



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM FITOTECNIA

**MANEJO DE ABELHAS *Xylocopa* Latreille, 1802 (HYMENOPTERA, APIDAE,
XYLOCOPINI) EM CULTIVO COMERCIAL DE *Passiflora edulis* Sims**

ZILDA CRISTINA MALHEIROS LIMA

VITÓRIA DA CONQUISTA

BAHIA– BRASIL

2026

ZILDA CRISTINA MALHEIROS LIMA

MANEJO DE ABELHAS *Xylocopa* Latreille, 1802 (HYMENOPTERA, APIDAE,
XYLOCOPINI) EM CULTIVO COMERCIAL DE *Passiflora edulis* Sims

Tese apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Fitotecnia, para a obtenção do título de “Doutor”.

Orientador (a): Aldenise Alves Moreira

Coorientador (a): Raquel Pérez-Maluf

VITÓRIA DA CONQUISTA

BAHIA– BRASIL

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

L711m

Lima, Zilda Cristina Malheiros.

Manejo de abelhas *Xylocopa* Latreille, 1802 (hymenoptera, apidae, Xylocopini) em cultivo comercial de *Passiflora edulis* Sims / Zilda Cristina Malheiros Lima, 2026.

134f. ; il. color.

Orientador (a): Dr.^a Aldenise Alves Moreira.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de concentração em Fitotecnia. Vitória da Conquista, 2026.

Inclui referências.

1. Abelhas solitárias. 2. *Passiflora* sp.. 3. Polinizadores. 4. Serviços ecossistêmicos. 5. Mudanças climáticas. I. Moreira, Aldenise Alves. II. Universidade

Catálogo na fonte: Karolyne Alcântara Profeta – CRB 5/2134

UESB - Campus Vitória da Conquista – BA



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
Área de Concentração em Fitotecnia

Campus de Vitória da Conquista, BA

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "MANEJO DE ABELHAS *XYLOCOPA LATREILLE*, 1802 (HYMENOPTERA, APIDAE, XYLOCOPINI) EM CULTIVO COMERCIAL DE *PASSIFLORA EDULIS SIMS*".

AUTOR (A): Zilda Cristina Malheiros Lima

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTORA EM AGRONOMIA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM FITOTECNIA, pela seguinte Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente



ALDENISE ALVES MOREIRA
Data: 31/01/2026 10:26:50 (-0300)
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Aldenise Alves Moreira, D.Sc. (UESB)

Documento assinado digitalmente



RAQUEL PEREZ MALUF
Data: 30/01/2026 19:27:33 (-0300)
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Raquel Pérez Maluf, D.Sc. (UESB)

Documento assinado digitalmente



SUANE COUTINHO CARDOSO
Data: 02/02/2026 14:32:13 (-0300)
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Suane Coutinho Cardoso, D.Sc. (IFBaiano)

Documento assinado digitalmente



ALINE CÂNDIDA RIBEIRO ANDRADE E SILVA
Data: 09/02/2026 14:37:27 (-0300)
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Aline Cândida R. Andrade e Silva, D.Sc. (UNIVASF)

Documento assinado digitalmente



ADAILTON FREITAS FERREIRA
Data: 19/02/2026 16:39:15 (-0300)
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Adailton Freitas Ferreira, D.Sc. (UESB)

Data de realização: 30 de janeiro de 2026.

Estrada do Bem Querer, Km 4, CEP 45031-900, Caixa Postal 95, Vitória da Conquista, Bahia, Brasil
Telefone: (77) 3425-9383, e-mail: ppgagronomia@uesb.edu.br

DEDICATÓRIA

Para a minha amada mãe Regina, que sempre esteve ao meu lado me apoiando e me oferecendo o maior amor do mundo.

Para os meus amores, meu pai Adailton (*in memorian*) e minha avó Zilda (*in memorian*), que em vida foram grandes incentivadores dos meus sonhos e me amaram sem medidas.

AGRADECIMENTOS

A realização deste sonho, traçado ao longo de quatro anos, não foi solitário; graças a Deus tive muitos ao meu lado nessa trajetória e tenho muito o que agradecer.

Primeiramente agradeço a Deus, que com sua infinita sabedoria me guiou, me fortaleceu e me orientou por meio da fé. Em dias difíceis e tumultuados, a fé e a esperança de que tudo passa fazem verdadeiros milagres.

À minha amada mãe Regina, que tantas vezes colocou os meus sonhos como prioridade, que foi força, apoio, acolhimento e cuidado, além da garantia certa de proteção e muito, muito amor.

Ao meu pai Adailton (*in memorian*), que partiu e deixou um grande vazio em meu coração, mas que, em vida, ensinou-me a amar sem medidas, lutar pelos meus sonhos e ser uma boa pessoa. Sonhamos juntos a concretização deste momento e mesmo não estando mais presente fisicamente, está presente em cada detalhe.

À minha avó Zilda (*in memorian*), minha grande incentivadora. Em vida também compartilhou comigo esse sonho, vibrou pela aprovação e, com toda a sua sabedoria, orientou-me em tantos momentos dessa vida, sempre com muito amor e cuidado. Ela também está em cada detalhe.

Ao meu irmão Marco Antônio, pela parceria, amor e incentivo, não só nessa etapa, mas na vida.

Às minhas tias, em especial, Tia Del e minha madrinha Marilene, por serem fontes inesgotáveis de cuidado, de apoio, de acolhimento, de incentivo, de torcida e muito amor.

Aos meus primos, pelos conselhos, pela torcida e incentivo constante, de modo especial: Thayara, Rhayana, Júnior, Veruska, Marciana, Caio, Paulo, Jack, Ana Paula, Lívia e Lucas.

Às minhas crianças: Maria Flor, Heitor, Cecília, Augusto, Sofia e Manu, que muitas vezes me ajudaram a olhar a vida com mais leveza e recarregam as minhas energias com toda a doçura e a pureza que as crianças possuem.

Aos meus amigos de longa data: Silvia, Sulamita, Islayne, Tamires, Alaine, Wesley e Marineide, que mesmo com a distância nunca deixaram de torcer e me incentivar.

Ao longo dessa caminhada também tive o privilégio de fazer grandes amigos que tornaram o processo bem mais leve. À Priscila, parceira de laboratório, de campo, de escrita e também fora da vida acadêmica, obrigada pelos conselhos, incentivo e amizade. Ao Elismar, por todo o apoio, ajuda em campo, boas risadas na vida e amizade leve. À Iasmim, pelas boas risadas e bons momentos compartilhados. Aos grupos “Encontros” e “Topa nada”, pelos momentos de descontração e risadas. Ao Alisson, pela parceira, amizade e carinho. Às meninas que dividem apartamento e também a vida ao longo desse período, em especial, Amanda, Eveline, Joana e Isa. Obrigada pela acolhida, por serem escuta, pelas risadas, pela parceria e amizade. Aos amigos do laboratório de Fruticultura e Biofábrica: Bide, Adriana, Rita e Bárbara; obrigada pela acolhida carinhosa, bons conselhos e amizade sincera. Aos amigos que construí ao longo da minha passagem pelo IF Baiano – Campus Teixeira de Freitas, em especial, ao Márcio e à Valéria, por tornarem a trajetória mais leve e mais afetuosa, além de toda a torcida e carinho. Aos meus alunos, pelo carinho e por manterem acesa em mim a chama da docência.

Aos amigos que a UESB, o Programa de Pós-Graduação e o LABISA me proporcionaram, a caminhada foi bem mais leve com vocês.

À FAPESB, pela concessão da bolsa que possibilitou a dedicação para a realização desta tese.

Por falar em leveza, não poderia deixar de agradecer à minha Psicóloga Sabrina, que com todo profissionalismo, humanidade e delicadeza me ajuda a manter as emoções em equilíbrio.

À professora Raquel, que me orientou não só no Doutorado, mas também no mestrado, são mais de seis anos juntas. Sou grata pela acolhida, pela parceria, pelos ensinamentos e por todo o aprendizado compartilhado.

À professora Aldenise, que assumiu o papel de ser minha orientadora, agradeço por ser sempre solícita e por toda atenção.

À Marília, que com toda leveza me ajudou com tanto cuidado na estatística dos nossos artigos, sempre com boas risadas e muito aprendizado.

À professora Suane, minha orientadora da graduação e a responsável por plantar em mim a sementinha da pesquisa e o sonho de ser Doutora em Agronomia. Obrigada por todo o aprendizado, por todo cuidado e pela parceira de mais de dez anos.

Agradeço também aqueles que ficam nos bastidores, mas que foram fundamentais para a realização do meu trabalho: os motoristas que, tantas vezes, foram a campo comigo; os funcionários da UESB, de modo especial, os colaboradores do PPGAgro; e à Elizângela e sua família, por terem disponibilizado o plantio para as nossas avaliações.

Estendo os meus agradecimentos também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), pela concessão da bolsa de estudo.

Enfim, sou grata a todos aqueles que caminharam comigo, que torceram e me incentivaram, afinal de contas: **“Um sonho que se sonha sozinho é apenas um sonho. Um sonho que se sonha junto é realidade”** (*Yoko Ono*).

“Entrega o teu caminho ao Senhor; confia nele, e o mais ele fará”.

Salmos 37:5

RESUMO GERAL

LIMA, Z. C. M. **MANEJO DE ABELHAS *Xylocopa* Latreille, 1802 (HYMENOPTERA, APIDAE, XYLOCOPINI) EM CULTIVO COMERCIAL DE *Passiflora edulis* Sims.** Vitória da Conquista – BA, UESB, 2026, 137 p. (Tese: Doutorado em Agronomia; Área de concentração em Fitotecnia) *

A polinização é um serviço ecossistêmico fundamental para a produção agrícola e para a manutenção da biodiversidade, sendo especialmente relevante em culturas dependentes de polinização cruzada, como *Passiflora edulis* Sims. Essa espécie apresenta autoincompatibilidade e depende da atividade de abelhas de grande porte, principalmente do gênero *Xylocopa*, para a frutificação e a qualidade dos frutos. No entanto, nos últimos anos, tem sido observado um déficit de polinização, juntamente com um aumento na dependência da polinização manual, com impactos diretos nos custos de produção e na sustentabilidade dos cultivos. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar, de forma abrangente, o papel das abelhas do gênero *Xylocopa* na polinização do maracujazeiro (*Passiflora edulis* Sims), sob cultivo comercial na região semiárida da Bahia, Brasil, considerando a biologia floral, a dinâmica sazonal e o comportamento dos visitantes florais, bem como a eficácia de estratégias ativas de manejo de polinizadores e os efeitos atuais e futuros das mudanças climáticas sobre a distribuição da cultura e de seu principal polinizador. Foram avaliados os seguintes parâmetros: antese floral, deflexão e receptividade dos estigmas, densidade de flores, densidade de abelhas, número de abelhas por flor, classificação das visitas e projeções de mudanças climáticas quanto às distribuições geográficas de *X. frontalis* e *P. edulis*. Os resultados demonstraram que a biologia floral do maracujazeiro é relativamente estável, com antese concentrada entre 12h00 e 14h00, estigmas receptivos desde a abertura floral e deflexão predominante entre 14h00 e 15h00, independentemente da sazonalidade. As abelhas do gênero *Xylocopa* destacaram-se como os principais polinizadores efetivos, enquanto *Apis mellifera* e *Trigona spinipes* atuaram como pilhadoras de néctar. A introdução de ninhos naturais de *Xylocopa frontalis* e *X. grisescens* promoveu um aumento de 351% na densidade de abelhas, 260% no número de abelhas por flor e 34,8% na frequência de visitas de *Xylocopa*, evidenciando o potencial do manejo ativo de polinizadores para reduzir déficits de polinização. As projeções climáticas indicaram que temperatura e precipitação são os principais determinantes da distribuição atual e futura, tanto da planta quanto do polinizador, com risco de dissociação espacial em cenários futuros. Conclui-se que a polinização do maracujazeiro por abelhas do gênero *Xylocopa* é um processo complexo, que depende da interação entre características florais, dinâmica populacional dos polinizadores, práticas de manejo agrícola e condições ambientais. Ainda assim, a introdução de ninhos de *Xylocopa* spp. destaca-se como uma estratégia viável para fortalecer a polinização do maracujazeiro e reduzir a dependência da polinização manual.

Palavras-chave: Abelhas solitárias, *Passiflora* sp., Polinizadores, Serviços ecossistêmicos, Interação, Mudanças climáticas.

*Orientador: Prof. Dr^a. Aldenise Alves Moreira, UESB.

GENERAL ABSTRACT

LIMA, Z. C. M. **Management of *Xylocopa* Bees Latreille, 1802 (Hymenoptera, Apidae, Xylocopini) in Commercial Cultivation of *Passiflora edulis* Sims.** Vitória da Conquista, Bahia, Brazil: UESB, 2026, 137 p. (Doctoral Thesis in Agronomy; Area of Concentration in Crop Science).

Pollination is a fundamental ecosystem service for the sustainability of agricultural production and the maintenance of biodiversity, being especially relevant in crops that depend on cross-pollination, such as passion fruit (*Passiflora edulis* Sims). This species is self-incompatible and depends on the activity of large-bodied bees, mainly of the genus *Xylocopa*, for fruit set and quality. However, environmental changes, intensive agricultural practices, and climate change have affected the availability and efficiency of these pollinators, resulting in pollination deficits and increased use of hand pollination, with direct impacts on production costs and crop sustainability. In this context, the present study evaluated floral biology, pollinator activity and behavior, management strategies involving the densification of *Xylocopa* nests, and the effects of projected climate change on the geographic distribution of *P. edulis* and its main pollinator in the state of Bahia. The results showed that the floral biology of passion fruit is relatively stable, with anthesis concentrated between 12:00 and 14:00 h, stigmas receptive from flower opening, and stigma deflection predominantly between 14:00 and 15:00 h, regardless of seasonality. However, pollination efficiency varied according to the composition and dynamics of the floral visitor community. Bees of the genus *Xylocopa* stood out as the main effective pollinators, whereas *Apis mellifera* and *Trigona spinipes* acted as robbers. The introduction of natural nests of *Xylocopa frontalis* and *X. grisescens* promoted a marked increase in bee density, visitation frequency, and the bee-to-flower ratio, highlighting the potential of active pollinator management to reduce pollination deficits. Climate projections indicated that temperature and precipitation are the main determinants of the current and future distribution of the plant and its pollinator, with a risk of spatial decoupling under future scenarios. It is concluded that sustainable passion fruit production depends on the integration of pollinator management, environmental conservation, and adaptive strategies in response to climate change.

Keywords: Solitary bees; *Passiflora* sp.; Pollinators; Ecosystem services; Interaction; Climate change.

*Advisor: Prof. Dr^a. Aldenise Alves Moreira, UESB.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO I: Sazonalidade da biologia floral e da atividade de polinizadores em cultivo comercial de *Passiflora edulis* Sims no semiárido baiano

Figura 1: Variações de temperatura, umidade relativa e precipitação no município de Anagé-Bahia, entre julho e outubro de 2023 58

Figura 2: Plantio comercial de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*), cultivar BRS Gigante Amarelo, localizado no Município de Anagé-Bahia em 2023 59

Figura 3: Deflexão dos estigmas das flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*): antese floral (A), primeiros minutos após a abertura (B), curvatura inicial (C), curvatura média (D) e curvatura total (E) 60

Figura 4: Porcentagem de flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) abertas, nos meses de agosto (A) e outubro 2023 (B), e a comparação da curva de abertura floral entre os dois meses pelo modelo de regressão ponderada localmente (Loess) (C) 61

Figura 5: Deflexão dos estigmas das flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*), nos meses de agosto (A) e outubro (B) e a comparação da curva de deflexão entre os dois meses pelo modelo de regressão ponderada localmente (Loess) (C) 62

Figura 6: Densidade média de flores (A), de abelhas (B) e de abelhas por flor nos meses de agosto e outubro em plantio comercial de *Passiflora edulis* no município de Anagé-BA 63

Figura 7: Número médio de visitas registradas em agosto e outubro nas flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) no município de Anagé-BA, em 2023 64

Figura 8: Número médio de visitas às anteras (A), estigmas (B) e nectário (C) registradas em flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) em Anagé-BA, nos meses de agosto e outubro de 2023 64

ARTIGO II: Estratégias de manejo de polinizadores: efeitos da introdução de ninhos de *Xylocopa* spp. na polinização de *Passiflora edulis* Sims

Figura 1: Variações de temperatura, umidade relativa e precipitação no município de Anagé-Bahia, entre julho de 2023 a novembro de 2024 92

Figura 2: Plantio comercial de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*), em 2023 e 2024, cultivar BRS Gigante Amarelo, localizado no Município de Anagé-Bahia. Destaque para

os ninhos de *Xylocopa frontalis* e *X. grisescens*, localizados a 154 metros do plantio de 2024, e a presença da mata nativa localizada à margem leste do plantio 93

Figura 3: Curva de abertura de flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) em 2023 e 2024 94

Figura 4: Curva de deflexão dos estigmas das flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*), em 2023 e 2024 95

Figura 5: Número médio de visitas em flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) sob condições naturais (sem adensamento) e com adensamento de abelhas do gênero *Xylocopa* 95

Figura 6: Número médio de toque às anteras (A), ao nectário (B) e aos estigmas (C) em flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) sob condições naturais (sem adensamento) e com adensamento de abelhas do gênero *Xylocopa* 96

Figura 7: Densidade média de flores (A), de abelhas (B) e de abelhas por flor (C) em plantio comercial de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) sob condições naturais (sem adensamento) e com adensamento de abelhas do gênero *Xylocopa* 97

ARTIGO III: Impactos das mudanças climáticas na ocorrência de *Passiflora edulis* e *Xylocopa frontalis* na Bahia: uma abordagem de modelagem de nicho ecológico*

Figura 1: *Script* utilizado para a modelagem para as espécies *Passiflora edulis* e *Xylocopa frontalis* no Estado da Bahia 104

Figura 2: Ocorrência atual (2020-2040) de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) (A) e mamangava (*Xylocopa frontalis*) (B) no estado da Bahia a cada 10 km 109

Figura 3: Variáveis bioclimáticas que afetam a ocorrência de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) (A) e da mamangava (*Xylocopa frontalis*) (B) no estado da Bahia..... 110

Figura 4: Cenários otimistas de mudanças climáticas para a ocorrência de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) (A) e da mamangava (*Xylocopa frontalis*) (B) no estado da Bahia, atualmente e em 2040-2060 111

Figura 5: Cenários intermediários de mudanças climáticas para a ocorrência de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) (A) e da mamangava (*Xylocopa frontalis*) (B) no estado da Bahia, atualmente e em 2040-2060 112

Figura 6: Cenários pessimistas de mudanças climáticas para a ocorrência de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) (A) e da mamangava (*Xylocopa frontalis*) (B) no estado da Bahia, atualmente e em 2040-2060 113

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO GERAL | 11 |
| 2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 15 |
| 3 ARTIGO I – Sazonalidade da biologia floral e da atividade de polinizadores em cultivo comercial de <i>Passiflora edulis</i> Sims no semiárido baiano | 21 |
| RESUMO | 22 |
| ABSTRACT | 23 |
| 3.1 INTRODUÇÃO | 24 |
| 3.2 MATERIAL E MÉTODOS | 27 |
| 3.3 RESULTADOS | 30 |
| 3.4 DISCUSSÃO | 34 |
| 3.5 CONCLUSÕES | 40 |
| 3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 42 |
| 3.7 LEGENDAS | 56 |
| 3.8 FIGURAS | 58 |
| 4 ARTIGO II – Estratégias de manejo de polinizadores: efeitos da introdução de ninhos de <i>Xylocopa</i> spp. na polinização de <i>Passiflora edulis</i> Sims | 65 |
| RESUMO | 66 |
| ABSTRAT | 67 |
| 4.1 INTRODUÇÃO | 68 |
| 4.2 MATERIAL E MÉTODOS | 72 |
| 4.3 RESULTADOS | 74 |
| 4.4 DISCUSSÃO | 76 |
| 4.5 CONCLUSÕES | 80 |
| 4.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 81 |
| 4.7 FIGURAS | 92 |
| 5 ARTIGO III – Impactos das mudanças climáticas na ocorrência de <i>Passiflora edulis</i> e <i>Xylocopa frontalis</i> na Bahia: uma abordagem de modelagem de nicho ecológico | 98 |

| | |
|--------------------------------------|-----|
| RESUMO | 99 |
| ABSTRAT | 100 |
| 5.1 INTRODUÇÃO | 101 |
| 5.2 MATERIAL E MÉTODOS | 103 |
| 5.3 RESULTADOS | 108 |
| 5.4 DISCUSSÃO | 113 |
| 5.5 CONCLUSÕES | 120 |
| 5.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 120 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS | 131 |

1. Introdução Geral

Os serviços ecossistêmicos garantem ao ser humano e ao meio ambiente benefícios relativos à produção de alimentos, à conservação da diversidade biológica e à recuperação de agroecossistemas, contribuindo para um modelo de desenvolvimento econômico que valorize e preserve esses serviços e promova bem-estar social e econômico (Cgee, 2017). Dentre esses serviços, a polinização destaca-se como um serviço ecossistêmico para a agricultura, ao contribuir com a produção de alimentos e assegurar a reprodução e a variabilidade genética das espécies vegetais (Burkle et al., 2017; Katumo et al., 2022). Análises globais demonstram que a polinização melhora não apenas a quantidade, mas também a qualidade dos alimentos, reforçando seu papel na segurança alimentar e na redução do desperdício (Gazzea et al., 2023), além de possuir elevado valor econômico em escala mundial (Porto et al., 2020).

Diversos animais atuam como agentes polinizadores, sendo as abelhas reconhecidas como os principais agentes desse processo (Inouye, 2013; Giannini et al., 2015). Estudos realizados nas últimas décadas reforçam o papel dos polinizadores, especialmente das abelhas, na polinização de plantas cultivadas e silvestres, evidenciando a necessidade de se incorporar esse serviço aos sistemas de produção agrícola. De modo geral, frutos provenientes de flores polinizadas apresentam mais sementes, melhor formato, maior valor nutritivo, melhor sabor e maior durabilidade (Bommarco et al., 2012; Garratt et al., 2013; Klatt et al., 2014; Junqueira e Augusto, 2016; Gazzea et al., 2023).

Plantas com flores e abelhas estão interligadas em uma relação de dependência mútua, mediada pela busca de recursos florais pelas abelhas e pelo favorecimento da polinização. A diversidade de comunidades de polinizadores, sobretudo de abelhas, está associada ao aumento da produtividade em diferentes cultivos agrícolas, como tomate, acerola, café, canola, maracujá-azedo e morango (Yamamoto et al., 2012; Garratt et al., 2013; Witter et al., 2014a; Vinícius-Silva et al., 2017; Silva et al., 2020). Em muitos casos, a redução da produção agrícola ou a ocorrência de frutos deformados decorrem da polinização insuficiente, e não da limitação de insumos agroquímicos (Imperatriz-

Fonseca e Nunes-Silva, 2010; Giannini et al., 2012). No Brasil, estudos indicam que abelhas da família Apidae, incluindo *Melipona*, *Xylocopa*, *Centris*, *Bombus* e *Apis mellifera*, figuram entre os principais polinizadores efetivos de culturas agrícolas (Giannini et al., 2015; Giannini et al., 2020).

Pesquisas demonstram que áreas naturais, próximas aos cultivos, funcionam como fontes de polinizadores silvestres, beneficiando a produção agrícola e aumentando o lucro do agricultor (Garibaldi et al., 2011; Bommarco et al., 2012; Witter et al., 2014b). A maior proporção de habitat seminatural ou vegetação nativa no entorno das lavouras está associada ao aumento da abundância e da riqueza de abelhas e à melhoria dos serviços de polinização (Cunningham-Minnick et al., 2019; Nicholson et al., 2019; Hansen et al., 2020; Ratto et al., 2021; Garratt et al., 2022; Scheper et al., 2023; Machado et al., 2024). Além disso, a adição de ninhos de abelhas solitárias ou sociais, em áreas com déficit de polinização, tem se mostrado uma estratégia eficaz para elevar o rendimento agrícola (Magalhães e Freitas, 2013; Junqueira e Augusto, 2016; Dainese et al., 2017).

Nas últimas décadas, a perda de polinizadores tem gerado crescente preocupação, associada ao uso de agroquímicos, à perda de habitat e às mudanças climáticas, que afetam o sucesso reprodutivo de plantas silvestres e cultivadas (Stein et al., 2017; Christmann et al., 2019; Katumo et al., 2022; Layek et al., 2023; Artamendi et al., 2025). As projeções climáticas para as próximas décadas indicam um cenário de elevada vulnerabilidade para a interação entre *P. edulis* e suas principais abelhas polinizadoras (*Xylocopa* spp.). Modelagens de nicho ecológico demonstram que o aquecimento global e a instabilidade nos regimes de chuvas podem reduzir em mais de 50% as áreas de sobreposição adequada entre a cultura e seus polinizadores, gerando um desacoplamento espacial e temporal que ameaça a viabilidade da produção no Neotrópico (Bezerra et al., 2019).

No Nordeste brasileiro, a intensificação da aridez projeta uma perda severa de habitats ideais, o que deve provocar um desencontro fenológico e forçar o deslocamento das zonas de cultivo para regiões de maior altitude ou latitudes mais ao sul, onde as condições climáticas ainda permitem a sobrevivência das abelhas carpinteiras (Giannini et al., 2013; Silva et al., 2022). Em sistemas agrícolas dependentes de polinizadores,

déficits de polinização podem resultar em expressivas perdas de produção, levando à adoção da polinização manual, prática onerosa que pode representar até cerca da metade do custo total de produção do maracujá-azedo (Furlaneto et al., 2011; Popak et al., 2019; Wurz et al., 2021; Silva et al., 2022).

Estudos indicam que cerca de 60% das culturas brasileiras dependem de polinizadores, sendo o maracujá-azedo classificado como de dependência essencial (Giannini et al., 2015; Giannini et al., 2017). O maracujazeiro-azedo (*Passiflora edulis* Sims) é descrito como autoincompatível e dependente de polinização cruzada para a formação de frutos viáveis (Yamamoto et al., 2012; Junqueira et al., 2016; Bezerra et al., 2019; Martarello et al., 2021). Estudos sobre a biologia floral de *P. edulis* reafirmam a complexidade de seu sistema reprodutivo, caracterizado por uma marcante dependência de sincronia com polinizadores específicos. A receptividade do estigma e a viabilidade do pólen são máximas nas primeiras horas após a antese, que ocorre tipicamente no período vespertino, sendo esses processos fisiológicos altamente sensíveis a oscilações de temperatura e umidade relativa (Siqueira et al., 2009).

Adicionalmente, a morfologia floral, marcada pela presença de uma corona de filamentos e a disposição espacial entre anteras e estigmas, estabelece uma barreira física que restringe a polinização efetiva a visitantes de grande porte, como as abelhas do gênero *Xylocopa* (Yamamoto et al., 2010). Suas características florais favorecem a alogamia e exigem polinizadores compatíveis com sua morfologia, destacando-se abelhas solitárias de grande porte, especialmente *Xylocopa frontalis* e *X. grisescens* (Yamamoto et al., 2012; Junqueira et al., 2016; Bezerra et al., 2019; Lima et al., 2023).

As abelhas do gênero *Xylocopa*, conhecidas como abelhas-carpinteiras, possuem atributos comportamentais e morfológicos que as tornam polinizadores de alta eficiência para o maracujazeiro. Estudos conduzidos no semiárido brasileiro demonstram que a densidade desses polinizadores em áreas de cultivo está intrinsecamente ligada à disponibilidade de locais de nidificação, como troncos de madeira morta, e à oferta de recursos florais alternativos durante a entressafra (Junqueira et al., 2013). A literatura destaca que o comportamento de forrageamento de alta energia dessas abelhas permite a visita a inúmeras flores em um curto espaço de tempo, promovendo a polinização cruzada,

necessária para otimizar a frutificação e a qualidade dos frutos (Freitas e Oliveira Filho, 2003). Na ausência desses polinizadores, a polinização manual tem sido utilizada como alternativa, porém apresenta elevado custo de mão de obra, podendo representar entre 44 e 48% do custo total de produção do maracujá-azedo e reduzir significativamente a rentabilidade do cultivo, quando comparada à polinização natural por abelhas (*Xylocopa*) (Popak et al., 2019).

Dessa forma, o manejo adequado e a conservação de recursos essenciais à sobrevivência das abelhas, como habitats para nidificação e oferta de recursos alimentares, são fundamentais para a manutenção dos serviços de polinização em áreas agrícolas (Aizen e Harder, 2009; Cooley e Vallejo-Marín et al., 2020; Kline e Joshi, 2020; Requier e Leonhardt, 2020). A disponibilidade de informações confiáveis sobre espécies-chave de polinizadores é essencial para a rentabilidade de culturas dependentes desses agentes e para a eficácia de programas de manejo e conservação (Alves, 2015).

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar, de forma integrada, o papel das abelhas do gênero *Xylocopa* na polinização do maracujá-azedo (*P. edulis*) em cultivo comercial no semiárido baiano, considerando a biologia floral, a dinâmica sazonal e o comportamento dos visitantes florais, bem como a eficácia de estratégias de manejo ativo de polinizadores e os efeitos atuais e futuros das mudanças climáticas sobre a distribuição da cultura e de seu principal polinizador.

