R.R., Leitão Filho, H.F). Edusp Fapesp, São Paulo, BR, pp. 223–231.
- Callisto, M., Melo, A.S., Baptista, D.F., Goncalves Junior, J.F., Graca, M.A.S. & Augusto, F.G. (2012) Future ecological studies of brazilian headwater streams under global changes. *Acta Limnologica Brasiliensia*, **24**, 293–302. DOI:10.1590/S2179-975X2012005000047.
- Cameron, S. A. (2004) Phylogeny and biology of neotropical orchid bees (Euglossini). *Annual Review of Entomology*, **49**, 377–404. DOI: 10.1146/annurev.ento.49.072103.115855.
- Carneiro, L.S., Aguiar, W.M., Aguiar, C.M.L. & Santos, G.M.M. (2018) Orchid bees (Hymenoptera: Apidae: Euglossini) in seasonally dry tropical forest (Caatinga) in Brazil. *Neotropical Entomology*, **65**, 246–251. DOI:10.13102/sociobiology.v65i2.2077.
- Carneiro, L.S, Ribeiro, M.C., Aguiar, W.M., Priante, C.F., Frantine-Silva, W. & Gaglianone, M.C. (2022) Orchid bees respond to landscape composition differently depending on the multiscale approach. *Landscape Ecology*, **37**, 1587–1601. DOI:10.1007/s10980-022-01442-8

- Carneiro, M.A.A., Ribeiro, S.P., Fernandes, G.W. (1995) Artrópodos de um gradiente altitudinal na Serra Do Cipó, Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Entomologia*, **39**, 597-604.
- Castro, F.S., Silva, P.G., Solar, R., Fernandes, G.W. & Neves, F.S. (2020) Environmental drivers of taxonomic and functional diversity of ant communities in a tropical mountain. *Insect Conservation and Diversity*, **13**, 393-403. DOI:10.1111/icad.12415
- Chemale-Jr., F., Dussin, I.A., Alkmim, F.F., Martins, M.S., Queiroga, G., Armstrong, R. & Santos, M.N. (2012) Unravelling a Proterozoic basin history through detrital zircon geochronology: The case of the Espinhaço supergroup, Minas Gerais, Brazil. *Gondwana Research*, **22**, 200–206. DOI:10.1016/j.gr.2011.08.016.
- Classen, A., Peters, M.K., Kindeketa, W.J., Appelhans, T., Eardley, C.D., Gikungu, M.W., Hemp, A., *et al.* (2015) Temperature versus resource constraints: Which factors determine bee diversity on Mount Kilimanjaro, Tanzania? *Global Ecology and Biogeography*, **24**, 642–652. DOI: 10.1111/geb.12286.
- Coddington, J.A., Agnarsson, I., Miller, J.A., Kuntner, M. & Hormiga, G. (2009) Undersampling bias: the null hypothesis for singleton species in tropical arthropod surveys. *Journal of Animal Ecology*, **78**, 573–584.
- Coelho, M.S., Carneiro, M.A.A., Branco, C.A., Borges, R.A.X., & Fernandes, G.W. (2018) Species turnover drives β -diversity patterns across multiple spatial scales of plant-galling interactions in mountaintop grasslands. *Plos One*, **13**, e0195565. DOI:110.1371/journal.pone.0195565
- Coelho, M.S. Fernandes, G.W., Pacheco, P., Diniz, V., Meireles, A., Santos, R.M., Carvalho, F.A. & Negreiros, D. (2016) Archipelago of montane forests surrounded by rupestrian grasslands: new insights and perspectives. In *Ecology and conservation of mountaintop grasslands in Brazil* (ed. by Fernandes, G.W.). Springer Nature, Chan, CH, pp. 129–153. DOI:10.1007/978-3-319-29808-5_7.
- Coelho, M.S., Fernandes, G.W., Perillo, L.N. & Neves, F.S. (2017) Capões de Mata: Arquipélagos florestais pouco conhecidos e ameaçados. *MG Biota*, **10**, 23–34.
- Conrad, K.M., Peters, V.E. & Rehan, S.M. (2021) Tropical bee species abundance differs within a narrow elevational gradient. *Scientific Reports*, **11**, 23368. DOI:10.1038/s41598-021-02727-9.
- Crossman, N.D., Bryan, B.A. & Summers, D.M. (2012) Identifying priority areas for reducing species vulnerability to climate change. *Diversity and Distributions*, **18**, 60–72. DOI:10.1111/j.1472-4642.2011.00851.x
- Dar, A.A., Jamal, K., Shah, M.S., Ali M., Sayed S., Gaber A., Kesba H. & Salah, M. (2022) Species richness, abundance, distributional pattern and trait composition of butterfly assemblage change along an altitudinal gradient in the Gulmarg region of

- Jammu & Kashmir, India. *Saudi Journal of Biological Sciences*, **29**, 2262–2269. DOI:10.1016/j.sjbs.2021.11.066.
- Darwin, C. (1859) On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life 1st ed. Londres: John Murray.
- Dec, E. & Santos, I.A. (2019) Species distribution of Euglossini bees (Hymenoptera: Apidae) at an altitudinal gradient in northern Santa Catarina. *Sociobiology*, **66**, 568–574. DOI:10.13102/sociobiology.v66i4.3436.
- Dormann, C.F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J.R.G. et al. (2012) Collinearity: A review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, **36**, 27–46. DOI: 10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x
- Dressler, R.L. (1968) Pollination by Euglossine bees. *Evolution*, **22**, 202–210. DOI:10.1111/j.1558-5646.1968.tb03463.x.
- Dressler, R.L. (1982) Biology of the orchid bees (Euglossini). *Annual Review of Ecology and Systematics*, **13**, 373–394. DOI: 10.1146/annurev.es.13.110182.002105
- Drossart, M. & Gérard, M. (2020) Beyond the decline of wild bees: optimizing conservation measures and bringing together the actors. *Insects*, **11**, 649–672. DOI:10.3390/insects11090649.
- Dzekashu, F.F., Yusuf, A.A., Pirk, C.W.W., Steffan-Dewenter, I., Lattorff, H.M.G. & Peters, M.K. (2022) Floral turnover and climate drive seasonal bee diversity along a tropical elevation gradient. *Ecosphere*, **13**, e3964. DOI:10.1002/ecs2.3964.
- Faleiro, F.V., Nemésio, A. & Loyola, R. (2018) Climate change likely to reduce orchid bee abundance even in climatic suitable sites. *Global Change Biology*, **24**, 2272–2283. DOI:10.1111/gcb.14112.
- Faria, L.R.R. & Silveira, F.A. (2011) The orchid bee fauna (Hymenoptera, Apidae) of a core area of the cerrado, Brazil: the role of riparian forests as corridors for forest-associated bees. *Biota Neotropica*, **11**, 87–94. DOI: 10.1590/S1676-06032011000400009.
- Fernandes, A.S., Oliveira, C.D., Assis, W.L. & Jardim, C.H. (2016a) Interações morfo-bio-climática em trechos do parque nacional da Serra do Cipó: aspectos preliminares. *Os desafios da geografia física na fronteira do conhecimento*, 2354 – 2366. DOI:10.20396/sbgfa.v1i2017.2582
- Fernandes, G.W. (2016) *Ecology and Conservation of Mountaintop grasslands in Brazil*. Springer Nature, Chan CH.
- Fernandes, G.W., Almeida, H.A., Nunes, C.A., Xavier, J.H.A., Cobb, N.S., Carneiro, M.A.A., Cornelissen, T., et al. (2016b) Cerrado to rupestrian grasslands: patterns of species distribution and the forces shaping them along an altitudinal gradient. In

Ecology and conservation of mountaintop grasslands in Brazil (ed. by Fernandes, G.W.), Springer Nature, Chan CH, pp. 345–377.

- Fernandes, G.W., Arantes-Garcia, L., Barbosa, M., Batista, N.K.L., Beiroz, W., Resende, F.M. *et al.* (2020) Biodiversity and ecosystem services in the campo rupestre: A road map for the sustainability of the hottest brazilian biodiversity hotspot. *Perspectives in Ecology and Conservation*, **18**, 213–222. DOI:10.1016/j.pecon.2020.10.004
- Fernandes, G.W., Barbosa, N.P.U., Alberton, B., Barbieri, A., Dirzo, R., Goulart, F., Guerra, T.J., *et al.* (2018) The deadly route to collapse and the uncertain fate of brazilian rupestrian grasslands. *Biodiversity and Conservation*, **27**, 2587–2603. DOI:10.1007/s10531-018-1556-4.
- Fernandes, G.W. & Price, P.W. (1988) Biogeographical gradients in galling species richness. *Oecologia*, **76**, 161–167. DOI: 10.1007/BF00379948.
- Fernandes, G.W. & Price, P.W. (1991) Comparisons of tropical and temperate galling species richness: the roles of environmental harshness and plant nutrient status. In *Plant-animal interactions: evolutionary ecology in tropical and temperate regions* (ed. by Price, P.W., Lewinsohn, T.M., Fernandes, G.W., Benson, W.W.) Wiley & Sons, New York, EUA, pp. 91–115.
- Fernandes, G.W. & Price, P.W. (1992) The adaptive significance of insect gall distribution: survivorship of species xeric and mesic habitats. *Oecologia*, **90**, 14–20. DOI: 10.1007/BF00317803.
- Flores, L.M.A., Zanette, L.R.S. & Araujo, F.S. (2018) Effects of habitat simplification on assemblages of cavity nesting bees and wasps in a semiarid neotropical conservation area. *Biodiversity and Conservation*, **27**, 311–328. DOI:10.1007/s10531-017-1436-3.
- Franklin, E., Magnusson, W.E & Luizão, F.J. (2005) Relative effects of biotic and abiotic factors on the composition. *Applied Soil Ecology*, **29**, 259–273.
- Freitas, C.D., Oki, Y., Resende, F. M., Zamudio, F., Freitas, G.S., Rezende, K.M., Souza, F.A. *et al.* (2022) Impacts of pests and diseases on the decline of managed bees in Brazil: a beekeeper perspective. *Journal of Apicultural Research*, **61**, 1–14. DOI: 10.1080/00218839.2022.2099188
- Hoffmann, W.A., Jaconis, S.Y., Mckinley, K.L., Geiger, E.L., Gotsch, S.G. & Franco, A.C. (2012) Fuels or microclimate? Understanding the drivers of fire feedbacks at savanna–forest boundaries. *Austral Ecology*, **37**, 634–643. DOI:10.1111/j.1442-9993.2011.02324.x.
- Hoiss, B., Krauss, J., Potts, S.G., Roberts, S. & Steffan-Dewenter, I. (2012) Altitude acts as an environmental filter on phylogenetic composition, traits and diversity in bee communities. *Proceedings of Royal Society's B Biological Science*, **279**, 4447–4456. DOI: 10.1098/rspb.2012.1581.

