

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Programa de Pós-graduação em Ecologia Conservação e Biodiversidade

CÉSAR AUGUSTO ARVELOS

**EXPLORANDO A ACÚSTICA DAS ABELHAS VIBRADORAS COMO INDICADOR
DA DIVERSIDADE DE ABELHAS E DA EFICIÊNCIA DA POLINIZAÇÃO EM
FLORES PORICIDAS**

UBERLÂNDIA

2023

CÉSAR AUGUSTO ARVELOS

**EXPLORANDO A ACÚSTICA DAS ABELHAS VIBRADORAS COMO INDICADOR
DA DIVERSIDADE DE ABELHAS E DA EFICIÊNCIA DA POLINIZAÇÃO EM
FLORES PORICIDAS**

Dissertação apresentada à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Biodiversidade e Conservação, da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Ecologia, Biodiversidade e Conservação.

Orientador: Prof. Dr. Vinícius Lourenço Garcia de Brito (UFU)

UBERLÂNDIA

2023

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

A795e Arvelos, César Augusto, 1999-
2023 Explorando a acústica das abelhas vibradoras como indicador da diversidade de abelhas e da eficiência da polinização em flores poricidas [recurso eletrônico] / César Augusto Arvelos. - 2023.

Orientador: Vinícius Lourenço Garcia de Brito.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Biodiversidade e
Conservação. Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.7071>
Inclui bibliografia.

1. Ecologia. I. Brito, Vinícius Lourenço Garcia de, 1985, (Orient.).
II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Ecologia, Biodiversidade e Conservação. III. Título.

CDU: 574

Glória Aparecida
Bibliotecária Documentalista - CRB-6/2047



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Conservação e Biodiversidade

Av. Pará, 1720, Bloco 2D, Sala 26 - Bairro Umuarama, Uberlândia-MG, CEP 38405-320
Telefone: (34) 3225-8641 - www.ppgeco.ib.ufu.br - ecologia@umuarama.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Ecologia, Conservação e Biodiversidade				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, número 332, PPGECB				
Data:	trinta e um de julho de dois mil e vinte e três	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	16:20
Matrícula do Discente:	12122ECR004				
Nome do Discente:	César Augusto Arvelos				
Título do Trabalho:	Explorando a acústica das abelhas vibradoras como indicador da diversidade de abelhas e da eficiência da polinização em flores porcidas				
Área de concentração:	Ecologia				
Linha de pesquisa:	Ecologia de comunidades e biodiversidade				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Alternativas reprodutivas e diversidade funcional de plantas no Cerrado				

Reuniu-se por videoconferência a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Ecologia, Conservação e Biodiversidade assim composta pelos doutores: Patrícia Nunes Silva - Unissinos; Carlos Eduardo Pereira Nunes - USP e Vinícius Lourenço Garcia de Brito - INBIO/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Vinícius Lourenço Garcia de Brito, apresentou a Comissão Examinadora e o(a) candidato(a), agradeceu a presença do público e concedeu ao(à) Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do(a) Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o(a) senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Vinicius Lourenço Garcia de Brito, Professor(a) do Magistério Superior**, em 31/07/2023, às 16:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Eduardo Pereira Nunes, Usuário Externo**, em 01/08/2023, às 10:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Patricia Nunes Silva, Usuário Externo**, em 01/08/2023, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4625556** e o código CRC **1270765B**.

“Passava os dias ali, quieto, no meio das coisas
miúdas. E me encantei.”

(Manoel de Barros)

ARADECIMENTOS

Gostaria de dedicar este espaço para expressar minha gratidão a todas as pessoas que tornaram possível a realização desta dissertação, contribuindo com seu apoio, incentivo e conhecimento.

Primeiramente, não poderia deixar de agradecer às minhas irmãs, Maria, Érika, Larissa e Sarah, pelos incentivos, conversas e acima de tudo presença. Vocês são grandes inspirações para mim.

Ao meu companheiro Bruno, agradeço por seu apoio constante, por me aguentar divagar sobre complementaridade funcional e ecoacústica, e me acompanhar e incentivar sempre.

À minha amiga Rafa (uma queria), que ainda nos desencontros sempre nos encontrávamos, compartilhando alegrias e desafios, e sendo uma fonte constante de motivação e inspiração.

Meu gatinho Vinicius também merece um agradecimento especial. Sua presença caótica e amor incondicional foram fundamentais para trazer descontração e afeto aos dias mais tensos de estudo.

Ao meu orientador e amigo Vinicius (sim, eles têm o mesmo nome!), agradeço por sua parceria e por acreditar em meu potencial. Sou eternamente grato pelas oportunidades que me proporcionou.

Aos membros da banca, Anselmo, Coquinho e Patrícia, agradeço pela disponibilidade em avaliar e contribuir para o aprimoramento deste trabalho.

Não posso esquecer de mencionar todo o grupo do laboratório (NERP), cuja atmosfera colaborativa e inspiradora contribuiu muito para o desenvolvimento mais leve do trabalho acadêmico, além de render muitas amizades.

E, é claro, agradeço a todas as pessoas que conheci ao longo desta jornada e que de alguma forma somaram ao meu trabalho. Cada conversa, troca de ideias e aprendizado compartilhado foi de imensa importância para o desenvolvimento desta dissertação.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela bolsa de estudos concedida, que possibilitou a dedicação integral a este trabalho.

A todos vocês, meu muito obrigado!

RESUMO

A biodiversidade desempenha um papel fundamental nos ecossistemas, onde cada espécie pode contribuir de forma única para o seu funcionamento saudável. No entanto, como a diversidade geralmente é medida pela contagem de espécies e suas abundâncias, métodos indiretos, como a análise acústica, podem oferecer uma abordagem alternativa para estudar comunidades e o papel das espécies no funcionamento dos ecossistemas. Entre os animais que emitem sons no ambiente, as abelhas, apesar de serem relativamente pouco estudadas nesse contexto, são um grupo importante. Abelhas vibradoras se destacam por produzir sons distintos entre as espécies durante suas interações com as plantas. Uma vez que os sons produzidos durante a vibração floral por essas abelhas estão relacionados com suas características morfológicas, a diversidade acústica das vibrações pode influenciar o sucesso reprodutivo das plantas. Neste estudo, investigamos a relação entre as características acústicas das abelhas vibradoras, a diversidade de espécies visitantes e a performance masculina das plantas. Para isso, observamos e gravamos as visitas das abelhas em uma população de *Rhynchanthera grandiflora*. Concatenamos os sons das visitas, calculamos índices acústicos e examinamos suas associações com a diversidade de abelhas e a quantidade de pólen liberado pelas anteras. Os índices acústicos do Índice de Uniformidade Acústica (AEI), Índice de Diversidade Acústica (ADI) e Índice Bioacústico (BIO) se mostraram os melhores preditores da diversidade de abelhas; no entanto, acreditamos que eles são melhores para prever a diversidade funcional do que a diversidade de espécies. Em resumo, este estudo destaca a utilidade das características vibracionais das abelhas vibradoras para avaliar a diversidade funcional da comunidade e seu efeito na polinização de *R. grandiflora*. Também enfatiza o efeito diferencial da complementaridade e da redundância funcional a depender do número de visitas. Em cenários com poucas visitas a complementaridade funcional potencializa a performance masculina, enquanto a redundância afeta positivamente essa performance em situações com abundância de abelhas visitando.

Palavras-chave: Polinização por vibração. Diversidade funcional. Reprodução de plantas. Abelhas. Índices acústicos.

ABSTRACT

Biodiversity plays a fundamental role in ecosystems, with each species can contribute uniquely to their healthy functioning. However, as diversity is often measured through species count and abundance, indirect methods like acoustic analysis can offer an alternative approach to studying communities and the role of species in ecosystem functioning. Among animals that emit sounds in the environment, bees, despite being relatively understudied in this context, are an important group. Vibrating bees stand out for producing distinct sounds between species during their interactions with plants. Since the sounds produced during floral vibration by these bees are linked to their morphological attributes, the acoustic diversity of vibrations can influence the reproductive success of plants. In this study, we investigated the relationship between the acoustic characteristics of vibrating bees, the diversity of visiting species, and plant male performance. For this purpose, we observed and recorded bee visits in a population of *Rhynchanthera grandiflora*. We concatenated the visit sounds, calculated acoustic indices, and examined their associations with bee diversity and the amount of pollen released from the anthers. The acoustic indices of Acoustic Evenness Index (AEI), Acoustic Diversity Index (ADI), and Bioacoustic Index (BIO) proved to be the best predictors of bee diversity; however, we believe they better predict functional diversity than species diversity. In summary, this study highlights the utility of vibrational characteristics of vibrating bees in assessing functional diversity within the community and its effect on *R. grandiflora* pollination. It also emphasizes the differential effect of complementarity and functional redundancy depending on the number of visits. In scenarios with few visits, functional complementarity enhances male performance, while redundancy positively affects this performance in situations with an abundance of visiting bees.