Referências Bibliográficas

- Aizen, M. A.; Harder, L. D. The global stock of domesticated honey bees is growing slower than agricultural demand for pollination. **Current Biology**, v.19, n.11, p. 915-918, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.03.071>
- Alves, D. de A. A importância da paisagem agrícola no serviço de polinização das abelhas. In: Associação Brasileira de Estudos das Abelhas – A.B.E.L.H.A. **Agricultura e polinizadores**, São Paulo: A.B.E.L.H.A, p. 32-43, 2015.
- Artamendi, M.; Martin, P.A.; Bartomeus, I.; Magrach, A. Loss of pollinator diversity consistently reduces reproductive success for wild and cultivated plants. **Nature Ecology & Evolution**, v. 9, p. 96–313, 2025. Doi: 10.1038/s41559-024-02595-2
- Bezerra, A.D.M.; Pacheco Filho, A.J.S.; Bonfim, I.G.A.; Smagghe, G.; Freitas, B.M. Agricultural area losses and pollinator mismatch due to climate changes endanger passion fruit production in the Neotropics. **Agricultural Systems**, v.169, p. 49-57, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.12.002>
- Bommarco, R.; Marini, L.; Vaissière, B. Insect pollination enhances seed yield quality and market value in oilseed rape. **Oecologie**, v. 169, p. 1025-1032, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2271-6>
- Burkle, L.A.; Delphia, C.M.; O’neill, K.M. A dual role for farmlands: food security and pollinator conservation. **Journal of Ecology**, v. 105, p. 890-899, 2017. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12784>
- Cgee - Centro de gestão e estudos estratégicos. Importância dos polinizadores na produção de alimentos e na segurança alimentar global. Brasília, DF: CGEE, 2017. 124p. Disponível em <https://cdi.mecon.gov.br/bases/docolec/az3402.pdf> . Acesso em agosto de 2025.
- Christmann, S. Do we realize the full impact of pollinator loss on other ecosystem services and the challenges for any restoration in terrestrial areas? **Restoration Ecology**, v. 27, p. 720-725, 2019. <https://doi.org/10.1111/rec.12950>
- Cooley, H.; Vallejo-Marín, M. Buzz-Pollinated crops: A global review and meta-analysis of the effects of supplemental bee pollination in tomato. **Journal of Economic Entomology**, v. 144, p. 505-519, 2021. <https://doi.org/10.1093/jee/toab009>
- Cunningham-Minnick, M.J.; Peters, V.E.; Crist, T.O. Nesting habitat enhancement for wild bees within soybean fields increases crop production. **Apidologie**, v. 50, p. 833-844, 2019.
- Dainese, M.; Riedinger, V.; Holzschuh, A.; Klein, D.; Scheper, J.; Steffan-Dewenter, I.

- Managing trap-nesting bees as crop pollinators: Spatiotemporal effects of floral resources and antagonists. **Journal of Applied Ecology**, v. 55, p.195-204, 2017. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12930>
- Freitas, B. M.; Oliveira Filho, J. H. Ninhos racionais para mamangava (*Xylocopa frontalis*) na polinização do maracujá-amarelo (*Passiflora edulis*). **Ciência Rural**, v. 33, n.6, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000600021>
- Furlaneto, F.P.B.; Martins, A.N.; Esperancini, M.S.T.; Vidal, A.A.; Okamoto, F. Cost of production of the yellow passion fruit (*Passiflora edulis*). **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452011000500058>
- Garibaldi, L.; Aizen, M.; Klein, A.; Cunningham, S.; Harder, L. Global growth instability of agricultural yield decreases with pollinator dependence. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 08, p. 5909-5914, 2011. <https://doi.org/10.1073/pnas.1012431108>
- Garratt, M. P. D.; Breeze, T.; Jenner, N.; Polce, C.; Biesmeijer, J. C.; Potts, S. G. Avoiding a bad apple: insect pollination enhances fruit quality and economic value. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, v. 184, p. 34–40, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.032>
- Garratt, M.P.D.; O’connor, R.S.; Carvell, C.; Fountain, M.T.; Breeze, T.D.; Pywell, R.; Redhead, J.W.; Kinneen, L.; Mitschunas, N.; Truslove, L.; Xavier, C.S.; Jenner, N.; Ashdown, C.; Brittain, C.; Mckerchar, M.; Butcher, C.; Edwards, M.; Nowakowski, M.; Sutton, P.; Potts, S.G. Addressing pollination deficits in orchard crops through habitat management for wild pollinators. **Ecological Applications**, v. 33, 2022. <https://doi.org/10.1002/eap.2743>
- Gazzea, E.; Batáry, P.; Marini, L. Global meta-analysis shows reduced quality of food crops under inadequate animal pollination. **Nature Communications**, v. 14, p. 4463, 2023.
- Giannini, T. C.; Acosta, A. L.; Garófalo, C. A.; Saraiva, A. M.; Alves, dos Santos I.; Imperatriz-Fonseca, V. L. Pollination services at risk: bee habitats will decrease owing to climate change in Brazil. **Ecological Modelling**, v. 244, p 127-131, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.06.035>
- Giannini, T. C.; Acosta, A. L.; Silva, C. I.; Oliveira, P. E. A. M.; Imperatriz-Fonseca, V. L.; Saraiva, A. M. Identifying the areas to preserve passion fruit pollination service in Brazilian Tropical Savannas under climate change. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 171, p. 39-46, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.03.003>
- Giannini, T.C.; Cordeiro, G.D.; Freitas, B.M.; Saraiva, A.M.; Imperatriz-Fonseca, V.L. The dependence of crops for pollinators and the economic value of pollination in Brazil.

Journal of Economic Entomology, v. 108, p. 849-857, 2015.
<https://doi.org/10.1093/jee/tov093>

Giannini, T.C.; Costa, W.F.; Cordeiro, G.D.; Imperatriz-Fonseca, V.L.; Saraiva, A.M.; Biesmeijer, J.; Garibaldi, L.A. Projected climate change threatens pollinators and crop production in Brazil. **Plos One**, 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182274>

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

Hansen, K.; Sritongchuay, T.; Bumrundsri, S.; Simmons, B.T.; Strange, N.; Dalsgaard, B. Landscape-Level effects of forest on pollinators and fruit set of guava (*Psidium guajava* L.) in Orchards across Southern Thailand. **Diversity**, v. 12, n. 6, p. 259, 2020.
<https://doi.org/10.3390/d12060259>

Imperatriz-Fonseca, V. L.; Nunes-Silva, P. As abelhas, os serviços ecossistêmicos e o Código Florestal Brasileiro. **Biota Neotropica**, v. 10, n. 4, p. 59-62, 2010.
<https://doi.org/10.1590/S1676-06032010000400008>

Inouye, D.W. Role of pollinators. **Encyclopedia of Biodiversity**, v. 6, p. 140-146, 2013. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00112-X>

Junqueira, C.N.; Augusto, S. Bigger and sweeter passion fruits: effect of pollinator enhancement on fruit production and quality. **Apidologie**, v. 48, p. 131-140, 2016.
<https://doi.org/10.1007/s13592-016-0458-2>

Junqueira, P. K.; Junqueira, P. L.; Zacharias, A. O.; Scaranari, C.; Faleiro, F. G. Cultivares. IN: Faleiro, F. G.; Junqueira, N. T. V. (Ed. téc.). Maracujá: o produtor pergunta, a Embrapa responde. (Coleção 500 perguntas, 500 respostas). Brasília, DF: **Embrapa**, v. 26, n. 63-76, 2016.

Katumo, D.M.; Liang, H.; Ochola, A.C.; LV, M.; Wangm Q.F.; Yang, C.F. Pollinator diversity benefits natural and agricultural ecosystems, environmental health, and human welfare. **Plant Diversity**, v. 44, p. 429-435, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.pld.2022.01.005>

Klatt, B.K.; Holzschuc, A.; Westphal, C.; Clough, Y.; Smit, I.; Pawelzik, E.; Tschardtke, T. Bee pollination improves crop quality, shelf life and commercial value. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 281, n. 1775, p. 2013-2440, 2014. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2440>

Kline, O.; Joshi, N.K. Mitigating the eEffects of habitat Loss on Solitary Bees in Agricultural Ecosystems. **Agriculture**, v. 10, n. 4, p. 115, 2020.

<https://doi.org/10.3390/agriculture10040115>

Layek, U.; Baghra, N.K.; das, A.; Kundu, A.; Karmakar, P. Dependency of crops on pollinators and pollination deficits: an approach to measurement considering the influence of various reproductive traits. **Agriculture**, v. 13, n. 8, p. 1563, 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture13081563>

Lima, Z.C.M.; Miranda, P.S.; Pérez-Maluf, R.; Moreira, A.A. Pollinators or pillagers? What is the impact of flower visitors on the production of yellow passion fruit? **Journal of apicultural research**, v. 64, p. 178-184, 2023. <https://doi.org/10.1080/00218839.2023.2252132>

Machado, A.C.P.; Baronio, G.J.; Novaes, C.S.; Ollerton, J.; Torres, M.W.; Lopes, D.N.S.; Rech, A.R. Optimizing coffee production: Increased floral visitation and bean quality at plantation edges with wild pollinators and natural vegetation. **Journal of Applied Ecology**, v. 61, p. 465-475, 2024. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14591>

Magalhães, C.; Freitas, B. Introduction nests of the oil collect bee *Centris analis* (Hymenoptera, Apidae, Centridini) for pollination of acerola (*Malpighia emarginata*) increases yield. **Apidologie**, v. 44, p. 234-237, 2013. <https://doi.org/10.1007/s13592-012-0175-4>

Martarello, N.S.; Gruchowski-Woitowicz, F.C.; Agostini, K. Pollinator efficacy in yellow passion fruit (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* Deg., *Passifloraceae*). **Neotropical Entomology**, v. 50, p. 349-357, 2021. Doi: 10.1007/s13744-020-00846-y

Nicholson, C.C.; Ricketts, T.H. Wild pollinators improve production, uniformity, and timing of blueberry crops. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 272, p. 29-37, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.10.018>

Popak, A.E.; Markwith, S.H. Economic valuation of bee pollination services for passion fruit (Malpighiales: Passifloraceae) cultivation on smallholding farms in São Paulo, Brazil, Using the Avoided Cost Method. **Journal of Economic Entomology**, v. 112, p. 2049–2054, 2019. <https://doi.org/10.1093/jee/toz169>

Porto, R.G.; Almeida, R.F.; Cruz-Neto, O.; Tabarelli, M.; Viana, B.F.; Peres, C.A.; Lopes, A.V. Pollination ecosystem services: A comprehensive review of economic values, research funding and policy actions. **Food Security**, v. 12, p. 1425-1442, 2020. DOI:10.1007/s12571-020-01043-w

Requier, F.; Leonhardt, S.D. Beyond flowers: including non-floral resources in bee conservation schemes. **Journal of Insect Conservation**, v. 24, p. 5-16, 2020.

Scheper, J.; Badenhauer, I.; Kantelhardt, J.; Kirchweber, S.; Bartomeus, I.; Bretagnolle, V.; Clough, Y.; Gross, N.; Raemakers, I.; Vilà, M.; Zaragoza-Trello, C.;

Kleijn, D. Biodiversity and pollination benefits trade off against profit in an intensive farming system. **Ecology**, v. 120, n. 28, 2023. <https://doi.org/10.1073/pnas.2212124120>

Silva, G.R.; Pérez-Maluf, R.; Ribeiro, G.S; Gusmão, A.L.J. Pollination service of *Nannotrigona testaceicornis* stingless bees in strawberry. **Arquivos do Instituto Biológico**, v. 87, 2020. <https://doi.org/10.1590/1808-1657000292019>

Silva, N.M.; Araújo Neto, S.E.; Souza, L.G.S.; Uchôa, T.L.; Pinto, G.P. Profitability of organic yellow passion fruit as a function of irrigation, protected cultivation and pollination. **Revista Caatinga**, v. 35, n. 3, 2022. <https://doi.org/10.1590/1983-21252022v35n314rc>

Silva, J. L.; Cruz-Neto, O.; Tabarelli, M.; Albuquerque, U. P.; Lopes, A. V. Climate change will likely threaten areas of suitable habitats for the most relevant medicinal plants native to the Caatinga dry forest. **Ethnobiology and Conservation**, v. 11, 2022. <https://doi.org/10.15451/ec2022-06-11.15-1-24>

Siqueira, K. M. M.; Kiill, L. H. P.; Martins, C. F.; Lemos, I. B.; Monteiro, S. P.; Feitoza, E.A. Ecologia da polinização do maracujá-amarelo, na região do vale do submédio São Francisco. **Revista Brasileira de Fruticultura**, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452009000100003>

Stein, K.; Coulibaky, D.; Stenchly, K.; Goetze, D.; Porembski, S.; Lindner, A.; Konaté, S.; Linsenmair, E.K. Bee pollination increases yield quantity and quality of cash crops in Burkina Faso, West Africa. **Scientific Reports**, v. 7, 2017. DOI:10.1038/s41598-017-17970-2

Vinícius-Silva, R.; Parma, D. F.; Tostes, R. B.; Arruda, V. M.; Werneck, M. V. Importance of bees in pollination of *Solanum lycopersicum* L. (Solanaceae) in openfield of the Southeast of Minas Gerais State, Brazil. **Hoehnea**, v. 44, n.3, p. 349-360, 2017. <https://doi.org/10.1590/2236-8906-07/2017>

Witter, S.; Nunes-Silva, P.; Blochtein, B. Abelhas na Polinização da Canola: benefícios ambientais e econômicos, **EDIPUCRS: Porto Alegre**, v.71, 2014a.

Witter, S.; Nunes-Silva, P.; Blochtein, B.; Lisboa, B.B.; Imperatriz-Fonseca, V.L. As abelhas e a agricultura. **EDIPUCRS: Porto Alegre**, v.143, 2014b.

Wurz, A.; Grass, I.; Tschardtke, T. Hand pollination of global crops – A systematic review. **Basic and Applied Ecology**, v. 56, p. 299-321, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2021.08.008>

Yamamoto, M.; Barbosa, A.A.A.; Oliveira, P.E.A.M. A polinização em cultivos agrícolas e a conservação das áreas naturais: o caso do maracujá-amarelo (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* deneger). *Oecologia Australis*, v. 14, n. 1, 2010.

Yamamoto, M.; Silva, C. I.; Augusto, S. C.; Barbosa, A. A. A.; Oliveira, P. E. The role of bee diversity in pollination and fruit set of yellow passion fruit (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa*, Passifloraceae) crop in Central Brazil. **Apidologie**, v. 43, p. 515-526, 2012. <https://doi.org/10.1007/s13592-012-0120-6>

ARTIGO I

Sazonalidade da biologia floral e da atividade de polinizadores em cultivo comercial de

Passiflora edulis Sims no semiárido baiano*

***Situação:** submetido

**Sazonalidade da biologia floral e da atividade de polinizadores em cultivo
comercial de *Passiflora edulis* Sims no semiárido baiano**

Zilda Cristina Malheiros Lima^{1*}; Priscila Silva Miranda¹; Raquel Pérez-Maluf¹; Marília
Alves Brito Pinto¹; Aldenise Alves Moreira¹; Alisson Gean Carvalho Guimarães¹

¹ Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia/UESB, Brasil. Estrada Bem Querer, Km-
04, 45033-300, Vitória da Conquista, Bahia, Brasil.

*zildacristinaml@gmail.com

Resumo

A polinização é essencial para a reprodução de *Passiflora edulis*, cultura dependente de polinização cruzada realizada principalmente por abelhas de grande porte, como *Xylocopa* spp. Em ambientes semiáridos, a sazonalidade pode alterar a biologia floral e o comportamento dos visitantes, influenciando a eficiência da polinização natural. Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar se a sazonalidade altera a janela de polinização e a eficiência dos visitantes. Foram analisadas antese, deflexão e receptividade dos estigmas, densidade floral e comportamento dos visitantes. A antese ocorreu predominantemente entre 12h00 e 14h00, com receptividade estigmática desde a abertura floral em ambos os meses. A deflexão dos estigmas foi semelhante entre os períodos, embora agosto apresentasse maior proporção de flores com estigmas totalmente curvos. A densidade floral foi maior em outubro, refletindo floração mais intensa, enquanto a densidade total de abelhas e a razão abelha/flor foram semelhantes entre os

meses. A composição dos visitantes variou sazonalmente: agosto foi dominado por *Xylocopa* spp. (96,5%), enquanto outubro apresentou maior diversidade, com aumento de *Apis mellifera*. As abelhas *Xylocopa* foram as principais polinizadoras efetivas, responsáveis pelo maior número de toques aos estigmas, enquanto *A. mellifera* e *Trigona spinipes* atuaram como pilhadoras. O maior número de visitas e de toques aos estigmas em outubro indica maior probabilidade de polinização natural nesse período, evidenciando a importância da dinâmica sazonal dos visitantes florais.

Palavras-chave: Serviços ecossistêmicos. Maracujá azedo. Fenologia floral. Polinização cruzada. *Xylocopa* spp.

Abstract

Pollination is essential for the reproduction of *Passiflora edulis*, a crop dependent on cross-pollination carried out mainly by large bees such as *Xylocopa* spp. In semiarid environments, seasonality may alter floral biology and visitor behavior, influencing the efficiency of natural pollination. In this context, the present study aimed to evaluate whether seasonality changes the pollination window and visitor efficiency. Anthesis, stigma deflexion and receptivity, floral density, and visitor behavior were analyzed. Anthesis occurred predominantly between 12:00 and 14:00 h, with stigmatic receptivity from flower opening in both months. Stigma deflexion was similar between periods, although August showed a higher proportion of flowers with fully curved stigmas. Floral density was higher in October, reflecting more intense flowering, whereas total bee density and the bee/flower ratio were similar between months. Visitor composition varied

seasonally: August was dominated by *Xylocopa* spp. (96.5%), whereas October showed greater diversity, with an increase in *Apis mellifera*. *Xylocopa* bees were the main effective pollinators, responsible for the highest number of contacts with stigmas, while *A. mellifera* and *Trigona spinipes* acted as nectar robbers. The higher number of visits and stigma contacts in October indicates a greater probability of natural pollination during this period, highlighting the importance of seasonal dynamics of floral visitors.

Keywords: Ecosystem services. Sour passion fruit. Floral phenology. Cross-pollination. *Xylocopa* spp.

Introdução

A polinização animal é um serviço ecossistêmico fundamental para a produção agrícola mundial, gerando um benefício econômico global avaliado entre US\$195 a 387 bilhões (Porto et al., 2020). Em sistemas tropicais e subtropicais, muitas espécies de interesse comercial dependem de visitantes florais para garantir a fertilização efetiva, sendo as abelhas os principais agentes desses serviços (Ollerton, 2017; Porto et al., 2020). Pesquisas relataram aumento na quantidade e qualidade dos frutos de algumas espécies vegetais, sejam elas dependentes exclusivamente da polinização cruzada (abóbora, acerola, cacau, melancia, maracujá) ou que se beneficiam dela (café, pepino, tomate, feijão, morango) (Silva et al., 2012; Magalhães e Freitas, 2013; Wolowski et al., 2019; Klein et al., 2020; Silva et al., 2020; Baronio et al., 2021; Lima et al., 2023; Miranda et al., 2024).

Nesse contexto, a espécie *Passiflora edulis* (maracujá-azedo), cultivada

amplamente, apresenta características florais e dependência de polinização cruzada, realizada por grandes abelhas, como as do gênero *Xylocopa*, frequentemente descritas como polinizadoras eficientes para a espécie (Siqueira et al., 2009; Yamamoto et al., 2012; Lima et al., 2023). Estudos prévios indicam que *Xylocopa* promove contato efetivo entre anteras e estigmas em *P. edulis*, favorecendo a fertilização e o vingamento dos frutos (Androcioli et al., 2017; Barrera et al., 2020; Martarello et al., 2021; Lima et al., 2023).

Já a presença e abundância de abelhas com comportamento pilhador, como *Apis mellifera*, pode alterar as interações planta-polinizador pela competição por recursos e pelo comportamento de pilhagem, coletando néctar ou pólen, mas sem realizar a polinização efetiva, reduzindo ou deslocando visitas de polinizadores efetivos (Richman et al., 2021). Essas dinâmicas são particularmente relevantes em pomares comerciais onde práticas de manejo, como irrigação, adubação, introdução de colmeias e polinização manual, são utilizadas, o que pode modificar a disponibilidade de recursos e o comportamento dos polinizadores (Richman et al., 2021; Page e Williams, 2022).

A fenologia floral e as características de receptividade, como antese, deflexão dos estigmas e janela de receptividade, determinam a “janela temporal” disponível para visitas efetivas dos polinizadores. Essa janela pode variar com fatores sazonais, como temperatura, precipitação e fotoperíodo (Martins et al., 2021; Pereira et al., 2024). Alterações sazonais podem, portanto, modular simultaneamente a oferta de flores, densidade floral e a atividade dos visitantes, o que afeta a frequência de visitas (Martins et al., 2021; Layek et al., 2025). Como as características florais são centrais nas interações entre as plantas e o polinizador, alterações em atributos, como tamanho floral, profundidade do tubo nectarífero, número de flores e receptividade reprodutiva podem

modificar a frequência de visitas, a taxa de contato com estruturas reprodutivas e a eficiência da polinização (Quesada et al., 2009; Kuppler et al., 2016; Kuppler et al., 2017; Delgado-Carrillo et al., 2018).

Nesse cenário, a sazonalidade se configura como um dos principais fatores das interações planta-polinizador, uma vez que as oscilações na disponibilidade hídrica e nas condições climáticas afetam tanto a fenologia da floração quanto a atividade dos polinizadores. Essas variações repercutem em alterações temporais na composição, abundância e diversidade dos visitantes florais (Quesada et al., 2009; Delgado-Carrillo et al., 2018). Em contextos de seca ou redução da disponibilidade de água, observa-se frequentemente a diminuição do número e do tamanho das flores, o que pode reduzir as taxas de visitação ou alterar a composição dos polinizadores, embora as respostas sejam heterogêneas e dependentes da espécie vegetal e do grupo de polinizadores envolvidos (Burkle e Runyon, 2016; Gallagher e Campbell, 2017; Glenney et al., 2018).

Estudos têm destacado que, apesar da importância das interações planta-polinizador, ainda são relativamente poucos os trabalhos que integram a variação espacial e temporal, incluindo sazonalidade na análise dessas redes (Moreira et al., 2015; Biella et al., 2017; CaraDonna et al., 2017; Souza et al., 2018). Em florestas tropicais secas, Cortés-Flores et al. (2022) demonstraram que a sazonalidade desempenha papel fundamental na diversidade de polinizadores e reforçaram a importância da conservação de florestas maduras para a manutenção das interações de polinização. Além disso, pesquisas mostram que mudanças induzidas por seca, nas características florais, podem afetar de forma complexa as taxas de visitação e a eficácia dos polinizadores, evidenciando lacunas no entendimento dessas respostas (Vaughton e Ramsey, 1998; Mitchell et al., 2004;

Kuppler et al., 2016; Walter, 2020). Esses trabalhos ressaltam a necessidade de estudos integrativos que considerem simultaneamente fenologia floral, sazonalidade ambiental e interações ecológicas.

Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar se a sazonalidade altera a janela de polinização e a eficiência dos visitantes.

Material e Métodos

O experimento foi desenvolvido em um cultivo comercial de maracujá-azedo (*P. edulis*), cultivar BRS Gigante Amarelo, localizado no município de Anagé-Bahia, sob as coordenadas 14°7'10"07" latitude Sul e 41°20'41" longitude oeste, nos meses de agosto e outubro de 2023, cujas variações de temperatura, umidade relativa e precipitação foram obtidas pelo NasaPower (Figura 1). Sendo que, ao longo do mês de agosto, a temperatura média foi de 30°C e de 32°C em outubro.

A área plantada tinha como dimensão 0,5 hectare, e as avaliações foram iniciadas com 90 dias do plantio, sendo observadas a primeira e segunda florada e colheita (Figura 2). O sistema de produção utilizado foi do tipo convencional, com a utilização de produtos químicos, quando necessário, para controlar pragas, irrigação por gotejamento duas vezes ao dia, fertilizantes químicos a cada 15 dias, desde o plantio, e utilização da polinização manual, realizada todos os dias no turno vespertino entre as 14h00-16h00.

Inicialmente, foi realizado um levantamento das espécies de abelhas de médio e grande porte, presentes no cultivo e na mata nativa, localizada à margem leste do plantio, bem como a avaliação das espécies vegetais presentes na mata, que poderiam ser locais potenciais de nidificação para abelhas do gênero *Xylocopa*. Tal busca foi realizada

aleatoriamente ao longo do plantio e no interior de uma mata nativa característica de caatinga. As abelhas foram identificadas no laboratório de Biodiversidade do Semiárido (Labisa), com a utilização de chaves de identificação, e as espécies vegetais foram identificadas por Alisson Guimarães, Msc. em Ciências Florestais. O diagnóstico de espécies de abelhas de médio e grande porte, presentes no cultivo e na mata nativa, indicou a presença das abelhas *X. frontalis* (Olivier, 1789), *X. grisescens* (Lepelletier, 1841), *A. mellifera* (Linnaeus, 1758) e *Trigona spinipes* (Fabricius, 1793), sobrevoando o plantio e forrageando flores nativas e próximas à área. O diagnóstico de espécies vegetais, presentes na mata, indicou a presença de 8 famílias e 19 espécies vegetais: **Anacardiaceae** (*Astronium urundeuva* Allemão, *Schinopsis brasiliensis* Engler), **Burseraceae** (*Commiphora leptophloeos* (Mart.) J.B.Gillett), **Cactaceae** (*Cereus jamacaru* DC, *Pereskia grandifolia* Haw), **Cobretaceae** (*Combretum pisonioides* Taub.), **Euphorbiaceae** (*Jatropha molissima* Pohl Baill., *Manihot caerulescens* Pohl), **Fabaceae** (*Acacia dealbata* (Link) Muller, *Libidibia ferrea* (Mart. Ex Tul.) L.P.Queiroz, *Mimosa caesalpiniaefolia* Benth., *Mimosa ophthalmocentra* Mart. ex Benth., *Mimosa tenuiflora* (Willd), *Mimosa verrucosa* Benth., *Caesalpinia pyramidalis* (Tul.)), **Malvaceae** (*Pseudobombax marginatum* (A.St.-Hil.)), **Rosaceae** (*Crataegus monogyna* Jacq., *Crataegus oxyacantha* L.) e **Rutaceae** (*Helietta apiculata* Benth).

Para o estudo da biologia floral do maracujazeiro, foram avaliados os seguintes parâmetros: antese floral, deflexão dos estigmas, receptividade dos estigmas e densidade de flores. A determinação dos horários de antese floral e deflexão dos estigmas foi obtida a partir do acompanhamento de trinta flores, que foram monitoradas individualmente desde a sua abertura até a completa deflexão dos estigmas, nos meses de agosto e outubro,

ao longo de cinco dias consecutivos em cada mês.

A deflexão dos estigmas, representada pela curvatura dos estigmas após a antese floral com o passar das horas (Figura 3), indica o melhor momento para a polinização da flor, pois a curvatura total destes permite que sejam tocados pelo polinizador ao terem suas flores visitadas.

A receptividade dos estigmas foi determinada, seguindo a metodologia proposta por Kearns e Inouy (1993), por meio da qual estiletos contendo os estigmas foram extraídos da flor, transferidos para uma placa de Petri e, posteriormente, depositadas duas gotas de Peróxido de hidrogênio – H_2O_2 (3%) sobre o estigma. Após 1 minuto, verificou-se, com auxílio de uma lupa, a formação de bolhas de ar sobre o estigma, o que indicava a atividade da enzima peroxidase e, portanto, a sua receptividade. Esta avaliação foi realizada em 10 estigmas, colhidos aleatoriamente, e repetida seis vezes ao longo do dia (12h00, 13h00, 14h00, 15h00, 16h00 e 17h00) no mês de agosto.

Para determinar a densidade de flores e abelhas no cultivo, utilizou-se o protocolo proposto por Vaissière et al. (2011), com modificações, no qual a densidade foi determinada por meio da amostragem de varredura das unidades florais abertas e os visitantes florais observados, percorrendo quatro blocos que correspondiam a 100 metros² cada, sorteados aleatoriamente e avaliados em intervalos de: 12h00, 13h00, 14h00, 15h00 e 16h00, quando eram contabilizados o número de flores abertas e de abelhas. Realizou-se esta amostragem caminhando lentamente entre as linhas/ruas de plantio, registrando o número de flores abertas visualizadas e o número de abelhas vistas ao olhar para as unidades florais individuais uma a uma em sequência. Essa avaliação foi realizada uma vez, no mês de agosto, e repetida no mês de outubro, durante a semana de avaliações.

O monitoramento e a qualificação das visitas foram realizados a partir da observação de trinta flores de maracujá presentes do cultivo, que foram marcadas com uma fita de cetim e acompanhadas durante todo o seu período de abertura e receptividade. Foram quantificados todos os visitantes e as visitas observadas quanto ao seu forrageamento, em função da coleta de néctar ou pólen.

Os resultados observados da antese floral e deflexão dos estigmas foram organizados em gráficos descritivos, enquanto que, para a avaliação do efeito da época do ano sobre: antese floral, deflexão dos estigmas, densidade de flores, densidade de abelhas, números de visitas e a qualificação das visitas foram ajustados a modelos de regressão, ponderados localmente - LOESS (Cleveland e Devlin, 1988). A diferença entre as épocas foi avaliada, comparando as regressões com base em seus respectivos intervalos de confiança de 95%. As seções com regressões sobrepostas não representaram nenhuma diferença entre tratamentos e a ausência de sobreposições representaram diferenças entre épocas.

Resultados

Biologia floral: Antese floral, deflexão e receptividade dos estigmas

A abertura floral iniciou-se a partir das 12h00, com pico de antese entre 13h00-14h00, tanto no mês de agosto como no mês de outubro (Figura 4A e B). Segundo o modelo de regressão ponderada localmente (Loess), não houve diferença entre a abertura floral nos dois meses avaliados, considerando os intervalos de hora (Figura 4C).

Em ambos os meses, observou-se que as primeiras deflexões ocorreram a partir das 13h00, com maior frequência de curvatura total dos estigmas entre as 14h00-15h00

da tarde (Figura 5A e B), não sendo observadas diferenças entre os meses avaliados (Figura 5C). No entanto, das trintas flores que foram observadas em cada mês, durante o mês de agosto, 93,7% apresentaram a deflexão total dos estigmas, enquanto que, no mês de outubro, essa porcentagem foi de 76,67%.