- Hsieh, T.C., Ma, K.H. & Chao, A. (2016) iNEXT: an R package for rarefaction and extrapolation of species diversity (Hill numbers). *Methods in Ecology and Evolution*, **7**, 1451–1456. DOI:10.1111/2041-210X.12613.
- Humboldt, A. von & Bonpland, A. (1807) *Ideen zu einer Geographie der Pflanzen: nebst einem Naturgemälde der Tropenländer: auf Beobachtungen und Messungen gegründet, welche vom 10ten Grade nördlicher bis zum 10ten Grade südlicher Breite, in den Jahren 1799, 1800, 1801, 1802 und 1803 angestellt worden sind.* / von Al. von Humboldt und A. Bonpland; bearbeitet und herausgegeben von dem erstern. Bey F.G. Cotta, Bey F. Schoell. DOI:10.5962/bhl.title.9310.
- Inouye, D.W. (1975) Flight temperatures of male Euglossine bees (Hymenoptera: Apidae: Euglossini). *Journal of the Kansas Entomological Society*, **48**, 366–370.
- Inouye, D.W. (2020) Effects of climate change on alpine plants and their pollinators. *Annals of the New York Academy of Sciences*, **1469**, 26–37. DOI: 10.1111/nyas.14104.
- Janzen, D.H. (1967) Why mountain passes are higher in the tropics. *The American Naturalist*, **101**, 233–249. DOI: 10.1086/282487.
- Janzen, D.H. (1971) Euglossine bees as long-distance pollinators of tropical plants. *Science*, **171**, 203–205.
- Janzen, D.H., DeVris, P.J., Higgins, M.L., & Kimsey, L.S. (1982) Seasonal and site variation in costa rican Euglossine bees at chemical baits in lowland deciduous and evergreen forests. *Ecology*, **63**, 66–74. DOI:10.2307/1937032.
- Jiménez-Valverde, A. & Lobo, J.M. (2007) Determinants of local spider (*Araneidae* and *Thomisidae*) species richness on a regional scale: climate and altitude vs. habitat structure. *Ecological Entomology*, **32**, 113–122.
- Körner, C. (2007) The use of 'altitude' in ecological research. *Trends in Ecology & Evolution*, **22**, 569–574. DOI: 10.1016/j.tree.2007.09.006.
- Lara, A.C.F., Fernandes, G.W. & Gonçalves-Alvim, S.J. (2002): Tests of hypotheses on patterns of gall distribution along an altitudinal gradient. *Tropical Zoology*, **15**, 219–232. DOI: 10.1080/03946975.2002.10531176.
- Le Stradic, S., Buisson, E., Fernandes, G.W. & Morellato, L. P.C. (2017) Reproductive phenology of two co-occurring Neotropical mountain grasslands. *Journal of Vegetation Science*, **29**, 15 – 24. DOI: 10.1111/jvs.12596.
- Leuschner, C. (2000) Are high elevations in tropical mountains arid environments for plants? *Ecology*, **81**, 1425–1436.
- Machado, C.A.S., Costa, C.P. & Francoy, T.M. (2018) Different physiognomies and the structure of Euglossini bee (Hymenoptera: Apidae). *Communities. Sociobiology*, **65**, 471–481. DOI: 10.13102/sociobiology.v65i3.2718.

- Madeira, J.A. & Fernandes, G.W., (1999) Reproductive phenology of sympatric taxa of *Chamaecrista* (Leguminosae) in Serra do Cipó, Brazil. *Journal of Tropical Ecology*, **15**, 463–479. DOI: 10.1017/S0266467499000954.
- Margatto, C., Berno, V.O., Gonçalves, R.B. & Faria Jr., L.R.R. (2019) Orchid bees (Hymenoptera, Apidae, Euglossini) are seasonal in seasonal semideciduous forest fragments, southern Brazil. *Papéis Avulsos de Zoologia*, **59**, e20195907. DOI:10.11606/1807-0205/2019.59.07.
- Markl, H. (1974) Insect behavior: functions and mechanisms. In *The Physiology of Insecta*: Volume III, (ed. by Morris Rockstein, M). Academic Press Elsevier, Amsterdam, NL, pp. 3–148
- Martins, D.C., Albuquerque, P.M.C., Silva, F.S. & Rebêlo, J.M.M. (2018) Orchid bees (Apidae: Euglossini) in cerrado remnants in northeast Brazil, *Journal of Natural History*, **52**, 627–644. DOI:10.1080/00222933.2018.1444210.
- Mateus, S., Silva, A.C.R.A., & Garófalo, C.A. (2015) Diversity and temporal variation in the orchid bee community (Hymenoptera: Apidae) of a remnant of a neotropical seasonal semi-deciduous forest. *Sociobiology*, **62**, 571–577. DOI:10.13102/sociobiology.v62i4.391
- May, M.L. & Casey, T.M. (1983) Thermoregulation and heat exchange in Euglossine bees. *Physiological Zoology*, **56**, 541–551.
- McCain, C.M. & Grytnes, J-A. (2010) *Elevational gradients in species richness*. John Wiley & Sons, Inc, Chichester, UK.
- McCravy K.W., Van Dyke J., Creedy T.J. & Roubik D.W. (2016) Orchid bees (Hymenoptera: Apidae: Euglossini) of Cusuco National Park, state of Cortés, Honduras. *Florida Entomologist*, **99**, 765–769.
- Medeiros, R.L.S., Aguiar, W.M., Aguiar, C.M.L. & Borges, I.G.M. (2017) The Orchid bee communities in different phytophysionomies in the Atlantic Forest: from lowland to montane rainforests. *Sociobiology*, **64**, 182–190. DOI: 10.13102/sociobiology.v64i2.1348.
- Merriam, C.H. (1894) Laws of temperature control of the geographic distribution of terrestrial animals and plants. *National Geographic Magazin*, **6**, 229–238.
- Michalet, R., Schöb, C., Lortie, C.J., Brooker, R.W. & Callaway, R.M. (2014) Partitioning net interactions among plants along altitudinal gradients to study community responses to climate change. *Functional Ecology: Climate Change and Species Range Shifts*, **28**, 75–86. DOI: 10.1111/1365-2435.12136
- Monteiro, B.L., Camargo, M.G.G., Loiola, P.P., Carstensen, D.W., Gustafsson, S. & Morellato, L.P.C. (2021) Pollination in the campo rupestre: a test of hypothesis for an ancient tropical mountain vegetation. *Biological Journal of the Linnean Society*, **133**, 512–530. DOI:10.1093/biolinnean/blaa205.

- Moore, R.D., Spittlehouse, D.L. & Story, A. (2005) Riparian microclimate and stream temperature response to forest harvesting. *Journal of the American Water Resources Association*, **41**, 813–834. DOI:10.1111/j.1752-1688.2005.tb03772.x.
- Moreira, E.F., Santos, R.L.S., Silveira, M.S., Boscolo, D., Neves, E.L. & Viana, B.F. (2017) Influence of landscape structure on Euglossini composition in open vegetation environments. *Biota Neotropica*, **17**, e20160294. DOI:10.1590/1676-0611-BN-2016-0294.
- Mota, G.S., Luz, G.R., Mota, N.M., Silva Coutinho, E., Veloso, D.M., Das, M., Fernandes, G.W. & Nunes, Y.R.F. (2018) Changes in species composition, vegetation structure, and life forms along an altitudinal gradient of rupestrian grasslands in south-eastern Brazil. *Flora*, **238**, 32–42. DOI:10.1016/j.flora.2017.03.010
- Moura, D.C. & Schindwein, C. (2009) The gallery forests of the São Francisco river as corridors for Euglossine bees (Hymenoptera: Apidae) from tropical rainforests. *Neotropical Entomology*, **38**, 281–284 DOI: 10.1590/S1519-566X2009000200018
- Murcia, C. (1995) Edge effect in fragmented forests: implications for conservation. *Tree*, **10**, 58-62.
- Negreiros, D., Le Stradic, S., Fernandes, G.W. & Rennó, H.C. (2014) CSR analysis of plant functional types in highly diverse tropical grasslands of harsh environments. *Plant Ecology*, **215**, 379–388. DOI:10.1007/s11258-014-0302-6.
- Nemésio, A. (2008) Orchid bee community (Hymenoptera, Apidae) at an altitudinal gradient in a large forest fragment in southeastern Brazil. *Revista Brasileira de Zoociências*, **10**, 249–256.
- Nemésio, A. (2009) Orchid bees (Hymenoptera: Apidae) of the Brazilian Atlantic forest. *Zootaxa*, **2041**, 1–242.
- Nemésio, A. (2016) Orchid bees (Hymenoptera, Apidae) from the Brazilian savanna-like ‘cerrado’: how to adequately survey under low population densities? *North-Western Journal of Zoology*, **12**, 230–238.
- Nemésio, A. & Santos-Junior, J.E. (2014) Is the “centro de endemismo Pernambuco” a biodiversity hotspot for orchid bees? *Brazilian Journal of Biology*, **74**, S078–S092. DOI:10.1590/1519-6984.26412.
- Nemésio, A. & Silveira, F.A. (2007) Diversity and distribution of orchid bees (Hymenoptera: Apidae) with a revised checklist of species. *Neotropical Entomology*, **36**, 874–888. DOI:10.1590/S1519-566X2007000600008.
- Novais, S.M.A., Nunes, C.A., Santos, N.B., D’Amico, A.R., Fernandes, G.W., Quesada, M. & Neves, A.C.O. (2018) Correction: Effects of a possible pollinator crisis on food crop production in Brazil. *Plos One*, **13**, e0197396.

- Nunes, C.A., Castro, F.S., Brant, H.S.C., Powell, S., Solar, R., Fernandes, G.W. & Neves, F.S. (2020) High temporal beta diversity in an ant metacommunity, with increasing temporal functional replacement along the elevational gradient. *Frontiers in Ecology and Evolution*, **8**, 571439. DOI: 10.3389/fevo.2020.571439
- Ohsawa, T., Ide, Y., (2008) Global patterns of genetic variation in plant species along vertical and horizontal gradients on mountains. *Global Ecology and Biogeography*, **17**, 152–163. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2007.00357.x
- Oksanen, J., Blanchet, F.G., Kindt R., Legendre, P., Minchin, P.R. & O’Hara, R.B. (2013) *Vegan: community ecology package. R package version 2.0–7*. Available: <http://cran.r-project.org/package=vegan>.
- Ospina-Torres, R., Montoya-Pfeiffer, P.M., Parra-H., A., Solarte, V, & Otero, J.T. (2015) Interaction networks and the use of floral resources by male orchid bees (Hymenoptera: Apidae: Euglossini) in a primary rain forests of the Chocó region (Colombia). *Revista de Biología Tropical*, **63**, 647-658.
- Packer, L. & Darla-West, G. (2021) Bees: How and why to sample them. In *Measuring arthropod biodiversity: A handbook of sampling methods* (ed. by Santos, J.C. & Fernandes, G.W.), Springer Nature, Chan CH, pp. 55–82.
- Pereira, F.W., Gonçalves, R.B. & Ramos, K.S. (2021) Bee surveys in Brazil in the last six decades: a review and scientometrics. *Apidologie*, **52**, 1152–1168.
- Perillo, L.N., Castro, F.S., Solar, R. & Neves, F. (2021) Disentangling the effects of latitudinal and elevational gradients on bee, wasp, and ant diversity in an ancient neotropical mountain range. *Journal of Biogeography*, **48**, 1564–1578. DOI: 10.1111/jbi.14095.
- Perillo, L.N., Neves, F.S., Antonini, Y. & Martins, R.P. (2017) Compositional changes in bee and wasp communities along Neotropical mountain altitudinal gradient. *Plos One*, **12**, e0182054. DOI: 10.1371/journal.pone.0182054.
- Peters, M.K., Peisker, J., Steffan-Dewenter, I. & Hoiss, B. (2016) Morphological traits are linked to the cold performance and distribution of bees along elevational gradients. *Journal of Biogeography*, **43**, 2040–2049. DOI:10.1111/jbi.12768.
- Pinto, A.R., Silveira, G.D.C., Gaglianone, M.C. & Freitas, L. (2019) Abrupt decrease in the diversity of Euglossini bees (Hymenoptera: Apidae) in a montane rainforest. *Journal of Apicultural Research*, **58**, 682–693. DOI: 10.1080/00218839.2019.1637223.
- Potts, S.G., Biesmeijer, J.C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O. & Kunin, W.E. (2010) Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology and Evolution*, **25**, 345–353. DOI: 10.1016/j.tree.2010.01.007.
- R Core Team. (2022) *R: A language and environment for statistical computing version 4.2.1*. <https://cran.r-project.org/bin/windows/base/>.