Keywords: Buzz pollination. Funtional diversity. Plant reproduction. Bees. Acoustic indexes.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Local do estudo e pontos amostrados na população de *R. grandiflora*. A UFVJM (Campus JK) é localizada em um campo rupestre, ecorregião caracterizada por afloramentos rochosos e uma alta biodiversidade. As populações da espécie de planta estudada, geralmente se estabelecem em locais brejoso ou beiras de corpos d'água, como no local do estudo. 5
- Figura 2 – Espécies de abelhas vibradoras mais frequentes visitando flores de *Rhynchanthera grandiflora*. (A) *Centris fuscata*, (B) *Xylocopa* sp.1, (C) *Bombus morio* e (D) *Xylocopa hirsutissima*. 6
- Figura 3 - Matriz de correlação entre a diversidade ecológica de abelhas, a duração total das visitas e os índices acústicos. ACI: Índice de complexidade acústica; ADI: Índice de diversidade acústica; AEI: Índice de uniformidade acústica; BIO: Índice bioacústico; HT: Índice temporal de entropia. Obs: Valores correspondem às correlações de Pearson (r) e os quadrados vazios às correlações não significativas ($p > 0,05$). 11
- Figura 4 - Relação entre os índices acústicos e a diversidade de abelhas. a) Índice de diversidade acústica (ADI); b) Índice de uniformidade acústica (AEI); c) Índice bioacústico (BIO). As linhas pretas representam as regressões lineares, ou seja, os valores da Diversidade (H') preditos pelos modelos. As áreas sombreadas correspondem aos intervalos de confiança (95%) de cada modelo. 13
- Figura 5 - Relação entre a diversidade de sons, a duração total das visitas e a porcentagem de pólen liberado (performance masculina) pelas anteras de alimentação (a) e polinização (b). ADI: Índice de diversidade acústica. 15

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Índices Acústicos extraídos dos sons concatenados. Para mais detalhes sobre os cálculos ver as referências.	8
Tabela 2 – Tabela de critérios de informação para os modelos lineares simples com os índices acústicos como preditores da diversidade.	10

LISTA DE SIGLAS

ACI	Índice de Complexidade Acústica
ADI	Índice de Diversidade Acústica
BIO	Índice Bioacústico
AEI	Índice de Uniformidade Acústica
AIC	Critério de Informação de Akaike
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
HT	Índice de Entropia Temporal
UFVJM	Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	METODOLOGIA	4
2.1	<i>Espécies e local de estudo</i>	4
2.2	<i>Aquisição e processamento dos dados</i>	6
2.2.1	<i>Índices acústicos x Diversidade de Abelhas</i>	6
2.2.2	<i>Performance masculina x Quantidade e qualidade das visitas</i>	8
2.3	Análises estatísticas	9
2.3.1	<i>Índices acústicos x Diversidade de Abelhas</i>	9
2.3.2	<i>Performance masculina x Quantidade e qualidade das visitas</i>	10
3	RESULTADOS.....	11
3.1	Análises exploratórias.....	11
3.2	Índices acústicos x Diversidade de Abelhas.....	12
3.3	Performance masculina x Quantidade e qualidade das visitas	14
4	DISCUSSÃO	16
4.1	Índices acústicos x Diversidade de Abelhas.....	16
4.2	Performance masculina x Quantidade e qualidade das visitas	17
5	CONCLUSÃO	19
6	REFERÊNCIAS.....	20

1 INTRODUÇÃO

A diversidade biológica desempenha um papel fundamental no funcionamento saudável e equilibrado da natureza (Magurran *et al.* 2010). Ela engloba a diversidade genética, de espécies e de ecossistemas, além das complexas interações ecológicas estabelecidas entre as espécies e as funções que desempenham (Maclaurin & Sterelny 2013). Cada espécie contribui de maneira única para o funcionamento do ecossistema, desempenhando funções específicas, como predação, decomposição de matéria orgânica e polinização (Bu *et al.* 2014). Estima-se que existam quase 11 milhões de espécies de organismos em todo o mundo, sendo que apenas 13% delas foram descritas e catalogadas (Mora *et al.* 2011). Entre essas espécies, os insetos são extremamente diversos, tornando desafiadora a caracterização completa de sua diversidade. A recente redução na diversidade pode ter impactos negativos na estabilidade e resiliência dos ecossistemas, tornando-os mais vulneráveis a perturbações ambientais (Walker 1995). Assim, a diversidade biológica é de extrema importância não apenas para a manutenção dos ecossistemas, mas também para a sustentabilidade e bem-estar humano. A perda de biodiversidade pode resultar em consequências negativas para serviços ecossistêmicos vitais, como a regulação do clima e a polinização de culturas agrícolas (Westerkamp & Gottsberger 2000; Nadrowski *et al.* 2010). Portanto, é essencial compreender e avaliar adequadamente a diversidade biológica e os seus efeitos.

A biodiversidade pode ser avaliada e medida em diferentes escalas e utilizando diversas abordagens. A contagem do número de espécies, também conhecida como riqueza, é uma forma simples de mensurar a diversidade biológica (Magurran 2005). Além disso, a abundância de indivíduos de cada espécie também é um dado importante para avaliar a biodiversidade em uma área, pois determina quais espécies são mais comuns ou mais raras (Magurran 2005). Essas medidas combinadas permitem o cálculo de índices que estimam a diversidade local de espécies, contribuindo para a compreensão da dinâmica das comunidades, a documentação de mudanças e a avaliação da conservação dos ambientes (Magurran *et al.* 2010). A avaliação tradicional da diversidade de espécies em uma área envolve a observação visual dos indivíduos no campo (O'Connor *et al.* 2019). No entanto, esse método pode ser desafiador e dispendioso, dependendo do tamanho da área considerada e dos hábitos de vida dos organismos estudados (Besson *et al.* 2022). Para contornar essas limitações, métodos indiretos e/ou passivos têm sido explorados para estimar a diversidade de espécies, oferecendo oportunidades valiosas para estudos ecológicos e de conservação da vida selvagem.

Uma abordagem indireta, passiva e promissora para estimar a diversidade de ambientes é a amostragem de sons produzidos por determinados grupos de animais. A utilização de informações acústicas dos organismos no ambiente tem sido amplamente explorada em estudos com aves e peixes, embora raramente tenha sido aplicada a invertebrados (Alcocer *et al.* 2022). Entre os invertebrados que produzem sons em seus ambientes naturais, as abelhas se destacam, emitindo sons distintos durante comportamentos como voo, defesa do ninho e forrageamento, com variações entre as espécies (Pritchard & Vallejo-Marín 2020). As abelhas desempenham um papel crucial como polinizadores, uma vez que participam da polinização da maioria das plantas com flores (Ollerton 2017). Através da coleta de néctar e pólen, as abelhas transferem grãos de pólen de uma flor para outra, possibilitando a fertilização e formação de sementes e frutos. Esse processo de polinização não apenas assegura a reprodução das plantas, mas também é essencial para a diversidade e a produtividade dos ecossistemas e para a agricultura (Ollerton 2017; Klein *et al.* 2018; Khalifa *et al.* 2021). No entanto, as populações de abelhas têm enfrentado ameaças como a perda de habitat, mudanças climáticas aceleradas e uso de pesticidas, tornando o desenvolvimento de métodos para monitoramento e a conservação desses insetos essencial (Brown J.F. & Paxton J. 2009).

Existem algumas espécies entre as abelhas que emitem sons (*buzzes*) durante a coleta de pólen em determinadas flores (Buchmann 1983). Aproximadamente 20.000 espécies de plantas possuem flores que liberam grãos de pólen através de pequenas aberturas apicais das anteras (i.e. anteras poricidas; Michener 1962; Buchmann 1983; Luo *et al.* 2008; De Luca & Vallejo-Marín 2013). Os visitantes dessas espécies são, geralmente, abelhas que, ao visitarem as flores, se agarram nos verticilos florais, cruzam as asas e promovem rápidas contrações dos músculos torácicos indiretos do voo para vibrar a flor e extrair os grãos de pólen (Buchmann & Hurley 1978; Buchmann 1983; De Luca & Vallejo-Marín 2013). Apesar desses insetos visitarem uma ampla diversidade de espécies vegetais com morfologias florais distintas, flores com anteras poricidas parecem ter evoluído especificamente em resposta a esse tipo de polinização (Vogel 1978; Buchmann 1983; Proença 1992; De Luca & Vallejo-Marín 2013). Além dessa característica das anteras, essas flores majoritariamente carecem de outros recursos que podem atrair os polinizadores e, por esse motivo, são denominadas flores de pólen (Vogel 1978; Faegri 1986; De Luca & Vallejo-Marín 2013). Esse conjunto de características florais associadas à polinização por vibração tem sido referido como “síndrome de polinização por

vibração” (ou *buzz-pollination*) e as abelhas capazes de vibrar as flores, o grupo funcional das “abelhas vibradoras” (Buchmann & Hurley 1978; De Luca & Vallejo-Marín 2013).

A diversidade de espécies de abelhas vibradoras desempenha um papel essencial na polinização eficiente das plantas polinizadas por vibração (Cooley & Vallejo-Marín 2021). No entanto, a avaliação da diversidade de abelhas visitantes em uma população ou comunidade de plantas nem sempre é uma tarefa simples e pode exigir métodos laboriosos. As abelhas vibradoras apresentam características vibracionais, e conseqüentemente sonoras, distintas que podem influenciar a liberação do pólen, afetando a performance masculina das plantas (Buchmann & Hurley 1978; Hansen *et al.* 2021). Nesse contexto, a análise das características acústicas das abelhas vibradoras surge como uma abordagem prática e eficiente para estimar a diversidade de espécies presentes em uma comunidade de polinizadores e o seu efeito na reprodução das plantas. Acredita-se que a diversidade acústica das vibrações produzidas pelas abelhas durante as visitas às flores desempenhe um papel importante na performance reprodutiva das plantas. Uma maior diversidade acústica está associada a uma maior eficiência na polinização, uma vez que diferentes espécies de abelhas podem desempenhar papéis complementares na transferência de pólen (Konzmann *et al.* 2020).

Com base nisso, o objetivo deste trabalho é estudar a relação entre as características acústicas produzidas pelas abelhas vibradoras durante as visitas em flores e a diversidade de espécies de abelhas na comunidade. Além disso, buscamos estudar o efeito da diversidade acústica na performance reprodutiva das plantas. A fim de se desenvolver esses objetivos, levantamos as seguintes hipóteses:

I - As características acústicas das comunidades de abelhas predizem a diversidade ecológica de abelhas.