Receptividade dos Estigmas

A receptividade dos estigmas foi constatada desde a antese floral até as últimas horas do monitoramento, independente da sua curvatura, indicando que, desde a abertura da flor, eles estão receptivos para que ocorra a fecundação após a visitação. Dessa forma, o vingamento ou não da flor, após a visitação, depende mais da curvatura dos estigmas, que precisam ser tocados, para que a flor seja de fato polinizada, do que de sua receptividade.

Densidade de flores e abelhas

Quanto à densidade de flores, observou-se que, em ambos os meses, havia flores abertas a partir de 12h00-13h00, com uma densidade média de flores superior no mês de outubro, durante todo o intervalo avaliado, de 13,75 por 100m² contra 8,62 no mês de agosto (Figura 6A). Já a densidade de abelhas não se diferiu nos intervalos avaliados, sendo de 0,87 e 0,81 por 100m², respectivamente (Figura 6B). A densidade de abelhas flor⁻¹ em 100 m² também não variou em relação aos intervalos avaliados entre os períodos comparados, no entanto, a densidade média de abelhas por flor, no mês de agosto, foi de 0,13 contra 0,07 em outubro, devido ao aumento de flores observado neste mês, sendo registradas as espécies *X. frontalis*, *X. grisesneces* e *A. mellifera* em ambos os meses (Figura 6C).

Monitoramento e qualificação das visitas

A partir do monitoramento de trinta flores, observou-se que, em agosto, foram registradas cinco espécies visitantes às flores de maracujá, sendo 388 visitas de *Xylocopa* spp. (96,54%), cinco de *A. mellifera* (1,24%), quatro de Trochilidae sp. (Beija-flor) (0,99%), três de *Centris* sp. (0,74%) e duas de *Trigona spinipes* (0,49%). Em outubro, registrou-se 477 visitas *Xylocopa* spp. (76,69%) e 145 de *A. mellifera* (23,31%). As visitas de *A. mellifera* e *Centris* sp. foram apenas para coleta de pólen, pousando exclusivamente nas anteras durante todo o período de visitação. A espécie *T. spinipes* coletou tanto pólen quanto néctar, tendo preferência e permanecendo por mais tempo no nectário das flores. Os demais visitantes, Trochilidae sp. e *Xylocopa* spp., visitavam apenas o nectário. As visitas do beija-flor eram rápidas, raramente chegando a tocar os estigmas das flores, diferentemente das visitas de *Xylocopa* spp., que demoravam em sua coleta, muitas vezes circulavam em torno do androginóforo e o seu dorso tocava os estigmas das flores, desde que houvesse ocorrido a deflexão deste, o que é conhecido como polinização nototrópica. Em agosto, 66,9% (261) das visitas de *Xylocopa* ocorreram após a deflexão dos estigmas e em outubro essa frequência foi de 62,7% (299), o que aumenta a probabilidade de sucesso na polinização.

Quanto à quantidade de visitas recebidas, durante o mês de agosto, a média foi de 13,4 visitas/flores, durante o intervalo de observações, totalizando 402 visitas, enquanto que, em outubro, houve 621 visitas, com uma média de 20,7. Observou-se que, em agosto, durante as primeiras horas de observação, havia um baixo forrageamento de abelhas, aumentando a partir das 14h00 e com pico de visitação entre 15h00-16h00, com 150 visitas registradas ao todo. Já em outubro, o pico de forrageamento ocorreu entre 13h00-

14h00, com 195 visitas ao todo, mantendo elevada frequência de visitação até às 16h00.

O número médio de visitas não foi influenciado pelo intervalo de tempo avaliado em ambos os meses. Por meio do modelo de regressão ponderada localmente (Loess) (Figura 7), podemos observar que houve, no mês de outubro, um maior número médio de visitas de abelhas, quando comparado ao mês de agosto, apenas durante as primeiras horas de avaliação, entre 12h00–14h00.

Em agosto, das 402 visitas recebidas, observou-se que, em apenas 52,47% delas, houve o toque dos visitantes nos estigmas, deixando evidente que o toque de *Xylocopa* spp. nesta estrutura ocorre devido ao grande porte da abelha e é dependente da disposição dos estigmas na flor. Em contrapartida, em 98,50% dessas visitas houve a visitação ao nectário para a coleta de recursos e em 92,30% a coleta de pólen por *A. mellifera* ou toque acidental das anteras pelas abelhas do gênero *Xylocopa*.

Em outubro, considerando as 622 visitas totais recebidas, observou-se maior frequência no toque dos polinizadores aos estigmas, sendo este observado em 71,38% das visitas, proporcionando, assim, maior coleta de recursos e, conseqüentemente, toque nas anteras, que totalizaram 94,05% das visitas recebidas, seguidas por 77,17% ao nectário, nos quais se destacam as abelhas do gênero *Xylocopa* como as principais coletoras de néctar.

Comparando os dois meses avaliados, podemos observar que, no mês de outubro, houve um maior número médio de toque às anteras e aos estigmas, entre 12h00–14h00, quando comparado com o mês de agosto (Figura 8A e B). No entanto, não houve diferença sobre o número médio de toque ao nectário (Figura 8C).

Discussão

A antese floral de *P. edulis*, observada neste estudo, mostrou um padrão semelhante entre agosto e outubro, com início da abertura próximo ao meio-dia e pico entre 13h00 e 14h00. Estes resultados indicam que, para a região semiárida avaliada, variações de temperatura em torno de 2°C não foram suficientes para alterar o ritmo de abertura floral. Essa estabilidade fenológica concorda com os resultados de Benevides et al. (2009), que também registraram maior frequência de antese (77%) entre 12h00 e 14h00 em plantio de *P. edulis* no Rio de Janeiro, assim como Siqueira et al. (2009) que relatam que a antese floral ocorreu entre 12h00 e 13h00, com fechamento das flores a partir das 18h em *P. edulis* f. *Flavicarpa*, no Vale do Submédio São Francisco (semiárido), confirmando o padrão diurno e estável de abertura floral em condições tropicais, mesmo sob variações ambientais locais.

Entretanto, estudos recentes indicam que pequenos aumentos de temperatura podem antecipar eventos fenológicos em outras espécies tropicais, como Pérez-Maluf et al. (2022), por exemplo, que detectaram antecipação significativa de 45 min na abertura floral de *Stylosanthes capitata*, após um aumento de 2°C da temperatura.

Revisões globais mostram que, embora o avanço fenológico com o aquecimento seja comum, há grande variação entre espécies e biomas, e algumas espécies tropicais podem apresentar estabilidade fenológica mesmo diante de pequenas variações térmicas, enquanto outras são mais sensíveis (Alzate-Marin et al., 2021; Geissler et al., 2023). Estudos genéticos recentes em *P. edulis* identificaram fatores de transcrição ligados ao termo resiliência floral, sugerindo que a espécie possui mecanismos moleculares de adaptação a variações térmicas (Jiang et al., 2025). Assim, embora *P. edulis* tenha se

mostrado adaptada às condições avaliadas, seu comportamento fenológico deve ser monitorado em cenários com maior aquecimento, conforme sugerem projeções ecossistêmicas mais amplas (Scaven e Rafferty, 2013).

A deflexão dos estigmas também apresentou padrão semelhante entre os meses avaliados, com predominância de curvatura total entre 14h00 e 15h00. A literatura aponta que a curvatura completa dos estigmas constitui uma das condições mais críticas para a polinização efetiva, pois determina a probabilidade de contato com o dorso das abelhas de grande porte, especialmente as do gênero *Xylocopa* (Gaglianone et al., 2010).

Diversos estudos reforçam a importância da deflexão dos estigmas, sua sincronização com a visita de polinizadores e o papel das abelhas de grande porte, especialmente *Xylocopa*, na polinização efetiva de *P. edulis*. Siqueira et al. (2009) descreveram detalhadamente a biologia floral de *P. edulis* no Vale do São Francisco, registrando que o tempo médio para a deflexão dos estigmas foi de cerca de 71 minutos, com predominância de flores totalmente curvadas entre 14h00 e 15h00. Hoffmann et al. (2000) também observaram que cerca de 77% das flores de *P. edulis* apresentaram curvatura completa dos estigmas, condição crítica para o contato com o dorso das abelhas *Xylocopa*, resultando em maior sucesso reprodutivo. O estudo reforça que a presença de estigmas totalmente curvos é fundamental para a polinização efetiva, pois facilita o depósito de pólen pelas abelhas de grande porte.

Assim, o mecanismo de deflexão dos estigmas atua como provável barreira temporal, mas não fisiológica para a polinização, uma vez que o pólen está disponível e os estigmas receptivos durante toda a antese, conforme as avaliações. Varassin et al. (2018) destacam que a movimentação dos verticilos florais, incluindo a deflexão dos

estigmas, promove a segregação temporal das funções sexuais e favorece a polinização cruzada por grandes abelhas, como *Xylocopa*, sincronizando a receptividade estigmática com o pico de atividade dos polinizadores. Estudos em outras espécies de *Passiflora* e plantas tropicais também mostram que a curvatura dos estigmas e sua posição são determinantes para o sucesso da polinização, especialmente em sistemas dependentes de polinizadores de grande porte (Mallikarjuna, 2023).

No presente estudo, a maior proporção de flores com deflexão completa em agosto, comparada a outubro, pode estar relacionada às condições ambientais ou ao estado fisiológico das plantas durante a primeira e segunda florada. Estudos em outras espécies também reforçam que a fenologia e o sucesso reprodutivo variam conforme as condições ambientais (temperatura, precipitação, fotoperíodo) e o estado fisiológico das plantas em diferentes ciclos de floração (Teixeira et al., 2020).

Além disso, pesquisas sobre metabolismo e expressão gênica em *P. edulis* mostram que mudanças fisiológicas ao longo do desenvolvimento da planta, influenciadas por fatores ambientais, podem modular características morfológicas e reprodutivas (Silva et al., 2019). Portanto, a polinização bem-sucedida das flores de *P. edulis* não está apenas ligada às adaptações morfológicas das flores aos seus visitantes, mas também à sincronização temporal entre o horário da abertura das flores, deflexão dos estigmas e ao horário de visita das abelhas *Xylocopa*, que são os principais polinizadores (Siqueira et al., 2009).

Em relação à densidade de flores, observa-se que essa praticamente dobrou em outubro, enquanto que a densidade de abelhas e o número de abelhas/flores se manteve. Essa relação é amplamente discutida na literatura, sobretudo em ambientes tropicais

sazonais, onde o aumento de flores nem sempre se traduz em maior eficiência de polinização (Martins et al., 2021; Pereira et al., 2024). Esse aumento significativo do número de flores em outubro pode ser explicado pela idade das plantas e variações do clima, uma vez que a segunda florada ocorreu quando já havia uma completa formação da copa das plantas, conseqüentemente maior número de ramos e botões florais e também maiores variações de temperatura, que favorecem a brotação (Ehlers et al., 2004; Costes et al., 2014; Sun et al., 2016; Khalafalla et al., 2020; Azevedo et al., 2025).

O padrão de visitação observado, maior número de visitas e toque aos estigmas em outubro, sugere que fatores ligados ao comportamento dos visitantes e   competição interespecífica podem ter influenciado a qualidade da polinização. Em outubro, registrou-se um aumento de *A. mellifera*, espécie conhecida como pilhadora em flores de maracujá, por coletar pólen sem promover o toque nos estigmas (Richman et al., 2021; Lima et al., 2023). Ainda assim, o maior número absoluto de visitas de *Xylocopa*, em outubro, contribuiu para elevar os percentuais de toque aos estigmas e anteras.

No entanto, o total de visitas observado neste trabalho foi inferior ao relatado por Lima et al. (2023) em um cultivo agroecológico de *P. edulis*, no município de Barra do Choça-BA, quando foram registradas, em janeiro, 3172 visitas no total e média de 93,29 visitas por flor. Porém, no presente estudo, foi registrado maior toque aos estigmas durante as visitas 52,47% e 71,38%, agosto e outubro, respectivamente, contra apenas 35,30% observado por Lima et al. (2023). A maior frequência de visitas se deu pela presença das abelhas do gênero *Xylocopa*, com baixa ocorrência de *A. mellifera* e outras espécies em agosto.

No mês de outubro, no entanto, houve um aumento no número de visitas de *A.*

mellifera, o que resultou, também, no aumento percentual do toque aos estigmas e anteras. O impacto de pilhadores e polinizadores legítimos são relatados em diversos trabalhos. Lima et al. (2023) analisaram o papel de diferentes abelhas em flores de maracujá, mostrando que *X. frontalis* é o principal polinizador, enquanto *A. mellifera*, mesmo sendo pilhadora, não reduziu significativamente a taxa de frutificação, embora possa afetar a disponibilidade de pólen.

Nesses casos, a atividade de pilhadores pode reduzir a disponibilidade de pólen para polinizadores legítimos e, conseqüentemente, a eficiência reprodutiva das plantas (Muchhala e Thomson, 2012; McCall et al., 2018; Martarello et al., 2021; Chabert et al., 2024). Além disso, outro fator que pode comprometer a fertilização são as visitas nas primeiras horas após a antese floral, quando ainda não ocorreu a deflexão dos estigmas. Nesse sentido, Gallagher e Campbell (2020) demonstraram que a composição e a eficiência dos visitantes variam ao longo da floração, podendo compensar variações na taxa de visitação.

A ocorrência de *X. frontalis* e *X. grisescens* nas visitas observadas confirma sua função como principais polinizadores efetivos, assim como relatado em outros estudos. Essas espécies apresentam atributos morfológicos e comportamentais que favorecem a polinização cruzada, como tamanho corporal compatível com a flor, horário de visitação adequado à antese e capacidade de transportar e depositar grandes quantidades de pólen nos estigmas. Estudos mostram que a frutificação e a qualidade dos frutos aumentam significativamente na presença dessas abelhas (Siqueira et al., 2009; Gaglianone et al., 2010; Junqueira et al., 2017; Martarello et al., 2021; Lima et al., 2023).

O comportamento observado, contato do dorso com estigmas e anteras, reforça a

compatibilidade morfológica dessas abelhas à estrutura floral de *P. edulis*. As flores de *P. edulis* apresentam características adaptadas à polinização por abelhas de grande porte, como *X. frontalis* e *X. grisescens*. A distância entre anteras e corola, a forma versátil das anteras e a posição dos estigmas favorecem o acoplamento preciso na região dorsal dessas abelhas, permitindo que o dorso entre em contato simultâneo com estigmas e anteras durante a visita, mecanismo fundamental para a polinização efetiva (Mallerbo-Souza et al., 2002; Siqueira et al., 2009; Garcia et al., 2014; Lima et al., 2023).

Esse comportamento, denominado polinização nototrópica, é realizado tanto por machos quanto por fêmeas de *Xylocopa* (Siqueira et al., 2009; Lima et al., 2023). Em contraste, as visitas de *A. mellifera* e *Trigona spinipes* foram predominantemente para pilhagem, focadas na coleta de pólen, com baixo ou raro toque aos estigmas, corroborando sua classificação como pilhadoras no contexto dessa cultura (Mallerbo-Souza et al., 2002; Benevides et al., 2009; Siqueira et al., 2009; Lima et al., 2023).

Além disso, a presença da mata nativa, próxima ao cultivo, pode ter sido utilizada como refúgio e fonte de alimentos para os polinizadores. Barros et al. (2024) e Ferreira et al. (2024) reforçam que a manutenção de uma alta diversidade de espécies vegetais, especialmente das famílias Anacardiaceae, Burseraceae, Euphorbiaceae e Fabaceae, é fundamental para sustentar populações de abelhas do gênero *Xylocopa*. Por exemplo, *X. cearensis* apresenta comportamento generalista, utilizando ramos de *Anacardium occidentale* (Anacardiaceae) para nidificação e explorando recursos florais de Fabaceae, como *Chamaecrista ramosa*, evidenciando uma dieta larval composta por pólen de múltiplas famílias botânicas.

Da mesma forma, *X. grisescens* demonstra flexibilidade no forrageamento,

concentrando-se em Fabaceae, como *Mimosa arenosa* e *Anadenanthera colubrina*, mas também explorando uma ampla variedade de plantas ao redor de cultivos agrícolas (Costa et al., 2024). A presença dessas plantas nativas, algumas delas registradas na mata do entorno, não só fornece recursos alimentares essenciais, mas também substratos adequados para nidificação, o que contribui para a manutenção das populações de *Xylocopa* e, conseqüentemente, para a polinização eficiente de culturas agrícolas e espécies nativas (Costa et al., 2024; Ferreira et al., 2024;).

Em linhas gerais, os resultados reforçam que a eficiência da polinização em *P. edulis* depende da interação entre fenologia floral, condições climáticas e composição da comunidade de visitantes. A manutenção e promoção de populações de *Xylocopa* spp., por meio de práticas como preservação de áreas nativas, oferta de recursos florais adicionais e conservação de locais de nidificação, devem ser consideradas como uma estratégia prioritária para garantir a sustentabilidade da produção de maracujá em ambientes semiáridos.

Conclusões

- Os estigmas mostram-se receptivos desde a abertura das flores, demonstrando que a limitação para a polinização está associada ao toque dos visitantes e não à atividade estigmática.
- Apesar do aumento de pilhadores, outubro apresentou maior probabilidade de polinização natural, devido ao maior número absoluto de visitas e toques nos estigmas registrados naquele período.
- As abelhas do gênero *Xylocopa* constituem os principais polinizadores efetivos, responsáveis pela maior parte dos toques às estruturas reprodutivas.

- Embora a biologia floral seja constante, a eficiência da polinização individual nas flores é fortemente modulada pela sazonalidade e pela composição da comunidade de visitantes, reforçando a importância de práticas de manejo que favoreçam polinizadores nativos.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, *Campus Vitória da Conquista*, ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio; e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), pelo financiamento e concessão da bolsa.

Contribuição dos autores & conflito de interesses

ZCML e RPM conceberam a ideia e delineararam o estudo. ZCML, PSM e RPM contribuíram para a preparação, quantificação das amostras e condução dos experimentos de campo. MABP contribuiu na análise estatística, AGCG na identificação de espécies vegetais e elaboração do mapa de localização, RPM e AAM revisaram o manuscrito. Todos os autores redigiram o artigo e aprovaram a versão final do manuscrito.

Não há conflito de interesses.

Referências Bibliográficas

Alzate-Marin AL, Rivas RMS, Galaschi-Teixeira JS, Bonifácio-Anacleto F, Silva CC, Schuster I, Nazareno AG, Giuliatti S, Rocha Filho LC, Garófalo CA, Martinez CA (2021) Warming and elevated CO₂ induces changes in the reproductive dynamics of a tropical plant species. *Science of the Total Environment* 768:144899. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144899>

Androcioli HG, Menezes Júnior AO, Vieira AOS, Bressan DF, Hoshino AT, Pacheco CA (2017) Visitation of bees to flowers of yellow passion fruit in Northern Paraná State, Brazil. *Agronomy Science and Biotechnology* 3:1. <https://doi.org/10.33158/ASB.2017v3i1p12>

Azevedo LM, Oliveira RR, Chalfun-Junior A (2025) The role of FT/TFL1 clades and their hormonal interactions to modulate plant architecture and flowering time in perennial crops. *Plants* 14(6):923. <https://doi.org/10.3390/plants14060923>

Baronio GJ, Souza CS, Silva NNA, Moura NP, Leite AV, Santos AMM, Castro CC (2021) Different visitation frequencies of native and non-native bees to vines: how much vegetation is necessary to improve fruit production? *Plant Biology* 23:923–930. [doi:10.1111/plb.13327](https://doi.org/10.1111/plb.13327)

Barrera Júnior W, Trinidad KA, Presas JA (2020) Hand pollination and natural

pollination by carpenter bees (*Xylocopa* spp.) in *Passiflora edulis* Sims. f. *flavicarpa* Deg. Journal of Apicultural Research 60:1. <https://doi.org/10.1080/00218839.2020.1842580>

Barros HC, Ferreira LAC, Silva-Almeida AG, Rêgo MMC (2024) Larval diet of the carpenter bee *Xylocopa* (*Neoxylocopa*) *cearensis* (Hymenoptera: Apidae: Xylocopini) from the Delta do Parnaíba environmental protection area, Brazil. Palynology 48. <https://doi.org/10.1080/01916122.2024.2341029>

Benevides CR, Gaglianone MC, Hoffmann M (2009) Visitantes florais do maracujá-amarelo (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* Deg., Passifloraceae) em áreas de cultivo com diferentes proximidades a fragmentos florestais na região Norte Fluminense, RJ. Revista Brasileira de Entomologia 53:415–421. <https://doi.org/10.1590/S0085-56262009000300016>

Biella P, Ollerton J, Barcella M, Assini S (2017) Network analysis of phenological units to detect important species in plant–pollinator assemblages: can it inform conservation strategies? Community Ecology 18:1–10. <https://doi.org/10.1556/168.2017.18.1.1>

Burkle LA, Runyon JB (2016) Drought and leaf herbivory influence floral volatiles and pollinator attraction. Global Change Biology 22:1644–1654. doi: 10.1111/gcb.13149.

Caradonna PJ, Petry WK, Brennam RM, Cunningham JL, Bronstein JL, Waser NM, Sanders NJ (2017) Interaction rewiring and the rapid turnover of plant–pollinator

networks. *Ecology Letters* 20:385–394. <https://doi.org/10.1111/ele.12740>

Chabert S, Morison N, Buffière MJ, Guilbaud L, Pleindoux C, Premorel G, Royer P, Harruis M, Vaissière BE (2024) Supplementing honey bee colonies with pollen increases their pollinating activity on nectariferous crops with anthers isolated from stigmas. *Journal of Economic Entomology* 117:43–57. <https://doi.org/10.1093/jee/toad222>

Cleveland WS, Devlin SJ (1988) Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting. *Journal of the American Statistical Association* 83:596–610. doi:10.2307/2289282

Cortés-Flores J, Lopezaraiza-Mikel M, Santiago-Hernández MH, Martén-Rodríguez S, Cristóbal-Pérez EJ, Aguilar-Aguilar MJ, Balvino-Oliveira FJ, Delgado-Carrillo O, Sayago R, Fuchs EJ, Sanchez-Montoya G, Quesada M (2023) Successional and phenological effects on plant–floral visitor interaction networks of a tropical dry forest. *Journal of Ecology* 111:927–942. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14072>

Costa JS, Aguiar CML, Dórea MC, Santos FAR, Villa PM, Aguiar WM (2024) Diet of *Xylocopa grisescens* Lapeletier (Hymenoptera, Apidae) in a semiarid area cultivated with passion fruit (*Passiflora edulis* Sims). *Sociobiology* 71:e11178. <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v71i4.11178>

Costes E, Crespel L, Denoyes B, Morel P, Demene MN, Lauri PE, Wenden B (2014) Bud

structure, position and fate generate various branching patterns along shoots of closely related Rosaceae species: a review. *Frontiers in Plant Science* 5. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00666>

Delgado-Carrillo O, Martén-Rodríguez S, Ashworth L, Aguilar R, Lopezaraiza-Mikel M, Quesada M (2018) Temporal variation in pollination services to *Cucurbita moschata* is determined by bee gender and diversity. *Ecosphere* 9:e02506. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2506>

Ehlers BK, Olesen JM (2004) Flower production in relation to individual plant age and leaf production among different patches of *Corydalis intermedia*. *Plant Ecology* 174:71–78

Ferreira LAC, Giannini TC, Zanella FCV, Albuquerque PMC (2024) Floral preferences of carpenter bees (*Apidae: Xylocopini: Xylocopa*) from Maranhão, Northeast Brazil. *Studies on Neotropical Fauna and Environment* 59. <https://doi.org/10.1080/01650521.2023.2265630>

Gaglianone MC, Rocha HHS, Benevides CR, Junqueira CN, Augusto SC (2010) Importância de Centridini (Apidae) na polinização de plantas de interesse agrícola: o maracujá-doce (*Passiflora alata* Curtis) como estudo de caso na região Sudeste do Brasil. *Oecologia Australis* 14:152–164. <https://doi.org/10.4257/oeco.2010.1401.08>

Gallagher MK, Campbell DR (2017) Shifts in water availability mediate plant–pollinator interactions. *New Phytologist* 215:792–802. doi: 10.1111/nph.14602

Gallagher MK, Campbell DR (2020) Pollinator visitation rate and effectiveness vary with flowering phenology. *American Journal of Botany* 107:445–455. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1439>

García MTA, Miguez MB, Gottsberger G (2014) Pollen: ovule ratio and its relationship with other reproductive traits in some *Passiflora* species (Passifloraceae). *Anales del Jardín Botánico de Madrid* 71:e009. <http://dx.doi.org/10.3989/ajbm.2360>

Geissler C, Davidson A, Niesenbaum RA (2023) The influence of climate warming on flowering phenology in relation to historical annual and seasonal temperatures and plant functional traits. *PeerJ*. 10.7717/peerj.15188.

Glenny WR, Runyon JB, Burkle LA (2018) Drought and increased CO₂ alter floral visual and olfactory traits with context-dependent effects on pollinator visitation. *New Phytologist* 220:785–798. DOI: 10.1111/nph.15081

Hoffmann M, Pereira TNS, Mercadante MB, Gomes AR (2000) Polinização de *Passiflora edulis* f. *flavicarpa* por abelhas em Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro. *Iheringia, Série Zoologia* 89:149–152. <https://doi.org/10.1590/S0073-47212000000200002>

Jiang X, Miao J, Zu W, Zhou R, Zheng L, Wei Y, Lai CM, Qin RJ, Zheng P, Wei X, Xu J, Qin Y, Niu X (2025) Functional characterization of KNOX and BELL genes in temperature-responsive floral morphogenesis of passion fruit (*Passiflora edulis*). *Plants* 14:1440. <https://doi.org/10.3390/plants14101440>

Junqueira CN, Augusto SC (2017) Bigger and sweeter passion fruits: effect of pollinator enhancement on fruit production and quality. *Apidologie* 48:131–140. <https://doi.org/10.1007/s13592-016-0458-2>

Kearns CA, Inouye DW (1993) *Techniques for pollination biologists*. University Press of Colorado, Niwot

Khalafalla MM, Menesy F, Magouz MR, Hamed EB (2020) Growth and flowering of endemic wild libyan geophyte, cyclamen rohlfsianum ascher, with a high ornamental value. *Applied Ecology and Environmental Research*, 18(3):4583-4594. DOI:http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1803_45834594.

Klein AM, Freitas BM, Bonfim IGA, Boreus V, Fornoff F, Oliveira MOA (2020) *Polinização Agrícola por Insetos no Brasil - Um Guia para Fazendeiros, Agricultores, Extensionistas, Políticos e Conservacionistas*. 149 p. Freiburg e Fortaleza: Albert-Ludwigs University Freiburg, Nature Conservation and Landscape Ecology, 2020. DOI: 10.6094/UNIFR/151237

Kuppler J, Höfers MK, Wiesmann L, Junker RR (2016). Time-invariant differences between plant individuals in interactions with arthropods correlate with intraspecific variation in plant phenology, morphology and floral scent. *The New Phytologist* 210:1357–1368. DOI: 10.1111/nph.13858

Kuppler J, Höfers MK, Trutschnig W, Bathke AC, Eiben JA, Daehler CC, Junker RR (2017). Exotic flower visitors exploit large floral trait spaces resulting in asymmetric resource partitioning with native visitors. *Functional Ecology* 31:2244–2254. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12932>

Layek U, Das N, Samanta A, Karmakar P (2025). Impact of Seasonal Atmospheric Factors and Photoperiod on Floral Biology, Plant – Pollinator Interactions, and Plant Reproduction on *Turnera ulmifolia* L. (Passifloraceae). *Biology*, 14 (1). <https://doi.org/10.3390/biology14010100>

Lima ZCM, Miranda OS, Pérez-Maluf R, Moreira AA (2023). Pollinators or pillagers? What is the impact of flower visitors on the production of yellow passion fruit? *Journal of Apicultural Research*, 64 (1), 178–184. <https://doi.org/10.1080/00218839.2023.2252132>

Magalhães CB, Freitas BM (2013). Introducing nests of the oil-collecting bee *Centris analis* (Hymenoptera: Apidae: Centridini) for pollination of acerola (*Malpighia emarginata*) increases yield. *Apidologie*, 44 (2), 234–239. doi:10.1007/s13592-012-0175-

4.

Malerbo-Souza DT, Nogueira-Couto RH, Toledo VAA (2002). Insetos associados às flores de diferentes espécies de maracujá (*Passiflora* spp.). *Acta Scientiarum Agronomia* 24(5):1269-1274. DOI: 10.4025/actasciagron.v24i0.2280

Mallikarjuna, R.M (2023). Pollination ecology, breeding systems and seed dispersal in *Passiflora foetida* L. (Passifloraceae), a perennial herbaceous climber weed in Southern parts of andhra pradesh, India. *Biotropica*, 30 (1), 51-52. Doi: 10.11598/btb.2023.30.1.1675

Martarello NS, Gruchowski-Woitowicz FC, Agostini K (2021). Pollinator Efficacy in Yellow Passion Fruit (*Passiflora edulis* f. *flavicarpa* Deg., Passifloraceae). *Ecology, Behavior and Bionomics*. Volume 50, pages 349–357. <https://doi.org/10.1007/s13744-020-00846-y>

Martén-Rodríguez S, Cristobal-Pérez EJ, Santiago-Hernández MH, Huerta-Ramos G, Clemente-Martínez L, Krupnick G, Taylor O, Lopezaraiza-Mikel M, Balvino-Olvera FJ, Senties-Aguilar EM, Díaz-Infante S, Jaimes AA, Novais S, Cortés-Flores J, Lobo-Segura EJ, Delgado-Carrillo FO, Ruiz-Mercado I, Sáyago-Lorenzana R, Pérez-Arroyo K, Quesada M (2025). Untangling the Complexity of Climate Change Effects on Plant Reproductive Traits and Pollinators: A Systematic Global Synthesis. *Global Change Biology*. Volume 31, Issue 2 e70081. <https://doi.org/10.1111/gcb.70081>.

Martins AE, Camargo MGG, Morellato LPC (2021). Flowering Phenology and the Influence of Seasonality in Flower Conspicuousness for Bees. *Front. Plant SCI.* 11:594538. doi: 10.3389/fpls.2020.594538.