- Rahbek, C. (1995) The elevational gradient of species richness: A uniform pattern? *Ecography*, **18**, 200–205. DOI:10.1111/j.1600-0587.1995.tb00341.
- Rahbek, C. (2005) The role of spatial scale and the perception of large-scale species richness patterns. *Ecology Letters*, **8**, 224–239. DOI:10.1111/j.1461-0248.2004.00701.x.
- Ramos, D.M., Diniz, P. & Valls, J.F.M. (2014) Habitat filtering and interspecific competition influence phenological diversity in an assemblage of Neotropical savanna grasses. *Brazilian Journal of Botany*, **37**, 29–36. DOI:10.1007/s40415-013-0044-z.
- Rebêlo, J.M.M. & Garófalo, C.A. (1991) Diversidade e sazonalidade de machos de Euglossini (Hymenoptera, Apidae) e preferências por iscas-odores em um fragmento de floresta no sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Biologia*, **51**, 787–799.
- Rech, A.R. & Brito, V.L.G. (2012) Extreme pollination mutualisms: Natural history and evolutionary trends. *Oecologia Australis*, **16**, 297–310. DOI:10.4257/oeco.2012.1602.08.
- Ribeiro, J.F. & Walter, B.M.T. (1998) Fitofisionomias do bioma cerrado. In *Cerrado: ambiente e flora* (ed. by S.M. Sano & S.P. Almeida). Embrapa- Cpac, Planaltina, pp.89-168.
- Ribeiro, S.P., Carneiro, M.A.A. & Fernandes, G.W. (1998) Free-feeding insect herbivores along environmental gradients in Serra do Cipó: basis for a management plan. *Journal of Insect Conservation*, **2**, 107–118.
- Rocha-Filho, L.C., Krug, C., Silva, C.I., & Garófalo, C.A. (2012) Floral resources used by Euglossini bees (Hymenoptera: Apidae) in coastal ecosystems of the atlantic forest. *Psyche: A Journal of Entomology*, 934–951. DOI: 10.1155/2012/934951.
- Roubik, D.W. & Hanson, P.E. (2004) *Orchids bees of tropical America: Biology and field guide*. Heredia: INBio Press, San José, CR.
- Santos, F.M., Beiroz, W., Antonini, Y., Rodriguez S.M., Quesada, M. & Fernandes, G.W. (2020) Structure and composition of the euglossine bee community along an elevational gradient of rupestrian grassland vegetation. *Apidologie*, **51**, 675–687. DOI: 10.1007/s13592-020-00752-7.
- Santos-Junior, J.E., Ferrari, R.R. & Nemésio, A. (2014) The orchid-bee fauna (Hymenoptera Apidae) of a forest remnant in the southern portion of the Brazilian Amazon. *Brazilian Journal of Biology*, **74**, 184-190. DOI: 10.1590/1519-6984.25712
- Silva, D.P. & Marco, P. (2014) No evidence of habitat loss affecting the orchid bees *Eulaema nigrita* Lepeletier and *Eufriesea auriceps* Friese (Apidae: Euglossini) in the Brazilian cerrado savanna. *Neotropical Entomology*, **43**, 509–518. DOI:10.1007/s13744-014-0244-7

- Silva, I.A., Silva, D.M. & Carvalho, G.H., Batalha, M.A. (2011) Reproductive phenology of brazilian savannas and riparian forests: environmental and phylogenetic issues. *Annals of Forest Science*, **68**, 1207–1215. DOI 10.1007/s13595-011-0071-5.
- Silveira, F.A. & Cure, J.R. (1993) High Altitude bee fauna of southeastern Brazil: Implications for biogeographic patterns (Hymenoptera: Apoidea). *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, **28**, 47-55. DOI:10.1080/01650529309360887
- Silveira, F.A.O., Barbosa, M., Beiroz, W., Callisto, M., Macedo, D.R., Morellato, L.P.C., Neves, F.S., *et al.* (2019) Tropical mountains as natural laboratories to study global changes: a long-term ecological research project in a megadiverse biodiversity hotspot. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, **38**, 64–73. DOI:10.1016/j.ppees.2019.04.001.
- Silveira G.C., Freitas R.F., Tosta T.H.A., Rabelo L.S., Gaglianone M.C. & Augusto S.C. (2015) The orchid bee fauna in the brazilian savanna: do forest formations contribute to higher species diversity? *Apidologie*, **46**, 197–208. DOI: 10.1007/s13592-014-0314-1.
- Sousa, F.G., Santos, J.S., Martello, F., Diniz, M.F., Bergamini, L.L., Ribeiro, M.C., Collevatti, R.C. & Silva, D.P. (2022) Natural habitat cover and fragmentation per se influence orchid-bee species richness in agricultural landscapes in the brazilian cerrado. *Apidologie*, **53**, 20–36. DOI: 10.1007/s13592-022-00925-6
- Stabentheiner, A., Vollmann, J., Kovac, H. & Crailsheim, K. (2003) Oxygen consumption and body temperature of active and resting honeybees. *Journal of Insect Physiology*, **49**, 881–889. DOI: 10.1016/S0022-1910(03)00148-3.
- Tello, J.S., Myers, J.A., Macía, M.J., Fuentes, A.F., Cayola, L., Arellano G, Loza, M.I. *et al.* (2015) Elevational gradients in β -diversity reflect variation in the strength of local community assembly mechanisms across spatial scales. *Plos One*, **10**, e0121458. DOI:10.1371/journal.pone.0121458
- Thornton, J.M., Palazzi, E., Pepin, N.C., Cristofanelli, P., Essery, R., Kotlarski, S., Giuliani, G., *et al.* (2021) Toward a definition of essential mountain climate variables. *One Earth*, **4**, 805–827. DOI:10.1016/j.oneear.2021.05.005.
- Torné-Noguera, A., Rodrigo, A., Arnan, X., Osorio, S, Barril-Graells, H., Rocha-Filho, L.C. & Bosch, J. (2014) Determinants of spatial distribution in a bee community: nesting resources, flower resources, and body size. *Plos One*, **9** e97255.
- Viana, T.A., Martins, F.M., & Lourenço, A.P. (2021) The orchid bee fauna (Hymenoptera: Apidae: Euglossini) of a Neotropical savanna: an efficient protocol to assess bee community and diversity along elevational and habitat complexity gradients. *Neotropical Entomology*, **50**, 748–758. DOI:10.1007/s13744-021-00899-7.
- Vilhena, O., Rocha, L.J. & Garofalo, C.A. (2017) Male orchid bees (Hymenoptera: Apidae: Euglossini) in canopy and understory of Amazon varzea floodplain forest: I. microclimatic, seasonal and faunal aspects. *Sociobiology*, **64**, 191–201.

- Viotti, M.A., Moura, F.R. & Lourenço, A.P. (2013) Species diversity and temporal variation of the orchid-bee fauna (Hymenoptera, Apidae) in a conservation gradient of a rocky field area in the Espinhaço range, state of Minas Gerais, southeastern Brazil. *Neotropical Entomology*, **42**, 565–575. DOI:10.1007/s13744-013-0164-y.
- Warming, E. (1892) *Lagoa Santa: Et Bidrag til den biologiske Plantegeografi Kgl. Danske Vidensk. Selsk. Skr., Række, naturvidensk. og math. Afd 6(3)* Kjøbenhavn, Bianco Lunos Kgl. Hof-Bogtrykkeri.
- Zimmermann, Y., Schorkopf, D.L.P., Moritz, R.F.A., Pemberton, R.W., Quezada-Euan, J.J.G. & Eltz, T. (2011) Population genetic structure of orchid bees (Euglossini) in anthropogenically altered landscapes. *Conservation Genetics*, **12**, 1183–1194. DOI:10.1007/s10592-011-0221-1.

Material complementar

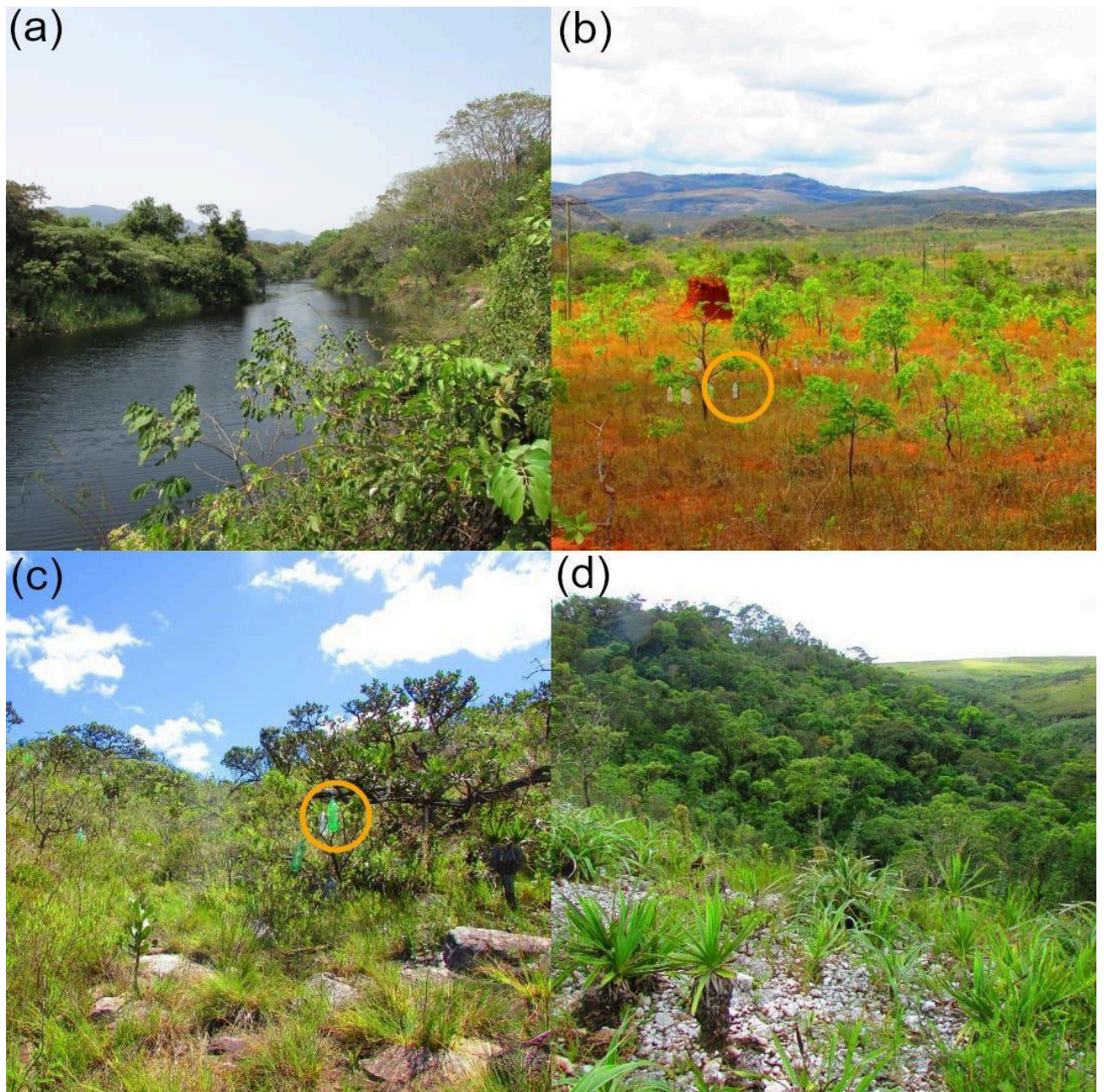


Figura S1: As principais fitofisionomias presentes na área de estudo, na Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil: (a) vegetação ripária ao longo do rio Cipó a 800m altitude; (b) vegetação xérica de Cerrado a 900m altitude; (c) vegetação xérica do ecossistema de Campo Rupestre a 1.200m altitude na Reserva Vellozia; (d) vegetação de mata nebulosa (ao fundo) e de Campo Rupestre (no primeiro plano) a 1400m altitude. O círculo laranja destaca as armadilhas em campo.