II - Quanto maior a diversidade acústica das vibrações das visitas nas flores, maior será a sua performance reprodutiva.

Espera-se que os resultados deste estudo possam contribuir para o desenvolvimento de metodologias não invasivas para avaliar a diversidade de espécies de abelhas e sua relação com a reprodução das plantas.

2 METODOLOGIA

2.1 *Espécies e local de estudo*

A coleta dos dados foi realizada entre 08 e 17 de setembro de 2022, no entorno do Campus JK da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), no município de Diamantina, Minas Gerais, Brasil (Figura 1). O local de estudo é caracterizado pela vegetação de campo rupestre, que agrupa alta biodiversidade e elevado endemismo. A vegetação de campo rupestre é predominantemente herbácea e arbustiva e agrupa paisagens em micro relevos ocupando trechos de afloramentos rochosos (Vasconcelos 2011). O clima da região é caracterizado como subtropical de altitude, seco no inverno e chuvoso durante o verão. A temperatura média da região é 18°C, com máxima em outubro e mínima em julho, e pluviosidade média anual de 1.500 mm, sendo a mínima no mês de julho e a máxima no mês de dezembro (Verdi *et al.* 2015). Utilizamos uma população de *Rhynchanthera grandiflora* (Aubl) DC. (Melastomataceae) para estudar as espécies de abelhas visitantes. Essa espécie foi selecionada por possuir flores com anteras poricidas que oferecem apenas o pólen como recurso às abelhas e, portanto, ser polinizada por vibração. Além disso, a população possuía uma grande quantidade de indivíduos floridos e diferentes fragmentos com uma alta variação na frequência e nas espécies que visitam as flores, o que favorecia a coleta dos dados. Observamos as visitas de 6 espécies de abelhas vibradoras (*Bombus morio*, *Centris flavifrons*, *Centris fuscata*, *Xylocopa hirsutissima*, *Xylocopa* sp1. e *Xylocopa* sp2.; Figura 2) na população de *R. grandiflora*.

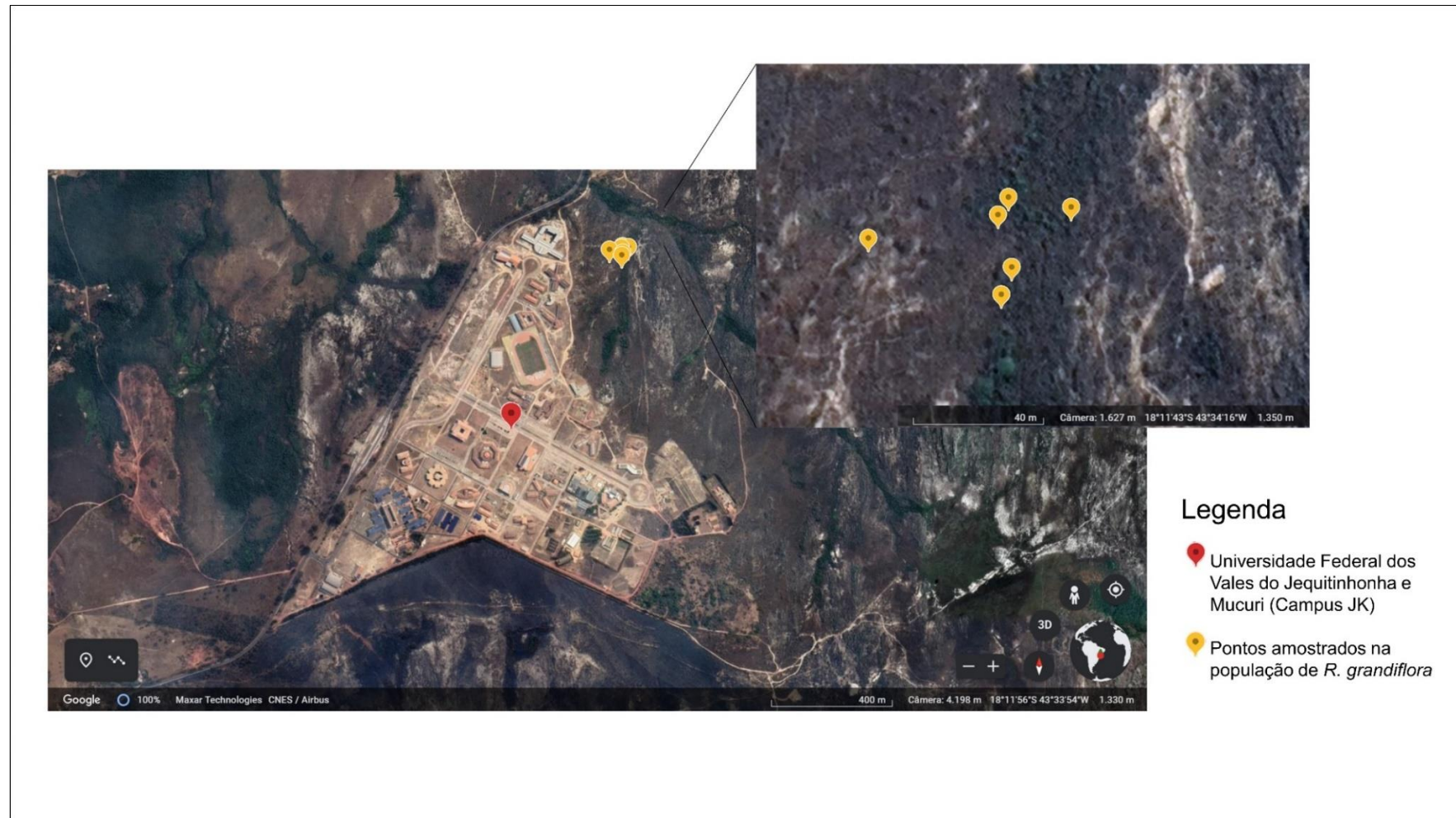


Figura 1 – Local do estudo e pontos amostrados na população de *R. grandiflora*. A UFVJM (Campus JK) é localizada em um campo rupestre, ecorregião caracterizada por afloramentos rochosos e uma alta biodiversidade. As populações da espécie de planta estudada, geralmente se estabelecem em locais brejoso ou beiras de corpos d'água, como no local do estudo.

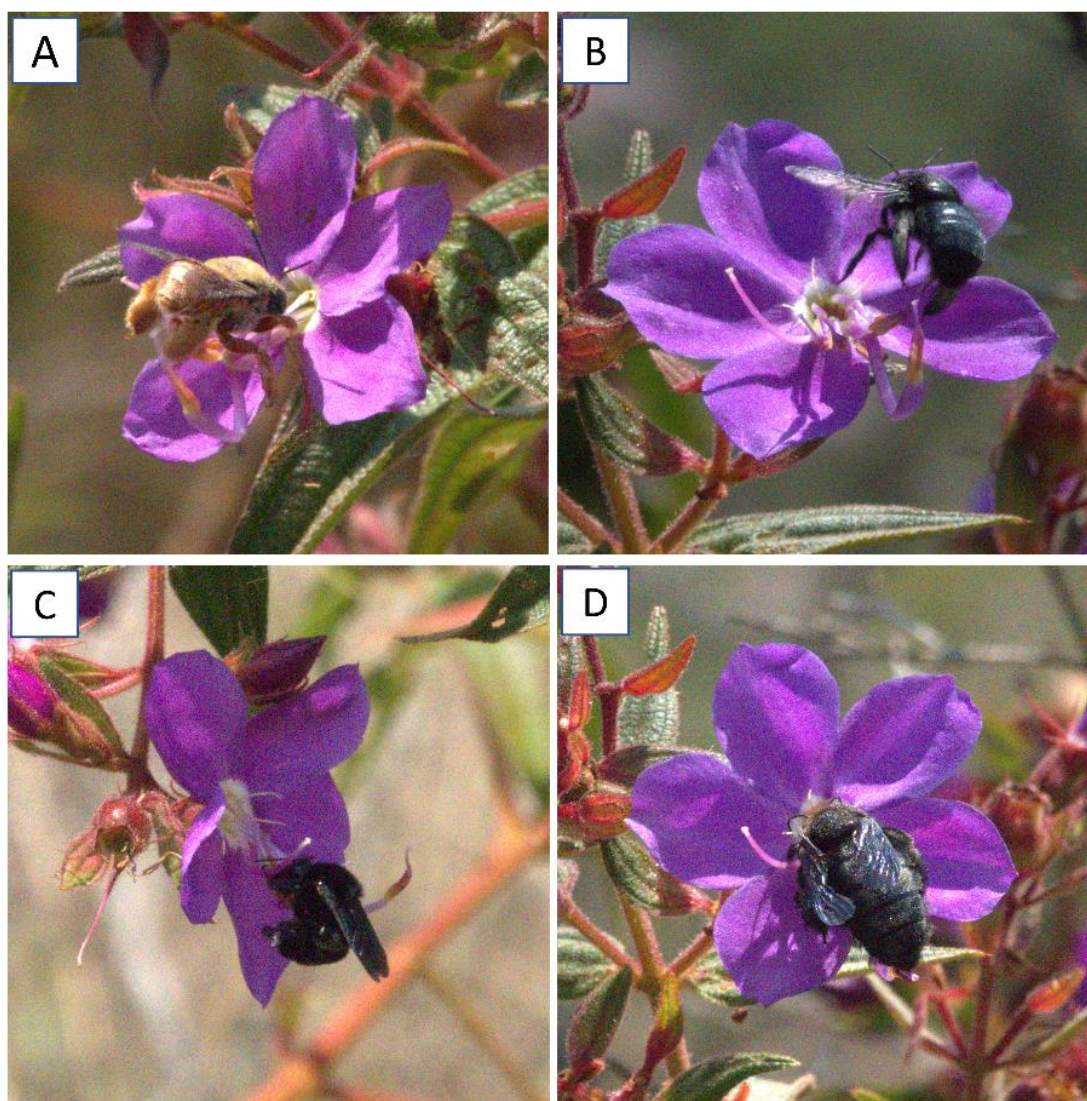


Figura 2 – Espécies de abelhas vibradoras mais frequentes visitando flores de *Rhynchanthera grandiflora*. (A) *Centris fuscata*, (B) *Xylocopa* sp.1, (C) *Bombus morio* e (D) *Xylocopa hirsutissima*.