Mccall AC, Richman S, Thomson R, Edgerton M, Jordan S, Bronstein JL (2018). Do honeybees act as pollen thieves or pollinators of *datura wrightii*? *Journal of Pollination Ecology*, 24(18), 164-171. DOI: [https://doi.org/10.26786/1920-7603\(2018\)17](https://doi.org/10.26786/1920-7603(2018)17)

Miranda PS, Lima, ZCM, Pérez-Maluf R, Monroe PHM, Moreira AA (2024). Assessment of stingless bee densification to improve pollination service: a case study in strawberry cultivation in field conditions. *Journal of Ecology and Environment*, 48:18, 2024. <https://doi.org/10.5141/jee.24.014>

Mitchell RJ, Karron JD, Holmquist KG, Bell JM (2004). The influence of *Mimulus ringens* floral display size on pollinator visitation patterns. *Functional Ecology*, 18:116–124. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2004.00812.x>

Moreira EF, Boscolo D, Viana BF (2015). Spatial heterogeneity regulates plant-pollinator networks across multiple landscape scales. *PLoS One*, 10, e0123628. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123628>

Muchhala N, Thomson JC (2012). Interspecific competition in pollination systems: costs

to male fitness via pollen misplacement. *Functional Ecology*, 26, 476–482. doi: 10.1111/j.1365-2435.2011.01950.x

Ollerton J (2017). Pollinator diversity: Distribution, ecological function, and conservation. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, v. 48, p. 353–376. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110316-022919>

Page ML, Williams NM (2022). Honey bee introductions displace native bees and decrease pollination of a native wildflower. *Ecological Applications*, 104(2). <https://doi.org/10.1002/ecy.3939>

Pereira CC, Boaventura MG, Cornelissen T, Nunes YRF, Castro GC (2024). What triggers phenological events in plants under seasonal environments? A study with phylogenetically related plant species in sympatry. *Brazilian Journal of Biology*, 84. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.257969>

Pérez-Maluf R, Alzate-Marin AL, Silva CC, Pansarin LM, Bonifácio-Anacleto F, Schuster I, Prado RM de, Martinez CA (2022). Warming and soil water availability affect plant-flower visitor interactions for *Stylosanthes capitata*, a tropical forage legume. *Science of the Total Environment*, 817. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152982>

Porto RG, Almeida RF, Cruz-Neto O, Tabarelli M, Viana BF, Peres CA, Lopes AV (2020). Pollination ecosystem services: A comprehensive review of economic values,

research funding and policy actions. *Food Security*, v. 12, n. 6, p. 1425–1442.
<https://doi.org/10.1007/s12571-020-01043-w>

Quesada M, Sanchez-Azofeifa GA, Alvarez-Añorve M, Stoner KE, Avila-Cabadilla L, Calvo-Alvarado J, Castillo A, Espírito-Santo MM, Fagundes M, Fernandes GW, Gamon J, Lopez-Araiza-Mikel M, Lawrence D, Morellato LPC, Powers JS, Neves FS, Rosas-Guerrero V, Sayago R, Sanchez-Montoya, G (2009). Succession and management of tropical dry forests in the Americas: Review and new perspectives. *Forest Ecology and Management*, 258(6), 1014–1024. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.023>

Richman SK, Barker JL, Baek M, Papaj DR, Irwin RE, Bronstein JL (2021). The sensory and cognitive ecology of nectar robbing. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.698137>

Scaven VL, Rafferty NE (2013). Physiological effects of climate warming of flowering plants and insect pollinators and potential consequences for their interactions. *Current Zoology*, 59, 418-426. DOI: 10.1093/czoolo/59.3.418

Silva GR da, Pérez-Maluf R, Ribeiro GS, Gusmão AL de (2020). Pollination service of *Nannotrigona testaceicornis* stingless bees in strawberry. *Agricultural Entomology*, 89, 1-9. DOI: 10.1590/1808-1657000292019

Silva PO, Batista DS, Cavalcanti JHF, Koehler AD, Vieira LM, Fernandes AM, Barrera-

Rojas CH, Ribeiro DM, Nogueira FTS, Otoni WC (2019). Leaf heteroblasty in *Passiflora edulis* as revealed by metabolic profiling and expression analyses of the microRNAs miR156 and miR172. *Annals of Botany Company*, 123: 1191–1203. doi: 10.1093/aob/mcz025.

Silva WP, Paz JRL da (2012). Abelhas sem ferrão: muito mais do que uma importância econômica. *Natureza online*, 10(3): 146–152.

Siqueira KMM, Kiill LHP, Martins CF, Lemos IB, Monteiro SP, Feitoza EA (2009). Ecology of pollination of the yellow passion fruit (*Passiflora edulis* Sims f. *flavicarpa* deg.), in the region of São Francisco valley. *Brazilian Journal of Fruticulture*, 31(1), 1–12. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452009000100003>

Souza CS, Maruyama PK, Aoki C, Sagryst MR, Raizer J, Gross CL, de Araujo C (2018). Temporal variation in plant–pollinator networks from seasonal tropical environments: Higher specialization when resources are scarce. *Journal of Ecology*, 106(6), 2409–2420. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12978>

Sun Q, Du X, Cai C, Long L, Zhang S, Qiao P, Wang W, Zhou K, Wang G, Liu X, Zhang H, Geng S, Yang C, Gao W, Mo J, Miao C, Song C, Cai Y (2016). To be a flower or fruiting branch: Insights revealed by mRNA and small RNA transcriptomes from different cotton developmental stages. *Scientific Reports*, 6:23212. DOI: 10.1038/srep23212.

Teixeira IF, Borin MES, Figueiredo FMF, Pereira PF (2020). Phenology of the *Koelreuteria bipinnata* Franch. in the urban area of São Gabriel – RS. *Ambiência*, 16(1), 881–899. DOI: 10.5935/ambiencia.2020.01.02

Varassin IG, Baggio AC, Guimarães PC, Prazeres LC, Cervi AC, Oliveira R (2018). Nectar dynamics and reproductive biology of *Passiflora actinia* Hook. (Passifloraceae) in Araucaria Forest. *Acta Botanica Brasilica*, 32(3): 426-433. doi: 10.1590/0102-33062018abb0142

Vaughton G, Ramsey M (1998). Floral display, pollinator visitation and reproductive success in the dioecious perennial herb *Wurmbea dioica* (Liliaceae). *Oecologia*, 115:93–101.

Vaissière BE, Freitas BM, Gemmill-Herren B (2011). Protocol to Detect and Assess Pollination Deficits in Crops: a Handbook for its Use. Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, Roma.

Walter J (2020). Dryness, wetness and temporary flooding reduce floral resources of plant communities with adverse consequences for pollinator attraction. *Journal of Ecology*, 108:1453–1464. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13364>

Wolowski M, Agostini K, Rech AR, Varassin ID, Maués M, Freitas L, Carneiro LT, Bueno RO, Consolaro H, Carvalheiro L, Saraiva AM, Silva CI (2019). Relatório temático

sobre polinização, polinizadores e produção de alimentos no Brasil. São Carlos, SP:
Editora Cubo. ISBN 978-85-60064-83-0. DOI: 10.4322/978-85-60064-83-0

Yamamoto M, Silva C, Augusto S, Barbosa A, Oliveira P (2012) The role of bee diversity
in pollination and fruit set of yellow passion fruit (*Passiflora edulis* forma *flavicarpa*).
Apidologie 43:515–526. <https://doi.org/10.1007/s13592-012-0120-6>

LEGENDAS DE FIGURAS

Figura 1: Variações de temperatura, umidade relativa e precipitação no município de Anagé-Bahia, entre julho e outubro de 2023.

Figura 2: Plantio comercial de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*), cultivar BRS Gigante Amarelo, localizado no Município de Anagé-Bahia em 2023.

Figura 3: Deflexão dos estigmas das flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*): antese floral (A), primeiros minutos após a abertura (B), curvatura inicial (C), curvatura média (D) e curvatura total (E).

Figura 4: Porcentagem de flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) abertas, nos meses de agosto (A) e outubro 2023 (B), e a comparação da curva de abertura floral entre os dois meses pelo modelo de regressão ponderada localmente (Loess) (C).

Figura 5: Deflexão dos estigmas das flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*), nos meses de agosto (A) e outubro (B), e a comparação da curva de deflexão entre os dois meses pelo modelo de regressão ponderada localmente (Loess) (C).

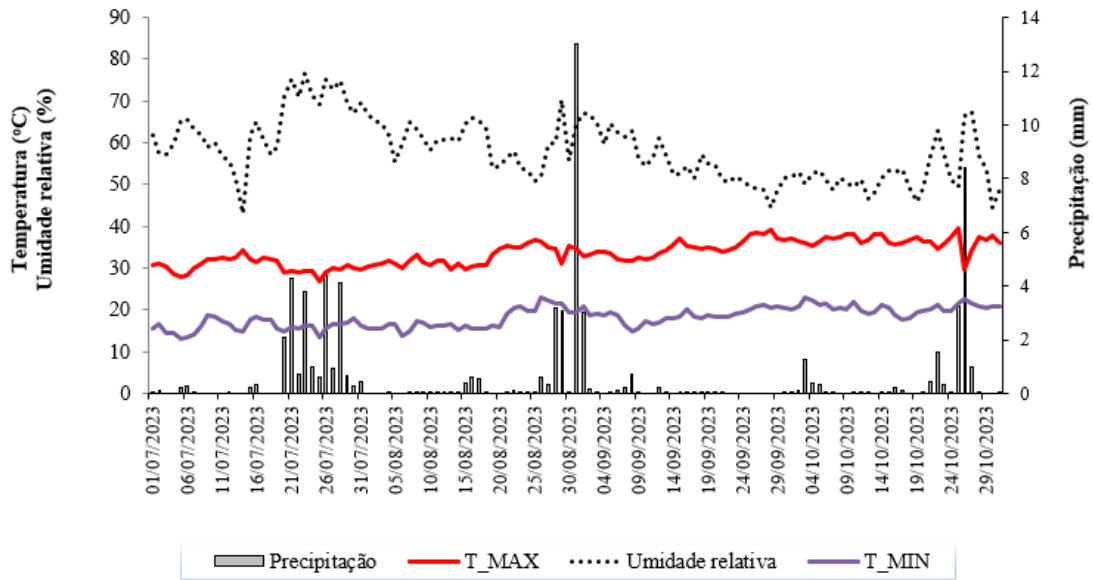
Figura 6: Densidade média de flores (A), de abelhas (B) e de abelhas por flor nos meses de agosto e outubro, em plantio comercial de *Passiflora edulis* no município de Anagé-BA.

Figura 7: Número médio de visitas registradas em agosto e outubro nas flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) no município de Anagé-BA, em 2023.

Figura 8: Número médio de visitas às anteras (A), estigmas (B) e nectário (C) registradas em flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) em Anagé-BA, nos meses de agosto e outubro de 2023.

FIGURAS

Figura 1: Variações de temperatura, umidade relativa e precipitação no município de Anagé-Bahia, entre julho e outubro de 2023.



Fonte: NasaPower

Figura 2: Plantio comercial de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*), cultivar BRS Gigante Amarelo, localizado no Município de Anagé-Bahia em 2023.

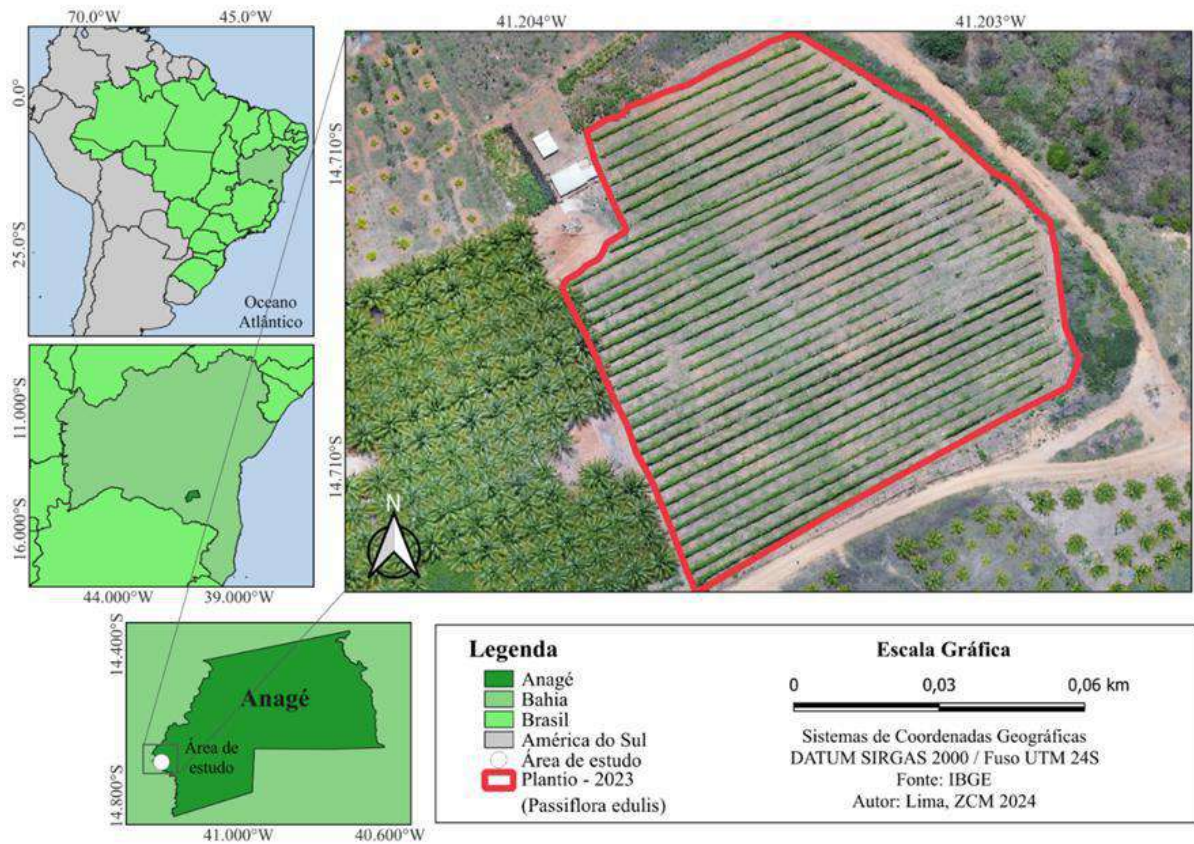


Figura 3: Deflexão dos estigmas das flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*): antese floral (A), primeiros minutos após a abertura (B), curvatura inicial (C), curvatura média (D) e curvatura total (E).

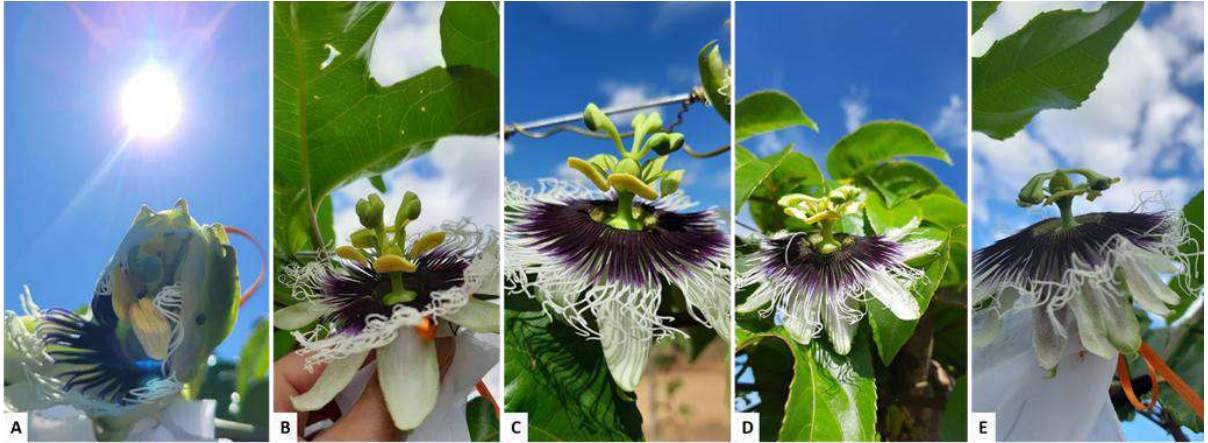


Figura 4: Porcentagem de flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) abertas, nos meses de agosto (A) e outubro 2023 (B), e a comparação da curva de abertura floral entre os dois meses pelo modelo de regressão ponderada localmente (Loess) (C).

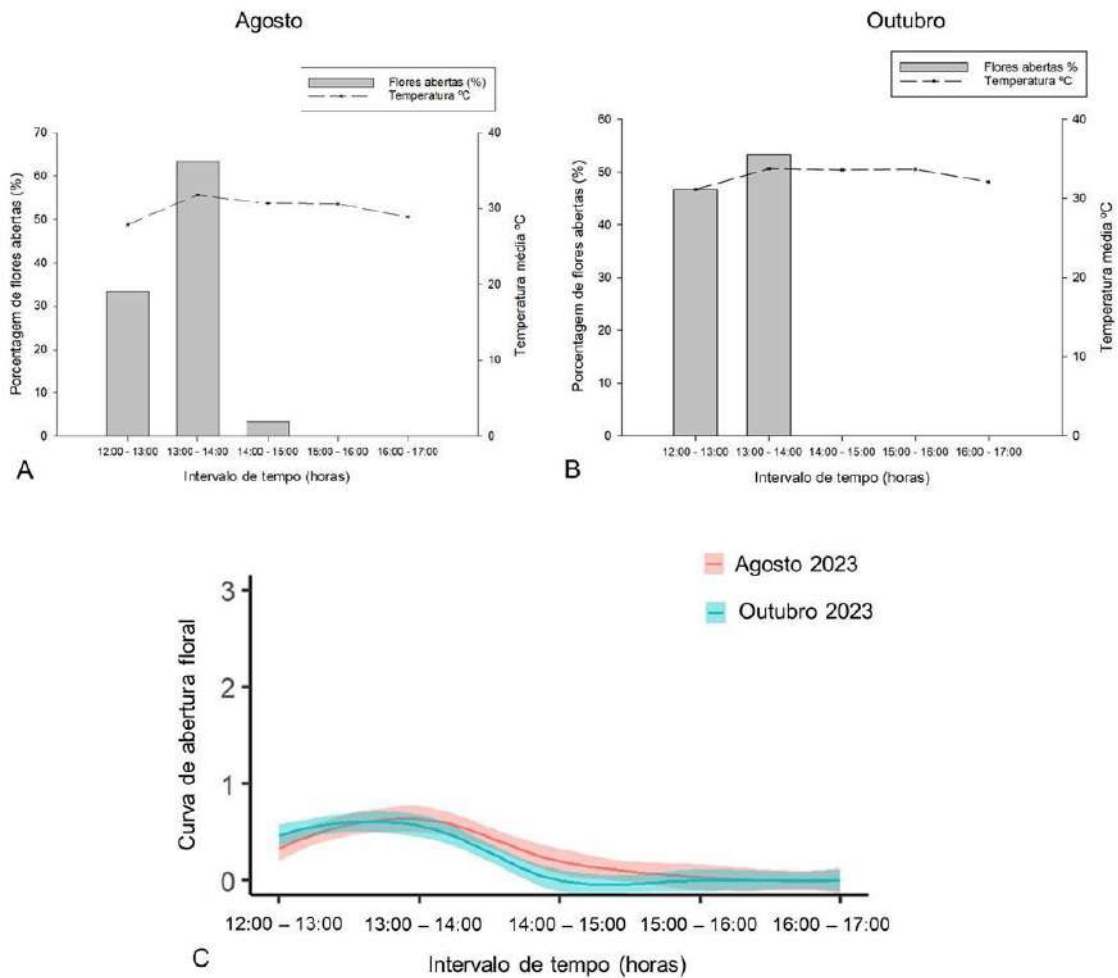


Figura 5: Deflexão dos estigmas das flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*), nos meses de agosto (A) e outubro (B), e a comparação da curva de deflexão entre os dois meses pelo modelo de regressão ponderada localmente (Loess) (C).

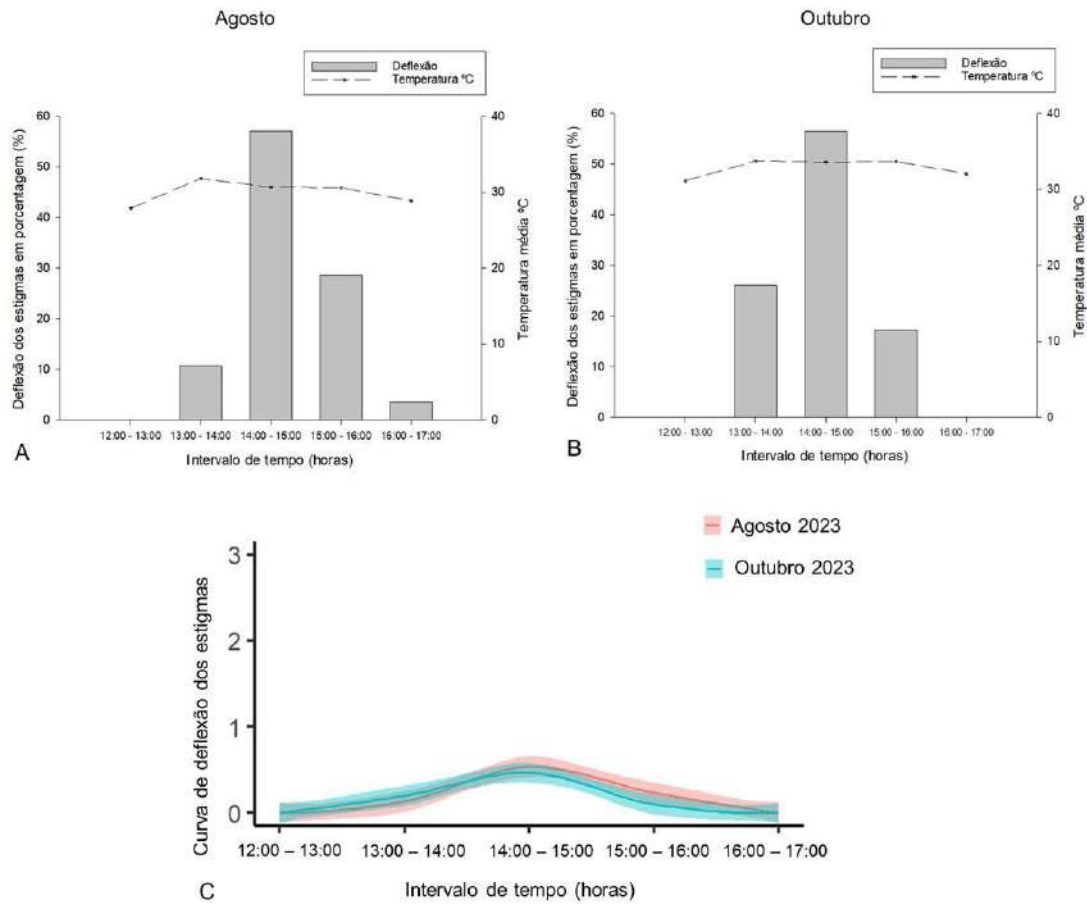


Figura 6: Densidade média de flores (A), de abelhas (B) e de abelhas por flor nos meses de agosto e outubro em plantio comercial de *Passiflora edulis*, no município de Anagé-BA.

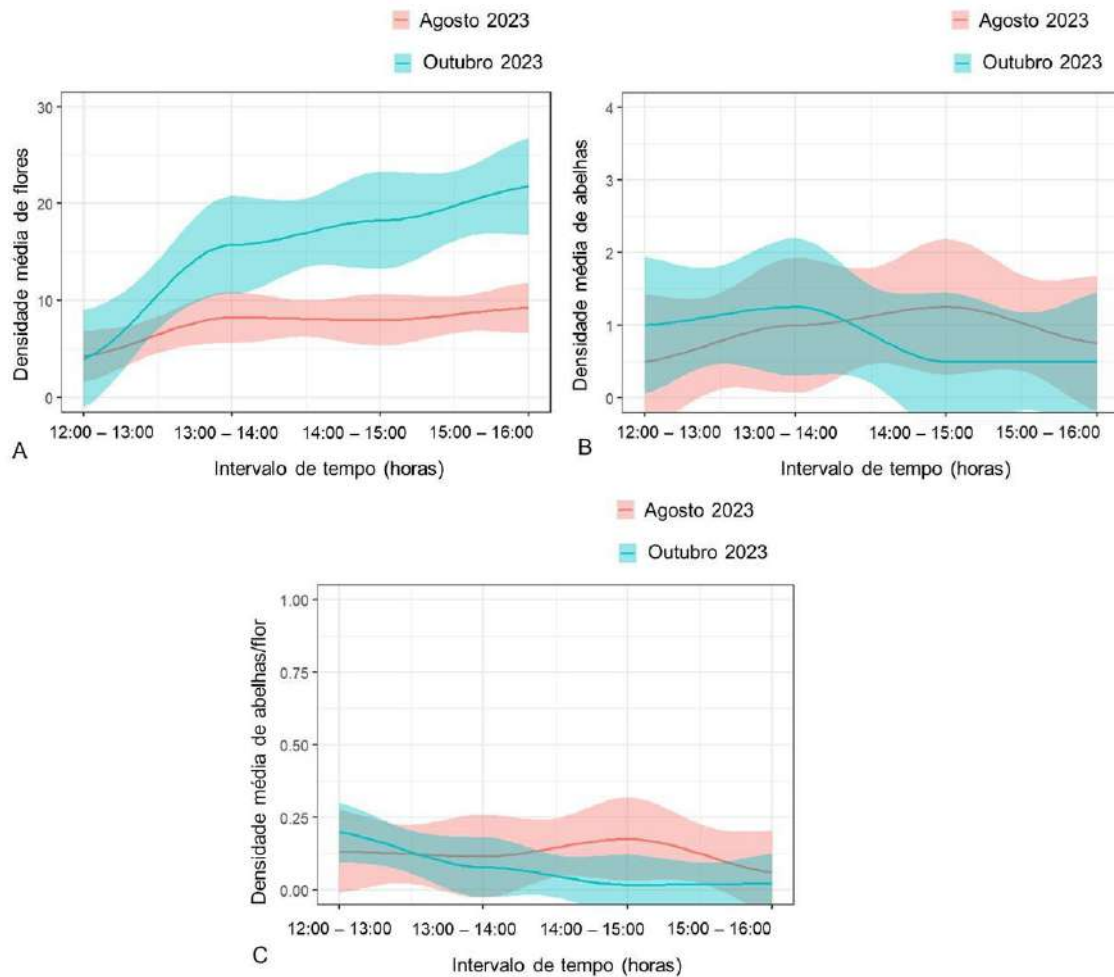


Figura 7: Número médio de visitas registradas em agosto e outubro nas flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*), no município de Anagé-BA, em 2023.

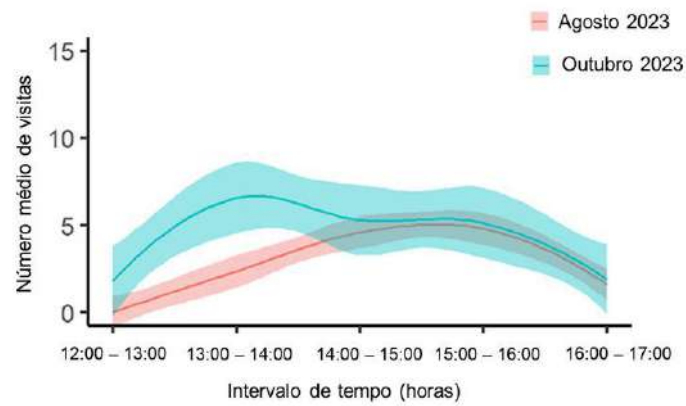
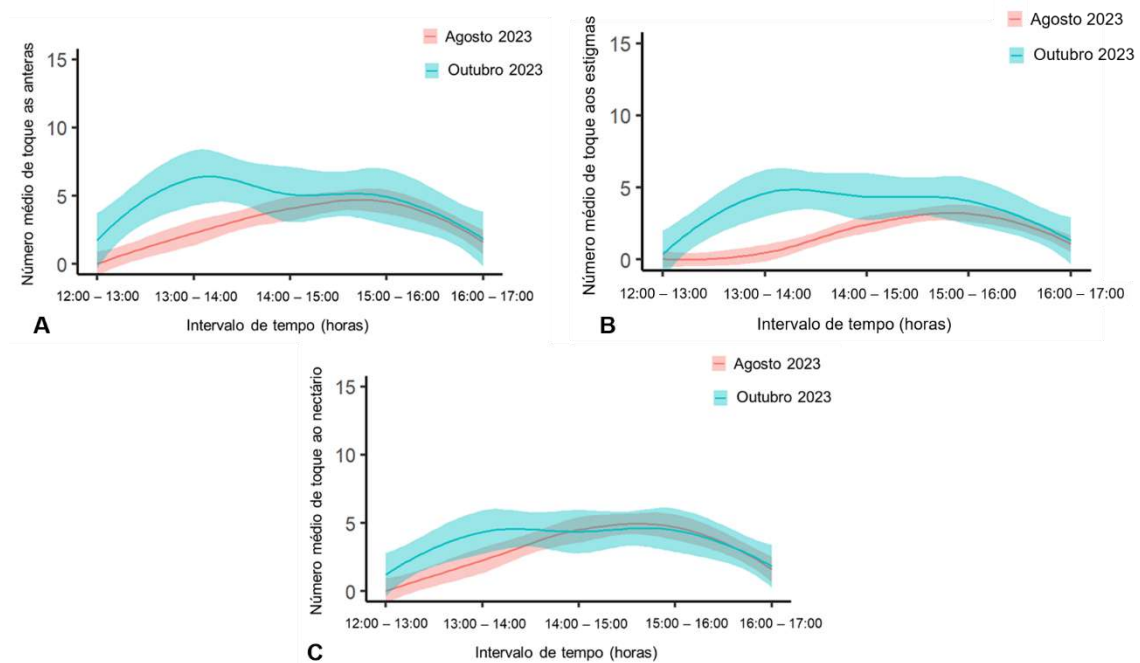


Figura 8: Número médio de visitas às anteras (A), estigmas (B) e nectário (C) registradas em flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) em Anagé-BA, nos meses de agosto e outubro de 2023.