Tabela S1. Valores médios de temperatura, umidade relativa do ar e precipitação nas estações chuvosas (janeiro-abril) e secas (julho-outubro) dos anos de 2018 a 2019 fornecidos pelas estações meteorológicas do PELD-CRSC em habitats xéricos na Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil

Altitude (m)	Estação Chuvosa			Estação Seca		
	Temperatura °C	Umidade Relativa %	Precipitação	Temperatura °C	Umidade Relativa %	Precipitação
800	25,09	69,23	291,00	21,95	62,68	217,00
900	23,14	75,78	1060,37	20,85	67,54	137,40
1.000	21,16	75,84	336,60	18,71	67,38	77,80
1.100	22,71	77,48	273,60	18,68	73,77	144,61
1.200	22,55	79,10	910,61	19,19	73,27	251,20
1.300	20,53	80,72	949,74	18,16	72,77	160,20
1.400	19,15	91,60	1075,04	16,37	85,19	208,40

Tabela S2. Valores dos índices de NDVI durante as estações chuvosa e seca nos habitats méxicos e xéricos na Serra do Cipó para os períodos de setembro 2019 e janeiro 2020, Minas Gerais, Brasil.

México					Xérico				
Altitude (m)	Latitude	Longitude	NDVI Estação chuvosa	NDVI Estação seca	Altitude	Latitude	Longitude	NDVI Estação chuvosa	NDVI Estação seca
761	-19,346056	-43,640444	0,5982	0,5999	823	-19,350135	-43,616175	0,6031	0,4355
789	-19,346611	-43,638694	0,5922	0,4875	844	-19,326722	-43,640278	0,5170	0,5392
797	-19,345028	-43,634444	0,6988	0,6239	856	-19,318500	-43,642556	0,6009	0,5271
991	-19,262556	-43,605361	0,5300	0,3464	995	-19,262528	-43,602917	0,4313	0,2520
970	-19,274222	-43,606167	0,5515	0,4158	1008	-19,272444	-43,602278	0,4317	0,3291
943	-19,268750	-43,606250	0,5292	0,4151	984	-19,277917	-43,606222	0,4726	0,3574
1.076	-19,253556	-43,584472	0,4110	0,2942	1019	-19,261639	-43,589444	0,4682	0,3808
992	-19,265750	-43,597250	0,5837	0,4794	1057	-19,251806	-43,585861	0,4220	0,3292
988	-19,263222	-43,587944	0,5587	0,4483	1013	-19,270250	-43,597639	0,4974	0,3919
1.112	-19,230861	-43,575722	0,4925	0,3805	1115	-19,231583	-43,578028	0,4499	0,3573
1.143	-19,220056	-43,579306	0,5793	0,4905	1180	-19,222556	-43,580667	0,4342	0,3466
1.114	-19,227250	-43,575750	0,5236	0,4323	1087	-19,234278	-43,580111	0,4431	0,3564
1.153	-19,288222	-43,557861	0,3742	0,3021	1169	-19,291306	-43,556472	0,5132	0,3979
1.236	-19,292111	-43,568361	0,5045	0,3632	1224	-19,289028	-43,564306	0,3691	0,2859
1.162	-19,290222	-43,553722	0,5286	0,4443	1197	-19,270056	-43,552556	0,3744	0,3128
1.186	-19,281278	-43,587611	0,5106	0,3935	1204	-19,285972	-43,587417	0,3822	0,3096
1.159	-19,286889	-43,591639	0,4186	0,3308	1155	-19,280944	-43,590444	0,4655	0,3338
1.133	-19,283333	-43,592389	0,4561	0,3679	1183	-19,286333	-43,594944	0,4127	0,3222
1.340	-19,254756	-43,552547	0,5844	0,5032	1340	-19,259817	-43,549956	0,4845	0,3863
1.370	-19,254561	-43,543669	0,5194	0,4409	1391	-19,247744	-43,544606	0,3127	0,2491
1.355	-19,259267	-43,541864	0,5513	0,4337	1387	-19,254656	-43,540211	0,4407	0,3155

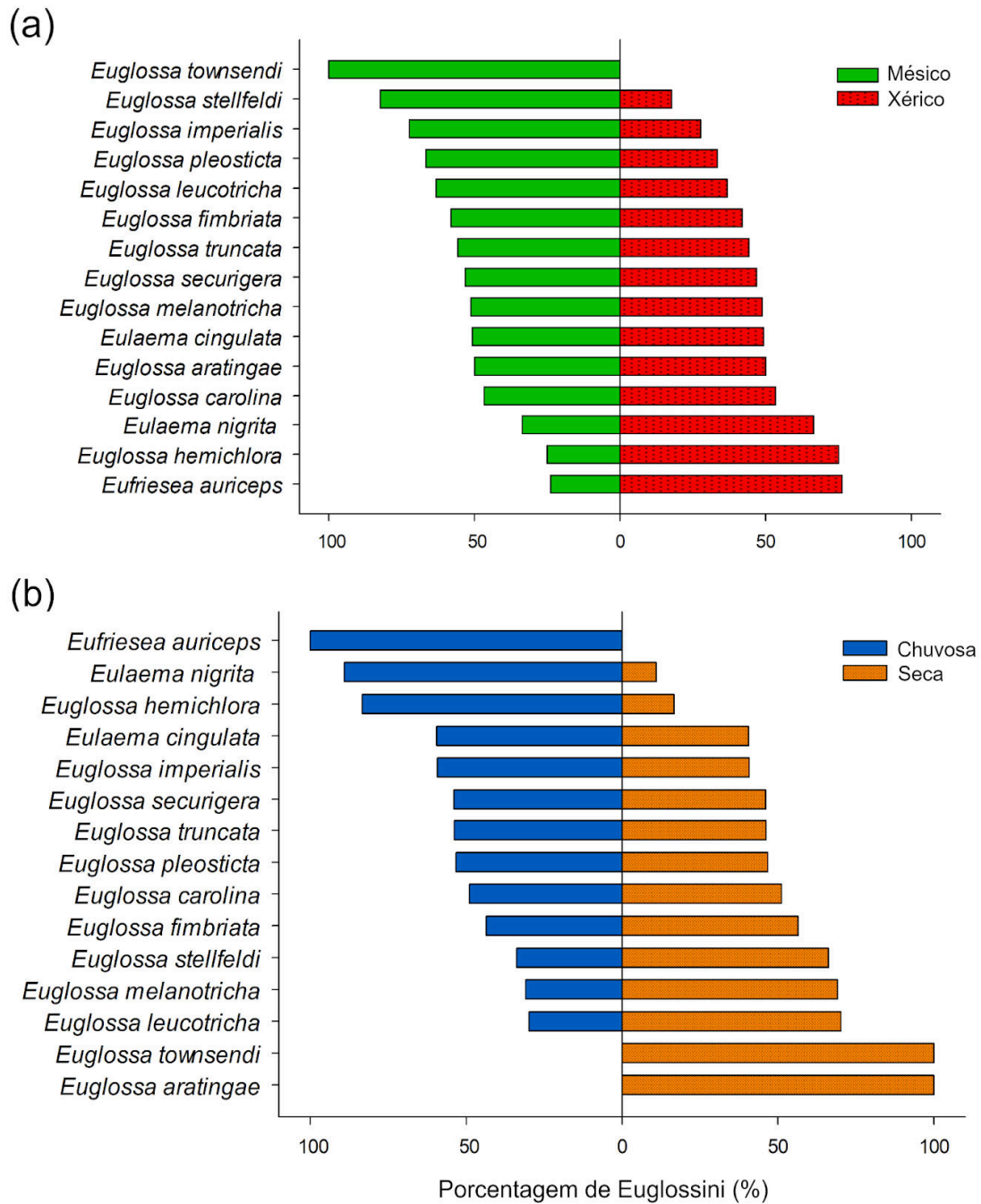


Figura S2. Porcentagem de ocorrências por espécie de acordo com (a) habitat (xérico ou méxico) e (b) estação (chuvosa ou seca) na Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil.

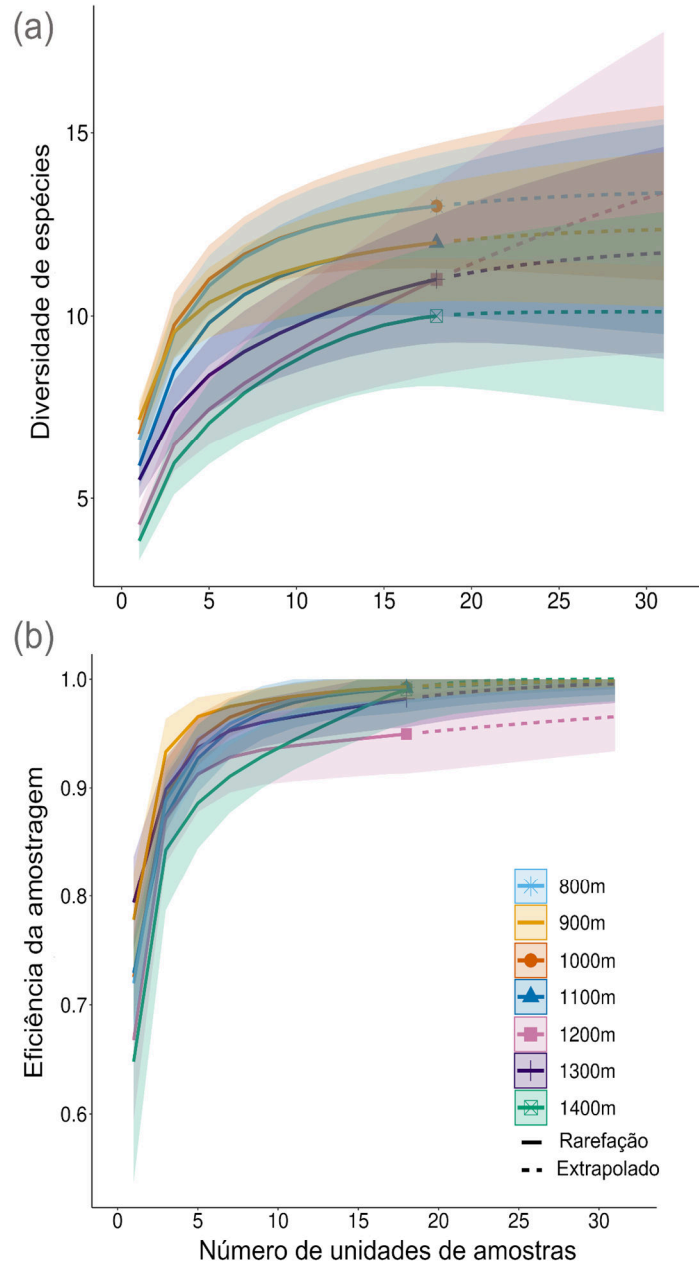


Figura S3. (a) Curvas de rarefação da riqueza de abelhas Euglossini em sete faixas de elevação amostradas na Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil. A linha cheia representa a riqueza interpolada enquanto a linha pontilhada representa a riqueza calculada por extrapolação. (b) Eficiência da amostragem encontradas para coletas nas faixas altitudinal nas faixas altitudinal 800m (Eficiência da amostragem = 0,993, espécies observadas = 13), 900m (Eficiência da amostragem = 0,993, espécies observadas = 12), 1000m (Eficiência da amostragem = 0,993, espécies observadas = 13), 1100m (Eficiência da amostragem = 0,992, espécies observadas = 12), 1200m (Eficiência da amostragem = 0,950, espécies observadas = 11), 1300m (Eficiência da amostragem = 0,982, espécies observadas = 11), e 1400m (Eficiência da amostragem = 0,990, espécies observadas = 10)

Tabela S4. Resultados dos modelos lineares generalizados mistos (GLMMs) para testar o efeito da altitude combinado com o habitat e estação para explicar a riqueza e abundância de abelhas Euglossini, e o efeito do habitat e estação sobre a estrutura da comunidade de abelhas Euglossini desconsiderando o efeito do gradiente altitudinal. Modelos nos quais foram constatadas superdispersão na utilização da distribuição de Poisson, foram corrigidos com distribuição binomial negativa. d.f. = Graus de liberdade. *Representa a diferença estatística.