2.2 Aquisição e processamento dos dados

2.2.1 Índices acústicos x Diversidade de Abelhas

Para obter os dados sobre a diversidade de abelhas realizamos observações focais das interações de polinização na população de *R. grandiflora*. Utilizamos lacres indexados e linhas enceradas coloridas para marcar a identidade de cada indivíduo e flor, respectivamente. Consideramos a flor como nossa unidade amostral e ao todo foram amostradas 30 flores distribuídas entre 27 indivíduos. Durante as observações, identificamos as espécies de abelhas visitantes e registramos o horário de cada visita. Com esses dados, calculamos o índice de

Shannon como estimativa da diversidade de abelhas visitantes em cada flor por meio do pacote *vegan* no software R v. 4.2.3 (Oksanen *et al.* 2022; R Core Team 2023). Esse índice reflete tanto a riqueza quanto a abundância relativa de cada espécie e é amplamente utilizado como uma estimativa da diversidade local (Van Strien *et al.* 2012).

A fim de coletar os dados dos sons produzidos pelas abelhas, utilizamos microfones unidirecionais (Shotgun Yoga Ht 81) equipados com espumas protetoras contra o vento e acoplados a gravadores de voz simples (Sony ICD-PX240 – Mono, taxa de amostragem 44.1 kHz, resolução de 16 bits). Posicionamos os microfones em pedestais a 10cm de cada flor observada. Mantivemos os microfones direcionados para as flores, gravando as visitas durante todo o período de atividade das abelhas na população de *R. grandiflora* (das 9h às 14h). Ao todo foram amostradas as visitas de 30 flores (3 flores por dia), sendo a gravação em cada flor a representação de uma comunidade de abelhas visitantes.

Após a gravação das visitas das abelhas nas flores, os arquivos de áudio foram processados utilizando os softwares de análises e edição de áudios Audacity v. 3.3.1 (www.audacityteam.org) e Adobe Audition v. 14.0.0.36 (www.adobe.com/products/audition). Através do primeiro software, recortamos manualmente as partes correspondentes aos sons das visitas (*buzzes*) e em seguida concatenamos esses segmentos em um único arquivo de áudio. Por fim, filtramos os ruídos com o efeito de redução através da captura de impressões dos sons de fundo (redução de 20 dB em 30%) e aplicamos um filtro passa-alta a 130 Hz com um rolloff de 24 dB por oitava utilizando o Adobe Audition v. 14.0.0.36. Extraímos cinco Índices Acústicos (ACI, ADI, AEI, BIO e HT; Tabela 1) e as durações totais das visitas em cada um dos arquivos de áudios concatenados através dos pacotes *soundecology* e *seewave* no R v. 4.2.3, respectivamente (Sueur *et al.* 2008; Villanueva-Rivera & Pijanowski 2018). Definimos a faixa entre as frequências de 100 e 500 Hz para o cálculo dos índices, a qual compreende as frequências fundamentais dos *buzzes* das abelhas (De Luca & Vallejo-Marín 2013).

Tabela 1 - Índices Acústicos extraídos dos sons concatenados. Para mais detalhes sobre os cálculos ver as referências.

Índices (Siglas)	Detalhes	Relação esperada com a diversidade ecológica	Referências
Índice de Complexidade Acústica (ACI)	Deriva das diferenças da energia acústica medida em faixas de frequência determinadas em intervalos temporais subsequentes. É um índice cumulativo e muito sensível a ruídos de fundo.	Positiva	(Pieretti <i>et al.</i> 2011)
Índice de Diversidade Acústica (ADI)	Representa a proporção de picos no espectro de frequência que ultrapassam um determinado limiar de energia.	Positiva	(Villanueva-Rivera <i>et al.</i> 2011)
Índice de Uniformidade Acústica (AEI)	Determina a regularidade do áudio calculando a variação da energia em determinada faixa de frequência ao longo do tempo.	Negativa	(Villanueva-Rivera <i>et al.</i> 2011)
Índice de Bioacústica (BIO)	Determina a área sob a frequência média no espectro. Provê uma medida do nível sonoro e do número de faixas de frequência emitidas.	Positiva	(Boelman <i>et al.</i> 2007)
Índice temporal de entropia (HT)	Computa a variação de energia através do envelope temporal do áudio.	Positiva	(Sueur <i>et al.</i> 2008)

2.2.2 *Performance masculina x Quantidade e qualidade das visitas*

As flores com anteras poricidas geralmente apresentam dimorfismo entre os estames (ou heteranteria) que consiste na diferenciação dessas estruturas em cor, forma ou tamanho (Luo *et al.* 2008; Vallejo-Marín 2019). Nessas flores, os estames estão divididos em dois tipos: estames pequenos e conspícuos que são facilmente acessados pelos visitantes para a coleta de pólen e

estão associados à função de alimentação; e estames mais longos e deslocados do eixo central da flor, associados à polinização (Fritz Müller 1883; Konzmann *et al.* 2020; Melo *et al.* 2022). As flores de *R. grandiflora* apresentam 4 estames de alimentação (pequenos) e 1 de polinização (grande). Coletamos e fixamos 10 botões de indivíduos de *R. grandiflora* escolhidos ao acaso em tubos Eppendorf de 1,5 ml preenchidos com álcool 70% para estimar a quantidade de grãos de pólen produzidos em cada tipo de antera (10 anteras de polinização e 40 de alimentação). Além disso, após o período das visitas, coletamos e fixamos da mesma maneira um dos estames de alimentação e o estame de polinização de cada flor observada para posterior contagem dos grãos de pólen remanescentes nas anteras. Posteriormente, transferimos separadamente as anteras fixadas para tubos Eppendorf de 2 ml contendo 200 µl de uma solução de álcool e glicerina (5:1) e as maceramos com o auxílio de um bastão de vidro. Em seguida, agitamos por um minuto essas soluções em um vórtex e contamos os grãos de pólen em amostras de 10 µl das soluções maceradas com o auxílio de uma câmara de Neubauer (hemocitômetro). A estimativa da quantidade de grãos de pólen nas anteras foi feita considerando o volume total da solução e da câmara (Trevizan *et al.* 2023). Consideramos as quantidades estimadas de grãos de pólen remanescentes nas anteras das flores observadas como “falhas” e a média das quantidades estimadas de pólen em cada tipo de antera dos botões (alimentação: média ± desvio padrão relativo = $96492 \pm 55\%$; polinização: média ± padrão relativo = $244450 \pm 58\%$) como “total”. A partir disso, estimamos a quantidade de “sucesso” (grãos de pólen liberados) como a quantidade de falhas subtraída da quantidade total. Além disso, medimos a largura no eixo horizontal de cada flor amostrada com o auxílio de um paquímetro digital no intuito de excluir o efeito do tamanho das flores na quantidade de pólen liberado pelas anteras.

2.3 Análises estatísticas

2.3.1 Índices acústicos x Diversidade de Abelhas

Fizemos uma análise exploratória correlacionando todos os índices acústicos extraídos, bem como a duração, com o índice de diversidade para verificar quais possuíam um potencial para a criação de um modelo linear. Para isso, calculamos os coeficientes de correlação de Pearson (r) e suas respectivas significâncias (p -valor) entre cada uma das variáveis e plotamos uma matriz de correlação utilizando o pacote *ggcorrplot* no R (Kassambara 2022). Por fim, as relações entre os índices acústicos selecionados (variáveis preditoras) e a diversidade ecológica

estimada pelas observações focais (variável resposta) foram avaliadas por meio do ajuste de modelos lineares simples, utilizando o pacote padrão *stats* do R (R Core Team 2023).

2.3.2 Performance masculina x Quantidade e qualidade das visitas

Para avaliar se a quantidade de pólen liberado pelas anteras (variável resposta) é determinada pelas características acústicas, quantidade de visitas ou o tipo de antera (variáveis preditoras) nós ajustamos um modelo linear generalizado misto. Para essa análise, testamos os três índices utilizados para prever a diversidade (ADI, AEI e BIO) e selecionamos o modelo de melhor performance e simplicidade através da comparação do Critério de Informação de Akaike (AIC; Tabela 2). Dentre eles o ADI foi escolhido para representar as características acústicas das abelhas por possuir menor valor de AIC. Utilizamos a duração dos áudios concatenados como equivalente à quantidade de visitas e testamos a interação entre o ADI, a duração total das visitas, bem como o tipo de antera (alimentação e polinização) na liberação de grãos de pólen. O tamanho da flor foi considerado uma variável aleatória e definimos uma família de distribuição binomial inflada de zeros, com link “logit”, pois modelamos a proporção de sucessos (pólen liberado) em relação às falhas (grãos de pólen remanescentes nas anteras). Ajustamos o modelo utilizando o pacote *glmmTMB* e testamos o ajuste (presença de outliers, análise dos resíduos, superdispersão e inflação de zeros) através do pacote *DHARMA* no R (Mollie *et al.* 2017; Hartig 2022). Após o ajuste do modelo, fizemos uma análise de variância do tipo III para determinar a significância de cada variável preditora, uma vez que esperávamos uma interação entre essas variáveis. Adicionalmente, plotamos os valores preditos pelo modelo em um plano para verificar a interação das variáveis preditoras na liberação dos grãos de pólen.