ARTIGO II

Estratégias de manejo de polinizadores: efeitos da introdução de ninhos de *Xylocopa*
spp. na polinização de *Passiflora edulis* Sims*

***Situação:** submetido

Estratégias de manejo de polinizadores: efeitos da introdução de ninhos de *Xylocopa* spp. na polinização de *Passiflora edulis* Sims

Zilda Cristina Malheiros Lima^{1*}, Priscila Silva Miranda¹, Raquel Pérez-Maluf¹, Elismar Pereira de Oliveira¹, Marília Alves Brito Pinto¹, Aldenise Alves Moreira¹

¹Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia/UESB, Brasil. Estrada Bem Querer, Km-04, 45033-300, Vitória da Conquista, Bahia, Brasil.

*e-mail: zildacristinaml@gmail.com

Resumo

A polinização por insetos é fundamental para a produtividade do maracujazeiro (*Passiflora edulis* Sims), espécie autoincompatível e altamente dependente de polinizadores nativos, especialmente abelhas de grande porte. A baixa disponibilidade desses polinizadores em áreas agrícolas tem levado ao uso crescente da polinização manual, elevando custos e reduzindo a sustentabilidade dos cultivos. Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar o efeito da introdução de ninhos, nidificados naturalmente, de *Xylocopa frontalis* e *X. grisescens*, visando aumentar a presença dessas abelhas nativas e aprimorar os serviços de polinização em um cultivo comercial de maracujá-azedo. Foram analisadas a antese floral, a deflexão dos estigmas, a densidade de flores e abelhas e o comportamento dos visitantes florais. A fenologia floral permaneceu semelhante entre os anos, com antese concentrada entre 12h00 e 14h00 e deflexão estigmática entre 14h00 e 15h00. Contudo, o adensamento de *Xylocopa* spp. resultou em expressivo aumento da densidade de abelhas (351%), das visitas às flores

(46,14%) e da densidade de abelhas por flor (260%). As abelhas *Xylocopa* spp. apresentaram comportamento polinizador eficiente, com alta frequência de toques às estruturas reprodutivas. Em contraste, no cultivo sem adensamento, a atividade polinizadora foi reduzida, apesar da presença de outras espécies visitantes. A introdução de ninhos demonstrou potencial para aprimorar os serviços de polinização no maracujazeiro, constituindo uma estratégia viável para aumentar a eficiência polinizadora e fortalecer a sustentabilidade do cultivo comercial de maracujá.

Palavras-chaves: Polinização por insetos. Maracujazeiro. Abelhas nativas. Serviços ecossistêmicos.

Abstract

Insect pollination is essential for the productivity of passion fruit (*Passiflora edulis* Sims), a self-incompatible species highly dependent on native pollinators, especially large-bodied bees. The low availability of these pollinators in agricultural areas has led to the increasing use of manual pollination, raising production costs and reducing crop sustainability. In this context, the present study aimed to evaluate the effect of introducing naturally established nests of *Xylocopa frontalis* and *Xylocopa grisescens* in order to increase the presence of these native bees and enhance pollination services in a commercial yellow passion fruit orchard. Floral anthesis, stigma deflexion, flower and bee density, and floral visitor behavior were analyzed. Floral phenology remained similar between years, with anthesis concentrated between 12:00 and 14:00 h and stigma deflexion occurring between 14:00 and 15:00 h. However, the increased density of

Xylocopa spp. Resulted in a marked rise in bee density (351%), flower visitation (46.14%), and bee density per flower (260%). *Xylocopa* spp. exhibited efficient pollinating behavior, with a high frequency of contact with reproductive structures. In contrast, in the orchard without increased nest density, pollinator activity was reduced despite the presence of other visitor species. The introduction of nests demonstrated strong potential to improve pollination services in passion fruit, representing a viable strategy to increase pollination efficiency and strengthen the sustainability of commercial passion fruit cultivation.

Keywords: Insect pollination. Passion fruit. Native bees. Ecosystem services.

Introdução

Os insetos polinizadores desempenham um papel essencial na estabilidade dos ecossistemas naturais e na produtividade agrícola global, contribuindo para a polinização de cerca de 75% das culturas alimentares consumidas no mundo (Ellis et al., 2015; Stein et al., 2017; Pires et al., 2020; Senapathi et al., 2021; Gazzea et al., 2023). A polinização por insetos contribui não apenas para o aumento da quantidade, mas também para a qualidade dos frutos, sementes e outros produtos agrícolas, além de promover a estabilidade da produção (Stein et al., 2017; Fijen et al., 2018; Senapathi et al., 2021; Gazzea et al., 2023).

A diversidade de polinizadores, incluindo abelhas, moscas, borboletas, besouros e outros, é crucial para a resiliência dos sistemas agrícolas e naturais, conferindo maior estabilidade e resistência a mudanças ambientais (Rader et al., 2015; Pires et al., 2020;

Senapathi et al., 2021; Requier et al., 2022). Entre esses organismos, as abelhas se destacam como polinizadores particularmente eficientes, graças à sua elevada capacidade de transporte de pólen e à frequência com que realizam visitas sequenciais entre flores da mesma espécie, promovendo a fertilização cruzada e aumentando o sucesso reprodutivo das plantas (Greenleaf & Kremen, 2006).

No entanto, tem-se observado um declínio acentuado nas populações de polinizadores em diferentes regiões do planeta, fenômeno amplamente reconhecido como a “crise dos polinizadores” (Potts et al., 2010; Dupont et al., 2011). Esse declínio resulta de uma combinação de fatores antrópicos, como intensificação agrícola, uso indiscriminado de pesticidas, mudanças climáticas, perda de habitat e disseminação de patógenos (Millard et al., 2023; Nicholson et al., 2024). Adicionalmente, a fragmentação de paisagens e a urbanização acelerada reduzem a disponibilidade de recursos para forrageamento e sítios adequados de nidificação, o que representa uma ameaça significativa à segurança alimentar global e à manutenção dos serviços ecossistêmicos (Dicks et al., 2016; Van der Sluijs et al., 2016; Powney et al., 2019; Pires et al., 2020; Varah et al., 2020).

A redução das populações de polinizadores constitui uma ameaça significativa à segurança alimentar, uma vez que muitas culturas agrícolas dependem diretamente da polinização biótica para garantir produtividade e qualidade dos frutos (Aizen et al., 2009; Bommarco et al., 2013; Aizen et al., 2019). Uma crise de polinização poderia reduzir a produção de 16,6 - 51 milhões de toneladas/ano e causar perdas de até US\$ 14,6 bilhões/ano (Novais et al., 2023). O maracujá-azedo (*Passiflora edulis* Sims) é um exemplo dessa dependência, trata-se de uma espécie autoincompatível que, para a

formação de frutos, exige a presença de polinizadores, especialmente abelhas de grande porte, principalmente *Xylocopa* spp. e *Bombus* spp., que são compatíveis com a morfologia floral.

A ausência dessas abelhas leva à queda de produção e maior dependência de polinização manual, aumentando o custo de mão de obra (Siqueira et al., 2009; Yamamoto et al., 2012; Lima et al., 2023). No Brasil, a baixa produtividade média do maracujá é atribuída, em grande parte, à carência de polinizadores naturais (Freitas et al., 2003; Siqueira et al., 2009; Yamamoto et al., 2012). Nesse sentido, o desmatamento e a perda de vegetação nativa em áreas de maracujá reduzem as populações de *Xylocopa*, gerando déficit de polinização e necessidade de polinização manual para manter a viabilidade econômica da cultura (Freitas et al., 2003; Siqueira et al., 2009; Yamamoto et al., 2012; Agriannual, 2014; Lima et al., 2023).

Nesse cenário, estratégias de manejo que visem aumentar a abundância de polinizadores nativos surgem como alternativas promissoras. O manejo intensivo de polinizadores, incluindo a instalação de ninhos e armadilha para abelhas solitárias, como *Xylocopa* e *Bombus*, tem demonstrado potencial para aumentar o número de visitantes florais e melhorar os serviços de polinização em diversos cultivos, incluindo o maracujá (Junqueira et al., 2012; Garibaldi et al., 2013). Freitas et al. (2003) relatam que a instalação de ninhos racionais para *Xylocopa frontalis* em maracujazeiro aumentou em 505% a frequência de mamangavas nas flores e em 92,3% o vingamento inicial de frutos, mostrando alto potencial do manejo de abelhas nativas para suprir a polinização e reduzir custos com polinização manual.

Assim como Fernandes et al. (2024), que observaram o plantio de espécies

atrativas (ex.: *Solanum lycocarpum*) associado à instalação de ninhos-armadilha em pomares de maracujá, aumentou a riqueza e abundância de abelhas, incluindo *X. frontalis*, indicando que o manejo de habitat pode ampliar visitantes florais e serviços de polinização. Nessa perspectiva, estudos indicam que aumentar a complexidade da paisagem, oferecer recursos florais e locais de nidificação e manejar múltiplas espécies nativas é a estratégia mais sustentável do que depender de um único polinizador, fortalecendo a resiliência das comunidades de insetos (Siqueira et al., 2009; Osterman et al., 2020; Pérez-Méndez et al., 2020; Garratt et al., 2022).

Diante das mudanças climáticas e da contínua perda de habitats, torna-se ainda mais importante promover a diversidade e o adensamento de polinizadores. Ambientes com maior riqueza de espécies tendem a apresentar maior estabilidade ecológica, já que diferentes polinizadores respondem de forma diferente às variações ambientais, garantindo a continuidade dos serviços ecossistêmicos (Garibaldi et al., 2013).

Diversos estudos mostram que maior riqueza de espécies de insetos polinizadores reduz a variação interanual na abundância e na composição das comunidades de polinizadores em cultivos, aumentando a estabilidade dos serviços de polinização ao longo dos anos (Winfrey et al., 2009; Bascompte et al., 2022; Tobajas et al., 2023). Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar o efeito da introdução de ninhos, nidificados naturalmente, de *Xylocopa frontalis* e *X. grisescens*, visando aumentar a presença dessas abelhas nativas e aprimorar os serviços de polinização em um cultivo comercial de maracujá-azedo.

Material e Métodos

O experimento foi desenvolvido em um cultivo comercial de maracujá-azedo (*P. edulis*), cultivar BRS Gigante Amarelo, localizado no município de Anagé-Bahia, sob as coordenadas 14°7'10"07" latitude Sul e 41°20'41" longitude oeste, nos meses de agosto e outubro de 2023 e 2024. Em dezembro de 2023, foi inserido, na margem leste do plantio, um tronco da espécie *Handroanthus albus* (Ipê amarelo) com nove ninhos ativos de abelhas das espécies *X. frontalis* e *X. grisescens*, cuja nidificação ocorreu naturalmente. Desse modo, foram realizadas duas avaliações, uma antes da introdução dos ninhos de *Xylocopa* (2023) e outra após, configurando a condição de adensamento das abelhas (2024).

As variações de temperatura, umidade relativa e precipitação ao longo dos períodos de avaliação foram obtidas através do banco de dados NasaPower (Figura 1).

As áreas plantadas tinham como dimensão 0,5 hectare, e as avaliações foram iniciadas com 90 dias do plantio, sendo observadas a primeira e segunda florada e colheita (Figura 2). O sistema de produção utilizado, em ambos os plantios, foi do tipo convencional, com a utilização de produtos químicos, quando necessário, para controlar pragas, irrigação por gotejamento duas vezes ao dia, com fertilizantes químicos a cada 15 dias desde o plantio e utilização da polinização manual, realizada todos os dias no turno vespertino entre as 14h00-16h00.

Para caracterizar a biologia floral do maracujazeiro, foram analisadas a antese floral e deflexão dos estigmas. A determinação dos horários de antese e da deflexão estigmática foi realizada por meio do monitoramento individual de 30 flores, acompanhadas desde o início da abertura floral até a completa deflexão dos estigmas. As

observações ocorreram nos meses de agosto e outubro, dos dois anos, durante cinco dias consecutivos em cada mês.

Para determinar a densidade de flores e abelhas no cultivo, utilizou-se o protocolo proposto por Vaissière et al. (2011), com modificações, no qual a densidade foi determinada por meio da amostragem de varredura das unidades florais abertas e os visitantes florais observados, percorrendo quatro blocos que correspondiam a 100 metros² cada, sorteados aleatoriamente e avaliados em intervalos de: 12h00, 13h00, 14h00, 15h00 e 16h00, nas quais eram contabilizados o número de flores abertas e de abelhas. Realizou-se esta amostragem caminhando lentamente entre as linhas/ruas de plantio, registrando o número de flores abertas visualizadas e o número de abelhas vistas ao olhar para as unidades florais individuais uma a uma, em sequência, sendo esta avaliação realizada uma vez por mês, nos quatro meses correspondentes às avaliações.

O monitoramento e a qualificação dos visitantes foram realizados a partir da observação de 30 flores de maracujá presentes no cultivo, em cada avaliação, previamente marcadas com fita de cetim e acompanhadas durante todo o seu período de abertura e receptividade floral. Para cada flor, foram registrados todos os visitantes florais e seus comportamentos, observando o contato destes com os estigmas, as anteras e/ou nectários.

Os resultados observados de antese floral, deflexão dos estigmas, densidade de flores, densidade de abelhas, densidade de abelhas por flor, números de visitas e a qualificação das visitas foram ajustados a modelos de regressão ponderados localmente - LOESS (Cleveland & Devlin, 1988). A diferença entre as épocas foi avaliada comparando-se as regressões com base em seus respectivos intervalos de confiança de 95%. As seções com regressões sobrepostas não representam nenhuma diferença entre

tratamentos e a ausência de sobreposições representam diferenças entre épocas.

Resultados

A antese das flores de maracujá iniciou às 12h00, nos dois anos avaliados, com 58,33% das flores abertas entre 13h00-14h00 em 2023 e 56,67% nas primeiras horas em 2024. No entanto, observou-se uma sincronia na abertura floral em ambos os períodos, com 100% das flores abertas até as 14h00 (Figura 3).

Comportamento semelhante foi observado para a deflexão dos estigmas, cuja curvatura iniciou por volta das 13h00, com pico entre 14h00 e 15h00, nos dois períodos avaliados, seguido de redução gradual ao longo da tarde. Houve, portanto, uma sincronia na dinâmica de deflexão entre os dois anos de avaliação (Figura 4). Além disso, observou-se uma semelhança na proporção de flores que apresentaram deflexão completa dos estigmas, sendo 83,33% em 2023 e 85% em 2024.

A partir do monitoramento das flores, em 2023, registrou-se, sob condições naturais, cinco espécies visitantes às flores de maracujá, sendo: 865 de *Xylocopa* spp. (84,75%), 150 visitas de *A. mellifera* (14,66%), quatro de Trochilidae sp. (Beija-flor) (0,39%), três de *Centris* sp. (0,23%) e duas de *Trigona spinipes* (0,19%).

Em 2024, sob condições de adensamento, observou-se também a presença de cinco espécies, sendo registradas: 1166 visitas de *Xylocopa* spp. (78%), 278 visitas de *A. mellifera* (18,6%), 52 visitas de Trochilidae sp. (Beija-flor) (3,4%), quatro visitas de *Centris* sp. (0,27%) e uma de *Oxaea flavescens* (0,07%).

As visitas de *Xylocopa* spp. eram demoradas, circulando, muitas vezes, em torno do androginóforo e o seu dorso tocava os estigmas das flores, desde que houvesse

ocorrido a deflexão deste, o que é conhecido como polinização nototrópica. Diferentemente de *A. mellifera* e *Centris* sp. que foram apenas para coleta de pólen, pousando exclusivamente nas anteras durante todo o período de visitação. A espécie *T. spinipes* coletou tanto pólen quanto néctar. Os demais visitantes: *Oxaea flavescens* e Trochilidae sp. visitavam apenas o nectário. As visitas de Trochilidae sp. eram rápidas, raramente chegando a tocar os estigmas das flores, e foram muito frequentes no mês de agosto de 2024.

Quanto à quantidade de visitas recebidas, sob condições naturais em 2023, a média foi de 17,07 visitas/flor com 1024 visitas ao todo, enquanto que, em 2024, sob condições de adensamento, houve uma média de 25 visitas/flor e 1501 visitas ao todo, um aumento de 46,14% na taxa de visitação e 34,5% nas visitas de *Xylocopa* spp. Esse aumento foi significativo desde as primeiras horas de avaliação e se manteve até às 15h00 (Figura 5). No entanto, é importante destacar que, em 2023, 64,6% (560) das visitas de *Xylocopa* ocorreram após a deflexão dos estigmas e, em 2024, essa frequência foi de 44,9% (542).

Em decorrência do maior número de visitas sob condições de adensamento, observou-se também maior frequência dos visitantes florais, nas anteras e no nectário, nos horários iniciais da tarde (Figura 6A e B). Tal fator deve-se também à frequência mais elevada nesse período de visitantes, como *Xylocopa* spp. e Trochilidae sp., que visitavam as flores para coletar néctar; e de *A. mellifera*, que coletam pólen e, portanto, visitam as anteras das flores. Em relação ao toque aos estigmas, não houve diferença nos intervalos de hora avaliados para o toque a essas estruturas (Figura 6C).

A densidade média de flores abertas foi superior em 2024, com uma média de

16,67 flores, em relação a 2023, que foi de 11,19. Esse aumento na densidade foi superior até às 14h00 (Figura 7A). Para a densidade média de abelhas, houve diferenças em todos os horários avaliados, com destaque para o ano de 2024, quando houve o adensamento, que apresentou uma densidade média de 3,78 abelhas e de 0,84 sob condições naturais, o que corresponde a um aumento de 351% na densidade de abelhas no plantio (Figura 7B). Esse aumento também refletiu na densidade média de abelhas por flor, que passou de 0,10 para 0,36, o que corresponde a um aumento de 260%, com destaque para as primeiras horas de avaliação (Figura 7C).

Esse elevado aumento na densidade de abelhas e de abelhas por flor está relacionado ao maior número de polinizadores, observadas sob adensamento, demonstrando o quanto o adensamento de abelhas com a introdução dos ninhos de *Xylocopa* foi benéfico para o plantio e para as variáveis analisadas.

Discussão

A dinâmica fenológica observada no maracujazeiro ao longo dos dois anos avaliados evidencia uma estabilidade nos horários de antese e deflexão dos estigmas. A antese concentrou-se entre 12h00 e 14h00, enquanto a deflexão estigmática apresentou pico entre 14h00 e 15h00, confirmando a presença de protandria, condição já descrita para *P. edulis*, que tende a favorecer a polinização cruzada e reduzir a autopolinização (Bertin, 1993). Esses resultados corroboram as observações de Siqueira et al. (2009) e reforçam que a deflexão dos estiletos estabelece uma barreira temporal à autopolinização, mas não fisiológica, pois essa estratégia está adaptada ao fluxo de pólen, sincronizando a coleta das abelhas com a abertura floral e a deflexão estigmática. A manutenção desse

padrão, nos últimos dois anos, sugere que a biologia floral da espécie é relativamente conservada. Contudo, o sucesso reprodutivo depende da janela de receptividade e a atividade dos polinizadores (Siqueira et al., 2009; Rafferty & Ives, 2011).

Soares et al. (2018), avaliando 17 espécies de *Passiflora*, observaram que os maiores valores de viabilidade polínica, receptividade estigmática e frutificação ocorreram na fase de antese, enquanto que, na pré-antese, houve menor desempenho reprodutivo. Isso reforça a ideia de uma janela bem definida de máxima eficiência reprodutiva. Fato também observado em outras espécies, como em *Turnera ulmifolia*, em que a hora de abertura floral e a longevidade das flores variam sazonalmente com temperatura, umidade e fotoperíodo, afetando a intensidade de visitas e o sucesso reprodutivo (Layek et al., 2025).

Entretanto, embora a fenologia floral não tenha variado entre os anos avaliados, a atividade dos polinizadores diferiu-se. Nas condições naturais, sem adensamento, observou-se menor densidade de abelhas no cultivo, menor número de visitas por flor e menor frequência de toques às estruturas reprodutivas. Mesmo que *Xylocopa* spp. fosse a espécie mais frequente no sistema sob condições naturais, observou-se a necessidade de aumentar a sua densidade, corroborando os estudos que apontam escassez desses polinizadores em áreas agrícolas, devido à perda de habitats e fragmentação ambiental (Potts et al., 2010; Dicks et al., 2016; Buchori et al., 2019; Proesmans et al., 2019; Klaus et al., 2021; Rahimi et al., 2021; Araújo et al., 2023).

Sob condições de adensamento, a introdução equivalente a 18 ninhos naturais por hectare elevou a densidade média de abelhas em 351%, refletindo diretamente no aumento das visitas totais e nas interações comportamentais nas flores. Esse acréscimo é

consistente com estudos que demonstram que ninhos-armadilha, troncos nidificados e estruturas de madeira são estratégias eficazes para aumentar populações de *Xylocopa* spp. em cultivos que dependem de polinização cruzada (Junqueira et al., 2012; Junqueira et al., 2013).

Esses resultados corroboram diversos estudos. Bezerra et al. (2019), por exemplo, observaram que o manejo com 25 ninhos/ha de *X. frontalis* e *X. grisescens* pode aumentar o pegamento de *P. edulis* de 92–700%, demonstrando a necessidade de adensar suas populações em áreas agrícolas onde são escassas. Assim como Freitas & Oliveira-Filho (2003) relatam que a introdução de 7 ninhos de *X. frontalis* levou a um aumento de 92,3% no vingamento inicial de frutos em relação à polinização natural antes da introdução.

Martarello et al. (2021) também mostraram a limitação de pólen/polinizadores sob condições naturais e indicam que o manejo de ninhos ocupados e uso de ninhos-armadilha, junto à conservação de vegetação nativa, pode aumentar populações de *Xylocopa* e o pegamento de frutos. Nessa mesma perspectiva, Junqueira et al. (2013) testaram a oferta de abrigos com 48 ninhos-armadilha (bambu) e a introdução de ninhos ocupados de *X. frontalis* e *X. grisescens*, em áreas experimentais de maracujá, e concluíram que apenas a introdução de ninhos ocupados elevou a visitação de mamangavas às flores e reduziu visitas de pilhadores (*Apis* e meliponíneos).

Além do aumento das visitas, a qualidade das interações também foi aprimorada sob adensamento. As abelhas do gênero *Xylocopa* apresentaram comportamento típico de polinização nototrópica, realizando contato direto entre o dorso e os estigmas, especialmente após a deflexão estigmática. Esse padrão aumenta a probabilidade de deposição de pólen e tem sido apontado como o mais eficiente para a fecundação de

Passiflora (Martins et al., 2014; Lima et al., 2023). Em contraste, nas condições sem adensamento, apesar das visitas de outras espécies, como *A. mellifera* e Trochilidae sp., grande parte das interações não resultava em contato efetivo com o estigma, o que reduz a eficiência polinizadora, como já discutido por King et al. (2013). Estudos mostram que a atividade e riqueza de abelhas dependem fortemente da disponibilidade de recursos florais e da estrutura do habitat; baixa oferta de flores e alta simplificação da matriz reduzem a atividade de forrageio e a frequência de visitas às flores (Proesmans et al., 2019; Klaus et al., 2021; Araújo et al., 2023).

A maior densidade de abelhas por flor, sob adensamento, teve um aumento aproximado de 260%, e também desempenha papel crucial na melhoria das interações. Ambientes com maior disponibilidade de polinizadores tendem a apresentar maior probabilidade de cruzamento entre flores geneticamente distintas e maior deposição de pólen, promovendo frutificação mais eficiente (Garibaldi et al., 2013).

Além disso, o aumento da densidade de flores, no ano de 2024, pode ter favorecido maior atração de *Xylocopa* spp., uma vez que abelhas solitárias respondem fortemente à abundância floral como indicadora de recursos energéticos e reprodutivos (Herrera, 1995; Klaus et al., 2021; Rahimi et al., 2021). A conservação e restauração de fragmentos florestais ou de habitats seminaturais em paisagens agrícolas aumenta riqueza e abundância de polinizadores e pode sustentar o fluxo de polinização para áreas de cultivo adjacentes (Proesmans et al., 2019; Klaus et al., 2021; Escobedo-Kenefic et al., 2024; Gazzea et al., 2025).

Em síntese, os resultados evidenciam que o adensamento de *Xylocopa* spp. desempenha papel determinante no aumento das visitas que configuram uma polinização

efetiva, ampliando tanto a quantidade quanto a qualidade das visitas. Por outro lado, a condição sem adensamento reflete o cenário comum de muitos cultivos comerciais, nos quais a baixa densidade natural de polinizadores pode gerar descompasso entre abertura floral e atividade de abelhas, com consequências negativas para a frutificação. Assim, a oferta de ninhos se confirma como estratégia eficaz para fortalecer os serviços ecossistêmicos de polinização, por ampliar a janela de forrageamento e favorecer as interações de polinização, de modo mais eficiente, favorecendo a sustentabilidade produtiva do sistema.

Conclusão

- O cultivo em condições naturais, sem adensamento de abelhas, apresenta menor atividade polinizadora, refletindo a baixa disponibilidade natural de polinizadores;
- As abelhas *Xylocopa* spp. exibiram um comportamento polinizador eficiente (polinização nototrópica), com alta frequência de toques nas estruturas reprodutivas das flores, o que é fundamental para a frutificação do maracujazeiro;
- A introdução de ninhos é uma estratégia viável para fortalecer a sustentabilidade do cultivo e reduzir a dependência da polinização manual, elevando os custos de produção.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, *Campus* Vitória da Conquista; ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio; e à Fundação de

Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB); pelo financiamento e concessão da bolsa.

Contribuição dos autores & conflito de interesses

ZCML e RPM conceberam a ideia e delineararam o estudo. ZCML, PSM, EPO e RPM contribuíram para a preparação, quantificação das amostras e condução dos experimentos de campo. MABP contribuiu na análise estatística, RPM e AAM revisaram o manuscrito. Todos os autores redigiram o artigo e aprovaram a versão final do manuscrito.

Não há conflito de interesses.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agriannual (2014) Anuário Estatístico da Agricultura Brasileira. FNP Consultoria e Comércio, São Paulo, Brasil.

Aizen MA, Aguiar S, Biesmeijer JC, Garibaldi LA, Inouye DW, Jung C, Martins DJ, Medel R, Morales CL, Ngo H, Pauw A, Paxton RJ, Sáez A, Seymour CL (2019) Global agricultural productivity is threatened by increasing pollinator dependence without a parallel increase in crop diversification. *Global Change Biology* 25:3516–3527. DOI: 10.1111/gcb.14736

Aizen MA, Garibaldi LA, Cunningham SA, Klein AM (2009) How much does agriculture

depend on pollinators? Lessons from long-term trends in crop production. *Annals of Botany* 103:1579–1588. doi:10.1093/aob/mcp076

Silva J, Soares MA, Koch E, Martins C, Antonini y, Araújo VA (2023) Bee diversity in a peri-urban patch of “Restinga”. *International Journal of Zoology and Animal Biology* 6:1-10. DOI: <https://doi.org/10.23880/izab-16000514>

Bascompte J, Scheffer M (2022) The resilience of plant–pollinator networks. *Annual Review of Entomology* 68:363–380. DOI:10.1146/annurev-ento-120120-102424

Bezerra ADM, Pacheco Filho AJS, Bomfim IGA, Smagghe G, Freitas BM (2019) Agricultural area losses and pollinator mismatch due to climate changes endanger passion fruit production in the Neotropics. *Agricultural Systems* 169:49–57. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.12.002>

Bommarco R, Kleijn D, Potts SG (2013) Ecological intensification: Harnessing ecosystem services for food security. *Trends in Ecology & Evolution* 28:230–238. DOI: 10.1016/j.tree.2012.10.012

Buchori D, Rizali A, Larasati A, Hidayat P, Ngo H, Gemmill-Herren B (2019) Natural habitat fragments obscured the distance effect on maintaining the diversity of insect pollinators and crop productivity in tropical agricultural landscapes. *Heliyon* 5. DOI:10.1016/j.heliyon.2019.e01425

Cleveland WS, Devlin SJ (1988) Locally weighted regression: An approach to regression analysis by local fitting. *Journal of the American Statistical Association* 83:596–610. <https://doi.org/10.1080/01621459.1988.10478639>

Dicks LV, Viana B, Bommarco R, Brosi B, Arizmendi C, Cunningham SA, Galetto L, Hill R, Lopes V, Pires C, Taki H, Potts SG (2016) Ten policies for pollinators: What governments can do to safeguard pollination services. *Science* 354. DOI: 10.1126/science.aai9226

Dupont YL, Damgaard C, Simonsen V (2011) Quantitative historical change in bumblebee (*Bombus* spp.) assemblages of red clover fields. *PLoS ONE* 6:e25172. DOI: 10.1371/journal.pone.0025172

Ellis AM, Myers SS, Ricketts TH (2015) Do pollinators contribute to nutritional health? *PLoS ONE* 10:e114805. doi: 10.1371/journal.pone.0114805.

Escobedo-Kenefic N, Cardona E, Arizmendi MDC, Domínguez CA (2024) Do forest reserves help maintain pollinator diversity and pollination services in tropical agricultural highlands? *Frontiers in Bee Science* 2. <https://doi.org/10.3389/frbee.2024.1393431>

Fernandes MG, Costa EN, Trindade RBR (2025) Diversity and abundance of bees in *Passiflora edulis* Sims orchard associated with *Solanum lycocarpum*. *Acta Scientiarum*

Agronomy 47:1. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v47i1.68716>

Fijen TPM, Scheper JA, Boom TM, Janssen N, Raemakers I, Kleijn D (2018) Insect pollination is at least as important for marketable crop yield as plant quality in a seed crop. *Ecology Letters* 21:1704–1713. <https://doi.org/10.1111/ele.13150>

Freitas BM, Oliveira Filho JH (2003) Rational nesting box to carpenter bees (*Xylocopa frontalis*) in the pollination of passion fruit (*Passiflora edulis*). *Ciência Rural* 33:6. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000600021>

Garibaldi LA, Steffan-Dewenter I, Winfree R, Aizen MA, Bommarco R, Cunningham SA (2013) Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *Science* 339:1608–1611. Doi: 10.1126/science.1230200.