Variáveis resposta	Variáveis fixas	Variáveis randômicas	Família	desvio	d.f.	p-value
Riqueza de Euglossini	Altitude	Réplica	Poisson	339.0	77	<0,001*
	Altitude:Habitat			335.5	75	0,110
	Altitude:Estação			337.1	75	0,524
	Altitude:Habitat:Estação			330.0	71	0,752
Abundância de Euglossini	Altitude	Réplica	Negative Binomial	786.06	76	0,080
	Altitude:Habitat			785.1	74	0,359
	Altitude:Estação			782.8	74	0,349
	Altitude:Habitat:Estação			777.0	70	0,778
Riqueza de Euglossini	Habitat	Réplica +	Poisson	349.2	76	0,245
	Estação	Altitude		349.2	76	0,245
	Habitat:Estação			344.7	74	0,041*
Abundância de Euglossini	Habitat	Réplica +	Negative Binomial	782.5	75	0,612
	Estação	Altitude		778.8	75	0,042
	Habitat:Estação			768.2	73	<0,001*

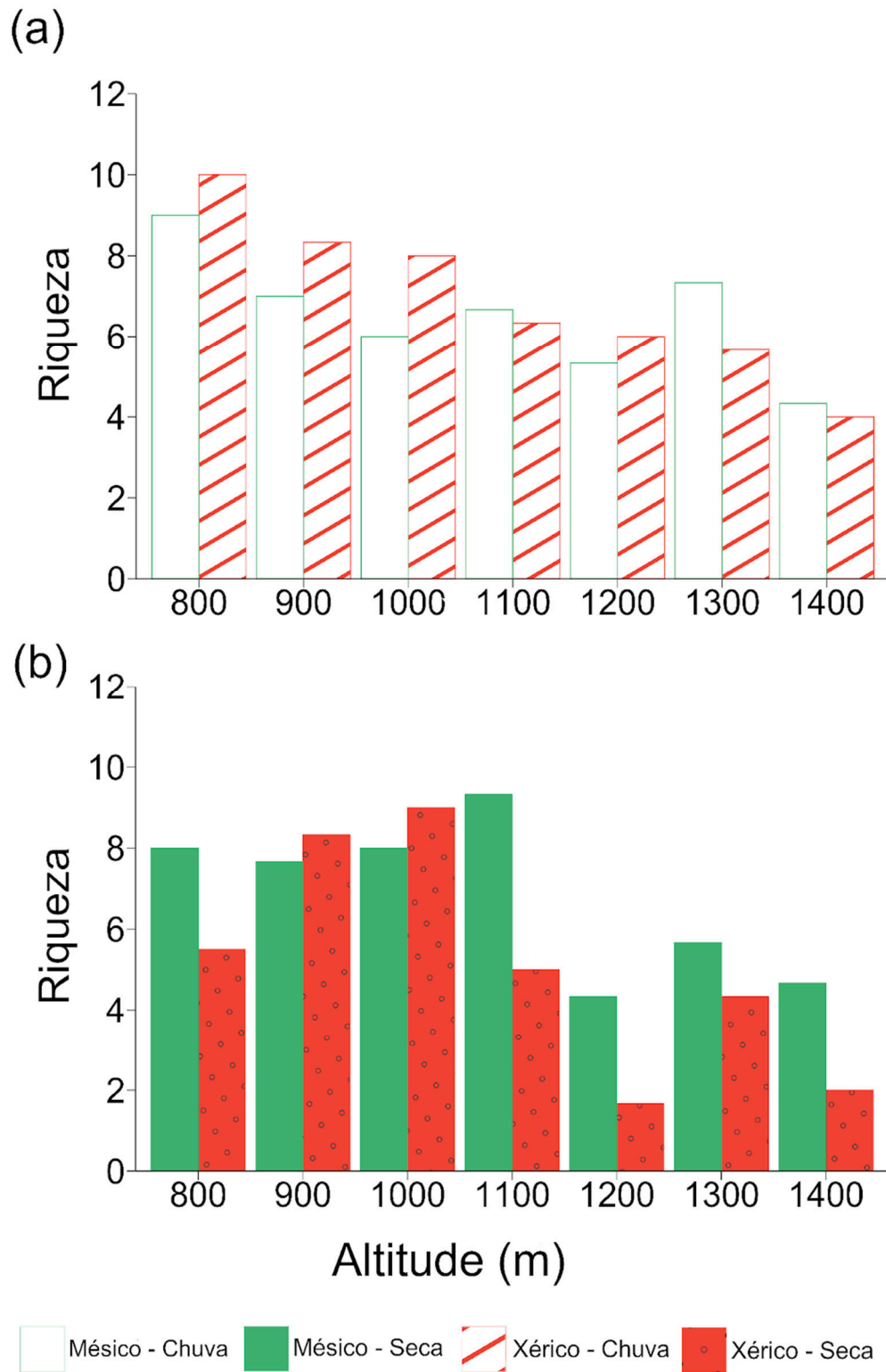


Figura S4. Riqueza de abelhas Euglossini referente a habitats mésicos e xéricos por altitude durante a estação chuvosa (a) e seca (b) na Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil.

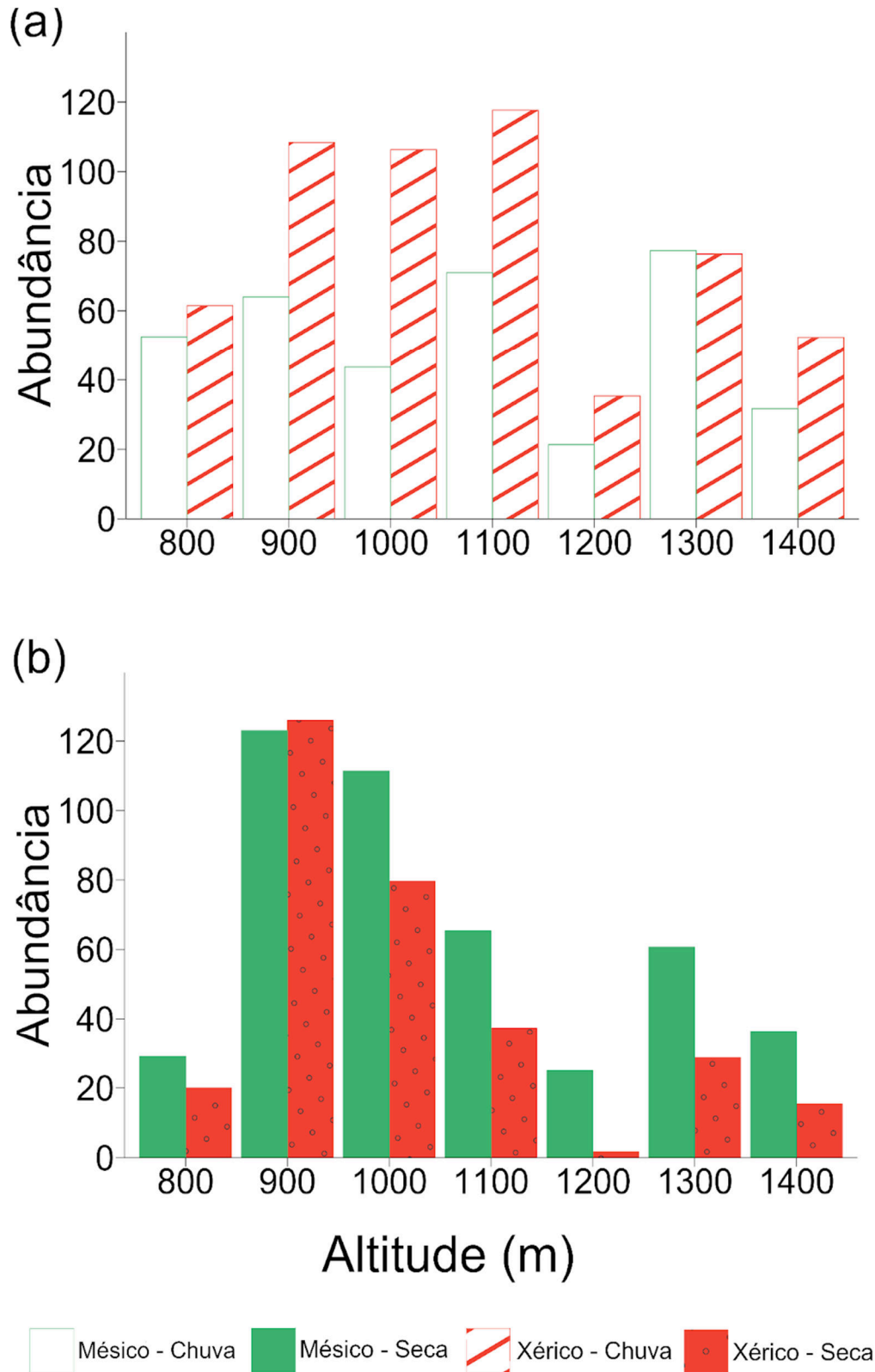


Figura S5. Abundância de abelhas Euglossini nos habitats mésicos e xéricos por altitude durante a estação chuvosa (a) e seca (b) na Serra do Cipó, Minas Gerais, Brasil.