Tabela 2 – Tabela de critérios de informação para os modelos lineares simples com os índices acústicos como preditores da diversidade.

Variável preditora do modelo	Número de parâmetros estimados	Log-verossimilhança	AIC	Delta_AIC	AIC_Wt
ADI	3	-8.04	23.00	0.00	0.58
AEI	3	-8.47	23.86	0.87	0.37
BIO	3	-10.45	27.83	04.83	0.05

AIC: Critério de informação de Akaike corrigido; **Delta_AIC:** Diferença entre o AIC atual e o melhor modelo (menor AIC); **AIC_Wt:** Peso Akaike, probabilidade relativa de cada modelo ser o melhor no conjunto considerado.

3 RESULTADOS

3.1 Análises exploratórias

Os índices AEI, ADI, BIO e a duração total das visitas estão correlacionados com a diversidade ecológica de abelhas (Figura 3). ADI e a duração total das visitas possuem uma correlação positiva com a diversidade ($r = 0,5$; $p < 0,001$ e $r = 0,4$; $p < 0,05$, respectivamente) e AEI e Bio uma correlação negativa ($r = 0,6$; $p < 0,001$ e $r = 0,5$; $p < 0,01$, respectivamente). Além disso, esses três índices acústicos estão correlacionados entre si. Portanto, são os melhores índices para se prever a diversidade de abelhas através dos sons.

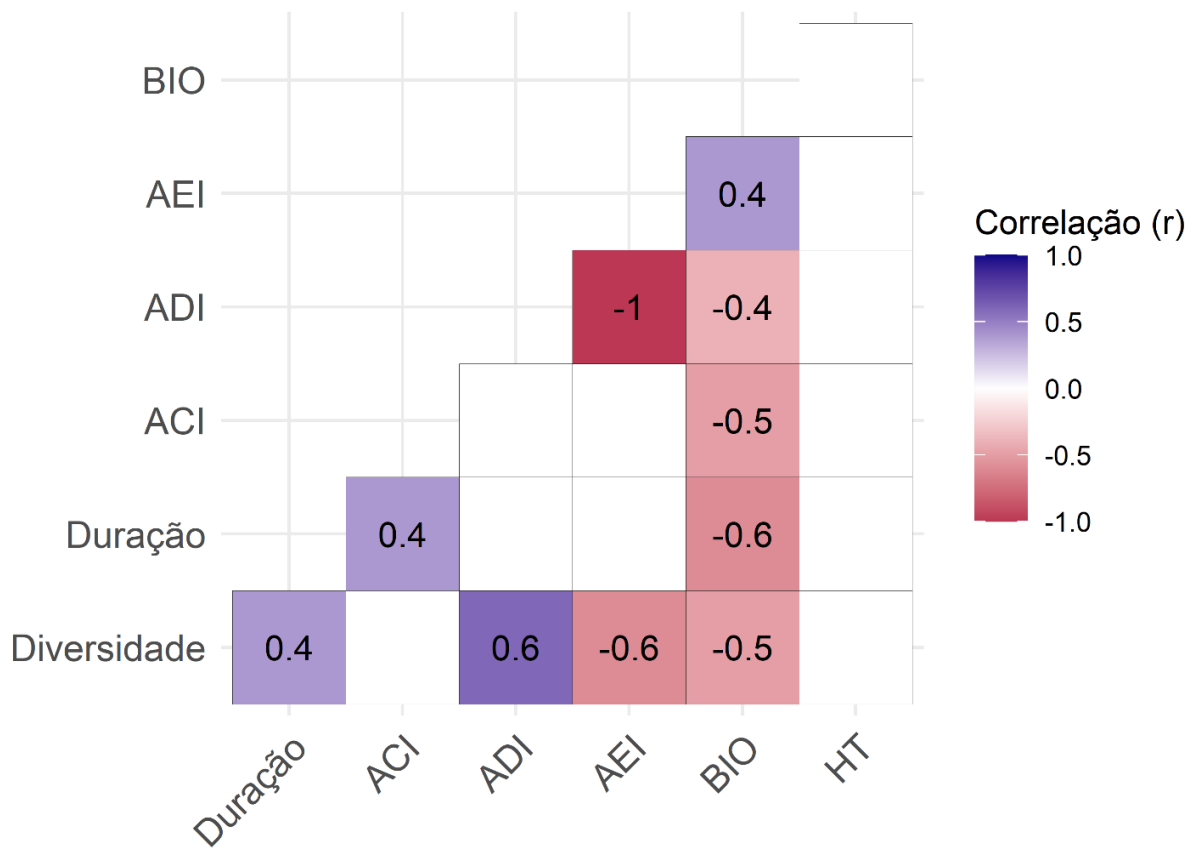


Figura 3 - Matriz de correlação entre a diversidade ecológica de abelhas, a duração total das visitas e os índices acústicos. ACI: Índice de complexidade acústica; ADI: Índice de diversidade acústica; AEI: Índice de uniformidade acústica; BIO: Índice bioacústico; HT: Índice temporal de entropia. Obs: Valores correspondem às correlações de Pearson (r) e os quadrados vazios às correlações não significativas ($p > 0,05$).

3.2 Índices acústicos x Diversidade de Abelhas

Os índices AEI, ADI e BIO predizem a diversidade ecológica de abelhas ($R^2 = 0,33$; $F_{1, 28} = 13,50$; $p > 0,001$; $R^2 = 0,34$; $F_{1, 28} = 14,72$; $p > 0,001$ e $R^2 = 0,23$; $F_{1, 28} = 8,37$; $p > 0,01$, respectivamente; Figura 4). ADI mostrou uma relação positiva (Figura 4a) e AEI e BIO mostraram uma relação negativa (Figura 4b e c, respectivamente). O índice que melhor prediz a diversidade ecológica de abelhas é o ADI, o qual o explica 34% da variação dessa diversidade.

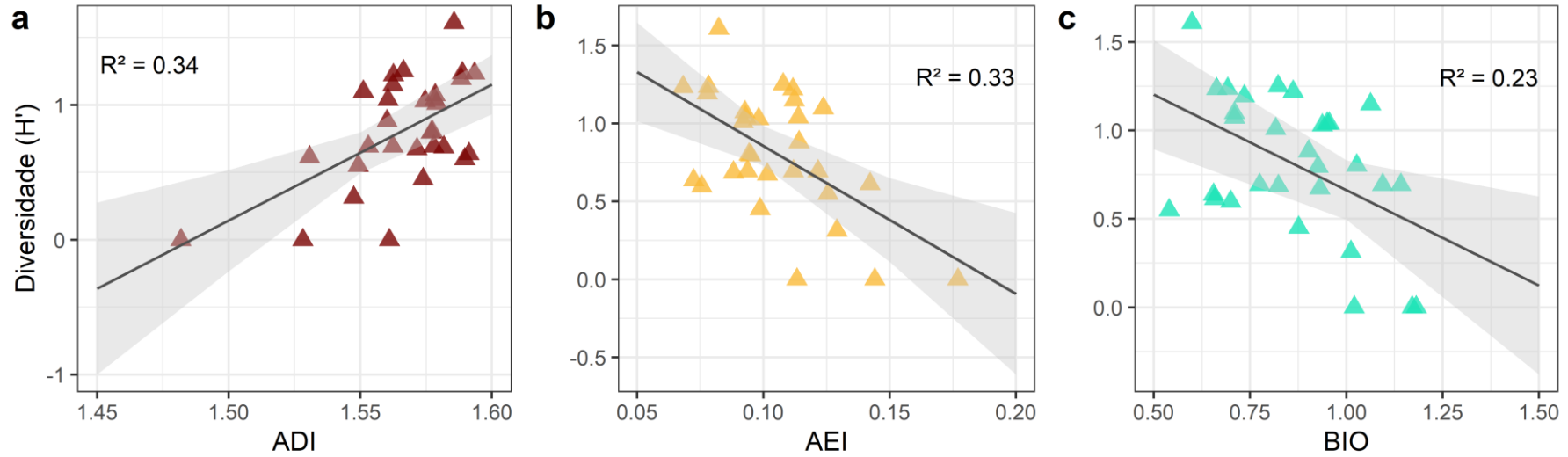


Figura 4 - Relação entre os índices acústicos e a diversidade de abelhas. a) Índice de diversidade acústica (ADI); b) Índice de uniformidade acústica (AEI); c) Índice bioacústico (BIO). As linhas pretas representam as regressões lineares, ou seja, os valores da Diversidade (H') preditos pelos modelos. As áreas sombreadas correspondem aos intervalos de confiança (95%) de cada modelo.

3.3 Performance masculina x Quantidade e qualidade das visitas

O Índice de Diversidade Acústica (ADI) e a duração total das visitas predizem a liberação de pólen, porém essa relação varia de acordo com o tipo de antera (ADI*duração*tipo de antera: $X^2 = 485,62$; GL = 1, $p < 0,001$; Figura 5). De forma geral, em altas durações (muitas visitas), a maioria dos grãos de pólen são liberados das anteras de alimentação e polinização. Porém, nesse cenário, altos valores de ADI desfavorecem a liberação dos grãos de pólen em ambas as anteras. Em durações baixas (poucas visitas), altos valores de ADI favorecem a liberação de pólen em ambas as anteras, porém esse efeito é maior nas anteras de alimentação.