Garratt MPD, O'Connor RS, Carvell C, Fountain MT, Breeze TD, Pywell R, Redhead JW, Kinneen L, Mitschunas N, Truslove L, Xavier e Silva C, Jenner N, Ashdown C, Brittain C, McKerchar M, Butcher C, Edwards M, Nowakowski M, Sutton P, Potts S (2022) Addressing pollination deficits in orchard crops through habitat management for wild pollinators. *Ecological Applications* 33. <https://doi.org/10.1002/eap.2743>

Gazzea E, Batáry P, Marini L (2023) Global meta-analysis shows reduced quality of food crops under inadequate animal pollination. *Nature Communications* 14:4463. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40231-y>

Gazzea E, Gobbo D, Mei M, Paniccia D, Trotta G, Boscutti F, Marini L (2025) Restoration of forests supports the conservation of pollinators in intensively managed agricultural landscapes. *Biological Conservation* 302. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2025.111008>

Greenleaf SS, Kremen C (2006) Wild bees enhance honey bees' pollination of hybrid sunflower. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 103:13890–13895. Doi: 10.1073/pnas.0600929103.

Herrera CM (1995) Microclimate and individual variation in pollinators: Flowering plants are more than their flowers. *Ecology* 76:1516–1524. <https://doi.org/10.2307/1938153>

Junqueira CN, Hogendoorn K, Augusto SC (2012) The use of trap-nests to manage carpenter bees. *Annals of the Entomological Society of America* 105:884–889. DOI:10.13140/2.1.4402.7523

Junqueira CN, Yamamoto M, Oliveira PE, Hogendoorn K, Augusto SC (2013) Nest management increases pollinator density in passion fruit orchards. *Apidologie* 44:729–737. DOI:10.1007/s13592-013-0219-4

King C, Ballantyne G, Willmer PG (2013) Why flower visitation is a poor proxy for pollination. *Methods in Ecology and Evolution* 4:811–818. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12074>

Klaus F, Tschardt T, Uhler J, Grass I (2021) Calcareous grassland fragments as sources of bee pollinators for the surrounding agricultural landscape. *Global Ecology and Conservation* 26. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01474>

Layek U, Das N, Samanta A, Karmakar P (2025). Impact of Seasonal Atmospheric Factors and Photoperiod on Floral Biology, Plant – Pollinator Interactions, and Plant Reproduction on *Turnera ulmifolia* L. (Passifloraceae). *Biology*, 14 (1). <https://doi.org/10.3390/biology14010100>

Lima ZCM, Miranda PS, Pérez-Maluf R, Moreira AA (2023) Pollinators or pillagers? *Journal of Apicultural Research* 64:178–184. <https://doi.org/10.1080/00218839.2023.2252132>

Martarello NS, Gruchowski-Woitowicz FC, Agostini K (2021) Pollinator efficacy in yellow passion fruit. *Neotropical Entomology* 50:349–357. Doi: 10.1007/s13744-020-00846-y

Martins MR, Reis MC, Araújo JRG, Lemos RNS, Coelho FAO (2014) Tipos de polinização e pastejo da abelha *Xylocopa* spp. *Revista Caatinga* 27:187–193.

Millard J, Outhwaite CL, Ceausu S, Carvalheiro LG, Silva FDS, Dicks LV, Newbold T (2023) Key tropical crops at risk from pollinator loss due to climate change and land use.

Science Advances 9:eadh0756. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0756>

Nicholson CC, Knapp J, Kiljanek T, Albrecht M, Chauzat MP, Costa C, Rúa PDL, Klein AM, Mand M, Potts SG, Schweiger O, Bottero I, Cini E, Miranda JR, Prisco GD, Dominik C, Hodge S, Kaunath V, Knauer A, Laurent M, Martínez-López V, Medrzycki P, Pereira-Peixoto MH, Raimets R, Schwarz JM, Senapathi D, Tamburini G, Brown MJF, Stout JC, Rundlof M (2024) Pesticide use negatively affects bumble bees across European landscapes. *Nature* 628:355–358. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06773-3>

Osterman J, Aizen MA, Biesmeijer JC, Bosch J, Howlett BG, Inouye DW, Jung C, Martins DJ, Medel R, Pauw A, Seymour CL, Paxton RJ (2021) Global trends in the number and diversity of managed pollinator species. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 322:107653. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107653>

Pérez-Méndes N, Andersson GKS, Requier F, Hipólito J, Aizen MA, Morales CL, García N, Gennari GP, Garibaldi LA (2020) The economic cost of losing native pollinator species for orchard production. *Journal of Applied Ecology* 57:599–608. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13561>

Pires CSS, Maués MM (2020) Insect pollinators, major threats and mitigation measures. *Neotropical Entomology* 49:469–471. <https://doi.org/10.1007/s13744-020-00805-7>

Potts SG, Biesmeijer JC, Kremen C, Neumann P, Schweiger O, Kunin WE (2010) Global

pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology & Evolution* 25:345–353. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.01.007>

Powney GD, Carvell C, Edwards M, Morris RKA, Roy HE, Woodcock BA, Isaac NJB (2019) Widespread losses of pollinating insects in Britain. *Nature Communications* 10:1018. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08974-9>

Proesmans W, Bonte D, Smagghe G, Meeus I, Verheyen K (2019) Importance of forest fragments as pollinator habitat varies with season and guild. *Basic and Applied Ecology* 34:95–107. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2018.08.004>

Rader R, Bartomeus I, Garibaldi LA, Garratt MPD, Howlett BG, Winfree R, Cunningham AS, Mayfield MM, Arthur AD, Andersson GKS, Bommarco R, Brittain C, Carvalheiro LG, Chacoff NP, Entling MH, Foully B, Freitas BM, Gemmill-Herren B, Ghazoul J, Griffin SR, Gross CL, Herbertsson L, Herzog F, Hipólito J, Jaggard S, Jauker F, Klein AM, Kleijn D, Krishnan S, Lemos CQ, Lindstrom ASM, Mandelik Y, Monteiro VM, Nelson W, Nilsson L, Pattemore DE, Pereira NO, Pisanty G, Potts SG, Reemer M, Rundlof M, Sheffield CS, Scheper J, Schuepp C, Smith HG, Stanley DA, Stout JC, Szentgyorgyi H, Taki H, Vergara CH, Viana BF, Woyciechowski M (2015) Non-bee insects are important contributors to global crop pollination. *PNAS* 113:146-151. [Doi/10.1079/pnas.1517092112](https://doi.org/10.1079/pnas.1517092112)

Rafferty NE, Ives AR (2011) Effects of experimental shifts in flowering phenology.

Ecology Letters 14:69–74. Doi: 10.1111/j.1461-0248.2010.01557.x

Rahimi E, Barghjelveh S, Dong P (2021) Estimating landscape structure effects on pollination. *Ecological Processes* 10:59. <https://doi.org/10.1186/s13717-021-00331-3>

Requier F, Pérez-Méndez N, Andersson GKS, Blareau E, Merle I, Garibaldi LA (2023) Bee and non-bee pollinator importance for local food security. *Trends in Ecology & Evolution* 38:196–205. Doi: 10.1016/j.tree.2022.10.006.

Senapathi D, Fründ J, Albrecht M, Garratt MPD, Kleijn D, Pickles BJ, Potts SG, An J, Andersson GKS, Bänisch S, Basu P, Benjamin F, Bezerra ADM, Bhattacharya R, Biesmeijer JC, Blaauw B, Blitzer EJ, Brittain CA, Carvalheiro LG, Cariveau DP, Chakraborty P, Chatterjee A, Chatterjee S, Cusser S, Danforth BN, Degani E, Freitas BM, Garibaldi LA, Geslin B, de Groot GA, Harrison T, Howlett B, Isaacs R, Jha S, Klatt BK, Krewenka K, Leigh S, Lindström SAM, Mandelik Y, McKerchar M, Park M, Pisanty G, Rader R, Reemer M, Rundlöf M, Smith B, Smith HG, Silva PN, Steffan-Dewenter I, Tschamntke T, Webber S, Westbury DB, Wickens JB, Wickens VJ, Winfree R, Zhang H, Klein AM (2021). Wild insect diversity increases inter-annual stability in global crop pollinator communities. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 288:20210212. Doi: 10.1098/rspb.2021.0212

Siqueira KMM, Kiill LHP, Martins CF, Lemos IB, Monteiro SP, Feitoza EA (2009). Ecology of pollination of the yellow passion fruit (*Passiflora edulis* Sims f. *flavicarpa*

deg.), in the region of São Francisco valley. *Brazilian Journal of Fruticulture*, 31(1), 1–12. <https://doi.org/10.1590/S0100-29452009000100003>

Soares TL, Jesus ON de, Souza E H de, Oliveira EJ (2018). *Floral development stage and its implications for the reproductive success of Passiflora L. Scientia Horticulturae* 238: 333–342. Doi:10.1016/j.scienta.2018.04.034

Stein K, Coulibaly D, Stenchly K, Goetze D, Porembski S, Lindner A, Konaté S, Linsenmair EK (2017) Bee pollination increases yield quantity and quality of cash crops in Burkina Faso, West Africa. *Scientific Reports*, 7:17691. DOI: 10.1038/s41598-017-17970-2

Tobajas E, Domínguez-García V, Molina FP, Bartomeus I (2023) Pollinator asynchrony drives temporal stability. *Journal of Ecology* 112:4–13. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14216>

Vaissière BE, Freitas BM, Gemmill-Herren B (2011). Protocol to Detect and Assess Pollination Deficits in Crops: a Handbook for its Use. Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação, Roma.

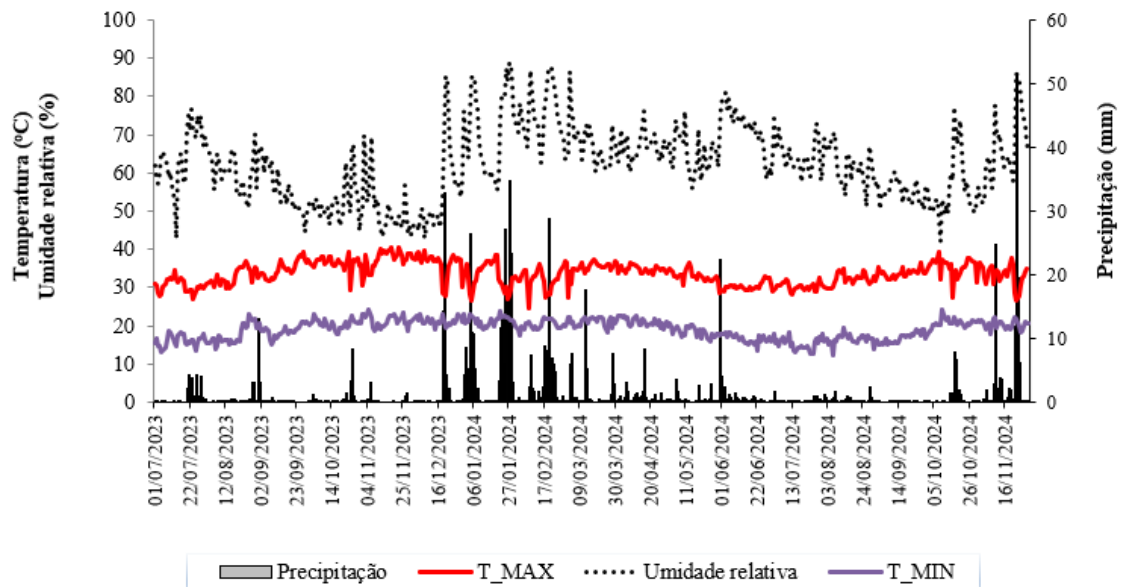
Van der Sluijs JP, Vaage NS (2016) Pollinators and global food security. *Food Ethics* 1:75–91. DOI 10.1007/s41055-016-0003-z

Varah A, Jones H, Smith J, Potts SG (2020) Temperate agroforestry systems provide greater pollination service than monoculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 301. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107031>

Winfree R, Kremen C (2009) Are ecosystem services stabilized by differences among species? *Proceedings of the Royal Society B* 276:229–237. <https://doi.org/10.1098/rspb.2008.0709>

Yamamoto M, Silva CI, Augusto SC, Barbosa AAA, Oliveira PE (2012) The role of bee diversity in pollination and fruit set of yellow passion fruit (*Passiflora edulis* forma *flavicarpa*, Passifloraceae) crop in Central Brazil. *Apidologie*, 43:515–526. Doi: 10.1007/s13592-012-0120-6

Figura 1: Variações de temperatura, umidade relativa e precipitação no município de Anagé-Bahia, entre julho de 2023 a novembro de 2024.



Fonte: NasaPower.

Figura 2: Plantio comercial de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*), em 2023 e 2024, cultivar BRS Gigante Amarelo, localizado no Município de Anagé-Bahia. Destaque para os ninhos de *Xylocopa frontalis* e *X. grisescens*, localizados a 154 metros do plantio de 2024; e à presença da mata nativa, localizada à margem leste do plantio.

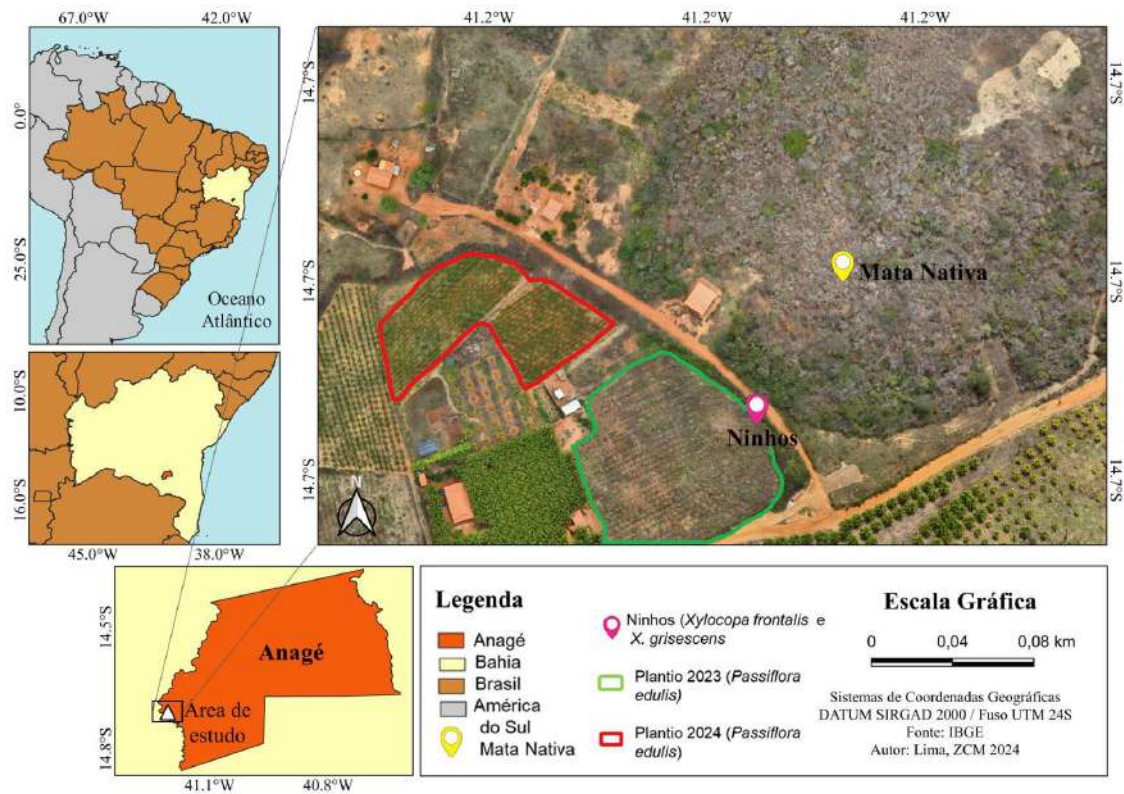


Figura 3: Curva de abertura de flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) em 2023 e 2024.

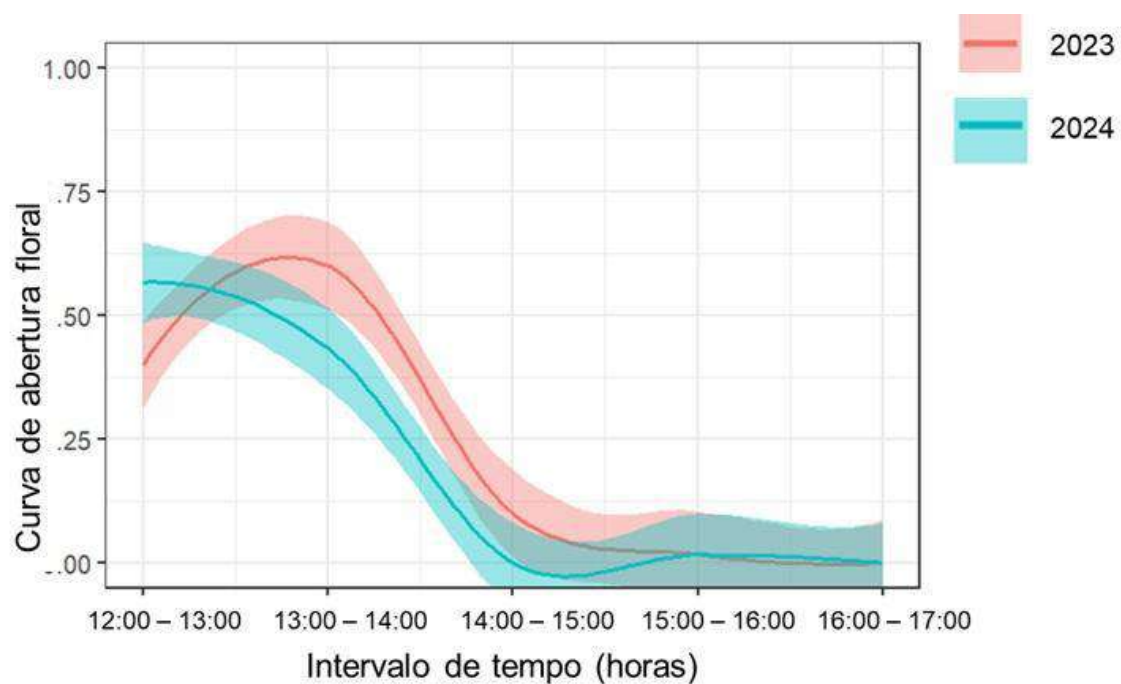


Figura 4: Curva de deflexão dos estigmas das flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*), em 2023 e 2024.

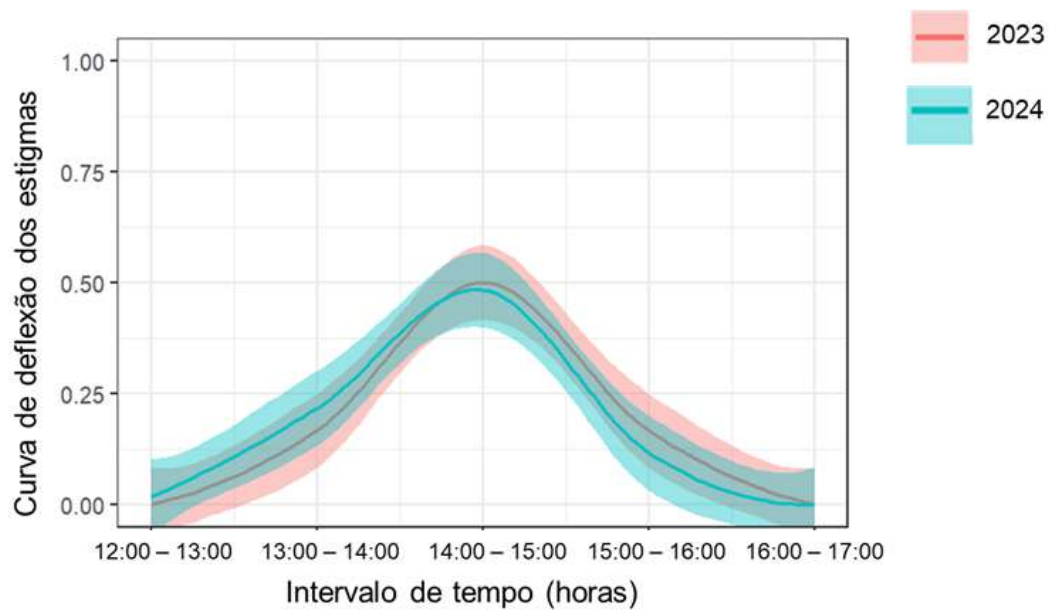


Figura 5: Número médio de visitas em flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) sob condições naturais (sem adensamento) e com adensamento de abelhas do gênero *Xylocopa*.

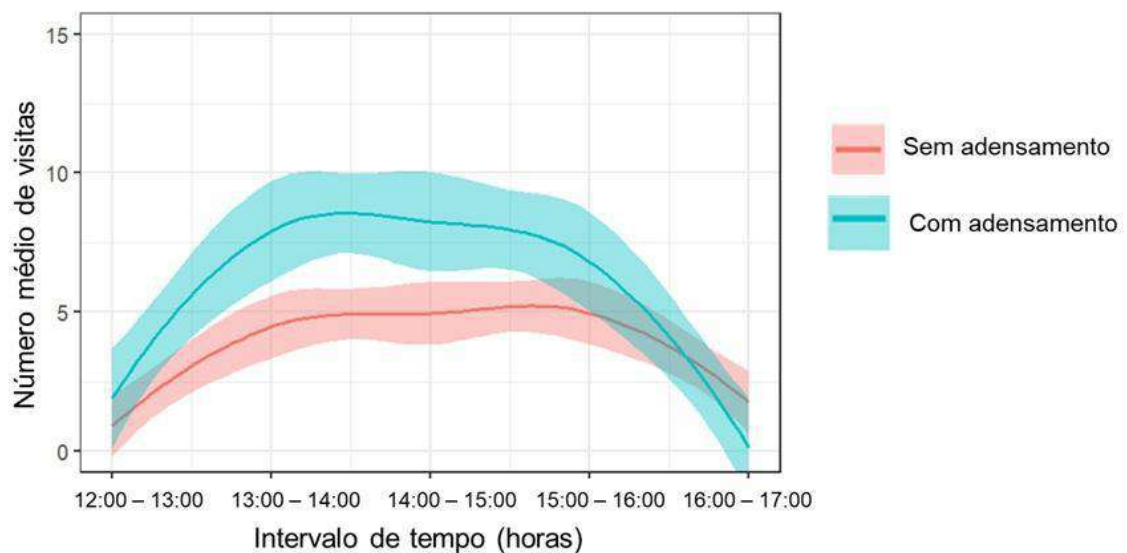


Figura 6: Número médio de toque às anteras (A), ao nectário (B) e aos estigmas (C) em flores de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) sob condições naturais (sem adensamento) e com adensamento de abelhas do gênero *Xylocopa*.

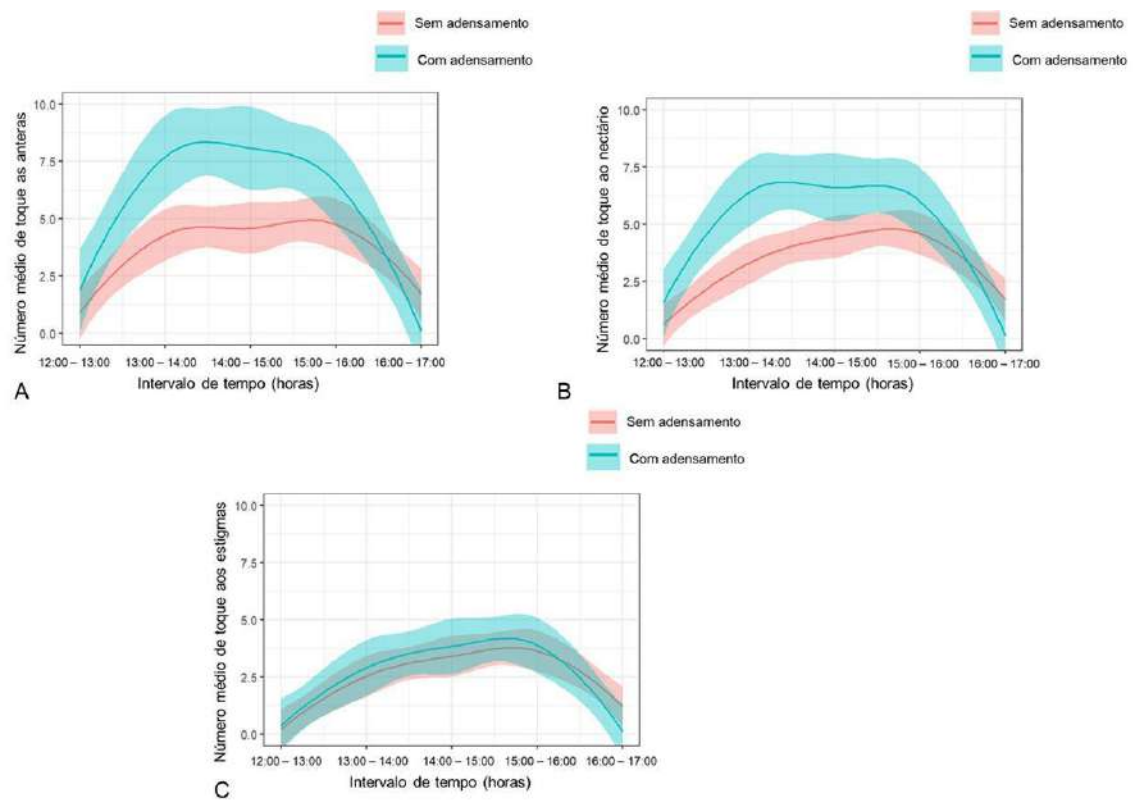
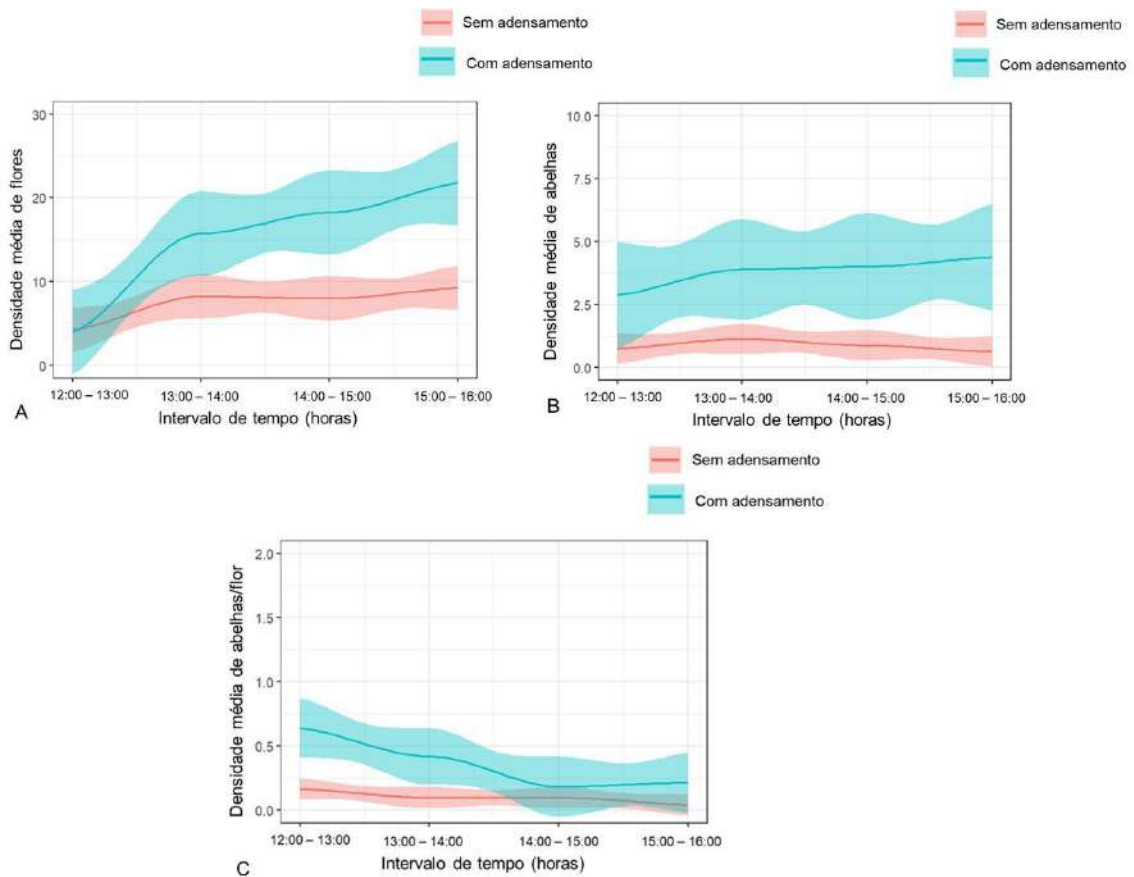


Figura 7: Densidade média de flores (A), de abelhas (B) e de abelhas por flor (C) em plantio comercial de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) sob condições naturais (sem adensamento) e com adensamento de abelhas do gênero *Xylocopa*.