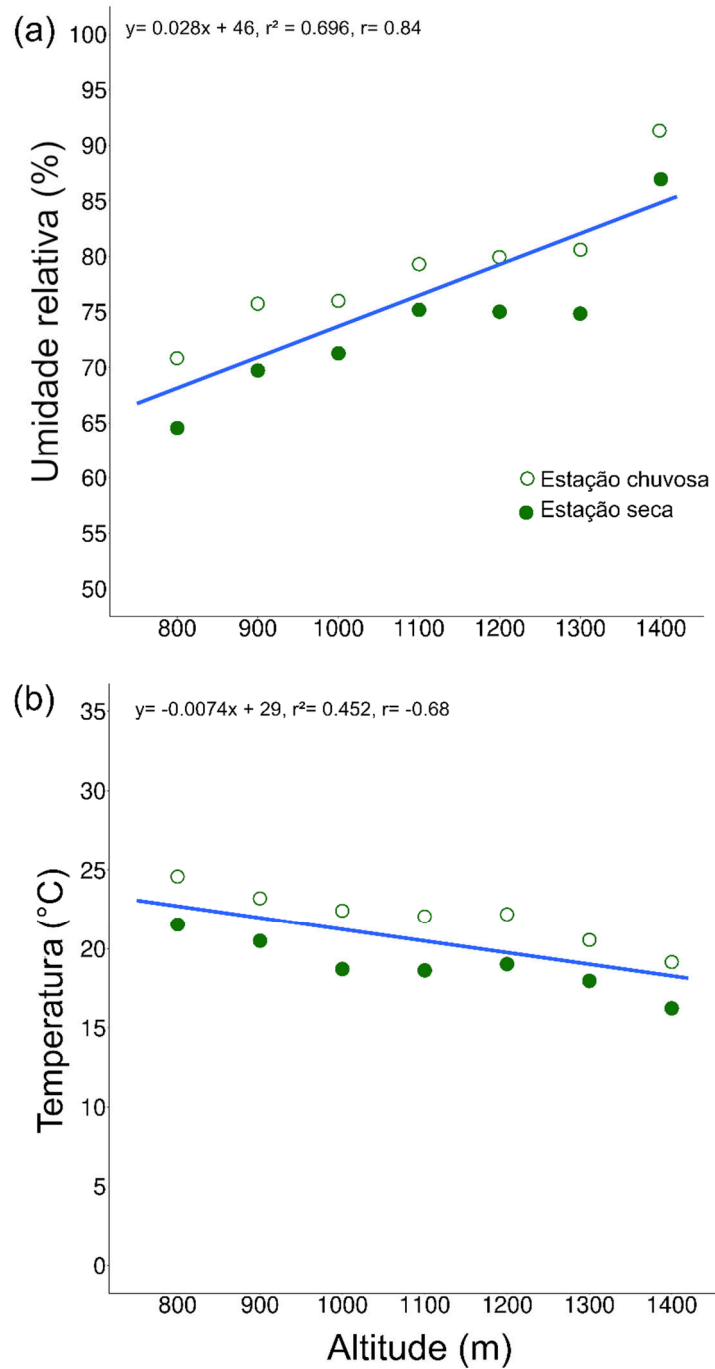


Figura S6. Correlations between elevation and environmental variables. (a) Mean air relative humidity (b) Mean air temperature. Air humidity and relative humidity increase with elevation and temperature decrease with elevation. All presented Pearson correlations are significant under $\alpha = 0.05$. Δ is the coefficient of variation while the other variables represent mean values. The coefficient of correlation is 0.84 for (a) and -0.68 for (b). Data of climatic variables sampled using meteorological monitoring towers during the period from January 2018 to December 2019 along an elevational gradient in Serra do Cipó, Minas Gerais, Brazil.

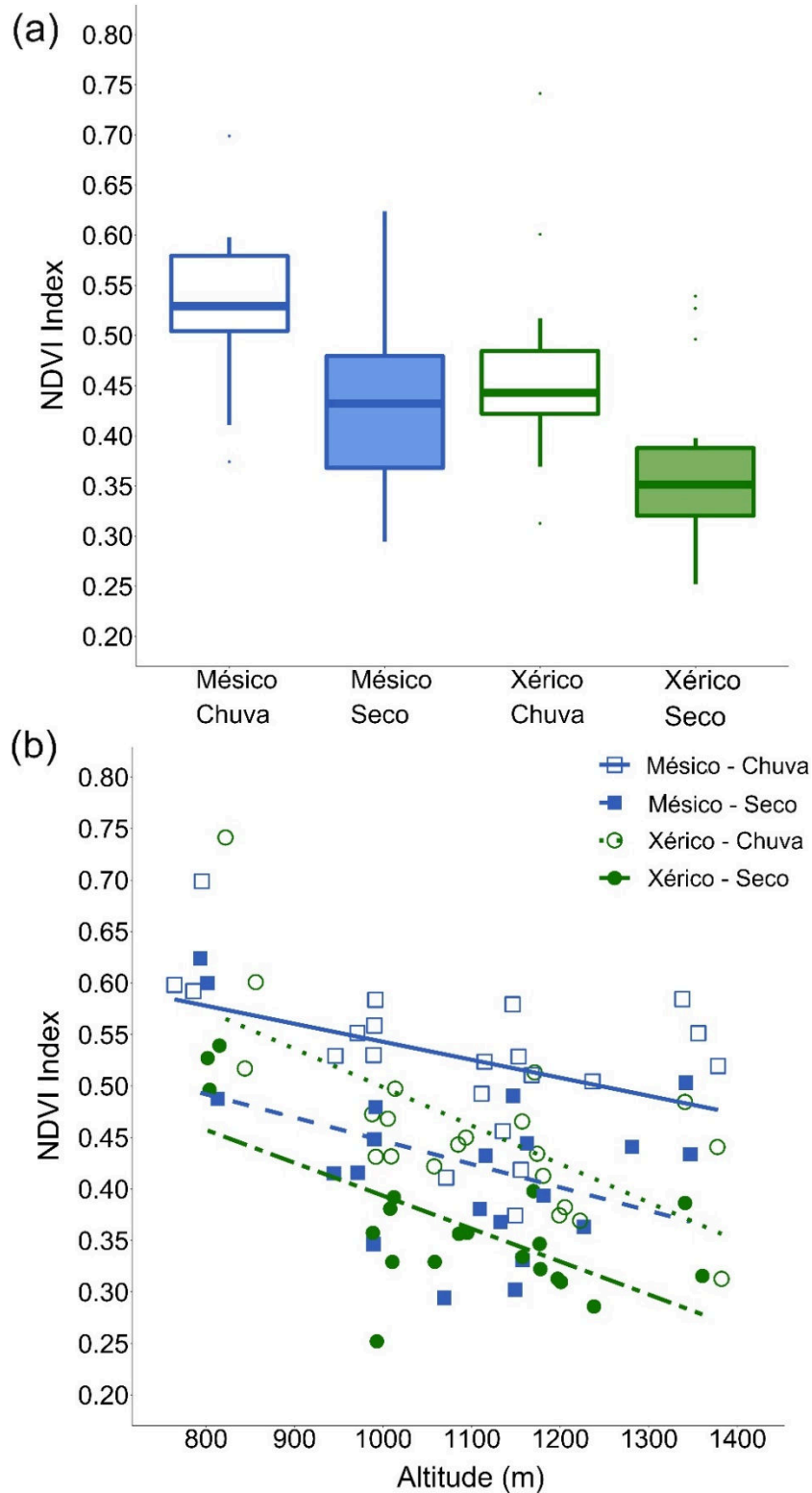


Figura S7. Os valores de NDVI para os tipos de habitat de acordo com a estação do ano (a) NDVI index ao longo do gradiente de altitude (b) na Serra do do Cipó, cordilheira do Espinhaço, Brasil. Os pontos representam os sítios amostrados (unidade amostral) com três por altitude entre estações seca e chuvosa. As regressões são: MésicRainy: $y = -1.75 \cdot 10^{-5}x + 7.18 \cdot 10^{-2}$; MésicDry: $y = 2.26 \cdot 10^{-4}x + 0.67$; XericRainy: $y = -3.73 \cdot 10^{-4} + 8.72 \cdot 10^{-1}$; XericDry: $y = -3.19 \cdot 10^{-4}x + 7.13 \cdot 10^{-1}$)

Tabela S5: Resultados dos modelos lineares generalizados mistos (GLMMs) para testar o efeito das variáveis climáticas e NDVI para explicar a riqueza e abundância de abelhas Euglossini em habitats xéricos, e o efeito do NDVI sobre a estrutura da comunidade de abelhas Euglossini em habitats méxicos. Modelos nos quais foram constatadas superdispersão na utilização da distribuição de Poisson, foram corrigidos com distribuição binomial negativa. d.f. = Graus de liberdade. *Representa a diferença estatística.

Variáveis respostas	Variáveis fixas	Variáveis randômicas	Família	Desvio	df	P-Value
Riqueza de abelhas Euglossini	Temperatura	Réplica	Poisson	175.9	37	0,005*
	Umidade relativa	Réplica		180.29	37	0,063
	Precipitação	Réplica		183.72	37	0,918
	NDVI (Xérico)	Ponto		189.18	37	0,018*
	NDVI (México)	Ponto		170.66	37	0,660
	Temperatura:Umidade relativa	Réplica		171.4	35	0,170
	Temperatura:Precipitação	Réplica		171.73	35	0,240
	Temperatura:NDVI (Xérico)	Réplica		178.83	35	0,915
	Umidade relativa:Precipitação	Réplica		176.91	35	0,307
	Umidade relativa:NDVI (Xérico)	Réplica		174.67	35	0,012*
	Precipitação:NDVI (Xérico)	Réplica		180.72	35	0,359
Abundância de abelhas Euglossini	Temperatura	Réplica	Negative Binomial	396.06	36	0,100
	Umidade relativa	Réplica		398.77	36	0,985
	Precipitação	Réplica		398.50	36	0,601
	NDVI (Xérico)	Ponto		423.95	36	0,230
	NDVI (México)	Ponto		392.7	36	0,301
	Temperatura:Umidade relativa	Réplica		395.0	34	0,240
	Temperatura:Precipitação	Réplica		396.00	34	0,822
	Temperatura:NDVI (Xérico)	Réplica		393.7	34	0,458
	Umidade relativa:Precipitação	Réplica		397.63	34	0,416
	Umidade relativa:NDVI (Xérico)	Réplica		397.94	34	0,440
	Precipitação:NDVI (Xérico)	Réplica		398.18	35	0,936

CONCLUSÃO GERAL

A tese traz importantes achados que podem auxiliar a compreender melhor os fatores envolvidos no desaparecimento das abelhas sociais e comerciais, como a abelha africanizada *Apis mellifera* e as abelhas nativas sem ferrão (meliponíneos), bem como, na modulação da diversidade das abelhas nativas solitárias a parassociais da tribo Euglossini.

No primeiro capítulo avaliamos a pressão de pragas e doenças sobre as perdas de colmeias manejadas e fatores sociais e ambientais que poderiam aumentar a incidência de infestações. Enquanto no segundo capítulo analisamos como os fatores ambientais interferem na distribuição das abelhas Euglossini, através das variações contidas num gradiente altitudinal, ambiental (xérico e méxico) e temporal (chuva e seca).

Os principais resultados encontrados no primeiro capítulo indicaram que cerca de 78% dos criadores de abelhas brasileiros identificaram alguma praga nas colmeias e cerca de 65% algum sintoma de doença, ou seja, a maioria das colmeias brasileiras apresentaram problemas sanitários. Além disso, as perdas de colmeias foram maiores na presença de pragas e doenças. Este foi o primeiro trabalho que avaliou simultaneamente a saúde das abelhas comerciais exóticas (*A. mellifera*) e nativas (abelhas sem ferrão) ao longo de todo território brasileiro, alcançando regiões que eram pouco documentadas, como o Nordeste. Ainda é necessário ampliar o conhecimento sobre as regiões Norte e Centro Oeste. Neste capítulo também observamos o risco do transbordamento de pragas e doenças entre espécies diferentes. A presença do besouro *Aethina tumida* que antes eram registrados apenas em colmeias de abelhas africanizadas, ou mesmo doenças bacterianas como a cria pútrida, tem sido encontrada em colmeias de abelhas sem ferrão, despertando assim novas preocupações e necessidades de contingência. Uma das possíveis razões para doenças bacterianas e fúngicas ocorrerem em abelhas sem ferrão é o uso de alimentação artificial produzida pela *A. mellifera*. Portanto, o capítulo também evidencia que algumas técnicas de manejo podem influenciar o aumento de pragas e doenças e mostra a importância da manutenção periódica para evitar maiores perdas. O papel das pragas e doenças não deve ser subestimado, pois pode implicar na

redução da produção de mel e demais produtos apícolas produzidos no Brasil, além de produtos agrícolas que dependem dos serviços de polinização das abelhas. Desta forma ainda são necessários mais estudos para aprofundar e monitorar as pragas e doenças nas colmeias.

Os principais resultados encontrados no segundo capítulo da tese evidenciam que as variações ambientais contidas no gradiente de altitude estudado é o principal fator que contribui para alterações na estrutura e composição das comunidades de abelhas solitárias das orquídeas. A riqueza de abelhas das orquídeas reduziu com aumento da altitude tanto para habitats méxicos quanto para xéricos, indicando que as maiores temperaturas e vegetação densa são as condições ótimas para a maioria destas abelhas. Além disso, durante a estação chuvosa, não houve diferença da riqueza e abundância de abelhas de Euglossini entre os habitats xéricos e méxicos, indicando que o aumento da floração e umidade observada nesta estação podem conferir condições ideais para que essas abelhas forragem entre as áreas, além de possível sincronia de polinizadores e plantas. Os habitats méxicos mantiveram a riqueza e abundância de espécies de abelhas entre estações do ano, enquanto os habitats xéricos sofreram redução de riqueza e abundância na estação seca, reforçando que as abelhas Euglossini são sensíveis a redução da umidade do ar, desta forma os habitats méxicos são uma importante fonte de recursos durante a estiagem. Este resultado auxilia a melhor compreensão da distribuição de abelhas Euglossini no bioma Cerrado. Ainda existem poucos estudos nesse bioma e ainda não havia sido avaliado comparativamente os ambientes méxicos e xéricos. Embora existam algumas espécies deste grupo de abelhas que possuam características morfológicas que permitem se deslocar livremente pela paisagem, nossos resultados indicaram que houveram substituições de espécies ao longo do gradiente de altitude. As espécies que se concentraram somente em uma faixa de altitude ou estação do ano podem estar mais susceptíveis às mudanças climáticas, enquanto as espécies que ocorrem em ambos os habitats por todo o gradiente poderão ser pouco afetadas, proporcionando um quadro de homogeneização das comunidades, porém ainda são necessários mais estudos para verificar este fato. Desta forma, este capítulo pela primeira vez, mostrou a diferença da composição de espécies entre habitats méxicos e xéricos ao longo do gradiente de altitude e enfatizou a necessidade de conservar estes ambientes pois têm papéis distintos ao longo do ano.

Em geral, os resultados presentes nesta tese contribuíram para preencher lacunas importantes dos fatores moduladores do desaparecimento das abelhas sociais e na diversidade de abelhas solitárias no Brasil. No primeiro capítulo destaca que os parasitas e patógenos exercem uma forte influência nas perdas de colmeias sociais melíferas e na maioria das vezes pode estar associada ao uso de técnicas de manejo erroneamente executadas. Estas evidências devem ser detalhadas em estudos futuros através de análises *in-loco*. Enquanto no segundo capítulo, traz as evidentes mudanças na estrutura e composição das comunidades de abelhas Euglossini em resposta às variações de clima e vegetação observadas no gradiente altitudinal (800 a 1400 m) e nos diferentes habitats (mésico e xérico) durante as estações (chuvosa e seca). Vegetações mais densas e umidade relativa do ar maior favorecem maior diversidade de espécies de Euglossini. Os resultados destacam também a relevância dos ambientes mésico na conservação destas espécies de Euglossini ao longo do gradiente altitudinal, especialmente durante os períodos mais secos do ano. Os resultados encontrados aqui poderão auxiliar na elaboração de planos de manejo que auxiliem na conservação dessas espécies de Euglossini nos habitats xéricos e mésico da Cadeia do Espinhaço, a segunda maior cadeia de montanhas da América do Sul, e a minimizar os possíveis efeitos de homogeneização das comunidades causadas pelas mudanças climáticas. Estas ações também serão essenciais para a preservação de espécies de plantas endêmicas presentes na Cadeia do Espinhaço, uma vez que a tribo de abelhas Euglossini é um importante polinizador de muitas dessas espécies.

REFERÊNCIAS

- Andrews, E. (2019) To save the bees or not to save the bees: honey bee health in the Anthropocene. *Agriculture and Human Values*, **36**, 891–902.
- Ascher, J. S. & Pickering, J. (2020) Discover Life bee species guide and world checklist (Hymenoptera: Apoidea: Anthophila). Disponível em: <http://www.discoverlife.org/mp/20q?guide=Apoidea_species>. Acesso em: 14, maio de 2022
- Bawa, K.S. (1990). Plant-pollinator interactions in tropical rain forests. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **21**, 299–422.
- Bernauer, O.M., Tierney, S.M. & Cook, J.M. (2022) Efficiency and effectiveness of native bees and honey bees as pollinators of apples in New South Wales orchards. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **337**, 108063.
- BPBES/REBIPP (2019) Relatório temático sobre Polinização, Polinizadores e Produção de Alimentos no Brasil. Wolowski, M., Agostini, K., Rech, A.R., Varassin, I.G., Maués, M., Freitas, L., Carneiro, L.T., Bueno, R.O., Consolaro, H., Carvalheiro, L., Saraiva, A.M., Silva, C.I., Padgurschi, M.C.G. (Eds.). 1ª edição, São Carlos, SP: Editora Cubo. 184 pp.
- Brodtschneider, R. & Crailsheim, K. (2010) Nutrition and health in honey bees. *Apidologie*, **41**, 278–294.
- Burkle, L.A., & Alarcón, R., (2011) The future of plant-pollinator diversity: understanding interaction networks across time, space, and global change. *American Journal of Botany*, **98**, 528–538.
- Carvalho, S., Roat, T., Pereira, A.M. (2012) Losses of Brazilian bees: an overview of factors that may affect these pollinators. *Julius-Kuhn-Archiv*, **437**, 159-166. DOI:10.5073/jka.2012.437.043
- Castilhos, D., Bergamo, G.C., Gramacho, K.P. & Goncalves, L.S. (2019) Bee colony losses in Brazil: a 5-year online survey. *Apidologie*, **50**, 263–272.
- Castilhos, D., Bergamo, G.C. & Kastelic, J.P. (2021). Honey bee colony losses in Brazil in 2018–2019. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, **4**, 5017–5041.
- Chen, Y., Evans, J. & Feldlaufer, M. (2006) Horizontal and vertical transmission of viruses in the honey bee, *Apis mellifera*. *Journal of Invertebrate Pathology*, **93**, 152-159.
- Conte, Y.L., Ellis M. & Ritter, W. (2010). Varroa mites and honey health: can Varroa explain part of the colony losses? *Apidologie*, **41**, 353-363.
- Cortopassi-Laurino, M, Imperatriz-Fonseca, V.L., Roubik, D.W., Dollin, A., Heard, T., Aguilar, I., (2006). Global meliponiculture: challenges and opportunities. *Apidologie*, **37**, 275–92.

- Costa, L.G.L., Barchuk, A.R. & Teixeira, I.R.V. (2020) Effects of the neonicotinoid imidacloprid on the feeding behavior of *Melipona quadrifasciata anthidioides* lep. *Revista Agrogeoambiental*, **12**, 16-25.
- Costanza, R., d' Arge, R., Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeen, S., O'Neill, R.V., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P. & Van den Belt, M. (1998) The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, **25**, 3–15.
- Crane, E. & Visscher P.K. (2009) Honey. In *Encyclopedia of insects* (ed by Resh, V., Cardé, R.), Academic Press: San Diego, CA, USA. pp.459-461.
- Cunningham, M.M., Tran, L., McKee, C.G., Polo, R.O., Newman, T., Lansing, L., Griffiths, J.S. et al (2022) Honey bees as biomonitors of environmental contaminants, pathogens, and climate change. *Ecological Indicators*, **134**, 108457.
- Danforth, B.N., Minckley, R.L., Neff, J.L. & Fawcett, F. (2019) *The Solitary Bees: Biology, Evolution, Conservation*. Princeton University Press, Princeton, Nova Jersey, EUA.
- D'Avila, M., & Marchini, L.C. (2013) Polinização realizada por abelhas em culturas de importância econômica no Brasil. *Boletim De Indústria Animal*, **62**, 79-90.
- Dellinger, A.S. (2020) Pollination syndromes in the 21 st century: where do we stand and where may we go? *New Phytologist*, **228**, 1193–1213.
- Dolezal, A.G. & Toth, A.L. (2018) Feedbacks between nutrition and disease in honey bee health. *Current Opinion in Insect Science*, **26**, 114-119.
- Durazzo, A., Lucarini, M., Plutino, M., Lucini, L., Aromolo, R., Martinelli, E., Souto, E.B., Santini, A. & Pignatti, G. (2021) Bee Products: A representation of biodiversity, sustainability, and health. *Life*, **11**, 938-970.
- Fahrenholz, L., Lamprecht, I. & Schricker B. (1989) Thermal investigations of a honey bee colony: thermoregulation of the hive during summer and winter and heat production of members of different bee castes. *Journal of Comparative Physiology B*, **159**, 551-560.
- Faleiro, F. V., Nemésio, A., Loyola, R. (2018) Climate change likely to reduce orchid bee abundance even in climatic suitable sites. *Global Change Biology*, **24**, 2272-2283.
- Faria, L.R.R. & Silveira, F.A. (2011) A fauna de abelhas euglossinas (Hymenoptera, Apidae) em uma área central do cerrado, Brasil: importância das florestas ripárias como corredores para espécies de abelhas associadas a florestas. *Biota Neotropical*, **11**, 87–94.
- Fernandes, G.W., Almeida, H.A., Nunes, C.A., Xavier, J.H.A., Cobb, N.S., Carneiro, M.A.A., Cornelissen, T., et al. (2016) Cerrado to rupestrian grasslands: patterns of species distribution and the forces shaping them along an altitudinal gradient. In *Ecology and conservation of mountaintop grasslands in Brazil* (ed. by Fernandes, G.W.), Springer Nature, Chan CH, pp. 345–377.

- Field, R.; Hawkins, B.A.; Cornell, H.V.; Currie, D.J.; Diniz-Filho, A.F.; Guégan, J.F.; Kaufman D.M.; Kerr, J.T.; Mittelbach, G.G.; Oberdorff, T.; O'Brien, E.M.; Turner, J.R.C. (2009) Spatial species-richness gradients across scales: a meta-analysis. *Journal of Biogeography*, **36**, 132–147.
- Francis, R.M., Nielsen, S.L. & Kryger, P. (2013) Varroa-virus interaction in collapsing honey bee colonies. *Plos one*, **8**, e57540.
- Gazzoni, D.L., Barateiro, J.V.G.R.P. & Santos, P.R. (2022) Supplemental bee pollination effect on the productivity of soybean grown in a low yield potential condition. *Journal of Apicultural Research*, **60**, 359-521.
- Giannini, T.C., Acosta, A.L., Garófalo, C.A., Saraiva, A.M., Santos, I.A. & Imperatriz-Fonseca, V.L. (2012) Pollination services at risk: Bee habitats will decrease owing to climate change in Brazil. *Ecological Modelling*, **244**, 127– 131.
- Gonçalves, L. S., Stort, A. C., & De Jong, D. (2019) Development of brazilian apiculture. In *The african honey bee*. (ed. by Spivak, M., Fletcher, D.J.C., Breed, M.D). Taylor & Francis, New York, EUA, pp. 1-14.
- González-Varo, J.P.; Biesmeijer, J.C., Bommarco, R., Potts, S.G., Schweiger, O., Smith, H.G., Steffan-Dewenter, I., *et al.* (2013). Combined effects of global change pressures on animal-mediated pollination. *Trends in Ecology & Evolution*, **28**, 524–530
- Goulson, D., Nicholls, E., Botias, C., & Rotheray, E. L. (2015) Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science*, **347**, 1255957–1255957.
- Gray, A., Brodschneider, R., Adjlane, N., Ballis, A., Brusbardis, V., Charrière, J.D., *et al.* (2019) Loss rates of honey bee colonies during winter 2017/18 in 36 countries participating in the COLOSS survey, including effects of forage sources. *Journal of Apicultural Research*, **58**, 1–7.
- Hamblin, J., Barbetti, M. J., Stefanova, K., Blakeway, F., Clements, J., Cowling, W., *et al.* (2018) Crop breeding to break nexus between bee decline/food production? *Global Food Security*, **19**, 56–63.
- Hawkins, B.A., Rodriguez, M.A. & Weller, S.G. (2011) Global angiosperm family richness revisited: linking ecology and evolution to climate. *Journal of Biogeography*, **38**, 1253–1266.
- Hristov, P., Shumkova, R., Palova, N., Neov, B. (2021) Honey bee colony losses: why are honey bees disappearing? *Sociobiology*, **68**, e5851.
- ICMBio (2018) Instituto Chico Mendes de Conservacao da Biodiversidade - Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extincao, Volume VII, Invertebrados, ICMBio/MMA Brasilia, pp.730.

- Imperatriz-Fonseca, V. L., Canhos, D. A. L., Alves, D. A. A., Saraiva, A. M. (2012). Polinizadores no Brasil: contribuição e perspectivas para a biodiversidade, uso sustentável, conservação e serviços ambientais. São Paulo. EDUSP, pp.488.
- IBGE (2020) Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa pecuária municipal. Produção de origem animal. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?=&t=destaques> > Acesso em: 19 de julho de 2022.
- Jaffé, R., Pope, N., Carvalho, A.T., Maia, U.M., Blochtein, B., Carvalho, C.A.L. (2015) Bees for development: brazilian survey reveals how to optimize stingless beekeeping. *Plos One*, **10**, e0121157.
- Kearns, C.A., Inouye D.W., Waser, N.M. (1998). Endangered mutualisms: the conservation of plant-pollinator interactions. *Annual Review of Ecology and Systematics*, **29**, 83-112.
- 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.
- Leal, I.R., Lopes, A.V., Machado, I.C. & Tabarelli, M. (2017) Plant–Animal Interactions in the Caatinga: Overview and Perspectives. In *Caatinga* (ed. by Silva, J. M. C., Leal, I. R., Tabarelli, M.) Springer, Cham. pp.255–278.
- LeBuhn, G. & Luna, J.V. (2021) Pollinator decline: what do we know about the drivers of solitary bee declines? *Current Opinion in Insect Science*, **46**, 106–111
- Leite, M.D.S., Medeiros, A.C., Maracajá, P.B., Bezerra, K.K.S., Silva, M.G., Belchior, S.M.S., Meneses, H.R.F. *et al.* (2021) Production, marketing and export of bee products: an analysis of the performance of the brazilian northeast region. *Research, Society and Development*, **10**, e466101018897.
- Lewinsohn, T.M., Agostini, K, Freitas, A.V.L. & Melo, A.S. (2022) Insect decline in Brazil: an appraisal of current evidence. *Biology letters*, **18**, 20220219-20220219.
- Machado, A.C.P., Barônio, G.J., Oliveira. F.F., Garcia, C.T. & Rech, A.R. (2020) Does a coffee plantation host potential pollinators when it is not flowering? Bee distribution in an agricultural landscape with high biological diversity in the brazilian campo rupestre. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **101**, 2345-2354.
- Maggi, M., Antúnez, K., Invernizzi, C. Aldea, P. Vargas, M., Negri, P., Brasesco, C., *et al.* (2016) Honeybee health in South America. *Apidologie*, **47**, 835–854.
- McMahon, D.P., Natsopoulou, M.E., Doublet, V., Furst, M., Weging, S., Brown, M.J.F., Gogol-Doring, A. & Paxton, R.J.. (2016) Elevated virulence of an emerging viral genotype as a driver of honey bee loss. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **283**, 20160811.
- Meeus, I, Brown, M.J.F, Graaf, D.C. & Smagghe, G. (2011) Effects of invasive parasites on bumble bee declines. *Conservation Biology*, **25**, 662–671.

- Meeus, I., Pisman, M., Smaghe, G. & Piot N. (2018) Interaction effects of different drivers of wild bee decline and their influence on host–pathogen dynamics. *Current Opinion in Insect Science*, 136-141.
- Message, D., Teixeira, É.W. & De Jong, D. (2012) Situação da sanidade das abelhas no Brasil. In: *Polinizadores no Brasil: contribuição e perspectivas para a biodiversidade, uso sustentável, conservação e serviços ambientais* (e.d. by Fonseca, V.L.I., Canhps, D.A.L., Alves, D. De A., Saraiva, A.M). Edusp, São Paulo, BR, pp.237-256.
- Moracho, T.G., Heeb, P. & Lihoreu, M. (2017) Effects of parasites and pathogens on bee cognition. *Ecological Entomology*, **42**, 51–64.
- Moura, D.C. & Schindwein, C. (2009) Mata ciliar do Rio São Francisco como biocorredor para Euglossini (Hymenoptera: Apidae) de florestas tropicais úmidas. *Neotropical Entomology*, **38**, 281-284.
- Moura, M.E.K., Faita, M.R., Amandia, D.T.T., Bertoldo, J.G., Lima, V.P. & Poltronieri, A.S. (2022) Influence of some abiotic factors on the flight activity of stingless bees (Hymenoptera: Meliponini) in Southern Brazil, *Journal of Apicultural Research*, **61**, 2028968.
- Moure, J.S., Urban, D., & Melo, G.A.R. (Orgs). Catalogue of Bees (Hymenoptera, Apoidea) in the Neotropical Region. Disponível em: <<http://www.moure.cria.org.br/catalogue>>. Acesso em: 14 de julho de 2022.
- Monteiro, B.L., Camargo, M.G.G., Loiola, P.D.P., Carstensen, D.W., Gustafsson, S. & Morellato, L.P.C. (2021) Pollination in the campo rupestre: a test of hypothesis for an ancient tropical mountain vegetation. *Biological Journal of the Linnean Society*, **133**, 512-530.
- Michener, C.D. (2007) The bees of the world. Baltimore J. Hopkins University Press. 953 p.
- Nogueira-Neto, P. (1970) A criação das abelhas indígenas sem ferrão. Editora Nogueirapis, São Paulo, Tecnapis pp.445.
- Novais, S.M.A., Nunes, C.A., Santos, N.B., D`Amico, A.R., Fernandes, G.W., Quesada, M. & Neves, A.C.O. (2018) Correction: Effects of a possible pollinator crisis on food crop production in Brazil. *Plos One*, **13**, e0197396.
- Nunes, S. P. & Heindrickson, M. (2019) A cadeia produtiva do mel no Brasil: análise a partir do sudoeste Paranaense. *Brazilian Journal of Development*, **9**, 16950-16967.
- Ollerton, J, Winfree, R. & Tarrant, S. (2011) How many flowering plants are pollinated by animals?. *Oikos*, **120**, 321–326.
- Pemberton, R.W. & Wheeler, G.S. (2006). Orchid bees don't need orchids: evidence from the naturalization of an orchid bee in Florida. *Ecological Society of America*, **87**, 1995-2001.

- Pereira, F.W., Gonçalves, R.B. & Ramos, K.S. (2021) Bee surveys in Brazil in the last six decades: a review and scientometrics. *Apidologie*, **52**, 1152–1168.
- Potts, S.G., Biesmeijer, J.C., Kremen, C., Neumann, P. Schweiger, O. & Kunin, W.E. (2010) Global pollinator declines. *Trends, impacts and drivers*, **25**, 1–353.
- Potts, S.G., Imperatriz-Fonseca, V., Ngo, H.T., Aizen, M.A., Biesmeijer, J.C., Breeze, T.D. *et al.* (2016) Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*, **540**, 220–229.
- Pires, C.S.S., Pereira, F.M., Lopes, M.T.R., Nocelli, R.C.F., Malaspina, O., Pettis, J.S. & Teixeira, E.W. (2016) Weakness and collapse of bee colonies in Brazil: are there cases of CCD? *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, **51**, 422-442.
- Prado, A. & Borges, P.A.V. (2020) Worldwide importance of insect pollination in apple orchards: A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **293**, 106839.
- Rabeling, S.C., Lim, J.L., Tidon, R., Neff, J.L., Simpson, B.B. & Pawar, S. (2019) Seasonal variation of a plant-pollinator network in the Brazilian Cerrado: Implications for community structure and robustness. *Plos One*, **14**, e0224997.
- Renner, S.S. & Feil J.P. (1993) Pollinators of tropical dioecious Angiosperms. *American Journal of Botany*, **80**, 1100-1107.
- Rocha-Filho, L.C., Krug, C., Silva, C.I., & Garófalo, C.A. (2012) Floral resources used by Euglossini bees (Hymenoptera: Apidae) in coastal ecosystems of the atlantic forest. *Psyche: A Journal of Entomology*, 934–951.
- Santos, F.M., Beiroz, W., Antonini, Y., Rodriguez S.M., Quesada M. & Fernandes, G.W. (2020) Structure and composition of the euglossine bee community along an elevational gradient of rupestrian grassland vegetation. *Apidologie*, **51**, 675-687.
- Soroye, P., Newbold, T. & Kerr J. (2020) Climate change contributes to widespread declines among bumble bees across continents. *Science*, **367**, 685-688.
- Sánchez-Bayo, F., Goulson, D., Pennacchio, F., Nazzi, F., Goka, K., & Desneux, N. (2016) Are bee diseases linked to pesticides? — A brief review. *Environment International*, **89**, 7–11.
- Sherman, P.W., Seeley, T.D. & Reeve, H.K. (1998) Parasites, pathogens, and polyandry in honey bees. *The American Naturalist*, **151**, 392–396.
- Silva-Neto, C.M., Bergamini, L.L., Elias, M.A.S., Moreira, G.L., Morais, J.M., Bergamini, B.A.R., Franceschinelli, E.V. (2017) High species richness of native pollinators in Brazilian tomato crops. *Brazilian Journal of Biology*, **77**, 506-513.
- Silveira, F.A.O., Barbosa, M., Beiroz, W., Callisto, M., Macedo, D.R., Morellato, L.P.C., Neves, F.S., *et al.* (2019) Tropical mountains as natural laboratories to study global changes: a long-term ecological research project in a megadiverse biodiversity hotspot. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, **38**, 64–73

- The Plant List (2010) Disponível em: < <http://www.theplantlist.org/browse/A/>>. Acesso em: 08, junho de 2022
- Vaudo, A.D., Tooker, J. F., Grozinger, C.M. & Patch, H.M. (2015). Bee nutrition and floral resource restoration. *Current Opinion in Insect Science*, **10**, 133–141.
- Van Dulmen A. (2001) Pollination and phenology of flowers in the canopy of two contrasting rain forest types in Amazonia, Columbia. *Plant Ecology*, **153**, 73–85.
- Viana, B.F., Coutinho, J.G.E., Garibaldi, L.A., Castagnino, G.L.B., Gramacho, K.P., & Silva, F.O. (2014) Stingless bees further improve apple pollination and production. *Journal of Pollination Ecology*, **14**, 261–269.
- Viana, T.A., Martins, F.M. & Lourenço, A.P. (2021) The orchid bee fauna (Hymenoptera: Apidae: Euglossini) of a neotropical savanna: an efficient protocol to assess bee community and diversity along elevational and habitat complexity gradients. *Neotropical Entomology*, **50**, 748–758.
- Winfree, R., Bartomeus, I., Cariveau, D.P. (2011) Native pollinators in anthropogenic habitats. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, **42**, 1-22.
- Watanabe, M.E. (1994) Pollination worries rise as honey bees decline. *Science*, **265**, 1170.