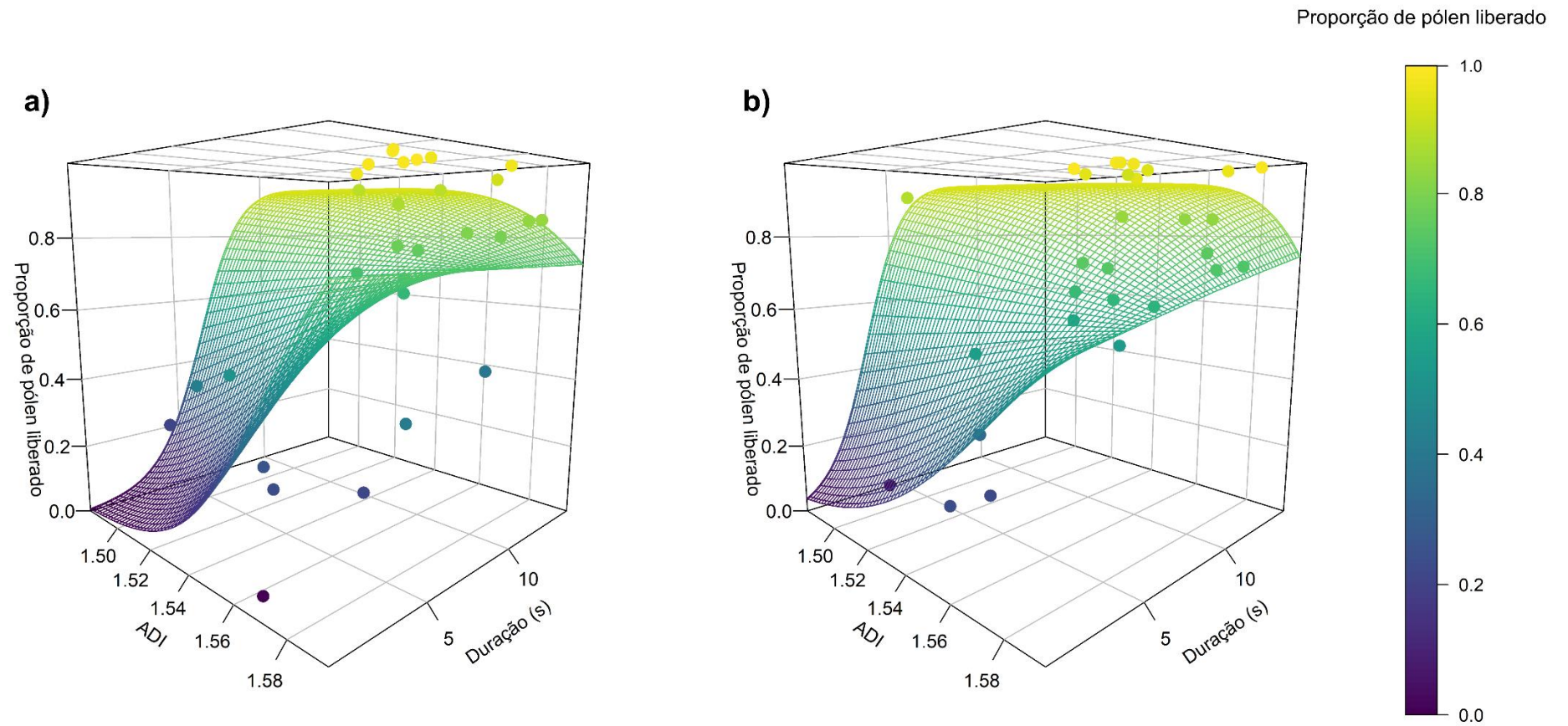


Figura 5 - Relação entre a diversidade de sons, a duração total das visitas e a porcentagem de pólen liberado (performance masculina) pelas anteras de alimentação (a) e polinização (b). ADI: Índice de diversidade acústica.

4 DISCUSSÃO

Nossos resultados apontam que é possível estimar a diversidade de abelhas vibradoras através dos sons que elas produzem durante as visitas em flores poricidas, entretanto, o poder dessa estimativa é relativamente baixo (34%). Além disso, a interação entre o Índice de Diversidade Acústica (ADI) e a duração total das visitas explica a liberação de grãos de pólen pelas anteras de alimentação e polinização de *R. grandiflora*.

4.1 Índices acústicos x Diversidade de Abelhas

A diversidade taxonômica e a funcional desempenham papéis fundamentais na dinâmica e no funcionamento dos ambientes naturais (Goswami *et al.* 2017). Assim como podemos medir a diversidade de espécies, também é possível medir a diversidade funcional de uma comunidade ou ecossistema, considerando a riqueza e equitabilidade funcional. A riqueza funcional refere-se à quantidade de espécies que ocupam um determinado nicho funcional na comunidade, enquanto a equitabilidade diz respeito à distribuição dessas espécies nos espaços de nicho funcional (Goswami *et al.* 2017).

Uma adaptação evolutiva que define um importante grupo funcional na interação mutualística entre as abelhas e as plantas com flores é a polinização por vibração (Buchmann 1983). Durante a interação entre as abelhas vibradoras e as flores polinizadas por vibração, a transmissão das vibrações do tórax da abelha até as anteras é determinada pelas características intrínsecas da espécie de abelha, pela flor sendo vibrada e pelo acoplamento entre a abelha e a flor (Arroyo-Correa *et al.* 2019; Vallejo-Marín 2019). Essas variações nas vibrações definem atributos funcionais que ocupam espaços de nicho na interação, tornando possível representar a diversidade funcional da comunidade por meio da riqueza e equidade dos atributos das vibrações produzidas pelas abelhas durante as visitas. Os índices acústicos utilizados no nosso estudo — Índice de uniformidade acústica (AEI), Índice de diversidade acústica (ADI) e Índice bioacústico (BIO) — refletem essa diversidade funcional, uma vez que representam as variações nos picos de frequências das vibrações (riqueza) e suas proporções (equidade; Boelman *et al.* 2007; Villanueva-Rivera *et al.* 2011).

Embora a diversidade de espécies e a diversidade funcional sejam conceitos complementares, elas nem sempre estão correlacionadas (Schleuter *et al.* 2010; Goswami *et al.* 2017). Ambientes taxonomicamente diversos podem abrigar espécies com traços funcionais semelhantes ou que exerçam funções equivalentes, o que faz com que se exija cautela ao

predizer a diversidade de espécies exclusivamente com base em seus atributos funcionais. Apesar disso, os índices acústicos, ADI e AEI, podem ser valiosas ferramentas para avaliar a diversidade funcional da comunidade de abelhas vibradoras e, por consequência, inferir informações sobre o funcionamento dos ecossistemas. No entanto, o BIO apresentou uma relação com a diversidade de espécies contrária da que esperávamos. Mammides *et al.* (2017) também já encontraram essa inconsistência ao se relacionar a diversidade de aves com esse índice. Além disso, o BIO é o único índice entre os três que é influenciado não apenas pelos sons bióticos (biofonia), mas também pelos geológicos (geofonia) e antrópicos (antrofonia; Farina 2014; Ross *et al.* 2021). No cenário do nosso estudo, embora tenhamos reduzido os ruídos indesejáveis ao processar os áudios, a presença de sons provenientes da geofonia, especialmente devido à proximidade com um curso d'água, pode ter contribuído para esse resultado. Além disso, o mês e o horário das coletas (setembro; 9h às 14h) curiosamente coincidiram com os períodos de ventos mais fortes na região (De Souza *et al.* 2013; Spark 2023). Nesse sentido, constatamos que é imprescindível avaliar previamente os aspectos da geofonia e antrofonia do ambiente para a execução de estudos como este, a fim de garantir resultados mais precisos e significativos.

Nesse contexto, torna-se fundamental conduzir estudos que considerem tanto a diversidade de espécies quanto a funcional, levando em conta os aspectos ambientais, a fim de obter uma compreensão mais completa dos processos ecológicos e evolutivos que sustentam a rica relação mutualística entre abelhas e plantas polinizadas por vibração. Integrando esses dois aspectos da diversidade, pesquisas futuras poderão avançar significativamente em direção ao entendimento abrangente do funcionamento dos ecossistemas e aprimorar metodologias destinadas à sua preservação.

4.2 Performance masculina x Quantidade e qualidade das visitas

Alguns estudos sugerem que abelhas maiores, em geral, transmitem vibrações com amplitudes mais altas e frequências mais baixas (de Luca *et al.* 2013; Switzer & Combes 2017; Switzer *et al.* 2019). Além disso, atributos florais, como a massa da antera em relação à massa da abelha, a geometria e arquitetura da antera e suas propriedades histológicas podem influenciar como as vibrações das abelhas são transmitidas para as flores e se traduzem em liberação de pólen (De Luca *et al.* 2019; Brito *et al.* 2020; Pritchard & Vallejo-Marín 2020; Nunes *et al.* 2021). As flores de *Rhynchanthera grandiflora* possuem uma diferenciação

morfológica entre as anteras. Essa diferença é associada a chamada divisão de trabalho entre os estames, onde o pólen provindo das anteras menores é destinado à alimentação das abelhas (larvas) e o da antera maior à polinização da planta (Fritz Müller 1883; Konzmann *et al.* 2020; Melo *et al.* 2022). Estudos anteriores, como o de Nunes *et al.* (2021), demonstraram que essa diferença na morfologia entre as anteras reflete em uma vibração distinta entre elas, o que pode levar também a uma diferença na liberação dos grãos de pólen.

Os resultados obtidos neste estudo revelam que a exploração de diferentes nichos vibracionais das abelhas pelas plantas, refletida pelo ADI, possui um efeito complexo na liberação de pólen, variando de acordo com a quantidade de visitas e o tipo de antera. Na teoria, a coexistência de várias espécies em uma comunidade é possível quando seus nichos são particionados e elas não competem pelo mesmo recurso de nicho limitado (i.e. complementaridade funcional; Pauw 2013; Benadi 2015; Bouman *et al.* 2017). Apesar de polinizadores do mesmo grupo funcional serem rotineiramente considerados como um recurso de nicho limitado, métricas de nicho raramente foram utilizadas para estudar a complementaridade e redundância funcional nesse contexto (Ackerly 2009; Dellinger *et al.* 2016; Phillips *et al.* 2020). Portanto, sabe-se pouco sobre como os nichos de polinização de espécies polinizadas pelo mesmo grupo funcional são particionados e se a exploração de diferentes sub-nichos contribui para um melhor desempenho reprodutivo das plantas (Reginato & Michelangeli 2016; Dellinger *et al.* 2019; Vasconcelos *et al.* 2019). Nossos resultados sugerem que o efeito da complementariedade das vibrações florais afeta a performance masculina de forma diferente nas anteras de alimentação e polinização, dependendo da quantidade de visitas.

Em ambientes com muitas visitas (altas durações totais) e redundância funcional, a maioria dos grãos de pólen de *R. grandiflora* são liberados tanto das anteras de alimentação quanto das anteras de polinização. Isso sugere, que a exploração de um determinado nicho vibracional, especializado, contribui fortemente para a performance masculina da planta. No entanto, nesses cenários com muitas visitas, a complementaridade funcional, refletida pelo ADI, desfavorece a liberação dos grãos de pólen em ambas as anteras. Essa interação pode ser explicada pelo fato de que diversidades acústicas altas refletem uma maior variação das vibrações produzidas pelas abelhas, o que conseqüentemente pode condizer com uma maior frequência de visitantes pouco eficientes na extração dos grãos de pólen. Por outro lado, em ambientes com limitação nas visitas, a complementaridade funcional pode ajudar a compensar

a falta de polinizadores. No entanto, o efeito da complementaridade na liberação de pólen nessas circunstâncias é mais forte nas anteras de alimentação, o que ressalta o provável papel compensatório da complementaridade funcional nessas situações, pois a planta perde mais pólen para abelhas alimentarem as larvas do que deposita no seu dorso para a polinização.

É importante ressaltar que a maioria das flores de *R. grandiflora* estão inseridas em um cenário de limitação de polinizadores, o que torna a diversidade funcional das abelhas essencial para a sua reprodução (Konzmann *et al.* 2020). Considerando que a polinização por vibração é uma função ecossistêmica, esses resultados indicam que a diversidade acústica das vibrações produzidas pelas abelhas pode ter implicações importantes na dinâmica da polinização e no funcionamento do ecossistema como um todo. No entanto, é importante reconhecer que essa interação é complexa e depende do cenário ambiental em que as plantas estão inseridas.

Em suma, este estudo ressalta a importância das características vibracionais das abelhas vibradoras na polinização de *R. grandiflora* e destaca a complementaridade funcional entre as espécies de abelhas visitantes. Os índices acústicos utilizados no estudo demonstram ser valiosas ferramentas para avaliar a diversidade funcional da comunidade de abelhas e fornecer insights sobre o funcionamento dos ecossistemas. Considerando a relevância da polinização por vibração para a reprodução dessa planta e a possível limitação de polinizadores no ambiente, esses resultados podem contribuir para uma melhor compreensão dos processos ecológicos e evolutivos subjacentes à interação mutualística entre abelhas e plantas polinizadas por vibração.

5 CONCLUSÃO

Nesse estudo, destacamos a importância das características acústicas das abelhas vibradoras na predição da sua diversidade em uma comunidade de polinizadores. Além disso, também mostramos a interação da complementaridade/redundância funcional e da duração dos sons das abelhas com os tipos de anteras para a liberação dos grãos de pólen. Esses achados contribuem para uma compreensão mais aprofundada dos mecanismos que regem as interações entre abelhas vibradoras e plantas polinizadas por vibração, fornecendo informações valiosas para o estudo dessas interações. Futuras pesquisas nessa área podem explorar ainda mais as relações entre características acústicas, diversidade de polinizadores, performance e sucesso reprodutivo das plantas, considerando diferentes contextos ecológicos e espécies vegetais específicas.

6 REFERÊNCIAS

Ackerly, D. (2009). Conservatism and diversification of plant functional traits: Evolutionary rates versus phylogenetic signal. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 106, 19699–19706.

<https://doi.org/10.1073/pnas.0901635106>

Alcocer, I., Lima, H., Sugai, L.S.M. & Llusia, D. (2022). Acoustic indices as proxies for biodiversity: a meta-analysis. *Biol. Rev.*, 97, 2209–2236.

<https://doi.org/10.1111/brv.12890>

Arroyo-Correa, B., Beattie, C. & Vallejo-Marín, M. (2019). Bee and floral traits affect the characteristics of the vibrations experienced by flowers during buzz pollination. *J. Exp. Biol.*, 222.

<https://doi.org/10.1242/jeb.198176>

Benadi, G. (2015). Requirements for plant coexistence through pollination niche partitioning. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, 282.

<https://doi.org/10.1098/rspb.2015.0117>

Besson, M., Alison, J., Bjerge, K., Goroehowski, T.E., Høye, T.T., Jucker, T., *et al.* (2022). Towards the fully automated monitoring of ecological communities. *Ecol. Lett.*, 25, 2753–2775.

<https://doi.org/10.1111/ele.14123>

Boelman, N.T., Asner, G.P., Hart, P.J. & Martin, R.E. (2007). Multi-trophic invasion resistance in Hawaii: Bioacoustics, field surveys, and airborne remote sensing. *Ecol. Appl.*, 17, 2137–2144.

<https://doi.org/10.1890/07-0004.1>

Bouman, R.W., Steenhuisen, S.L. & Van Der Niet, T. (2017). The role of the pollination niche in community assembly of *Erica* species in a biodiversity hotspot. *J. Plant Ecol.*, 10, 634–648.

<https://doi.org/10.1093/jpe/rtw068>

Brito, V.L.G., Nunes, C.E.P., Resende, C.R., Montealegre-Zapata, F. & Vallejo-Marín, M. (2020). Biomechanical properties of a buzz-pollinated flower: Buzz pollination biomechanics. *R. Soc. Open Sci.*, 7.

<https://doi.org/10.1098/rsos.201010>

Brown J.F., M. & Paxton J., R. (2009). The conservation of bees: a global perspective. *Apidologie*, 40, 410–416.

<https://doi.org/10.1051/apido/2009019>

- Bu, W., Zang, R. & Ding, Y. (2014). Functional diversity increases with species diversity along successional gradient in a secondary tropical lowland rainforest. *Trop. Ecol.*, 55, 393–401.
- Buchmann, S.L. (1983). Buzz pollination in angiosperms. *Handb. Exp. Pollinat. Biol.*, 73–113.
- Buchmann, S.L. & Hurley, J.P. (1978). A biophysical model for buzz pollination in angiosperms. *J. Theor. Biol.*, 72, 639–657.
- [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(78\)90277-1](https://doi.org/10.1016/0022-5193(78)90277-1)
- Cooley, H. & Vallejo-Marín, M. (2021). Buzz-Pollinated Crops: A Global Review and Meta-analysis of the Effects of Supplemental Bee Pollination in Tomato. *J. Econ. Entomol.*, 114, 505–519.
- <https://doi.org/10.1093/jee/toab009>
- Dellinger, A.S., Essl, F., Hojsgaard, D., Kirchheimer, B., Klatt, S., Dawson, W., *et al.* (2016). Niche dynamics of alien species do not differ among sexual and apomictic flowering plants. *New Phytol.*, 209, 1313–1323.
- <https://doi.org/10.1111/nph.13694>
- Dellinger, A.S., Pöllabauer, L., Loreti, M., Czurda, J. & Schönenberger, J. (2019). Testing functional hypotheses on poricidal anther dehiscence and heteranthery in buzz-pollinated flowers. *Acta ZooBot Austria*, 156, 197–214.
- Faegri, K. (1986). The solanoid flower. *Trans. Bot. Soc. Edinburgh*, 45, 51–59.
- <https://doi.org/10.1080/03746608608684993>
- Farina, A. (2014). Soundscape ecology: Principles, patterns, methods and applications. *Soundscape Ecol. Princ. Patterns, Methods Appl.*, 9789400773, 1–315.
- <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7374-5>
- Fritz Müller. (1883). Two kinds of stamens with different functions in the same flower. *Nature*, 27, 364–365.
- <https://doi.org/10.1038/027364b0>
- Goswami, M., Bhattacharyya, P., Mukherjee, I. & Tribedi, P. (2017). Functional Diversity: An Important Measure of Ecosystem Functioning. *Adv. Microbiol.*, 07, 82–93.
- <https://doi.org/10.4236/aim.2017.71007>
- Hansen, M., Lanes, G.C., Brito, V.L.G. & Leonel, E.D. (2021). Investigation of pollen release by poricidal anthers using mathematical billiards. *Phys. Rev. E*, 104.
- <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.104.034409>
- Khalifa, S.A.M., Elshafiey, E.H., Shetaia, A.A., El-Wahed, A.A.A., Algethami, A.F., Musharraf, S.G., *et al.* (2021). Overview of bee pollination and its economic value for crop

production. *Insects*, 12.