ARTIGO III

Impactos das mudanças climáticas na ocorrência de *Passiflora edulis* e *Xylocopa frontalis* na Bahia: uma abordagem de modelagem de nicho ecológico*

***Situação:** submetido

Impactos das mudanças climáticas na ocorrência de *Passiflora edulis* e *Xylocopa frontalis* na Bahia: uma abordagem de modelagem de nicho ecológico

Resumo

As mudanças climáticas representam uma ameaça crescente à agricultura e à biodiversidade, impactando negativamente as interações planta-polinizador. O maracujá azedo (*Passiflora edulis*) é uma cultura economicamente importante e altamente dependente da polinização por grandes abelhas, especialmente *Xylocopa frontalis*. Nessa perspectiva, este estudo teve como objetivo avaliar o impacto das mudanças climáticas sob as espécies *P. edulis* e *X. frontalis* no estado da Bahia, com base em modelos de nicho ecológico. Os dados de ocorrência foram obtidos do GBIF e submetidos à rarefação espacial, e as variáveis bioclimáticas foram extraídas da base WorldClim e selecionadas por análise de multicolinearidade ($VIF < 10$). Foram utilizados os algoritmos GLM, GAM, Random Forest, Bioclim e GLMnet; e as projeções futuras consideraram três cenários climáticos (otimista, intermediário e pessimista), para o período de 2041–2060. Os resultados indicam que as variáveis de temperatura e precipitação são os principais determinantes da distribuição atual e futura das espécies. Em todos os cenários, observa-se uma tendência de concentração das áreas de alta adequabilidade no litoral baiano. No cenário pessimista, há significativa retração nas áreas adequadas para o maracujá, enquanto *X. frontalis* mantém alguma resiliência. Conclui-se que há risco de dissociação espacial entre planta e polinizador em cenários futuros, o que pode comprometer a polinização natural e a produtividade da cultura. O estudo destaca a importância de estratégias adaptativas para a conservação de polinizadores e a sustentabilidade agrícola.

Palavras-chave: Variações ambientais; Projeções; Maracujá azedo; Mamangava; Polinização.

Abstract

Climate change poses a growing threat to agriculture and biodiversity, negatively affecting plant–pollinator interactions. Sour passion fruit (*Passiflora edulis*) is an economically important crop that is highly dependent on pollination by large bees, especially *Xylocopa frontalis*. This study aimed to assess the effects of projected climate change on the geographic distributions of these two species in the state of Bahia, using ecological niche modeling. Occurrence data were obtained from GBIF and subjected to spatial rarefaction, while bioclimatic variables were extracted from the WorldClim database and selected through multicollinearity analysis ($VIF < 10$). The algorithms GLM, GAM, Random Forest, Bioclim, and GLMnet were applied, and future projections considered three climate scenarios (optimistic, intermediate, and pessimistic) for the period 2041–2060. The results indicate that temperature and precipitation variables are the main determinants of the current and future distributions of both species. Across all scenarios, there is a tendency for high-suitability areas to become concentrated along the coast of Bahia. Under the pessimistic scenario, a significant contraction of suitable areas for passion fruit is observed, whereas *X. frontalis* maintains some degree of resilience. It is concluded that there is a risk of spatial decoupling between the plant and its pollinator under future scenarios, which may compromise natural pollination and crop productivity. This study highlights the importance of adaptive strategies for pollinator conservation and agricultural sustainability.

Keywords: Environmental variations; Projections; Sour passion fruit; Carpenter bee; Pollination.

Introdução

As abelhas desempenham um papel crucial na polinização de angiospermas, sendo reconhecidas como os polinizadores mais importantes do mundo. Elas são responsáveis por cerca de 75% da produção agrícola destinada à alimentação humana, destacando-se a sua contribuição para o cultivo de frutas, vegetais e outras culturas essenciais para a segurança alimentar global (IPBES, 2016; Stein et al., 2017; Senapathi et al., 2021; Gazzea et al., 2023). A diversidade e a adaptabilidade comportamental dessas espécies, juntamente com sua especialização em recursos florais, as tornam altamente eficientes na transferência de pólen. Essa eficiência não só é vital para a reprodução das plantas com flores, mas também gera um valor econômico global que ultrapassa US\$ 387 bilhões anualmente (Klein et al., 2007; Ollerton et al., 2011; Giannini et al., 2015; Porto et al., 2020).

Entretanto, apesar da sua importância ecológica e econômica, as populações de polinizadores têm enfrentado um declínio alarmante em diversas regiões do mundo. Esse fenômeno é consequência de uma combinação de fatores, incluindo a perda e fragmentação de habitats, o uso intensivo de agrotóxicos, a introdução de espécies exóticas invasoras, a propagação de doenças e, cada vez mais, as mudanças climáticas (IPBES, 2016; Potts et al., 2016; Dicks et al., 2021). Essa diminuição na polinização já está comprometendo a estabilidade da produção agrícola global, dificultando a segurança alimentar, especialmente em países tropicais em desenvolvimento, onde as economias são

fortemente dependentes da agricultura (Garibaldi et al., 2011).

As mudanças climáticas agravam essa crise, provocando alterações na distribuição geográfica das espécies, interferindo nas interações entre plantas e polinizadores e afetando negativamente a abundância e diversidade de abelhas (Cordeiro e Dötterl, 2023a; 2023b). Essas mudanças têm um impacto desproporcional em países de baixa renda, como o Brasil, que abriga uma rica biodiversidade e biomas sensíveis às variações climáticas (Taconet et al., 2020). Além disso, o Brasil enfrenta lacunas significativas no conhecimento sobre sua fauna de abelhas, particularmente em termos de distribuição geográfica, características ecológicas e padrões de interação, o que limita a implementação de estratégias de conservação eficazes (Hortal et al., 2015).

A compreensão dos impactos das mudanças climáticas sobre polinizadores e culturas agrícolas é, portanto, de extrema urgência. Nesse contexto, a modelagem de nicho ecológico tem se consolidado como uma ferramenta essencial para prever os efeitos das mudanças climáticas. Essa abordagem permite relacionar registros de ocorrência das espécies com variáveis climáticas atuais e projetadas, possibilitando a estimativa de áreas de adequabilidade climática que podem ser afetadas, identificando regiões de contração, expansão ou deslocamento de faixas de ocorrência (Hofmann et al., 2021). Modelos aplicados em áreas como a Amazônia Oriental indicam que muitas espécies de abelhas devem passar por uma redução significativa em suas áreas de ocorrência, com consequências mais severas para polinizadores de culturas e espécies com distribuições restritas (Giannini et al., 2020).

Além disso, a modelagem que considera a distribuição conjunta de plantas e polinizadores é crucial para manter as interações de polinização em cenários futuros.

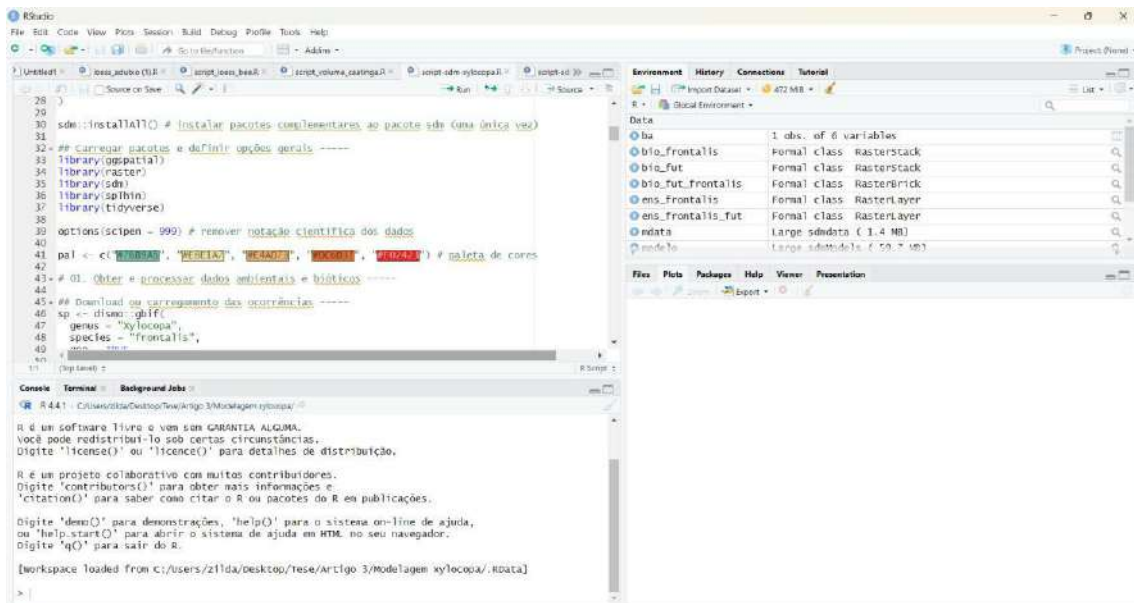
Estudos indicam que as mudanças climáticas podem levar a extinções locais e a uma drástica redução na coocorrência entre cultivos alimentares e seus polinizadores principais (Kolonowska et al., 2023; Oliveira et al., 2025; Kolonowska et al., 2025). Cultivos altamente dependentes de poucos polinizadores, como o maracujá-azedo e suas abelhas do gênero *Xylocopa*, são particularmente suscetíveis a esses descompassos, o que torna a abordagem de modelagem ainda mais relevante para antever os riscos associados à polinização (Bezerra et al., 2019a; Oliveira et al., 2025).

Nesse contexto, a modelagem ecológica não só oferece subsídios para estratégias de conservação de polinizadores, mas também direciona o manejo agrícola adaptativo e políticas públicas voltadas à segurança alimentar em regiões tropicais vulneráveis, como o Brasil (Giannini et al., 2017; Bezerra et al., 2019a; Giannini et al., 2020). Considerando esses aspectos, o presente estudo visa preencher lacunas existentes ao projetar os efeitos das mudanças climáticas nas distribuições geográficas da abelha *Xylocopa frontalis* e da cultura do maracujá-azedo (*Passiflora edulis*), avaliando o impacto dessas mudanças climáticas sobre ambas as espécies no estado da Bahia, com base na aplicação de modelos de nicho ecológico.

Material e Métodos

A modelagem foi realizada utilizando-se o programa estatístico RStudio - versão 4.4.1, seguindo o *script* elaborado por Lima, R.R. (2024) (dados não publicados), utilizando os pacotes: ggspatial, raster, sdm, sphim, Tidyverse, geodata e geobr.

Figura 1: *Script* utilizado para a modelagem para as espécies *Passiflora edulis* e *Xylocopa frontalis* no Estado da Bahia.



Esses pacotes foram utilizados para apoiar diferentes etapas da análise espacial e ecológica. O *tidyverse* foi empregado na organização, manipulação e visualização dos dados; o *raster* e o *geodata* na obtenção e processamento de variáveis ambientais; o *sdm* na modelagem de distribuição de espécies; o *spThin* na filtragem espacial dos registros de ocorrência, reduzindo vieses amostrais; o *ggspatial* na elaboração de mapas com elementos cartográficos; e o *geobr* no uso de bases cartográficas oficiais do Brasil.

Dados bióticos

Os registros de ocorrência das espécies *X. frontalis* (mamangava) e *P. edulis* (maracujá-azedo) foram obtidos por meio da plataforma *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF), disponível em (<https://www.gbif.org/>), com o uso da função `gbif()`. Os dados foram filtrados para manter apenas registros georreferenciados, localizados na Bahia, removendo duplicatas e coordenadas inválidas. Para reduzir possíveis distorções

causadas pela concentração desigual dos pontos amostrados, foi realizada uma seleção espacial dos pontos, mantendo-se uma distância mínima de 10 km entre eles, com auxílio do pacote spThin.

Variáveis ambientais

As variáveis bioclimáticas foram obtidas do banco de dados WorldClim (<https://www.worldclim.org/>), versão 2.1, com resolução de 5 arc-minutos (~10 km), por meio da função worldclim global() do pacote geodata. A área de estudo foi recortada para o Estado da Bahia, utilizando os dados do pacote geobr. Em seguida, as variáveis climáticas foram convertidas para o sistema de referência SIRGAS 2000 e ajustadas ao limite da área de estudo.

As variáveis bioclimáticas são derivadas dos valores mensais de temperatura e precipitação para gerar variáveis biologicamente mais significativas. Elas são frequentemente utilizadas em modelos de distribuição de espécies e técnicas de modelagem ecológica relacionadas. As variáveis bioclimáticas representam tendências anuais (por exemplo, temperatura média anual, precipitação anual), sazonalidade (por exemplo, amplitude térmica e de precipitação anual) e fatores ambientais extremos ou limitantes (por exemplo, temperatura do mês mais frio e mais quente, e precipitação dos trimestres mais úmidos e mais secos).

Eles são codificados da seguinte forma:

- BIO1 = Temperatura média anual;
- BIO2 = Amplitude Diurna Média (Média mensal de (temperatura máxima - temperatura mínima));
- BIO3 = Isotermacidade (BIO2/BIO7) ($\times 100$);

- BIO4 = Sazonalidade da temperatura (desvio padrão \times 100);
- BIO5 = Temperatura máxima do mês mais quente;
- BIO6 = Temperatura mínima do mês mais frio;
- BIO7 = Amplitude térmica anual (BIO5-BIO6);
- BIO8 = Temperatura média do trimestre mais chuvoso;
- BIO9 = Temperatura média do trimestre mais seco;
- BIO10 = Temperatura média do trimestre mais quente;
- BIO11 = Temperatura média do trimestre mais frio;
- BIO12 = Precipitação Anual;
- BIO13 = Precipitação do mês mais chuvoso;
- BIO14 = Precipitação do mês mais seco;
- BIO15 = Sazonalidade da Precipitação (Coeficiente de Variação);
- BIO16 = Precipitação do trimestre mais chuvoso;
- BIO17 = Precipitação do trimestre mais seco;
- BIO18 = Precipitação do Trimestre Mais Quente;
- BIO19 = Precipitação do Trimestre Mais Frio.

Para reduzir a correlação excessiva entre as variáveis bioclimáticas, foi realizada uma análise do Fator de Inflação da Variância (VIF) utilizando-se o pacote usdm e mantendo-se apenas aquelas que apresentaram maior influência sobre as espécies selecionadas e valores de VIF inferiores a 10.

Construção dos modelos de nicho

A modelagem da aptidão ambiental foi realizada com o pacote sdm. Os registros

de ocorrência foram transformados em dados espaciais e associados a uma variável binária de presença, enquanto as variáveis ambientais selecionadas foram utilizadas como variáveis explicativas. Foram avaliados e combinados diferentes algoritmos, incluindo regressão logística generalizada (GLM), modelos aditivos generalizados (GAM), Random Forest (RF), Bioclim e GLMnet.

Os modelos foram avaliados por meio da curva ROC e dos valores de AUC (Área Sob a Curva), e a importância relativa das variáveis foi analisada com a função `getVarImp()`. Com base nas estimativas geradas por cada algoritmo, foi construído um modelo conjunto (*ensemble*), ponderado pelo índice TSS (*True Skill Statistic*), utilizando a função `ensemble()`.

Projeções para cenários futuros de mudanças climáticas

As projeções futuras foram realizadas a partir dos cenários climáticos do CMIP6, obtidos por meio da função `cmip6_world()` do pacote `geodata`, considerando o modelo MIROC6 e o período de 2041–2060. Foram considerados três cenários socioeconômicos diferentes:

Otimista: redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa;

Intermediário: cenário de continuidade com políticas moderadas;

Pessimista: altas emissões e crescimento econômico dependente de combustíveis fósseis.

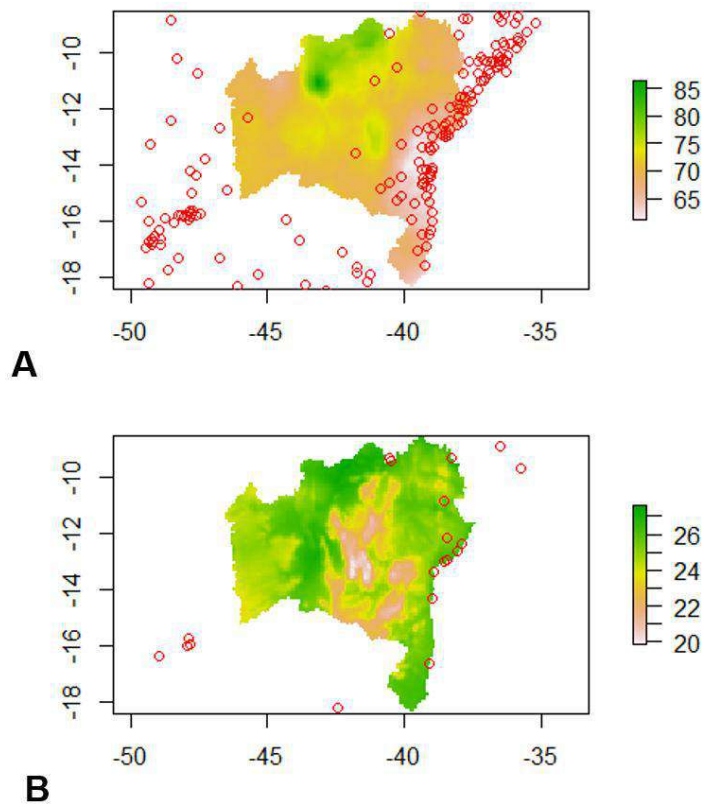
As variáveis futuras foram selecionadas de forma a corresponder exatamente às utilizadas nos modelos atuais. Os dados climáticos foram convertidos para o mesmo sistema de referência, recortados e mascarados para a área da Bahia. Para cada cenário, foi gerado um modelo, permitindo a comparação visual e quantitativa entre as projeções futuras e as distribuições atuais.

Com base nos modelos aplicados, que incluíram algoritmos como GLM, GAM e Random Forest e apresentaram valores elevados de confiança AUC (0,881–0,998), indicando excelente capacidade de previsão, foram gerados mapas de distribuição provável da abelha *X. frontalis* e do maracujá-azedo *P. edulis*. As análises consideraram três cenários climáticos distintos: otimista, intermediário e pessimista, contemplando o período presente (2020–2040) e o futuro (2041–2060).

Resultados

Os registros da ocorrência atual (2020-2040) do maracujá (*P. edulis*) e da mamangava (*X. frontalis*) no estado da Bahia (Figura 2) estão representados por círculos vermelhos e a adequabilidade ambiental indicada por uma escala de cores. A modelagem da distribuição de *P. edulis* (Figura 2A) indica maior adequabilidade climática nas regiões leste e nordeste do estado, apesar da maior densidade de registros serem observados no litoral do estado. Para *X. frontalis* (Figura 2B), as condições adequadas são mais amplas, embora os registros de ocorrência estejam dispersos, como no extremo leste e litoral da Bahia. A sobreposição parcial entre as espécies sugere que, embora existam áreas com melhores condições para ambas, nem toda região favorável ao polinizador apresenta condições igualmente ideais para o maracujá.

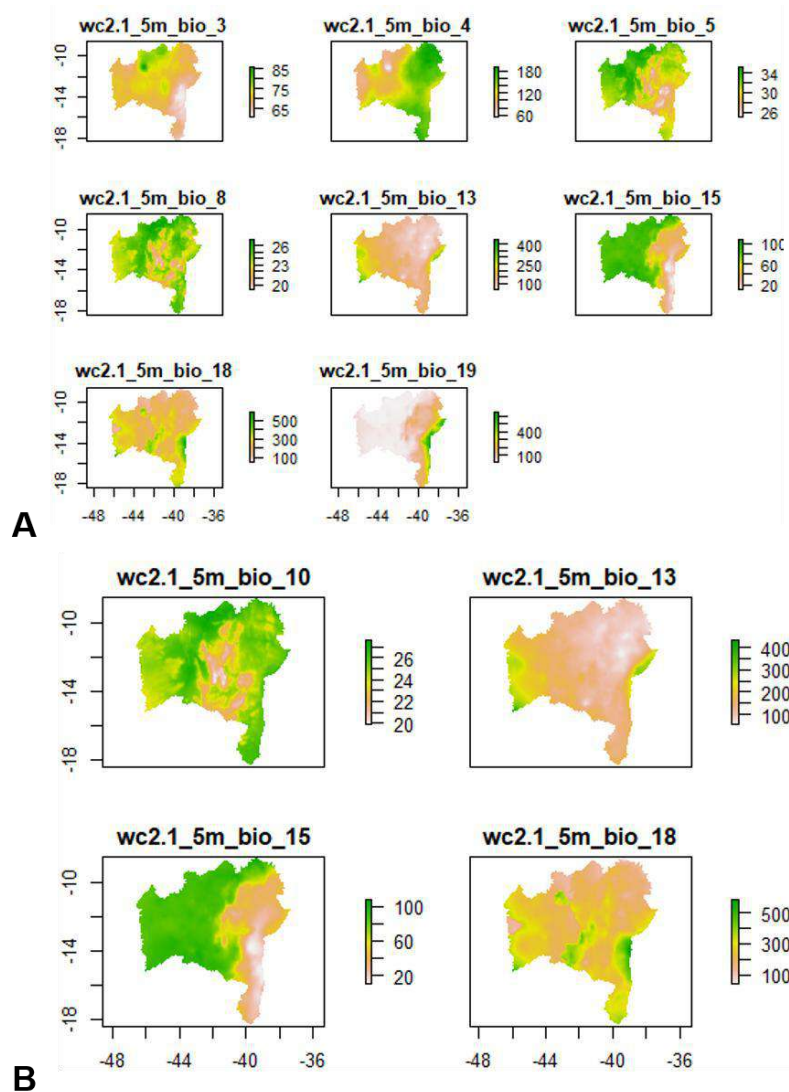
Figura 2: Ocorrência atual (2020-2040) de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) (A) e mamangava (*Xylocopa frontalis*) (B) no estado da Bahia a cada 10 km.



As variáveis bioclimáticas que mais influenciam a distribuição das espécies são diferentes: para *P. edulis*, destacam-se as variáveis bio3 (isotermalidade), bio4 (sazonalidade da temperatura), bio8 (temperatura média do trimestre mais úmido) e bio13 (precipitação no mês mais úmido), indicando uma forte influência da temperatura e da precipitação em sua distribuição, demonstrando a sensibilidade da espécie a regimes climáticos estáveis e úmidos (Figura 3A). Já para a *X. frontalis*, as variáveis mais relevantes foram bio10 (temperatura média do trimestre mais quente), bio13 (precipitação no mês mais úmido), bio15 (sazonalidade da precipitação) e bio18 (precipitação no trimestre mais quente), refletindo a dependência da espécie por regiões com maior

estabilidade térmica e hídrica (Figura 3B).

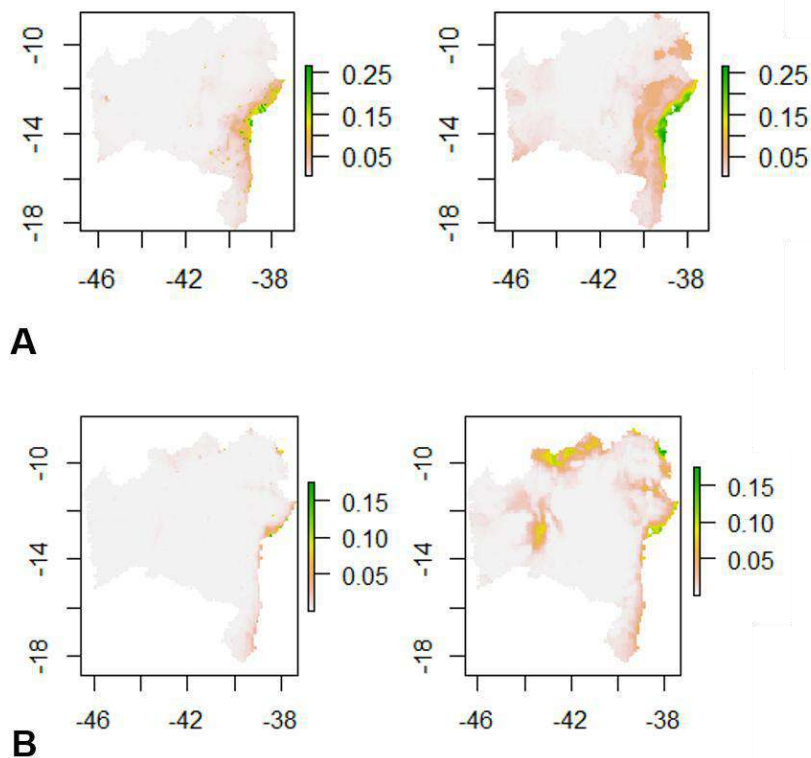
Figura 3: Variáveis bioclimáticas que afetam a ocorrência de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) (A) e da mamangava (*Xylocopa frontalis*) (B) no estado da Bahia.



Considerando um cenário otimista de mudanças climáticas entre 2040 – 2060, os modelos indicam que as condições mais adequadas para o cultivo de maracujá se ampliam consideravelmente, principalmente nas zonas litorâneas e no sudeste do estado (Figura

4A). Semelhantemente à distribuição potencial da mamangava, que também é ampliada, mas com persistência em áreas do centro-norte e litoral do estado (Figura 4B).

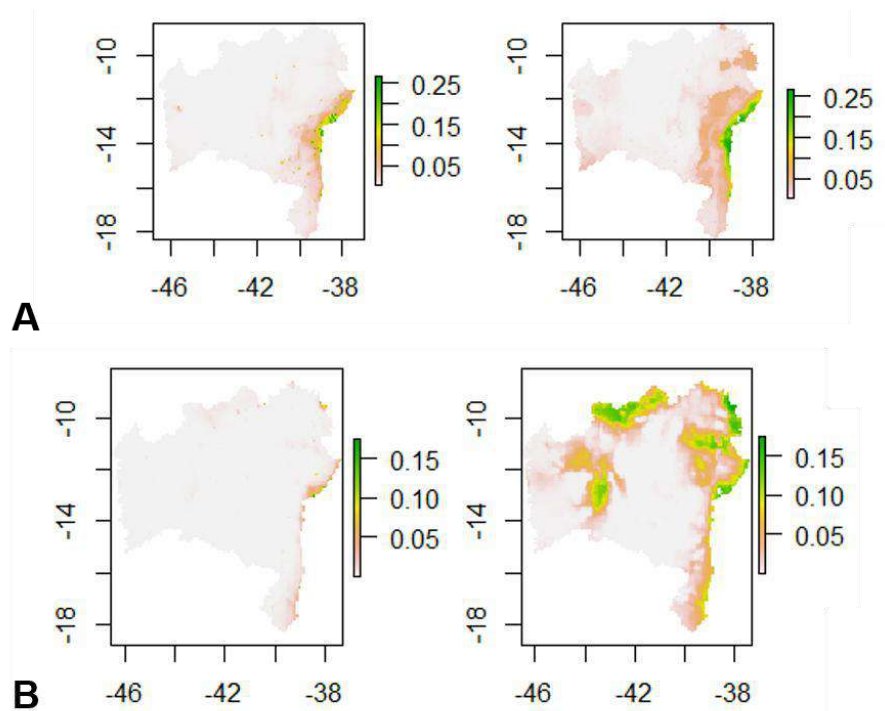
Figura 4: Cenários otimistas de mudanças climáticas para a ocorrência de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) (A) e da mamangava (*Xylocopa frontalis*) (B) no estado da Bahia atual e em 2040-2060.



Sob condições de um cenário intermediário, observa-se uma similaridade ao cenário otimista para a cultura do maracujá, com uma leve expansão para áreas próximas ao litoral (Figura 5A). De maneira geral, o cultivo continua possível em grande parte da área atual, embora com modificações. Enquanto que, para a mamangava, áreas de alta adequabilidade aumentam consideravelmente para o período futuro, especialmente em regiões litorâneas, indicando uma possível expansão da ocorrência da espécie nessas

regiões (Figura 5B). No entanto, observa-se uma sobreposição entre as espécies, o que pode comprometer a polinização efetiva e aumentar ainda mais a necessidade de polinização manual nos cultivos.

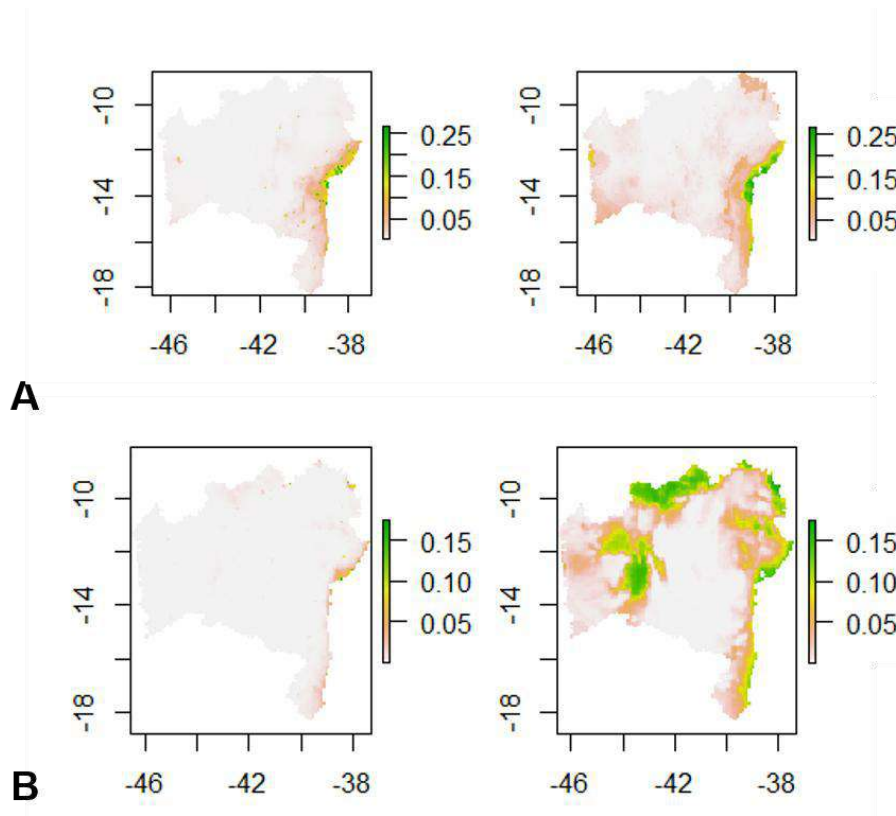
Figura 5: Cenários intermediários de mudanças climáticas para a ocorrência de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) (A) e da mamangava (*Xylocopa frontalis*) (B) no estado da Bahia atual e em 2040-2060.