<https://doi.org/10.3390/insects12080688>

Klein, A.M., Boreux, V., Fornoff, F., Mupepele, A.C. & Pufal, G. (2018). Relevance of wild and managed bees for human well-being. *Curr. Opin. Insect Sci.*, 26, 82–88.

<https://doi.org/10.1016/j.cois.2018.02.011>

Konzmann, S., Hilgendorf, F., Niester, C., Rech, A.R. & Lunau, K. (2020). Morphological specialization of heterantherous *Rhynchanthera grandiflora* (Melastomataceae) accommodates pollinator diversity. *Plant Biol.*, 22, 583–590.

<https://doi.org/10.1111/plb.13102>

De Luca, P.A., Buchmann, S., Galen, C., Mason, A.C. & Vallejo-Marín, M. (2019). Does body size predict the buzz-pollination frequencies used by bees? *Ecol. Evol.*, 9, 4875–4887.

<https://doi.org/10.1002/ece3.5092>

De Luca, P.A., Bussière, L.F., Souto-Vilaros, D., Goulson, D., Mason, A.C. & Vallejo-Marín, M. (2013). Variability in bumblebee pollination buzzes affects the quantity of pollen released from flowers. *Oecologia*, 172, 805–816.

<https://doi.org/10.1007/s00442-012-2535-1>

De Luca, P.A. & Vallejo-Marín, M. (2013). What's the “buzz” about? The ecology and evolutionary significance of buzz-pollination. *Curr. Opin. Plant Biol.*, 16, 429–435.

<https://doi.org/10.1016/j.pbi.2013.05.002>

Luo, Z., Zhang, D. & Renner, S.S. (2008). Why two kinds of stamens in buzz-pollinated flowers? Experimental support for Darwin's division-of-labour hypothesis. *Funct. Ecol.*, 22, 794–800.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2008.01444.x>

Maclaurin, J. & Sterelny, K. (2013). What Is Biodiversity? *What Is Biodiversity?*

Magurran, A.E. (2005). Biological diversity. *Curr. Biol.*, 15, 116–118.

<https://doi.org/10.1016/j.cub.2005.02.006>

Magurran, A.E., Baillie, S.R., Buckland, S.T., Dick, J.M.P., Elston, D.A., Scott, E.M., *et al.* (2010). Long-term datasets in biodiversity research and monitoring: Assessing change in ecological communities through time. *Trends Ecol. Evol.*, 25, 574–582.

<https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.06.016>

Mammides, C., Goodale, E., Dayananda, S.K., Kang, L. & Chen, J. (2017). Do acoustic indices correlate with bird diversity? Insights from two biodiverse regions in Yunnan Province, south China. *Ecol. Indic.*, 82, 470–477.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.07.017>

Melo, L.R.F., Vasconcelos, T.N.C., Caetano, A.P.S. & de Brito, V.L.G. (2022). Stamen Diversity in Melastomataceae: Morphology, Color, and Function. *Syst. Evol. Ecol. Melastomataceae*, 609–628.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-99742-7_27

Michener, C.D. (1962). An Interesting Method of Pollen Collecting by Bees from Flowers with Tubular Anthers. *Rev. Biol. Trop.*, 10.

Mora, C., Tittensor, D.P., Adl, S., Simpson, A.G.B. & Worm, B. (2011). How many species are there on earth and in the ocean? *PLoS Biol.*, 9.

<https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001127>

Nadrowski, K., Wirth, C. & Scherer-Lorenzen, M. (2010). Is forest diversity driving ecosystem function and service? *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 2, 75–79.

<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2010.02.003>

Nunes, C.E.P., Nevard, L., Montealegre-Z, F. & Vallejo-Marín, M. (2021). Variation in the natural frequency of stamens in six morphologically diverse, buzz-pollinated, heterantherous *Solanum* taxa and its relationship to bee vibrations. *Bot. J. Linn. Soc.*, 197, 541–553.

<https://doi.org/10.1093/botlinnean/boab044>

O'Connor, R.S., Kunin, W.E., Garratt, M.P.D., Potts, S.G., Roy, H.E., Andrews, C., *et al.* (2019). Monitoring insect pollinators and flower visitation: The effectiveness and feasibility of different survey methods. *Methods Ecol. Evol.*, 10, 2129–2140.

<https://doi.org/10.1111/2041-210X.13292>

Ollerton, J. (2017). Pollinator Diversity: Distribution, Ecological Function, and Conservation. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 48, 353–376.

<https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110316-022919>

Pauw, A. (2013). Can pollination niches facilitate plant coexistence? *Trends Ecol. Evol.*, 28, 30–37.

<https://doi.org/10.1016/j.tree.2012.07.019>

Phillips, R.D., Peakall, R., van der Niet, T. & Johnson, S.D. (2020). Niche Perspectives on Plant–Pollinator Interactions. *Trends Plant Sci.*, 25, 779–793.

<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2020.03.009>

Pieretti, N., Farina, A. & Morri, D. (2011). A new methodology to infer the singing activity of an avian community: The Acoustic Complexity Index (ACI). *Ecol. Indic.*, 11, 868–873.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.11.005>

Pritchard, D.J. & Vallejo-Marín, M. (2020). Floral vibrations by buzz-pollinating bees achieve higher frequency, velocity and acceleration than flight and defence vibrations. *J. Exp. Biol.*, 223.

<https://doi.org/10.1242/jeb.220541>

Proença, C.E.B. (1992). Buzz pollination-older and more widespread than we think? *J. Trop. Ecol.*, 8, 115–120.

<https://doi.org/10.1017/S0266467400006192>

Reginato, M. & Michelangeli, F.A. (2016). Diversity and constraints in the floral morphological evolution of *Leandra* s.str. (Melastomataceae). *Ann. Bot.*, 118, 445–458.

<https://doi.org/10.1093/aob/mcw116>

Ross, S.R.P.J., Friedman, N.R., Yoshimura, M., Yoshida, T., Donohue, I. & Economo, E.P. (2021). Utility of acoustic indices for ecological monitoring in complex sonic environments. *Ecol. Indic.*, 121.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107114>

Schleuter, D., Daufresne, M., Massol, F. & Argillier, C. (2010). A user's guide to functional diversity indices. *Ecol. Monogr.*, 80, 469–484.

<https://doi.org/10.1890/08-2225.1>

De Souza, M.J.H., Cupolillo, F., Antunes, D.A.P., Gianotti, A.R. & Bie, L.V. (2013). Estudo horário do vento em Diamantina - MG. In: *XVIII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*. Belém.

Spark, W. (2023). *Clima e condições meteorológicas médias em Estarreja no ano todo*. Available at: <https://pt.weatherspark.com/y/30616/Clima-característico-em-Diamantina-Brasil-durante-o-ano#Figures-WindSpeed>. Last accessed .

Van Strien, A.J., Soldaat, L.L. & Gregory, R.D. (2012). Desirable mathematical properties of indicators for biodiversity change. *Ecol. Indic.*, 14, 202–208.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.07.007>

Sueur, J., Pavoine, S., Hamerlynck, O. & Duvail, S. (2008). Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal. *PLoS One*, 3.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004065>

Switzer, C.M. & Combes, S.A. (2017). Bumblebee sonication behavior changes with plant species and environmental conditions. *Apidologie*, 48, 223–233.

<https://doi.org/10.1007/s13592-016-0467-1>

- Switzer, C.M., Russell, A.L., Papaj, D.R., Combes, S.A. & Hopkins, R. (2019). Sonicating bees demonstrate flexible pollen extraction without instrumental learning. *Curr. Zool.*, 65, 425–436.
- <https://doi.org/10.1093/cz/zoz013>
- Trevizan, R., Caetano, A.P.S., Brito, V.L.G., Oliveira, P.E. & Telles, F.J. (2023). Stamen and pollen heteromorphism linked to the division of labour in Melastomataceae species. *Flora Morphol. Distrib. Funct. Ecol. Plants*, 305.
- <https://doi.org/10.1016/j.flora.2023.152315>
- Vallejo-Marín, M. (2019). Buzz pollination: studying bee vibrations on flowers. *New Phytol.*, 224, 1068–1074.
- <https://doi.org/10.1111/nph.15666>
- Vasconcelos, M.F. (2011). O que são campos rupestres e campos de altitude nos topos de montanha do leste do Brasil? *Rev. Bras. Bot.*, 34, 241–246.
- <https://doi.org/10.1590/S0100-84042011000200012>
- Vasconcelos, T.N.C., Chartier, M., Prenner, G., Martins, A.C., Schönenberger, J., Wingler, A., *et al.* (2019). Floral uniformity through evolutionary time in a species-rich tree lineage. *New Phytol.*, 221, 1597–1608.
- <https://doi.org/10.1111/nph.15453>
- Verdi, M., Pougy, N., Martins, E. & Martinelli, G. (2015). A Serra do Espinhaço Meridional. *Plano ação Nac. para a Conserv. da flora ameaçada extinção da Serra do Espinhaço Merid.*, 19–31.
- Villanueva-Rivera, L.J., Pijanowski, B.C., Doucette, J. & Pekin, B. (2011). A primer of acoustic analysis for landscape ecologists. *Landsc. Ecol.*, 26, 1233–1246.
- <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9636-9>
- Vogel, S. (1978). Evolutionary shifts from reward to deception in pollen flowers. *Pollinat. Flowers by Insects*, 89–96.
- Walker, B. (1995). Conserving Biological Diversity through Ecosystem Resilience. *Conserv. Biol.*, 9, 747–752.
- <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1995.09040747.x>
- Westerkamp, C. & Gottsberger, G. (2000). Diversity Pays in Crop Pollination. *Crop Sci.*, 40, 1209–1222.
- <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.4051209x>