Em condições extremas de mudanças climáticas, no cenário pessimista, observa-se que, para o maracujá, as áreas adequadas se mantêm principalmente no litoral do estado, (Figura 6A). Enquanto que, para a mamangava, há uma manutenção de algumas áreas adequadas e expansão em outras, especialmente no norte e centro-oeste do estado (Figura 6B). Evidenciando, assim, o risco de perda de sincronia espacial entre a planta e

o polinizador.

Figura 6: Cenários pessimistas de mudanças climáticas para a ocorrência de maracujá-azedo (*Passiflora edulis*) (A) e da mamangava (*Xylocopa frontalis*) (B) no estado da Bahia atual e em 2040-2060.



Discussão

Para *P. edulis*, os mapas revelam uma distribuição fortemente concentrada no litoral baiano, não sendo registradas pela base do GBIF os plantios da região da Chapada Diamantina e Livramento, grandes produtores do estado que, apesar de estarem localizados em regiões que não favorecem a produção de maracujá, apresentam resultados

satisfatórios através da utilização de tecnologias, como melhoramento genético; e manejo, como irrigação e adubação. Vários trabalhos mostram que irrigação e manejo de fertilidade permitem boa produtividade de *P. edulis* em condições climáticas menos ideais. Em estudo de lâminas de irrigação, o aumento da lâmina aplicada elevou significativamente a produtividade de maracujazeiro amarelo, sem perda de qualidade de fruto, confirmando a importância da irrigação para manter altos rendimentos (Souza et al., 2024). Em condições de estresse hídrico, *P. edulis* mostra redução de crescimento e parâmetros fisiológicos, caracterizando sensibilidade a déficit hídrico, o que justifica o uso de irrigação em regiões naturalmente pouco favoráveis (Conteiro et al., 2021).

Em todos os cenários, a adequabilidade tende a aumentar nas regiões costeiras ao longo do tempo, com destaque para o cenário otimista, no qual se observa a manutenção e até expansão de áreas de alta adequabilidade. No cenário pessimista, o padrão é semelhante ao da abelha, com retração de zonas altamente adequadas e maior concentração nas faixas litorâneas. Em estudo avaliando a modelagem e distribuição atual e futura do maracujá (*P. edulis*) e de suas principais abelhas polinizadoras (*X. frontalis* e *X. grisescens*) no Neotrópico, usando cenários RCP 4.5 (otimista/moderado) e 8.5 (pessimista), para 2060 e 2080, Bezerra et al. (2019a) relatam que a faixa atual de alta adequabilidade do maracujá e das abelhas se concentra principalmente na faixa leste do Brasil, incluindo grande parte da costa nordeste e sudeste, semelhante ao que foi observado na presente projeção.

Sob cenários futuros, Bezerra et al. (2019a) observaram que há redução da área adequada total, mas as áreas remanescentes tornam-se mais adequadas (probabilidade passando de ~60% para ~80%). Já para cenários pessimistas, a adequabilidade alta para

plantas e polinizadores permanece contínua na costa leste da América do Sul, com perda de adequação em áreas internas, especialmente Amazônia e outras regiões do interior.

As curvas de resposta dos modelos indicam forte influência de variáveis climáticas, como a temperatura média do trimestre mais quente (bio10), precipitação do trimestre mais quente (bio18) e sazonalidade da precipitação (bio15) para *X. frontalis*. Para o maracujá, as variáveis bio4 (sazonalidade da temperatura), bio18 (precipitação do trimestre mais seco) e bio19 (precipitação do trimestre mais úmido) mostraram-se altamente relevantes. Os resultados obtidos no presente estudo, por meio dos modelos de nicho ecológico, indicam uma forte influência de variáveis climáticas, sobretudo de temperatura e precipitação, na distribuição atual e futura do maracujá e da mamangava na Bahia.

Em modelagem de nicho para *P. edulis* e *Xylocopa* spp. no Neotrópico, usando-se as 19 variáveis do WorldClim, foi encontrado forte peso de variáveis ligadas à temperatura máxima/mais quente (bio5/bio10) e precipitação de trimestres úmidos/secos (bio16–bio19) na definição das áreas adequadas (Bezerra et al., 2019a; Bezerra et al., 2019b). Outros trabalhos com plantas e insetos mostram padrão semelhante: temperatura da estação mais quente (bio10) e precipitação do trimestre mais úmido (bio16) figuram entre os principais preditores de distribuição (Ijbari et al., 2025; Oliveira et al., 2025). Estudos recentes também destacam que mudanças no “timing” dos trimestres mais úmidos/secos (bio16–bio19), sob mudança climática, alteram o significado ecológico dessas variáveis, reforçando sua relevância para nichos futuros (Bede-Fazekas et al., 2024).

As projeções para o período entre 2040–2060 mostram cenários contrastantes, de

acordo com o grau de severidade climática. No cenário otimista, observa-se uma expansão das áreas de alta adequabilidade para ambas as espécies, especialmente nas regiões litorâneas e sudeste do estado. No entanto, mesmo nesse cenário, as áreas de sobreposição ótima entre planta e polinizador não aumentam proporcionalmente, o que pode indicar descompassos espaciais entre os nichos ecológicos das duas espécies.

Em trabalhos similares, avaliando *P. edulis*, *X. frontalis*, *X. grisescens* nos Neotrópicos, Bezerra et al. (2019a) e Bezerra et al. (2019b) observaram que, mesmo quando uma das espécies ganha novas áreas adequadas em cenários moderados, a área de coocorrência planta–abelha diminui 31,9–54,9%, indicando descompasso espacial entre nichos. Em estudo mais amplo com diversas culturas e abelhas, a redução de áreas de coocorrência planta–polinizador é novamente evidente, com perdas de 51,5% para *P. edulis*–*X. frontalis* (Oliveira et al., 2025).

Esse descompasso é ainda mais preocupante nos cenários intermediário e pessimista. Enquanto o maracujá tende a se concentrar em faixas litorâneas estreitas, devido à sua sensibilidade a extremos de temperatura e regimes de precipitação irregulares, *X. frontalis*, embora mantenha certa resiliência, perde áreas altamente adequadas no interior do estado. Em estudo mais amplo com *P. edulis* e *X. frontalis* em cenários otimistas, intermediário e pessimistas, todas as combinações planta–abelha sofrem redução de habitats adequados e de coocorrência; sendo que a região Nordeste/Atlântico aparece entre as áreas mais críticas de contração e reorganização biótica (Oliveira et al., 2025).

A diminuição da sobreposição espacial aumenta a vulnerabilidade dos serviços de polinização e pode comprometer a produção de maracujá (Bezerra et al., 2019a; Oliveira

et al., 2025). Estudos ressaltam que o deslocamento assimétrico de plantas e polinizadores, sob clima futuro, gera falhas de polinização e risco à segurança alimentar, sobretudo em cultivos tropicais dependentes de abelhas (Settele et al., 2016; Millard et al., 2023;). Para cultivos altamente dependentes de poucos polinizadores, como *P. edulis*, recomenda-se manejo ativo de polinizadores (criação e manejo de *Xylocopa*) para mitigar déficits (Bezerra et al., 2019a). A literatura também discute que, quando a polinização natural falha, práticas como polinização manual são adotadas, mas são onerosas e menos eficientes em larga escala (Settele et al., 2016; Borghi et al., 2019).

Esse risco de dissociação entre planta e polinizador, em resposta às mudanças climáticas, já foi identificado em outros contextos. Estudo de Giannini et al. (2020), na Amazônia, demonstrou que 95% das espécies de abelhas avaliadas teriam sua distribuição reduzida sob cenários futuros, impactando culturas como o maracujá, que dependem fortemente de grandes abelhas solitárias, como *Centris* e *Xylocopa*. Sínteses globais indicam que polinizadores especialistas são mais vulneráveis às mudanças climáticas e à redução de habitat, com risco de perda de serviços de polinização para culturas fortemente dependentes de poucos táxons de abelhas (Gérard et al., 2020; Keeler et al., 2021; Martén-Rodriguez et al., 2025).

Modelagens na Amazônia Oriental mostram que cerca de 95% das espécies de abelhas avaliadas terão sua área de ocorrência reduzida sob cenários futuros, com perdas especialmente altas para polinizadores de culturas agrícolas (Costa et al., 2020; Giannini et al., 2020; Acosta et al., 2024). Entre os mais afetados estão justamente polinizadores de lavouras e espécies com distribuição mais restrita, o que inclui grandes abelhas solitárias importantes para maracujá, como *Centris* e *Xylocopa* (Borges et al., 2020;

Giannini et al., 2020; Acosta et al., 2024).

Além disso, estudos experimentais demonstram que o aumento da temperatura afeta negativamente as interações planta-polinizador. Em *Stylosanthes capitata*, por exemplo, o aquecimento e o déficit hídrico resultaram em mudanças na fenologia floral e redução do número de visitantes florais, afetando diretamente o sucesso reprodutivo da planta (Pérez-Maluf et al., 2022). Esse fenômeno, conhecido como desencontro fenológico, pode ocorrer também no maracujá e *X. frontalis*, especialmente se as espécies respondem de forma distinta às variações climáticas.

Meta-análises mostram que aquecimento e seca reduzem número de flores, tamanho floral, néctar e frequentemente visitas de polinizadores, com impactos negativos no sucesso reprodutivo (Glenny et al., 2018; Descamps et al., 2021; Kuppler et al., 2021; Jaworski et al., 2022). Análises apontam que esses efeitos levam a desencontros fenológicos (florescimento vs. atividade de polinizadores) e a redes de polinização menos conectadas, especialmente em sistemas especializados (Keeler et al., 2021; Maninca et al., 2023; Martén-Rodríguez et al., 2025).

A dissociação temporal e espacial já vem sendo apontada como uma das principais ameaças à resiliência de serviços ecossistêmicos como a polinização (Memmott et al., 2007; Forrest, 2015). A literatura aponta que incompatibilidades espaciais e fenológicas entre plantas e polinizadores são uma das principais ameaças à resiliência da polinização sobre mudanças climáticas. Pesquisas indicam que alterações em distribuição, fenologia, abundância e comportamento podem romper interações, mesmo quando espécies ainda coexistem espacialmente (Gérard et al., 2020).

É importante ressaltar que a perda de sincronia planta-polinizador não afeta apenas

a produtividade agrícola. Também há implicações para a biodiversidade regional e o funcionamento dos ecossistemas. A polinização é peça-chave em redes ecológicas complexas e sua ruptura pode desencadear efeitos cascata. Conforme destacado por Alves-dos-Santos et al. (2025), muitas abelhas solitárias apresentam especializações ecológicas e funcionais únicas que não podem ser facilmente substituídas por outras espécies.

Reduções na diversidade e coocorrência de polinizadores levam à perda de robustez e resiliência em redes de polinização, com menor redundância funcional e maior risco de colapsos locais (Brosi et al., 2013; Moreira et al., 2015). Modelos e experimentos mostram que a perda, mesmo de poucas espécies-chave, pode reduzir fidelidade floral e sucesso reprodutivo de plantas, desencadeando efeitos em cascata sobre comunidades vegetais e serviços ecossistêmicos associados (Brosi et al., 2013; Moreira et al., 2015).

Por fim, o Brasil ainda apresenta lacunas significativas de conhecimento sobre a ecologia e distribuição de suas abelhas nativas (Hortal et al., 2015), o que limita a efetividade de ações de conservação. Há forte déficit de dados sobre diversidade, distribuição e características funcionais das abelhas brasileiras, especialmente em biomas pouco amostrados, o que limita diagnósticos e ações de conservação (Borges et al., 2020; Aguiar et al., 2024). Esse déficit de dados torna ainda mais relevante o uso de modelos preditivos, como os aplicados neste estudo, que fornecem subsídios importantes para políticas públicas de mitigação, de conservação e estratégias adaptativas na agricultura, fundamentais para a segurança alimentar.

Conclusões

- Os resultados indicam que a distribuição atual do maracujá e da mamangava, na Bahia, é influenciada principalmente por fatores climáticos relacionados à temperatura e precipitação;
- As projeções para 2040–2060 apontam para uma redução nas condições climáticas adequadas, especialmente para o maracujá, com implicações para a sustentabilidade da polinização e da produtividade agrícola;
- A potencial dissociação espacial entre planta e polinizador agrava os riscos para o cultivo do maracujá, que depende fortemente da polinização por *X. frontalis*.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, *Campus Vitória da Conquista*, ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio; e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), pelo financiamento e concessão da bolsa.

Referências

Acosta, A.L., Santos, C.F., Imperatriz-Fonseca, V.L., Oliveira, R.C., Giannini, T.C., 2024. A methodological approach to identify priority zones for monitoring and assessment of wild bee species under climate change. *Frontiers in Bee Science* 2. <https://doi.org/10.3389/frbee.2024.1329844>

Aguiar, L.M.S., Diniz, U.M., Bueno-Rocha, I.D., Filomeno, L.R.A., Aguiar-Machado, L.S., Gomes, P.A., Togni, P.H.B., 2024. Untangling biodiversity interactions: A meta-network on pollination in Earth's most diverse tropical savanna. *Ecology and Evolution* 14. <https://doi.org/10.1002/ece3.11094>

Alves-dos-Santos, I., Martins, H.O.J., Sabino, W.O., 2025. Solitary bees facing climate change. *Sociobiology* 72, e11380. <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v72i2.11380>

Bede-Fazekas, A., Somodi, I., 2024. Precipitation and temperature timings underlying bioclimatic variables rearrange under climate change globally. *Global Change Biology* 30. <https://doi.org/10.1111/gcb.17496>

Bezerra, A.D.M., Pacheco Filho, A.J.S., Bomfim, I.G.A., Smagghe, G., Freitas, B.M., 2019a. Agricultural area losses and pollinator mismatch due to climate changes endanger passion fruit production in the Neotropics. *Agricultural Systems* 169, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.12.002>

Bezerra, A.D.M., Pacheco Filho, A.J.S., Bomfim, I.G.A., Smagghe, G., Freitas, B.M., 2019b. Data relating to threats to passion fruit production in the Neotropics due to agricultural area loss and pollinator mismatch as consequence of climate changes. *Data in Brief* 23. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.103802>

Borges, R.C., Padovani, K., Imperatriz-Fonseca, V.L., Giannini, T.C., 2020. A dataset of

multi-functional ecological traits of Brazilian bees. *Scientific Data* 7.
<https://doi.org/10.1038/s41597-020-0461-3>

Borghi, M., Souza, L.P., Yoshida, T., Fernie, A.R., 2019. Flowers and climate change: A metabolic perspective. *New Phytologist* 224, 1425–1441.
<https://doi.org/10.1111/nph.16031>

Brosi, B.J., Briggs, H.M., 2013. Single pollinator species losses reduce floral fidelity and plant reproductive function. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 110, 13044–13048. <https://doi.org/10.1073/pnas.1307438110>

Contiero, L.F., Cavichioli, J.C., Lisboa, L.A.M., Vitorino, R.A., Ramos, S.B., Figueiredo, P.A.M., 2021. Water stress in passion fruit cropping: An approach to its development. *Revista Engenharia na Agricultura* 29, 245–253.
<https://doi.org/10.13083/reveng.v29i1.11610>

Cordeiro, G.D., Dötterl, S., 2023a. Global warming impairs the olfactory floral signaling in strawberry. *BMC Plant Biology* 23, 549. <https://doi.org/10.1186/s12870-023-04564-6>

Cordeiro, G.D., Dötterl, S., 2023b. Floral scents in bee-pollinated buckwheat and oilseed rape under a global warming scenario. *Insects* 14, 242.
<https://doi.org/10.3390/insects14030242>

Costa, W.F., Giannini, T.C., Saraiva, A.M., 2020. Biodiversity climate shifts: Shaping data transformation and evaluation. *Biodiversity Information Science and Standards* 4. <https://doi.org/10.3897/biss.4.59241>

Descamps, C., Quinet, M., Jacquemart, A.L., 2021. The effects of drought on plant–pollinator interactions: What to expect? *Environmental and Experimental Botany* 182. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104297>

Dicks, L.V., Breeze, T.D., Ngo, H.T., Senapathi, D., An, J., Aizen, M.A., Aizen, M.A., Basu, P., Buchori, D., Galetto, L., Garibaldi, L.A., Gemmill-Herren, B., Howlett, B.G., Imperatriz-Fonseca, V.L., Johnson, S.D., Kovács-Hostuánszki, A., Kwon, Y.J., Lattorff, H.M.G., Lungharwo, T., Seymour, C.L., Vanbergen, A.J., Potts, S.G., 2021. A global-scale expert assessment of drivers and risks associated with pollinator decline. *Nature Ecology & Evolution* 5, 1453–1461. <https://doi.org/10.1038/s41559-021-01534-9>

Forrest, J.R.K., 2015. Plant–pollinator interactions and phenological change: What can we learn about climate impacts from experiments and observations? *Oikos* 124, 4–13. <https://doi.org/10.1111/oik.01386>

Garibaldi, L. A., Steffan-Dewenter, I., Kremen, C., Morales, J. M., Bommarco, R., Cunningham, S. A., Carvalheiro, L. G., Chacoff, N. P., Dudenhöffer, J. H., Greenleaf, S. S., Holzschuh, A., Isaacs, R., Krewenka, K., Mandelik, Y., Mayfield, M. M., Morandin, L. A., Potts, S. G., Ricketts, T. H., Szentgyörgyi, H., Viana, B. F., Westphal, C., Winfree, R., Klein, A. M., 2011. Stability of pollination services decreases with isolation from

natural areas despite honey bee visits. *Ecology Letters* 14, 1062–1072.
<https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01669.x>

Gazzea, E., Batáry, P., Marini, L., 2023. Global meta-analysis shows reduced quality of food crops under inadequate animal pollination. *Nature Communications* 14, 4463.
<https://doi.org/10.1038/s41467-023-40231-y>

Gérard, M., Vanderplanck, M., Wood, T., Michez, D., 2020. Global warming and plant–pollinator mismatches. *Emerging Topics in Life Sciences* 4, 77–86.
<https://doi.org/10.1042/ETLS20190139>

Giannini, T.C., Costa, W.F., Borges, R.C., Miranda, L., Costa, C.P.W., Saraiva, A.M., Imperatriz-Fonseca, V.L., 2020. Climate change in the Eastern Amazon: Crop-pollinator and occurrence-restricted bees are potentially more affected. *Regional Environmental Change* 20. Doi:10.1007/s10113-020-01611-y

Giannini, T.C., Costa, W.F., Cordeiro, G.D., Imperatriz-Fonseca, V.L., Saraiva, A.M., Biesmeijer, J., Garibaldi, L.A., 2017. Projected climate change threatens pollinators and crop production in Brazil. *PLoS ONE*. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182274>

Giannini, T.C., Garibaldi, L.A., Acosta, A.L., Silva, J.S., Maia, K.P., Saraiva, A.M., Guimarães Jr., P.R., Kleinert, A.M.P., 2015. Native and non-native supergeneralist bee species have different effects on plant–bee networks. *PLoS ONE* 10, e0137198.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137198>

Glenny, W.R., Runyon, J.B., Burkle, L.A., 2018. Drought and increased CO₂ alter floral visual and olfactory traits with context-dependent effects on pollinator visitation. *New Phytologist* 220, 785–798. <https://doi.org/10.1111/nph.15081>

Hofmann, G. S., Cardoso, M. F., Alves, R. J. V., Weber, E. J., Barbosa, A. A., de Toledo, P. M., Pontual, F. B., de O. Salles, L., Hasenack, H., Cordeiro, J. L. P., Aquino, F. E. & de Oliveira, L. F. B., 2021. The Brazilian Cerrado is becoming hotter and drier. *Global Change Biology* 27, 4060–4073. <https://doi.org/10.1111/gcb.15712>

Hortal, J., de Bello, F., Diniz-Filho, J.A.F., Lewinsohn, T.M., Lobo, J.M., Ladle, R.J., 2015. Seven shortfalls that beset large-scale knowledge of biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 46, 523–549. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054400>

Ijbari, H., Vaezi, J., Behroozian, M., Ejtehadi, H., 2025. Impact of Climate Change on the Distributional Potential of the Endemic Species *Tamarix dubia* Bunge and Conservation Implications for the Irano-Turanian Region. *Ecology and Evolution* 15. <https://doi.org/10.1002/ece3.71877>

IPBES, 2016. The assessment report on pollinators, pollination and food production. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and

Ecosystem Services, Bonn. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3402856>

Jaworski, C.C., Geslin, B., Zakardjian, M., Caillault, P., Neve, G., Meunier, J.Y., Dupouyet, S., Sweeney, A., Lewis, O., Dicks, L., 2022. Long-term experimental drought alters floral scent and pollinator visits. *Journal of Ecology* 110, 2628–2648. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13974>

Keeler, A.M., Rose-Person, A., Rafferty, N.E., 2021. From the ground up: Building predictions for how climate change will affect belowground mutualisms, floral traits, and bee behavior. *Climate Change Ecology* 1. <https://doi.org/10.1016/j.ecochg.2021.100013>

Klein, A.M., Vaissière, B.E., Cane, J.H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S.A., Kremen, C., Tscharntke, T., 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B* 274, 303–313. <https://doi.org/10.1098/rspb.2006.3721>

Kolanowska, M, 2023. Loss of fungal symbionts and changes in pollinator availability caused by climate change will affect the distribution and survival chances of myco-heterotrophic orchid species. *Scientific Reports*, 13, 6848. Doi:10.1038/s41598-023-33856-y

Kolanowska, M, 2025. Climate change will cause the spatial mismatch between sexually deceptive beetle daisy (*Gorteria diffusa*, Asteraceae) and its pollinator. *Scientific Reports*,

15, 21740. Doi:10.1038/s41598-025-06976-w.

Kuppler, J., Kotowska, M.M., 2021. A meta-analysis of responses in floral traits and flower–visitor interactions to water deficit. *Global Change Biology* 27, 3095–3108. <https://doi.org/10.1111/gcb.15621>

Martén-Rodríguez S, Cristobal-Pérez EJ, Santiago-Hernández MH, Huerta-Ramos G, Clemente-Martínez L, Krupnick G, Taylor O, Lopezaraiza-Mikel M, Balvino-Olvera FJ, Senties-Aguilar EM, Díaz-Infante S, Jaimes AA, Novais S, Cortés-Flores J, Lobo-Segura EJ, Delgado-Carrillo FO, Ruiz-Mercado I, Sáyago-Lorenzana R, Pérez-Arroyo K, Quesada M (2025). Untangling the Complexity of Climate Change Effects on Plant Reproductive Traits and Pollinators: A Systematic Global Synthesis. *Global Change Biology*. Volume 31, Issue 2 e70081. <https://doi.org/10.1111/gcb.70081>.

Manincor, N., Fisogni, A., Rafferty, N.E., 2023. Warming of experimental plant–pollinator communities alters traits and depresses reproduction. *Ecology Letters* 26, 323–334. <https://doi.org/10.1111/ele.14158>

Millard, J., Outhwaite, C.L., Ceausu, S., Carvalheiro, L.G., Silva, F.D.S., Dicks, L.V., Ollerton, J., Newbold, T., 2023. Key tropical crops at risk from pollinator loss due to climate change and land use. *Science Advances* 9. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh0756>

Moreira, E.F., Boscolo, D., Viana, B.F., 2015. Spatial heterogeneity regulates plant–pollinator networks. PLoS ONE. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123628>

Nicolas, T., Aurélie, M., Céline, G., 2020. Influence of climate change impacts and mitigation costs on inequality between countries. *Climatic Change*, volume 160(1), pages 15–34. Doi: 10.1007/s10584-019-02637-w.

Oliveira, W., Cruz-Neto, O., Silva, J.L.S., Tabarelli, M., Peres, C.A., Lopes, A.V., 2025. Climate change will lead to local extinctions disrupting bee-dependent crop pollination. *Frontiers in Bee Science* 3. <https://doi.org/10.3389/frbee.2025.1510451>

Ollerton, J., Winfree, R., Tarrant, S., 2011. How many flowering plants are pollinated by animals? *Oikos* 120, 321–326. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18644.x>

Pérez-Maluf, R., Alzate-Marin, A. L., Silva, C. C., Pansarin, L. M., Bonifácio-Anacleto, F., Schuster, I., de Mello Prado, R., Martinez, C. A., 2022. Warming and soil water availability affect plant–flower visitor interactions for *Stylosanthes capitata*, a tropical forage legume. *Science of the Total Environment* 817, 152982. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152982>

Souza, J. A. A. de, Pires, M. S., Santos, D. B. dos, Aspiazú, I., Santos, G. M. S. dos, São José, A. R., Simões, W. L. (2024). Fruit quality and productivity of yellow passion fruit grown under different irrigation depths. *Concilium*, 24(12), 587–606. Doi:

10.53660/CLM-3666-24M48.

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. <https://doi.org/10.1038/nature20588>

Porto, R.G.; Almeida, R.F.; Cruz-Neto, O.; Tabarelli, M.; Viana, B.F.; Peres, C.A.; Lopes, A.V. Pollination ecosystem services: A comprehensive review of economic values, research funding and policy actions. *Food Security*, v. 12, p. 1425-1442, 2020. Doi:10.1007/s12571-020-01043-w

Senapathi, D., Fründ, J., Albrecht, M., Garratt, M.P.D., Kleijn, D., Pickles, B.J., Potts, S.G., An, J., Andersson, G.K.S., Bänisch, S., Basu, P., Benjamin, F., Bezerra, A.D.M, Bhattacharya, R., Biesmeijer, J.C., Blaauw, B., Blitzer, E.J., Brittain, C.A., Carvalheiro, L.G., Cariveau, D.P., Chakraborty, P., Chatterjee, A., Chatterjee, S., Cusser, S., Danforth, B.N., Degani, E., Freitas, B.M., Garibaldi, L.A., Geslin, B., Groot, G.A., Harrison, T., Howlett, B., Isaacs, R., Jha, S., Klatt, B.K., Krewuka, K., Leigh, S., Lindström, S.A.M., Mandelik, Y., McKerchar, M., Mia, P., Pisanty, G., Rader, R., Reemer, M., Rundlöf, M., Smith, B., Smith, H.G., Silva, P.N., Steffan-Dewenter, I., Tschamntke, T., Webber, S., Westbury, D.B., Westphal, C., Wickens, J.B., Wickens, V.J, Winfree, R., Zhang, H., Klein, A.M., 2021. Wild insect diversity increases interannual stability in global crop pollinator communities. *Proceedings of the Royal Society B* 288,

20210212. <https://doi.org/10.1098/rspb.2021.0212>

Settele, J., Bishop, J., Potts, S.G., 2016. Climate change impacts on pollination. *Nature Plants* 2, 16092.

Stein, K., Coulibaly, D., Stenchly, K., Goetze, D., Porembski, S., Lindner, A., Konaté, S. & Linsenmair, K.E, 2017. Bee pollination increases yield quantity and quality of cash crops in West Africa. *Scientific Reports* 7, 17691. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17970-2>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados encontrados neste trabalho evidenciam que a polinização do maracujazeiro por abelhas do gênero *Xylocopa* deve ser compreendida como um processo ecológico complexo, dependente da interação entre características florais, dinâmica das populações de polinizadores, práticas de manejo agrícola e condições ambientais locais e regionais. Mais do que um fenômeno pontual, a polinização é um componente estratégico da sustentabilidade produtiva do maracujazeiro, especialmente em ambientes semiáridos, onde a variabilidade climática impõe desafios adicionais à estabilidade das interações planta-polinizador.

Os dados observados indicam que a simples presença de polinizadores não garante, por si só, a eficiência da polinização. A funcionalidade ecológica das espécies, a sincronização temporal entre floração e atividade dos polinizadores e a disponibilidade de habitats adequados para forrageamento e nidificação são fatores determinantes para o sucesso reprodutivo da cultura. Nesse contexto, o manejo ativo de abelhas nativas surge como uma alternativa promissora, porém ainda pouco explorada em escala comercial, exigindo ajustes técnicos, validação em diferentes sistemas produtivos e avaliação de sua viabilidade econômica a longo prazo.

Entre os principais desafios identificados, destacam-se a dependência crescente da polinização manual, os custos associados à sua adoção, a perda e fragmentação de habitats naturais e a baixa incorporação do conhecimento ecológico sobre polinizadores no planejamento agrícola. Soma-se a isso a presença de espécies pilhadoras, que podem alterar a dinâmica de visitas florais, e a intensificação do uso de insumos agrícolas, com potenciais efeitos negativos sobre populações de abelhas nativas.

As projeções relacionadas às mudanças climáticas apontam para um cenário adicional de incerteza, no qual alterações na temperatura e na precipitação podem modificar a distribuição geográfica do maracujazeiro e de seus principais polinizadores, aumentando o risco de desencontro espacial e temporal entre planta e polinizadores. Esse contexto reforça a necessidade de estratégias adaptativas que integrem manejo de

polinizadores, conservação da vegetação nativa e planejamento territorial, especialmente em regiões vulneráveis como o semiárido.

Apesar dos avanços alcançados, permanecem lacunas importantes a serem exploradas. Estudos de longo prazo são necessários para avaliar a estabilidade das populações de *Xylocopa* em áreas manejadas, os efeitos cumulativos do adensamento de ninhos e sua interação com diferentes práticas agrícolas. Também são necessários trabalhos que incorporem análises econômicas, avaliando custos, benefícios e riscos do manejo de polinizadores em comparação à polinização manual. Além disso, investigações sobre diversidade genética, fisiologia, saúde das populações de abelhas e respostas comportamentais, frente a cenários climáticos futuros, são fundamentais para aprimorar estratégias de conservação e manejo.

De forma geral, esta tese contribui para ampliar a compreensão da polinização do maracujazeiro sob uma perspectiva integrada, reforçando que a sustentabilidade da produção agrícola depende do reconhecimento e da valorização dos serviços ecossistêmicos prestados pelos polinizadores. A consolidação desse conhecimento no contexto da agricultura requer a aproximação entre pesquisa científica, extensão rural e políticas públicas, de modo a promover sistemas produtivos mais resilientes, economicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis.