MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES
MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE E EVOLUÇÃO

JULIANA DA SILVA CARDOSO

REDES DE INTERAÇÃO TRÓFICA DOS VISITANTES FLORAIS DE *Gouania cornifolia* REISSEK EM ÁREAS EM REGENERAÇÃO NATURAL PÓS-MINERAÇÃO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

BELÉM - PARÁ
2024

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES
MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE E EVOLUÇÃO

JULIANA DA SILVA CARDOSO

REDES DE INTERAÇÃO TRÓFICA DOS VISITANTES FLORAIS DE *Gouania cornifolia* REISSEK EM ÁREAS EM REGENERAÇÃO NATURAL PÓS-MINERAÇÃO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Dissertação apresentada ao Museu Paraense Emílio Goeldi, como parte das exigências do Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Evolução, Área de Concentração Evolução e Dinâmica da Diversidade Biológica para obtenção do Título de Mestre.

Orientadora:
Márcia Motta Maués

Coorientadora:
Cláudia Inês da Silva

BELÉM - PARÁ
2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C268 Cardoso, Juliana da Silva

Redes de interação trófica dos visitantes florais de Gouania cornifolia Reissek em áreas em regeneração natural pós-mineração na Amazônia Oriental. / Juliana da Silva Cardoso. – Belém, 2024.
49 f. : il. color.

Orientadora : Márcia Motta Maués
Coorientadora: Cláudia Inês da Silva
Dissertação (mestrado) – Museu Paraense Emílio Goeldi, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Evolução.

1. Polinização. 2. Apis mellifera. 3. Gouania cornifolia Reissek. 4. Interação trófica. 5. Recuperação ambiental – Amazônia Oriental (Brasil). I. Maués, Márcia Motta. II. Silva, Cláudia Inês da. III. Título.

CDD. 20 ed. 582.01662

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES
MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIODIVERSIDADE E EVOLUÇÃO

JULIANA DA SILVA CARDOSO

REDES DE INTERAÇÃO TRÓFICA DOS VISITANTES FLORAIS DE *Gouania cornifolia* REISSEK EM ÁREAS EM REGENERAÇÃO NATURAL PÓS-MINERAÇÃO NA AMAZÔNIA ORIENTAL

Dissertação apresentada ao Museu Paraense Emílio Goeldi, como parte das exigências do Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Evolução.

Aprovada em

29/04/2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
MARCIA MOTTA MAUES
Data: 09/05/2024 15:20:50-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dra. Márcia Motta Maués – Orientadora
Embrapa Amazônia Oriental

Documento assinado digitalmente
CLAUDIA INES DA SILVA
Data: 07/06/2024 16:30:13-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dra. Cláudia Inês da Silva – Coorientadora
Museu Paraense Emílio Goeldi

Documento assinado digitalmente
ELY SIMONE CAJUEIRO GURGEL
Data: 10/05/2024 13:18:27-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dra. Ely Simone Cajueiro Gurgel – 1º Examinador
Museu Paraense Emílio Goeldi

Documento assinado digitalmente
PATRICIA MAIA CORREIA DE ALBUQUERQUE
Data: 07/06/2024 11:54:12-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dra. Patrícia Maia Correia de Albuquerque – 2º Examinador
Universidade Federal do Maranhão

Documento assinado digitalmente
ANDRE RODRIGO RECH
Data: 14/05/2024 10:58:52-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

André Rodrigo Rech – 3º Examinador
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me permitir realizar o desejo de cursar o mestrado e por ter me guiado durante essa fase.

Ao Museu Paraense Emílio Goeldi e ao Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Evolução (PPGBE).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

À Dra. Márcia Motta Maués, pela orientação, apoio, comprometimento com o trabalho, conhecimentos compartilhados, mas em especial por sua paciência e compreensão.

À Dra. Cláudia Inês da Silva, pela orientação, dedicação, por compartilhar e aplicar seus conhecimentos valiosos sobre palinologia e ecologia de abelhas, que foram essenciais para realização deste trabalho.

À Dra. Marlúcia Bonifácio Martins, coordenadora do Projeto Interações, do qual este trabalho faz parte.

À minha família, por todo o apoio durante a fase do mestrado.

À Ma. Leilane Ávila Bezerra e Dra. Marivana Borges Silva, por me concederem a oportunidade de continuar este trabalho, pela disponibilização em organizar os insetos, buscar identificação para os mesmos, bem como, pelas contribuições no entendimento da complexa biologia floral da *Gouania cornifolia* Reissek e valiosas sugestões no manuscrito.

À Dra. Beatriz Woiski Teixeira Coelho, pela identificação das abelhas e pelas contribuições com este trabalho.

À Dra. Roberta Macedo Cerqueira, pelo apoio durante a coleta de botões florais, identificação das plantas, preparação das exsicatas e outras contribuições com este trabalho.

À Dra. Rosângela Santa-Brígida, pelo apoio e conversas no laboratório, que me orientaram em muitos momentos do mestrado e pelas contribuições com as análises estatísticas.

À Jesiane Miranda Cardoso e Ronaldo Roberto, pelo apoio durante a coleta de botões florais.

À coordenação do Laboratório Multiusuário de Análises Químicas, da Coordenação de Ciências da Terra (COCTE), do MPEG, pela permissão para utilizar a centrífuga de tubo Falcon.

À coordenação do Laboratório de Palinologia, da Coordenação de Botânica (COBOT), do MPEG, por disponibilizar o espaço, bem como, equipamentos para preparação do material polínico.

À coordenação do Laboratório de Ecologia de Insetos (LEI), do MPEG.

Ao Nayron Frances, técnico do Laboratório de Biologia Molecular, do MPEG, pelo empréstimo da centrífuga para eppendorff.

SUMÁRIO

RESUMO..... 7
ABSTRACT..... 8
Introdução..... 9
Referências..... 12
Capítulo 1 – Impact of *Apis melllifera* on the bee-plant trophic interaction network in post-mining restoration areas in the Amazon..... 15
Abstract..... 16
1. Introduction..... 16
2. Materials and Methods..... 18
2.1. Study Area..... 18
2.2. Target species for bee sampling..... 20
2.3. Bee sampling..... 20
2.4. Pollen collection and preparation..... 20
2.5. Data analysis..... 20
3. Results..... 21
4. Discussion..... 28
5. Conclusion..... 31
6. Acknowledgments..... 31
7. References..... 32
Appendix 1..... 40
Appendix 2..... 41
Attachments 45

RESUMO

As interações mutuamente benéficas entre planta e animal são importantes para o funcionamento dos ecossistemas terrestres, pois são essenciais para a reprodução tanto das plantas, quanto dos animais com as quais interagem. A polinização é uma interação mutualística, em que os polinizadores se beneficiam com os recursos florais utilizados na construção de seus ninhos e principalmente na alimentação de adultos e de suas crias. Ações antrópicas tem sido a principal causa do declínio de polinizadores, dentre elas, destaca-se a mineração. Para mitigar esses efeitos negativos, as mineradoras adotam medidas para recuperar as áreas exploradas, a fim de restabelecer a diversidade da biota original. A presença de plantas nativas é indispensável na recuperação das áreas degradadas. *Gouania cornifolia* Reissek (Rhamnaceae) é uma das espécies vegetais que possui considerável importância ecológica em áreas de regeneração, uma vez que apresenta atributos que contribuem para a recuperação de ambientes pós-mineração. Este trabalho buscou caracterizar e comparar as redes de interações tróficas entre as espécies de abelhas e plantas usadas na sua alimentação, em dois ambientes: regeneração natural e borda de floresta adjacente, em uma área pós-mineração, no nordeste do Pará. Para isso, foram coletadas abelhas em flores de *G. Cornifolia* e retirado o pólen depositado no corpo delas. Posteriormente, as abelhas foram identificadas e os *vouchers* depositados na Coleção Entomológica do MPEG. Também foram coletados botões florais em pré-antese das plantas que floresceram nas áreas estudadas para a organização de uma coleção de referência de pólen, que foi imprescindível para a identificação do pólen presente no corpo dessas abelhas. Todo o material polínico amostrado no corpo das abelhas e nos botões florais, foram submetidos ao processo de acetólise, descritos e identificados em microscopia óptica. Na Palinoteca do MPEG foram inseridas as lâminas de pólen de plantas da coleção de referência. Com as análises palinológicas foi possível construir uma matriz de presença e ausência, e a partir desta, foram feitas as redes de interação trófica. As abelhas com maior quantidade de espécimes amostrados nas flores foram *Apis mellifera* Linnaeus, *Trigona pallens* (Fabricius, 1798), *Nannotrigona dutrae* (Friese, 1901), *Frieseomelitta longipes* (Smith, 1854) e *Melipona flavolineata* (Friese, 1900). Os tipos polínicos mais frequentes identificados no corpo delas foram: *G. cornifolia*, *Solanum estramonifolium* Jacq., *Lepidaploa silvae* (H.Rob.) H.Rob., Apocynaceae sp1e *Lepidaploa paraensis* (Mart. ex DC.) H.Rob. Neste estudo, as áreas de borda de floresta apresentaram maior diversidade de abelhas, composição de alimento mais rica em tipos polínicos e rede de interação mais aninhada com a exclusão da espécie exótica *Apis mellifera*, que mostrou alterar a estrutura das redes de interações.

Palavras-chave: abelhas ; pólen; polinização; recuperação ambiental.

ABSTRACT

Mutually beneficial interactions between plants and animals are important for the functioning of terrestrial ecosystems, as they are essential for the reproduction of both plants and animals with which they interact. Pollination is a mutualistic interaction, in which pollinators benefit from the floral resources used to build their nests and mainly to feed adults and their offspring. Anthropogenic actions have been the main cause of the decline of pollinators, among which mining stands out. To mitigate these negative effects, mining companies adopt measures to recover exploited areas, in order to reestablish the diversity of the original biota. The presence of native plants is essential in the recovery of degraded areas. *Gouania cornifolia* Reissek (Rhamnaceae) is one of the plant species that has considerable ecological importance in regeneration areas, as it has attributes that contribute to the recovery of post-mining environments. This work sought to characterize and compare the networks of trophic interactions between species of bees and plants used in their food, in two environments: natural regeneration and adjacent forest edge, in a post-mining area, in the northeast of Pará. To achieve this, Bees were collected from *G. Cornifolia* flowers and the pollen deposited on their bodies was removed. Subsequently, the bees were identified and the vouchers deposited in the MPEG Entomological Collection. Pre-anthesis floral buds were also collected from plants that flowered in the areas studied to organize a pollen reference collection, which was essential for identifying the pollen present on the bodies of these bees. All pollen material sampled from the bees' bodies and flower buds were subjected to the acetolysis process, described and identified using optical microscopy. The MPEG Palinoteca included plant pollen slides from the reference collection. With palynological analyzes it was possible to construct a matrix of presence and absence, and from this, trophic interaction networks were created. The bees with the largest number of specimens sampled from flowers were *Apis mellifera* Linnaeus, *Trigona pallens* (Fabricius, 1798), *Nannotrigona dutrae* (Friese, 1901), *Frieseomelitta longipes* (Smith, 1854) and *Melipona flavolineata* (Friese, 1900). The most frequent pollen types identified in their bodies were: *G. cornifolia*, *Solanum estramonifolium* Jacq., *Lepidaploa silvae* (H.Rob.) H.Rob., Apocynaceae sp1e *Lepidaploa paraensis* (Mart. ex DC.) H.Rob. In this study, forest edge areas showed greater bee diversity, food composition richer in pollen types and a more nested interaction network with the exclusion of the exotic species *Apis mellifera*, which was shown to alter the structure of interaction networks.

Keywords: bees; pollen; pollination; environmental recovery.

Introdução

As redes de interação planta-animal são constituídas pela relação entre dois grupos diferentes, que são as plantas e os animais e são modelos para o estudo de redes mutualísticas, uma vez que evidenciam uma diversidade de ocorrências sobre a coevolução (Bascompte e Jordano, 2006). Além disso, desempenham um papel muito importante para o funcionamento da biodiversidade, visto que possuem uma estrutura que pode também contribuir com a resistência à perda de espécies (Bascompte e Jordano, 2007).

Os animais que visitam as flores são denominados visitantes florais e procuram na flor recursos conforme sua necessidade (Santos et al., 2016). Esses recursos florais podem ser nutritivos: pólen, néctar, lipídeos e tecidos florais, não nutritivos: resinas e fragrâncias e estabelecem a relação entre flor e visitante. A alimentação é a necessidade responsável por grande parte das visitas às flores. O pólen é um recurso floral nutritivo e transporta a informação genética do gameta masculino, além de fazer parte da dieta de diversos grupos de insetos, sobretudo abelhas e outros grupos de animais como aves e mamíferos (Agostini; Lopes; Machado, 2014).

Para ser considerado um polinizador efetivo, o visitante floral deve efetuar o transporte do grão de pólen das anteras de uma flor para o estigma de outra flor, de uma mesma espécie de planta. Essa transferência é chamada de polinização e pode ser realizada das seguintes formas: por autopolinização, que ocorre com o pólen e estigma de uma única flor, por geitonogamia, quando é realizada entre a antera e o estigma de flores diferentes de uma mesma planta e por xenogamia, que acontece entre a antera e o estigma de flores de plantas diferentes (Santos et al., 2016).

A polinização proporciona diversos benefícios para o bem estar do homem e por isso é considerada um serviço ecossistêmico, que promove regulação ao preservar a variabilidade genética de plantas nativas que sustentam a biodiversidade, provisão ao garantir o abastecimento confiável e variado de alimentos e cultural, ao proporcionar valores culturais atrelados aos saberes tradicionais (IPBES, 2016).

As abelhas são um grupo importante de polinizadores e mantêm uma relação estreita com as angiospermas, uma vez que contribuem para a reprodução sexuada destes vegetais, enquanto coletam recursos florais para suprir suas necessidades (Michener, 2007).

Com o aumento das alterações ambientais, verifica-se uma diminuição global de

polinizadores, mais intensa nos trópicos do que nas zonas temperadas (Aizen et al. 2009), em que existe maior concentração de espécies vegetais que são polinizadas por animais (Ollerton; Winfree; Tarrant, 2011).

Diversos impactos ambientais estão associados ao declínio de insetos, incluindo polinizadores, dentre eles, destacam-se as alterações climáticas, a desertificação, espécies invasoras e a perda e degradação de habitat ocasionada pelas atividades relacionadas à agricultura, desenvolvimento, exploração madeireira, mineração, represamento e outros (Wagner, 2020).

Na Amazônia, encontram-se algumas das principais jazidas de minérios, dentre elas, as reservas de bauxita são as que têm maior destaque (BRASIL DNPM, 2018). A mineração causa alterações severas no meio ambiente durante toda sua implementação, afetando intensamente a flora e a fauna (Silva e Andrade, 2017) e é um dos fatores que contribuem para o declínio de polinizadores (Associação Brasileira de Estudos das Abelhas, 2015).

A recuperação de áreas exploradas pela mineração envolve diversas fases, que precisam ser desenvolvidas de modo planejado, detalhado e devem constar em um documento chamado Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) (Zappi et al., 2018). O PRAD corresponde ao conjunto de métodos aplicados na recuperação dessas áreas, a fim de restabelecer o equilíbrio do ambiente explorado (Santos, 2017).

Assim, a restauração ecológica pode ser considerada uma prática intervencionista, estimulada pelo homem, a fim de reproduzir um ecossistema em equilíbrio, restabelecendo as condições ambientais de um ecossistema alterado, englobando ações que envolvem a biota como um todo (Ferreira; Barros; Gajardo, 2018). Dentre os métodos da restauração, destaca-se a nucleação (Reis; Tres; Scariot, 2006), o plantio de mudas e a regeneração natural (Cugula et al., 2021).

A nucleação consiste na criação de núcleos de diversidade, entre espaços abertos e busca preencher área que deve ser recuperada (Reis; Tres; Scariot, 2006). O plantio de mudas tem como principal objetivo o aceleramento da sucessão natural, para que ocorra a cobertura do solo de forma mais rápida e haja o sucesso da recuperação (Almeida, 2016). Já a regeneração natural é o processo de recuperação da comunidade vegetal, após distúrbios. Dessa forma, a regeneração natural é considerada um método de recuperação de menor custo de implantação em relação aos demais (Simonelli et al., 2021).

A presença de angiospermas nativas em áreas degradadas é um grande atrativo para a fauna silvestre, que inclui organismos capazes de atuar como meios de reprodução

das comunidades vegetais, como polinizadores e dispersores de suas sementes. Esses animais são capazes de favorecer a reprodução e a variabilidade genética das populações, permitindo uma comunidade mais resistente às perturbações ambientais (Ferreira; Barros; Gajardo, 2018).

Gouania cornifolia Reissek é uma das espécies vegetais que possui considerável importância ecológica em áreas alteradas, uma vez que apresenta atributos que contribuem para recuperação de ambientes pós-mineração (Bezerra, 2021). Trata-se de uma liana, da família Rhamnaceae, nativa da Amazônia, Venezuela e Peru. É conhecida popularmente como "parakauã" e cipó-de-lavadeira, ocorre naturalmente em vegetação aberta (Lima, 2015).

A referida espécie é uma liana sarmentosa, com ramos cilíndricos, glabrescentes a velutinos e com presença de gavinhas. Suas folhas são alternas, com pecíolo, margem inteira, serreada ou denteada, com estípulas laterais, lanceoladas, que podem ser inteiras ou lobadas (Lima e Giulietti, 2005). As flores apresentam cor verde-amarelada clara em quase todas as estruturas florais, com exceção do estigma que é verde. São actinomorfas, com pétalas alternadas e pentâmeras, dispostas em inflorescências do tipo tirso racemiforme terminal. Ocorrem flores bissexuais e masculinas na mesma inflorescência, as flores também apresentam dimorfismo comportamental temporal e dois morfos genéticos, com flores que abrem sete e onze horas da manhã (Bezerra, 2021).

Na Amazônia oriental, *G. cornifolia* foi registrada como invasora de pastagens e com crescimento acelerado, alto potencial de reprodução e multiplicação, com capacidade de ocorrer em ambientes degradados e em solo pobre em nutrientes (Camarão et al., 1990). Espécies de *Gouania* cobrem superficialmente o solo, uma vez que possuem rápida multiplicação de indivíduos e dispersão de sementes pelo vento (Medan e Schirarend, 2004). Além disso, as flores de *G. cornifolia* oferecem de forma abundante recursos tróficos (néctar e pólen) para diversos grupos de visitantes florais e possui atributos que facilitam sua propagação em áreas alteradas (Bezerra, 2021).

Dessa forma, por ser uma espécie que apresenta facilidade de ocorrer em ambientes degradados e possuir importância ecológica ao recobrir o solo dessas áreas e ofertar recursos alimentares em abundância aos insetos que a visitam, *G. cornifolia* torna-se um importante modelo para entender como estão estruturadas as redes tróficas entre abelhas e outras plantas visitadas por elas.

Nessa perspectiva, o presente trabalho buscou caracterizar e comparar as redes de interações tróficas entre as espécies de abelhas e plantas usadas na sua alimentação, em dois

ambientes: regeneração natural e borda de floresta adjacente, em uma área pós-mineração, no nordeste do Pará, tendo como base o inventário das abelhas amostradas em *G. cornifolia* e na identificação do pólen transportado por elas. Dessa forma, este trabalho apresenta as seguintes hipóteses: 1) a composição do alimento na comunidade de abelhas amostradas na borda da floresta seria mais rica em tipos polínicos do que aquela encontrada para abelhas em áreas de regeneração natural; 2) as redes de interação encontradas na borda de floresta apresentariam um padrão mais aninhado em função da maior diversidade de fontes de recursos alimentares que poderia atrair uma maior diversidade de espécies de abelhas e 3) as redes na regeneração natural seriam aninhadas mais generalistas em função da menor diversidade de fontes de recursos alimentares. Nesse caso, haveria maior sobreposição entre as espécies de abelhas na exploração das mesmas espécies de plantas e menor conectividade nas redes.

Referências

AGOSTINI, K.; LOPES, A.V.; MACHADO, I. C. Recursos florais. In: RECH, A. R et al. **Biologia da polinização**. 1. ed. Rio de Janeiro: Projeto Cultural, 2014. p. 129- 150.

AIZEN, M. A. et al. How much does agriculture depend on pollinators? Lessons from long-term trends in crop production. **Annals of Botany,** v.103, n. 9, p. 2005-2010, 2009. DOI: https:// 10.1093/aob/mcp076

ALMEIDA, D. S. **Recuperação ambiental mata atlântica.**, 3. ed. Ilhéus, BA: Editus, 2016. 198 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DAS ABELHAS (Org.). **Agricultura e polinizadores**. São Paulo: Abelha, 2015. 71 p.

BASCOMPTE, J; JORDANO, P. The structure of plant-animal mutualistic networks. In: PASCUAL, M.; DUNNE, J. (eds.). **Ecological networks.** Oxford: Oxford University, 2006. p.143-159.

BASCOMPTE, J.; JORDANO, P. Plant-animal mutualistic networks: the architecture of biodiversity. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics,** v. 38, p. 567-593, 2007. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.38.091206.095818

BEZERRA, L. A. **Biologia floral de uma liana nativa heterodicogâmica, *Gouania cornifolia* Reissek (Rhamnaceae), com potencial para regeneração natural na Amazônia brasileira.** 2021. 77 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de

Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, PA, 2021.

BRASIL DNPM. Mineração no Brasil – Guia do investidor – DNPM. Disponível em: http://www.dnpm.gov.br/guia2000.htm. Acesso em: 02 nov. 2022.

CAMARÃO, A. P. et al. **Identificação e composição química de espécies de invasoras consumidas por bovinos em pastagens cultivadas em Paragominas**, Pará. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 1990. 62 p. (Boletim de Pesquisa 104).

CUGULA, J. et al. Análise temporal da recuperação de área de mineração em Paragominas pela técnica de regeneração natural por meio de índices de vegetação. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 6, n. 4, p. 379-395, 2021. DOI:https://doi.org/10.24221/jeap.6.4.2021.3676.379-395

FERREIRA, C. S. S.; BARROS, I. C.; GAJARDO, I. C. S. M. **Recuperação e manejo sustentável de áreas degradadas**. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2018. 240 p.

IPBES. **The assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production.** POTTS, S. G., IMPERATRIZ-FONSECA, V. L., NGO, H. T. (eds). Secretariat of the ntergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn. 2016. 552p.

LIMA, R. B.; GIULIETTI, A. M. 2005. Rhamnaceae In: WANDERLEY, M. G. L., SHEPHERD, G. J., MELHEM, T. S., MARTINS, S. E., KIRIZAWA, M., GIULIETTI, A. M. (eds.) **Flora Fanerogâmica do Estado de São Paulo.** Instituto de Botânica, São Paulo, vol. 4, pp: 331-342.

LIMA, R. B. 2015**. Rhamnaceae in Lista de Espécies da Flora do Brasil.** Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: http://floradobrasil.jbrj.gov.br/jabot/floradobrasil /FB207. Acessado em: 28 dez. 2022.

MARTINS, A. B. (coord.). Melastomataceae. In: Martins, S. E. et al. (eds.). **Flora Fanerogâmica do Estado de São Paulo**. Instituto de Botânica, São Paulo, vol. 6, 2009, p. 1-168.

MEDAN, D.; SCHIRAREND C. Rhamnaceae. In: Kubitzki (ed) **The families and genera of vascular plants VI. Flowering plants — Dicotyledons: Celastrales, Oxalidales, Rosales, Cornales, Ericales**. Springer Verlag, Heidelberg, p. 320–338. 2004.

MICHENER, C. D. 2007. **The bees of the world.** Baltimore. London, Johns Hopkins Univ. Press, 953pp.

OLLERTON, J.; WINFREE, R.; TARRANT, S. How many flowering plants are pollinated by animals? **Oikos,** v. 120, n. 3, p. 321-326, 2011. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1600-0706.2010.18644.x

REIS, A.; TRES, D. R.; SCARIOT, E. C.. Restauração na Floresta Ombrófila Mista através da sucessão natural. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 55, p. 67-67, 2007.

SANTOS, I. et al. Quando um visitante floral é um polinizador?. **Rodriguésia**, v. 67, p. 295-307, 2016. DOI: https://doi.org/10.1590/2175-7860201667202

SANTOS, J. A. G. **Recuperação e reabilitação de áreas degradadas pela mineração.** 2017. 44 f. Monografia (Especialização em Mineração e Meio Ambiente) , Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA, 2017.

SILVA, M. L.; ANDRADE, M. C. K. Os impactos ambientais da atividade mineradora. **Caderno Meio Ambiente e Sustentabilidade,** v. 11, n. 6, p. 67-82, 2017.

SIMONELLI, M. et al. **Levantamento do potencial de regeneração natural de florestas nativas nas diferentes regiões do estado do Espírito Santo.** Vitória, ES: Edifes, 2021. 110 p.

WAGNER, D. L. Insect declines in the Anthropocene. **Annual review of entomology**, v. 65, p. 457-480, 2020. DOI: https://doi.org/10.1146/annurev-ento-011019- 025151

ZAPPI, D. C. et al. **Plantas nativas para recuperação de áreas de mineração em carajás.** Belém: Vale, 2018.

Capítulo 1 – Impact of *Apis melllifera* on the bee-plant trophic interaction network in post-mining restoration areas in the Amazon (artigo submetido de acordo com as normas do Journal Arthropod-Plant Interactions).

Impact of *Apis melllifera* on the bee-plant trophic interaction network in post-mining restoration areas in the Amazon

Juliana da Silva Cardoso[1*], Cláudia Inês da Silva[1*], Marivana Borges Silva[1,2], Leilane Ávila Bezerra[1], Beatriz Woiski Teixeira Coelho[1], Rosângela Santa-Brígida[1], Marlúcia Bonifácio Martins[1]
Roberta Macedo Cerqueira [3] & Márcia Motta Maués[4]

[1]Museu Paraense Emílio Goeldi/MPEG, Avenida Perimetral, 1901, Terra Firme. CEP 66.077-530, Belém, Pará, Brasil.
[2]Universidade Federal do Pará/UFPA, *Campus* de Bragança, Tv. Leandro Ribeiro, s/n, CEP 68.600-000, Bragança, Pará, Brasil.
[3]Universidade Federal do Pará/UFPA, Rua Augusto Corrêa, 01, Guamá, CEP 66.075-110, Belém, Pará, Brasil.
[4]Embrapa Amazônia Oriental, Laboratório de Entomologia, Travessa Dr. Enéas Pinheiro s/n, Marco, CEP 66.095-903, Belém, Pará, Brasil.

*Corresponding author: claudiaines.cise@gmail.com

Juliana da Silva Cardoso, julianasilvabm50@gmail.com, +55 91 98250 1503,
https://orcid.org/0009-0005-9044-8312
Cláudia Inês da Silva, claudiaines.cise@gmail.com, +55 11 98105 1032,
https://orcid.org/0000-0003-0836-8662
Marivana Borges Silva, marivana.ufpa@gmail.com, +55 91 99625 4516,
https://orcid.org/0000-0003-1274-0287
Leilane Ávila Bezerra, leilaneavilabezerra@gmail.com, +55 91 9390 5057,
https://orcid.org/0000-0002-2352-104X
Beatriz Woiski Teixeira Coelho, bwtcoelho@gmail.com, +55 11 96570 8226,
https://orcid.org/0009-0003-0603-5773
Rosângela Santa-Brígida, rosangelasbc13@gmail.com, +55 83 99309 3388,
http://orcid.org/0000-0003-0072-225X
Marlúcia Bonifácio Martins, marlucia@museu-goeldi.br, +55 91 8141 0336
https://orcid.org/0000-0003-4171-909X
Roberta Macedo Cerqueira, romacer30@gmail.com, +55 91 99243 1842,
https://orcid.org/0000-0002-5976-7228
Márcia Motta Maués, marcia.maues@embrapa.br, +55 91 88155 0266,
https://orcid.org/0000-0003-2270-5944

Abstract

To investigate how plant-pollinator ecological interactions are affected by habitat modification, and to provide information to support restoration efforts, we characterized trophic interaction networks between bees and plants in a natural regeneration area and forest edge environments in a post-bauxite mining area in the eastern Amazon. For this purpose, bees were collected on the flowers of *Gouania cornifolia* Reissek (Rhamnaceae), an ordinary native liana in the studied areas, which plays a crucial role in post-mining regeneration by enhancing ecosystem interaction networks between plants and pollinators, and attracting a diversity of floral visitors. The pollen deposited on the bees' bodies was removed, and through palynology, the plant species that bees visited to collect food were identified. Subsequently, a presence-absence matrix was constructed, trophic interaction networks were created, and metrics analyses were performed. Forest edge areas showed greater native bee diversity, a higher richness of pollen types, and a more nested interaction network with the exclusion of the exotic species *Apis mellifera* compared to natural regeneration areas. *Apis mellifera* exploited a greater richness of floral sources due to its wide foraging range, which allowed for movement between different environments, including preserved forest, forest edge, and natural regeneration. This exotic bee alters the structure of interaction networks, being more evident in areas of natural regeneration. We conclude that the forest edges showed more resilient networks than natural regeneration areas, emphasizing the importance of preserved forest environments in the recovery of ecological networks.

Keywords: flower visitors; *Gouania cornifolia*, palynoecology; pollination; environmental recovery.

1. Introduction

Mutualistic interactions between plants and animals play a crucial role in the functioning and diversity of biological communities, as they are vital for plant reproduction and the life cycles of animals (Jordano et al. 2003). In plant-pollinator interactions, organisms provide mutual benefits that enhance the adaptation of both parties. The survival and reproduction of these organisms require a delicate balance between costs and resources (Agostini et al. 2014). Among pollinators, bees have the remarkable ability to pollinate up to 50% of tropical plants, playing a fundamental role in preserving biodiversity in the Amazon Rainforest (Bawa 1985, 1990).

Bees have been visiting the flowers of angiosperms for thousands of years to collect resources essential for their survival and that of their offspring (Michener 2007). Among the available floral resources, the following stand out: a) oils, resins, and petals used for nest construction (Silva et al. 2014a, Silva and Freitas 2018; Martins et al. 2020); b) fragrances used for territory marking or female attraction for mating (Eltz et al. 2005; Zimmermann et al. 2006); c) sites or refuges used for mating and dormitories (Gottsberger et al. 2016; Paulino-Neto 2014); and d) those used for the feeding of adults and their offspring, such as pollen, nectar, or floral oils (Vogel 1990; Alves-dos-Santos et al. 2007; Silva et al. 2017; Sabino et al. 2018; Cavalcante et al. 2023).

The collection of pollen and nectar predominates among the available floral resources (Silva et al. 2020), and habitat fragmentation directly affects the availability of these resources (Potts et al. 2010; Silva et al. 2021, 2024). In wilderness areas, bees exhibit feeding behavior that requires utilizing a variety of plant species for food collection to help maintain a balanced diet rich in proteins, carbohydrates, and lipids (Nascimento et al. 2019; Silva et al. 2024). A more diversified diet increases nutritional value, promoting better health and longevity for bees (Di Pasquale et al. 2013). Thus, a greater diversity of bees is expected to interact with a wider

variety of plant species, to meet their nutritional demands, creating complex interaction networks, maintaining complementarity or trophic partitioning (Blüthgen and Klein 2010).

Studies on trophic ecology and interaction networks have shown that most bees exhibit generalist or polylectic feeding behavior, with few being oligolectic or monolectic (Cane et al. 2006). This gradient between generalist and specialist behavior in resource use is not always evident, nor does it present itself as a distinct characteristic among species, since the behavior of these insects can vary depending on their geographical location (Sabino et al. 2018; Silva et al. 2024), as well as seasonality, and spatiotemporal availability of floral resources (Aleixo et al. 2016; Silva et al. 2017, 2021), or even competitive pressure among species (Menezes et al. 2007). Thus, it is typical for eusocial bee species with group foraging, perennials, and numerous nests to exhibit temporal selectivity in food collection (Faria et al. 2013).

In temporal selectivity, bees maintain consistency in foraging on the same floral source until it is depleted before switching to another, thus altering food sources over time (Aleixo et al. 2013; Faria et al. 2013). At the other extreme, in non-eusocial species with a univoltine reproductive cycle, where the reproductive temporal window is narrow, selective foraging behavior is almost mandatory (Rocha-Filho et al. 2008; Sabino et al. 2018; Martins et al. 2020). Solitary bee females select food sources to balance the cost-benefit of exploration during their foraging period, whether for nest construction or provisioning of brood cells (Rocha-Filho et al. 2008; Silva et al. 2016, 2017, Martins et al. 2020). That is because a single female is responsible for ensuring the survival of her offspring and increasing the species' fitness (Alves-dos-Santos et al. 2007; Martins et al. 2024). Between these extremes, there is a gradient of behavior within a universe of over 20,000 bee species distributed worldwide, with 80% having solitary habits (Michener 2007).

In Brazil, there are about 2,000 identified bee species (Moure 2022). Worldwide, there are around 600 species of stingless bees, with approximately 300 occurring in Brazil. It is estimated that 119 species of stingless bees occur in the Amazon (Pedro 2014), which are poorly studied. Little is known about the diet or interactions of these bees with Amazonian plants, as well as the trophic interaction networks that arise from the pollination services provided by bees, involving Amazonian fruit plants such as Brazil nut trees, açaí palms, and camu-camu (Maués 2002; Cavalcante et al. 2012; Campbell et al. 2018, 2019, 2023; Bezerra 2020; Borges et al. 2020).

Local knowledge of the trophic interaction networks between bees and plants is essential for managing ecological restoration projects with pollinator management plans aimed at conserving the Amazon biome (Cane 2001; Campbell et al. 2023; Silva et al. 2024). The Amazon has suffered significant losses in its biodiversity due to deleterious activities, including mining, land speculation and land grabbing, and predatory logging among other degrading activities that promote the fragmentation and reduction of native habitats (Decaens et al. 2018; Mapbiomas 2024).

The fragmentation of the landscape and loss of habitats, with a consequent increase in the distance between remaining forest areas, constitutes one of the main factors in reducing bee diversity (Freitas et al. 2014; Potts et al. 2010). These processes have been identified as the primary cause of the reduction in nesting sites and food resources for adult bees and their offspring (Alves-dos-Santos et al. 2014; Vaudo et al. 2015; Silva et al. 2024). Under these conditions, mutualistic plant-pollinator interaction networks tend to be affected by a central set of properties. The effects are often related to the resilience of assemblages, i.e., the ability to maintain the functions and structure of the assemblage after a disturbance (Xiao et al. 2016; Ferreira et al. 2020).

Deforestation for mining activities presents specific characteristics. The complete removal of all species

as well as soil layers, leads to the profound destruction of habitats (Sonter et al. 2017). Subsequently to mining, inert material (tailings), along with a topsoil previously reserved from the forest, are deposited to restore the landscape and biodiversity of the mined area. This process creates environments with low resilience that must be regenerated from scratch. In post-mining natural regeneration areas, during their successional process and community formation, the presence of facilitator plant species is notable. Plants with this characteristic can establish themselves in adverse locations and, during their reproductive process, attract and maintain a diversity of visiting insects (Campbell et al. 2019). This is the case of the species *Gouania cornifolia* Reissek, belonging to the Rhamnaceae family, which exhibits a generalist habit in interacting with its floral visitors or pollinators, attracted by the abundant food such as pollen and especially the nectar provided in its flowers (Bezerra et al. *in preparation*).

Our goal in this study was to characterize and evaluate differences in the trophic interaction networks between bee and plants used in their diet, between post-bauxite mining natural regeneration (NR) and adjacent forest edge (FE). We used flowers of the species *G. cornifolia* to sample and identify the diversity of visiting bees, and through palynology, we assessed the botanical origin of the pollen grains present on the bees' bodies in both habitats.

Considering forest edges as an ecotone transitioning between preserved forest and post-mining natural regeneration areas, our hypotheses in this study are as follows: 1) The lower plant species richness in natural regeneration areas, where *G. cornifolia* also occurs , leads to a lower variety of pollen types sampled in bees. Therefore, the food composition in bee communities sampled at the forest edge would be richer in the number of pollen types than that found in natural regeneration areas; 2) Considering that more diverse networks in areas with high resource diversity tend to have higher nestedness, we hypothesized that the interaction networks recorded at the forest edge exhibit a more nested pattern due to the greater diversity of food resources that can attract a wider variety of bee species. In this sense, with more plant species, bees could choose more profitable resource sources, have less trophic niche overlap among them, and show greater connectivity in the networks; 3) Considering that bee and plant richness is lower in regeneration areas, and that these bees utilize all available resources, we hypothesized that the networks in natural regeneration areas would be more generalist due to the lower diversity of food sources. In this case, there would be greater overlap among bee species in exploiting the same plant species and lower connectivity in the networks.

2. Materials and Methods

2.1. Study Area

The study was conducted in areas of post-bauxite mining forest undergoing natural regeneration, and on the edges of the remaining primary forest. The study area belongs to the Bauxite Mining Company Norsk Hydro (Hydro), in the municipality of Paragominas, State of Pará, Brazil (Figure 1). Paragominas is located at geographical coordinates 2°59'S and 47°21'W, at an altitude of 89 meters. The region's climate is classified as Aw, according to the Köppen classification (Köppen 1948), with an average relative air humidity of 81% and an annual average temperature of 26.3°C. The average annual precipitation is 1,743 mm, with the driest season occurring between July and November (Alves et al. 2014).

Sampling of bees on *G. cornifolia* flowers was conducted in six areas, representing two environments: three belonging to the natural regeneration habitat (NR) and three on the forest edge (FE) (Figure 1). The natural

regeneration areas have been undergoing forest succession since 2014. Immediately after bauxite mining, the soil underwent a restoration process involving the deposition of infertile soil, which was later covered with a layer of topsoil removed from areas of vegetation suppression. Superficially, the soil in the regeneration areas benefit from the deposition of organic matter and the presence of roots in the absorption zone (Martins et al. 2020); however, at greater depths, the presence of ferruginous concretions and gravel limits plant development and consequently restricts the species capable of colonizing and thriving in these environments (Neto et al. 2021). The herbaceous/shrub component is dominated by early succession, colonizing families and species, such as Poaceae (*Trichanthecium polycomum* (Trin.) Zuloaga & Morrone); Fabaceae (*Desmodium barbatum* (L.) Benth., *Mimosa sensitiva* L.); Cyperaceae (*Rhynchospora ciliata* (Vahl) Kük., *Scleria gaertneri* Raddi, among others); Solanaceae (*Solanum crinitum* Lam. and *Solanum* spp.); Dilleniaceae (*Davilla rugosa* Poir.) and Rubiaceae (*Borreria verticillata* (L.) G.Mey.). In the tree component, species such as Malpighiaceae (*Byrsonima crassifolia* (L.) Kunth), Hypericaceae (*Vismia guianensis* (Aubl.) Choisy), Urticaceae (*Cecropia* spp.), and Euphorbiaceae (*Croton matourensis* Aubl.) are predominant (Cerqueira et al. 2021, 2022).

The sampled primary forest areas are located at the edge of the bauxite mine, bordering the exploited areas. These forests have undergone alterations and selective logging and are currently protected by the company as areas for local biodiversity conservation. These forests are dominated by species of Fabaceae, Sapotaceae, Lecythidaceae, Burseraceae, and Salicaceae, among other families (Cerqueira et al. 2021, 2022), with a well-formed continuous canopy. The plant species found at the edge of these forests are typically more resistant to higher solar radiation, forming an ecotone zone between the forest and regeneration areas, with mixed components of species from both environments, especially shrub and herbaceous species.

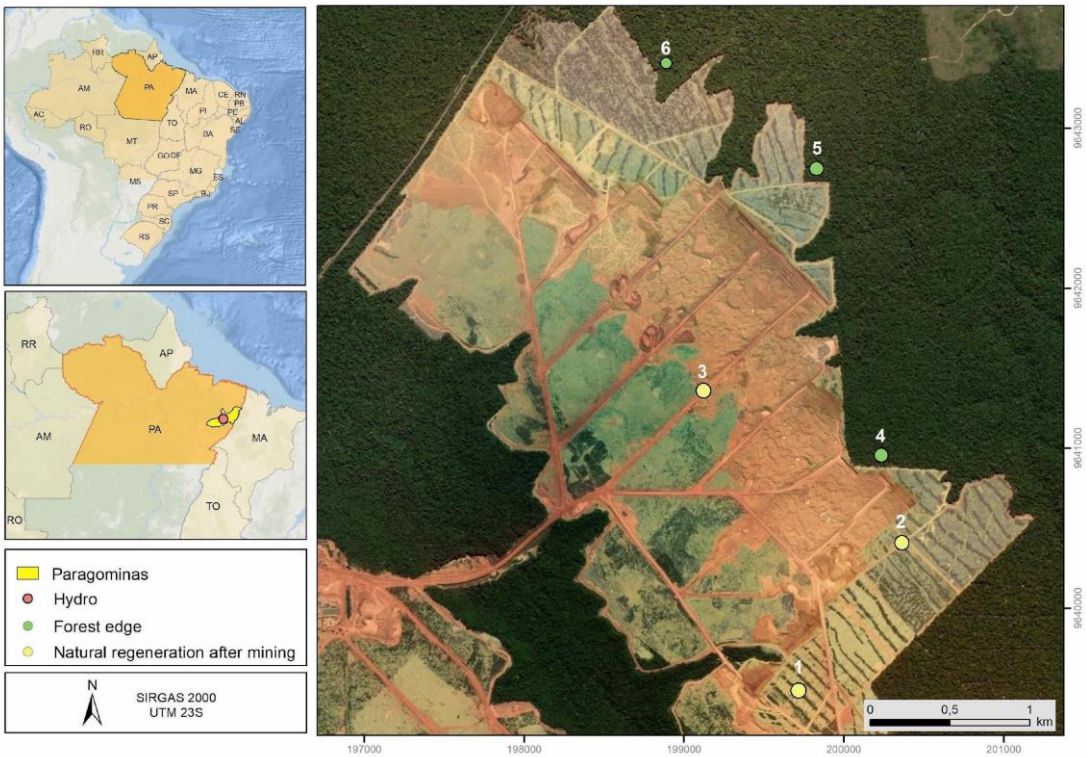

Figure 1. Location of the study areas in the municipality of Paragominas, State of Pará, in the Brazilian Amazon. The yellow circles represent the collection point in the three natural regeneration areas, and the green circles represent the points in the three forest edge areas.

2.2. Target plant species for bee sampling

The species *Gouania cornifolia* Reissek belongs to the family Rhamnaceae Juss., and occurs in Brazil, in the states of Pará and Amazonas, in different forest types (Lima et al. 2024). This species has a lianescent habit, with elliptical leaves with entire margins, cartaceous texture, without stipules; branches with coiled tendrils. The flowers (composed of five petals, sepals, stamens, and nectariferous disc) are small, ranging in color from yellowish to greenish, with a short corolla, in inflorescences arranged in clusters along an axillary or terminal axis (Reissek 1861; Lima and Giulietti 2005; Pool 2014; Lima et al. 2024). This plant commonly occurs in areas with anthropogenic interference and fragmentation, being resistant to excessive heat, low humidity, and degraded soil (Dantas and Rodrigues 1980). It presents great ecological potential, with characteristics that contribute to its development in environments undergoing natural regeneration. Bezerra et al. (*in preparation*) describes that the species' flowers are small (3-4 mm), producing pollen and nectar as main resources, and are grouped in multi-flowered racemose inflorescences that attract a diversity of visiting insects.

2.3. Bee sampling

The bees were collected using entomological nets during visits to *G. cornifolia* flowers from 11:00 am to 5:00 pm. Subsequently, the bees were individually stored in Eppendorf vials containing 70% alcohol. In the laboratory, the pollen deposited on the specimens' bodies was carefully separated for analysis. The specimens were then prepared following standard procedures, identified, and the vouchers were deposited in the entomological collection of the Museu Paraense Emílio Goeldi.

2.4. Pollen collection and preparation

For the pollen studies sampled on the bees' bodies, it was necessary to create a reference collection of pollen from plants occurring in the study areas. For this purpose, in parallel with the bee collection on *G. cornifolia* flowers, floral buds in pre-anthesis of plants that bloomed in the study areas were sampled. Pollen from floral buds of exsiccata collected in the study area and deposited in the João Murça Pires herbarium of the Emílio Goeldi Paraense Museum (MPEG) and the HF Profa. Normélia Vasconcelos Herbarium of the Federal University of Pará (UFPA) was also sampled. The pollen material from both the floral buds and those sampled on the bees' bodies was prepared following the protocol proposed by Silva et al. (2014b), acetolyzed according to the Erdtman method (1960). Subsequently, the slides were prepared using Kisser's gelatin (Kisser 1935) and sealed with colorless varnish. The vouchers were then deposited in the pollen collection of MPEG (Table 1, Supplementary material).

2.5. Data analysis

The identification of pollen collected on the bees' bodies was performed by comparison with those deposited in the pollen collection of MPEG, and the virtual pollen collection of RCPol (https://rcpol.mn.ufrj.br/pt/home/), in addition to specialized literature (Absy et al. 2013; Ferreira and Absy 2015; Barth and Carreira 2016; Carreira and Barth 2003). After pollen identification, adjacency matrices of presence and absence were created, to characterize the interactions between bee species and the plants they interacted with for food collection on flowers.

Through the adjacency matrices, five structural descriptors of the network were evaluated, including network size, number of possible connections, degree, average degree, and nestedness. Network size was

determined by the number of species in the network ($S= a+p$), where a is the number of bee species and p is the number of plant species. The multiplication of these variables (ap) corresponded to the value of possible connections (M) in the network. Degree (k) represents the number of interactions in the network. The average degree per plant was obtained by the number of interactions divided by the number of plant species ($kp=k/p$), or in the case of bees, divided by the number of bee species ($ka=k/p$).

To measure the degree of nestedness of the matrices, the NODF index (Almeida-Neto et al. 2008) was used, which ranges from 0 (not nested) to 100 (perfectly nested). The significance of NODF was estimated through a Monte Carlo procedure with 1,000 randomizations, using the null model *Ce* (null model 2, Bascompte et al. 2003), where the probability of interaction between a row and a column is proportional to the total interactions of each. The nestedness value indicates how interactions involving specialist species (with few interactions) are represented in a subset of species that interact with generalist species (with many interactions). Both analyses were performed using the Nested 3.0 program (Guimarães and Guimarães 2006).

3. Results

A total of 42 species of bees belonging to four families (Apidae, Colletidae, Halictidae, and Megachilidae) were identified from a total of 1122 collected specimens. The family Apidae showed the highest richness and abundance, with 29 species and 1091 individuals, followed by Halictidae with nine species and 26 individuals, Megachilidae with two species and three individuals, and Colletidae with two species and two individuals. The forest edge areas (FE) presented the highest richness (n = 32) and abundance of bees (n= 590). The most abundant species on *G. cornifolia* flowers were *Apis mellifera* (Linnaeus, 1758) with 308 individuals, followed by *Trigona pallens* (Fabricius, 1798) (n= 93), *Nannotrigona dutrae* (Friese, 1901) (n= 45), *Ptilotrigona lurida* (Smith, 1854) (n = 29), and *Melipona flavolineata* Friese, 1900 (n= 16). The post-mining natural regeneration areas (NR) presented ten species and 532 individuals of bees, with *A. mellifera* (n= 506) also being the most abundant, followed by *Dialictus osmioides* (Ducke, 1902) (n= 09) and *Tetragonisca angustula* (Latreille, 1811) (n = 8) (Table 1).

Of the total bees collected from *G. cornifolia* flowers, pollen was removed from 155 individuals representing 42 species (Table 1). These samples were analyzed in duplicates, totalling 310 pollen samples, of which 47% were represented by *A. mellifera* (Table 1). In general, the most generalist species regarding the food sources were *A. mellifera*, *Melipona melanoventer* Schwarz, 1932, *Partamona ailyae* Camargo, 1980, *M. flavolineata*, and *N. dutrae* (Figure 2A), all of which are eusocial bee species.

A total of 94 samples were analyzed in the FE and 61 samples in the NR, with *A. mellifera* representing 25% and 80% of the samples, respectively. When the trophic networks were analyzed separately for these two environments, the species *A. mellifera*, *M. melanoventer*, *Trigona lacteipennis* Friese, 1900, and *M. flavolineata* were more generalist in the FE (Figure 2B), while the species *A. mellifera*, *P. ailyae*, and *M. flavolineata* were more generalist in the NR (Figure 2D).

The species *A. mellifera* was removed from the analysis to evaluate its impact on the network structure, as this species had a very expressive sample representativeness compared to other bee species in both environments (Figures 2C and E). With the removal of this species, a significant loss of interactions was observed, with a reduction in network size and the number of possible connections, which was more evident in the NR (Figure 2E; Table 2). A variation in interactions between areas within each habitat type was also noted. In general, the networks presented low nestedness values (Table 2). The networks analyzed in the FE presented

the highest values of network size and possible connections (Figure 3A-C) compared to the networks analyzed within the NR (Figure 3D-F), except for Area 6, which presented the lowest values for these analyzed metrics (Table 2).

Considering the analysis of pollen removed from the bodies of bees, it was possible to identify 63 pollen types distributed among 26 families, 35 genera, 38 species, and nine undetermined types (Table 1; Supplementary material). In general, some plant species were visited more than others (Table 1; Figures 2A-D), and as expected, *G. cornifolia* pollen was the most frequent, being present in the body of almost all species, except for five, which corresponded to *Augochlora* (*Oxystoglossella*) *morrae* Strand, 1910, *Euglossa avicula* Dressler, 1982, *Friseomelitta flavicornis* (Fabricius, 1798), *Partamona pearsoni* (Schwarz, 1938), and *Xylocopa* (*Schonnherria*) *viridis* Smith, 1854 (Figure 2A).

The pollen type *Solanum stramoniifolium* Jacq. was the second most frequent in the samples, followed by *Lepidaploa silvae* (H.Rob.) H.Rob., Apocynaceae sp1, and *Lepidaploa paraensis* (H.Rob.) H.Rob. (Table 1; Figure 2A). The pollen types *G. cornifolia* (70%), *S. stramoniifolium* (18%), Apocynaceae sp1 (8%), and *L. silvae* (7%) were more frequent in the samples analyzed in the FE (Table 1; Figure 2B). In the NR, the most frequent pollen types were *G. cornifolia* (81%), *L. paraensis* (37%), and *S. stramoniifolium* (8%) (Table 1; Figure 2C). Differences were also found in the most frequent types between areas within each type of environment, with a predominance of *G. cornifolia* in all of them (Figures 3A-F).

Table 1. Pollen types identified in bee samples collected visiting flowers of *Gouania cornifolia* in the studied areas in the municipality of Paragominas, State of Pará, Brazil. Abbrev: Abbreviations of plant and bee scientific names. *eusocial bee species and ** non-eusocial bee species. The complete names of bee species can be found in the footer of this table. NR: natural regeneration. FE: forest edge.

Family	Pollen types/Species	Occurrence environment (Cerqueira et al. 2021, 2022)	Abbrev.	Espécies de abelhas (número de amostras analisadas): NR e FE					NR					
				Par_ail *	Tri_bra *	Api_mel *	Tet_ang *	Mel_fla *	Aug_ill **	Aug_mor **	Aug_sp2 **	Exo_aur **	Dia_osm **	Hyl_orb **
Amaranthaceae	Amaranthaceae	NI	Ama						NR (1)					
Apocynaceae	Apocynaceae	NI	Apo			NR (6); FE (2)		FE (1)						
Apocynaceae	*Tabernaemontana angulata* Mart. ex Müll. Arg	NR/FE	Tab_ang			NR (4); FE (3)			NR (1)					
Arecaceae	*Bactris maraja* Mart.	F	Bac_mar			NR (2); FE (3)								
Asteraceae	*Ageratum conyzoides* L.	NR	Age_con			NR (3); FE (2)								
Asteraceae	Asteraceae sp1	NI	Ast_sp1			NR (7)								
Asteraceae	Asteraceae sp2	NI	Ast_sp2			FE (1)								
Asteraceae	*Chromolaena* sp.	F	Cho_sp											
Asteraceae	*Lepidaploa paraensis* (H.Rob.) H.Rob. (NR)	NR	Lep_par			NR (24); FE (5)			NR (1)	FE (1)				
Asteraceae	*Lepidaploa silvae* (H.Rob.) H.Rob.	NR	Lep_NII			NR (21); FE (3)					NR (1)			
Asteraceae	*Mikania congesta* DC.	NR	Mik_con			NR (1)								
Asteraceae	*Porophyllum ruderale* (Jacq.) Cass.	NR	Por_rud			NR (1)								
Asteraceae	*Tilesia baccata* (L.) Prusk	FE	Til_bac			NR (8); FE (9)		FE(1)						
Bignoniaceae	*Adenocalymma validum* L.G.Lohmann	FE	Ade_val	NR (1)										
Bignoniaceae	Bignoniaceae	NI	Big											
Bignoniaceae	*Jacaranda copaia* (Aubl.) D. Don	NR/FE/F	Jac_cop					FE (1)						
Boraginaceae	*Cordia exaltata* Lam.	NR	Cor_exa					FE (1)						
Caryocaraceae	*Caryocar* sp.	FE/F	Car_sp											
Cyperaceae	*Rhyncospora ciliata* (Vahl) Kük.	NR	Rhy_cil			NR (2)							FE (1)	
Dilleniaceae	*Davilla rugosa* Poir	NR	Dav_rug			NR (1)								
Indeterminado	Indet sp1	NI	Ind_sp1			NR (1)								
Indeterminado	Indet sp2	NI	Ind_sp2		FE (1)	NR (2)								
Indeterminado	Indet sp3	NI	Ind_sp3		FE (1)	NR (2)								
Indeterminado	Indet sp4	NI	Ind_sp4											
Indeterminado	Indet sp5	NI	Ind_sp5			NR (1)		FE (1)						
Indeterminado	Indet sp6	NI	Ind_sp6											
Indeterminado	Indet sp7	NI	Ind_sp7			NR (1)						NR (1)		
Indeterminado	Indet sp8	NI	Ind_sp8											
Indeterminado	Indet sp9	NI	Ind_sp9			NR (1)								
Lamiaceae	*Mesosphaerum suaveolens* (L.) Kuntze	NR	Mes_sua			NR (5); FE (2)								
Lamiaceae	Lamiaceae sp1	NI	Lam_sp1			NR (1)								
Lamiaceae	Lamiaceae sp2	NI	Lam_sp2			NR (2)								
Leguminosae	*Erithryna* sp.	NA	Eri_sp											
Leguminosae	*Inga* sp1	NI	Ing_sp1			NR (1)								
Leguminosae	*Inga* sp2	NI	Ing_sp2			NR (1)								
Leguminosae	*Mimosa pudica* L.	NR	Mim_pud			NR (13); FE (5)						NR (1)		
Leguminosae	*Mimosa sensitiva* L.	NR/FE	Mim_sen											
Leguminosae	*Senegalia polyphylla* (DC.) Britton & Rose	NR	Sen_pol											
Leguminosae	*Anadenanthera peregrina* (L.) Speg.	NR	Ana_per					FE (1)						
Leguminosae	*Piptadenia gonoacantha* (Mart.) J.F.Macbr.	FE	Pip_gon			NR (1)								
Leguminosae	*Senna obtusifolia (L.) H.S.Irwin & BaNReby*	FE/F	Sen_obt			NR (1)	FE (2)							
Leguminosae	*Senna multijuga (Rich.) H.S.Irwin & BaNReby*	NR/F	Sen_mul			NR (1); FE (1)								
Malpighiaceae	*Byrsonima crassifolia* (L.) Kunth	NR	Byr_cra			NR (2)								
Malpighiaceae	*Byrsonima crispa* A. Juss.	NR/FE/F	Byr_cri			FE (2)								
Melastomataceae	*Bellucia grossularioides* (L.) Triana	NR/FE	Bel_gro										FE (1)	
Melastomataceae	*Tibouchina aspera* Aubl.	F	Tib_asp			NR (1); FE (1)								
Myrtaceae	*Eugenia biflora* (L.) DC.	FE	Eug_bif			NR (1)								
Myrtaceae	*Myrcia* sp.	F	Myr_sp			NR (1); FE (1)								
Myrtaceae	*Eugenia* sp.	F	Eug_sp											
Passifloraceae	*Passiflora coccinea* Aubl.	NR/FE/F	Pas_coc											
Passifloraceae	*Turnera breviflora* Moura	NR	Tur_brev			NR (1)								
Piperaceae	Piperaceae	NI	Pip			FE (1)						NR (1)		
Poaceae	*Cenchrus ciliaris* L.	NR/F	Cen_cil			NR (5); FE(7)								
Poaceae	*Dactyloctenium aegyptium* (L.) Willd.	NR	Dac_aeg			NR (4); FE (7)								
Poaceae	*Pariana campestris* Aubl.	F	Par_cam			NR (4); FE (7)								
Poaceae	Poaceae	NI	Poa			NR (1); FE (1)								
Rhamnaceae	*Gouania cornifolia* Reissek	NR/FE	Gou_cor	FE (2)	NR (1)	NR (46); FE (19)	NR (1); FE (5)	FE (3)	NR (2)		NR (1)	NR (1)	FE (1)	NR (1)
Rubiaceae	*Borreria ocymifolia* (Roem. & Schult.) Bacigalupo & E.L.Cabral	F	Bor_ocy			NR (15); FE (1)								
Rubiaceae	*Borreria* sp.	NR	Bor_sp			NR (14); FE (1)								
Rubiaceae	*Borreria spinosa* Cham. & Schltdl.	NA	Bor_spi			NR (25); FE (8)								
Rubiaceae	*Hexasepalum teres* (Walter) J.H.Kirkbr.	NR	Hex_ter			NR (1)								
Rubiaceae	*Psychotria racemosa* (Aubl.) Raeusch.	NA	Psy_rac											
Salicaceae	*Casearia grandiflora* Cambess	NR	Cas_gran			FE (2)	NR (1); FE (1)							
Sapindaceae	*Paullinia pinnata* L.	NA	Pau_pin											
Sapindaceae	*Serjania paucidentada* DC.	NR/FE	Ser_pau			NR (3)								
Sapotaceae	*Manilkara paraensis* (Huber) Standl.	F	Man_par			NR (13); FE (6)								
Sapotaceae	*Pouteria cladantha* Sandwith	F	Pou_cla			NR (1)								
Solanaceae	*Solanum crinitum* Lam.	NR/FE	Sol_cri			NR (1); FE (2)								
Solanaceae	*Solanum rubiginosum* Vahl	NR	Sol_rub											
Solanaceae	*Solanum stramoniifolium* Jacq.	NR	Sol_str			NR (1); FE (2)			NR (2)			NR (1)		
Solanaceae	*Solanum subinerme* Jacq.	NR	Sol_sub			NR (1)			NR (1)			NR (1)		NR (1)
Urticaceae	*Cecropia palmata* Willd.	NR/FE/F	Cec_pal											

Abbrev.	FE: Apa_inp *	Dia_nan **	Dia_sp3 **	Dia_sp4 **	Eug_avi **	Exo_ana **	Fri_fla *	Fri_lon *	Hyl_sp. **	Meg_Mou **	Meg_sp1 **	Mel_ama *	Mel_fas *	Mel_mel *	Mel_pun *	Mel_sem *	Nan_dut *	Neo_eri **	Par_pea *	Par_vic *	Per_sem **	Ple_min *	Pti_lur *	Sca_bip *	Sca_tub *	Tri_gui *	Tri_lac *	Tri_pal *	Tri_rec *	Tri_vit *	Xyl_vir **
Ama																															
Apo																	FE (1)					FE (1)		FE (1)		FE (1)		FE (1)			
Tab_ang																															
Bac_mar														FE (1)		FE (1)															
Age_con																															
Ast_sp1																							FE (1)								
Ast_sp2														FE (1)																	
Cho_sp																															
Lep_par											FE (1)						FE (1)														
Lep_NII			FE (1)						FE (1)													FE (1)			FE (1)						
Mik_con																															
Por_rud																															
Til_bac														FE (1)									FE (1)								
Ade_val																															
Big																											FE (1)				
Jac_cop																															
Cor_exa																															
Car_sp																												FE (1)			
Rhy_cil																								FE (1)							
Dav_rug														FE (1)										FE (1)			FE (1)				
Ind_sp1																															
Ind_sp2																								FE (1)							
Ind_sp3																															
Ind_sp4																											FE (1)				
Ind_sp5														FE (1)	FE (1)													FE (1)			
Ind_sp6																													FE (1)		
Ind_sp7																									FE (1)						
Ind_sp8																										FE (1)		FE (1)			
Ind_sp9																															
Mes_sua																															
Lam_sp1																															
Lam_sp2																															
Eri_sp														FE (1)																	
Ing_sp1																FE (1)															
Ing_sp2																															
Mim_pud																															
Mim_sen																															
Sen_pol												FE (1)															FE (1)				
Ana_per																															
Pip_gon																															FE (1)
Sen_obt																															
Sen_mul														FE (1)									FE (1)								
Byr_cra			FE (1)																									FE (1)			
Byr_cri			FE (1)																								FE (1)				
Bel_gro																															
Tib_asp																FE (1)								FE (2)							
Eug_bif																FE (1)	FE (1)														
Myr_sp																															
Eug_sp																			FE (1)												
Pas_coc					FE (1)																										
Tur_brev																															
Pip														FE (1)																	
Cen_cil																															
Dac_aeg																															
Par_cam																										FE (1)					
Poa																															
Gou_cor	FE (1)	FE (1)	FE (1)	FE (1)		FE (1)		FE (1)	FE (1)	FE (1)	FE (1)	FE (2)	FE (1)	FE (1)	FE (2)		FE (1)	FE (1)		FE (1)	FE (1)	FE (1)	FE (1)	FE (2)	FE (1)	FE (1)	FE (1)	FE (7)	FE (1)	FE (1)	
Bor_ocy										FE (1)																					
Bor_sp										FE (1)																	FE (1)		FE (1)		
Bor_spi			FE (1)														FE (1)										FE (1)				
Hex_ter																															
Psy_rac																FE (1)															
Cas_gran																											FE (1)				
Pau_pin																															
Ser_pau																															
Man_par																										FE (1)					
Pou_cla																FE (1)															
Sol_cri																															
Sol_rub						FE (1)																									
Sol_str						FE (1)	FE (1)					FE (1)	FE (1)					FE (1)	FE (1)				FE (1)				FE (1)		FE (2)		
Sol_sub																							FE (1)								
Cec_pal																															

Scientific names of bees, followed by abbreviations: *Aparatrigona inpunctata* (Ducke, 1916) (Apa_inp), *Apis mellifera* Linnaeus, 1758 (Api_mel), *Augochloropsis illustris* (Vachal, 1903) (Aug_ill), *Augochlora (Oxystoglossella) morrae* Strand, 1910 (Aug_mor), *Augochloropsis* sp2 (Aug_sp2), *Dialictus nanus* (Smith, 1879) (Dia_nan), *Dialictus osmioides* (Ducke, 1902) (Dia_osm), *Dialictus* sp3 (Dia_sp3), *Dialictus* sp4 (Dia_sp4), *Euglossa avicula* Dressler, 1982 (Eug_avi), *Exomalopsis analis* Spinola, 1853

(Exo_ana), *Exomalopsis auropilosa* Spinola, 1853 (Exo_aur), *Friseomelita flavicornis* (Fabricius, 1798) (Fri_fla), *Friseomelitta longipes* (Smith, 1854) (Fri_lon), *Hylaeus (Hylaeopsis)* sp. (Hyl_sp.), *Hylaeus (Gongyloprosopis) orbicu*s (Vachal, 1910) (Hyl_orb), *Megachile (Moureapis)* sp. (Meg_Mou), *Megachile (Pseudocentro)* sp1 (Meg_sp1), *Melipona amazonica* Schulz, 1905 (Mel_ama), *Melipona fasciculata* Smith, 1854 (Mel_fas), *Melipona flavolineata* Friese, 1900 (Mel_fla), *Melipona melanoventer* Schwarz, 1932 (Mel_mel), *Melipona seminigra* Friese, 1903 (Mel_sem), *Melipona puncticollis* Friese, 1902 (Mel_pun), *Nannotrigona dutrae* (Friese, 1901) (Nan_dut), *Neocorynura erinnys* (Schrottky, 1910) (Neo_eri), *Partamona ailyae* Camargo, 1980 (Par_ail), *Partamona pearsoni* (Schwarz, 1938) (Par_pea), *Partamona vicina* Camargo, 1980 (Par_vic), *Pereirapis semiarauta* (Spinola, 1851) (Per_sem), *Plebeia minima* (Gribodo, 1893) (Ple_min), *Ptilotrigona lurida (*Smith, 1854) (Pti_lur), *Scaptotrigona bipunctata (*Lepeletier, 1836) (Sca_bip), *Scaptotrigona tubiba* (Smith, 1863) (Sca_tub), *Tetragonisca angustula* (Latreille, 1811) (Tet_ang), *Trigona branneri* Cockerell, 1912 (Tri_bra), *Trigona guianae* Cockerell, 1910 (Tri_gui), *Trigona lacteipennis* Friese, 1900 (Tri_lac), *Trigona pallens* (Fabricius, 1798) (Tri_pal), *Trigona recursa* Smith, 1863 (Tri_rec), *Trigonisca vitrifons Albuquerque &* Camargo, 2007 (Tri_vit), *Xylocopa (Schonnherria) viridis* Smith, 1854 (Xyl_vir).

Table 2. Metrics of interaction networks between bees and plants found in the studied areas in the municipality of Paragominas, State of Pará, Brazil. NR: natural regeneration. NRwAm: natural regeneration excluding *Apis mellifera*. FE: forest edge. FEwAm: forest edge excluding *Apis mellifera*.

Metrics	Total	NR	NRwAm	FE	FEwAm	NR			FE		
						Area 1	Area 2	Area 3	Area 4	Area 5	Area 6
Plant species (p)	72	58	28	52	44	42	29	27	35	35	11
Bee species (a)	42	11	10	36	35	7	3	4	19	22	7
Network Size ($S= a+p$)	114	69	38	88	79	49	32	31	54	57	18
Possible connections ($C= ap$)	3024	638	280	1872	1540	294	87	108	665	770	77
Interactions occurred (k)	218	90	46	134	112	58	33	37	68	74	16
Average degree per plant (k_p)	3,03	1,55	1,64	2,58	2,55	1,38	1,14	1,37	1,94	2,11	1,45
Average degree per bee (k_a)	5,19	8,18	4,60	3,83	3,29	8,29	11,00	9,25	3,58	3,36	2,67
Nestedness (NODF)	25,37	33,55	25,45	29,95	28,12	32,89	17,68	35,21	25,81	28,20	29,05
Nestedness (NODF) expected	8,32	14,05	14,43	9,63	9,44	17,74	20,76	24,21	11, 30	10,97	21,40
Significance test (p)	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,69	0,03	<0,05	<0,05	0,17

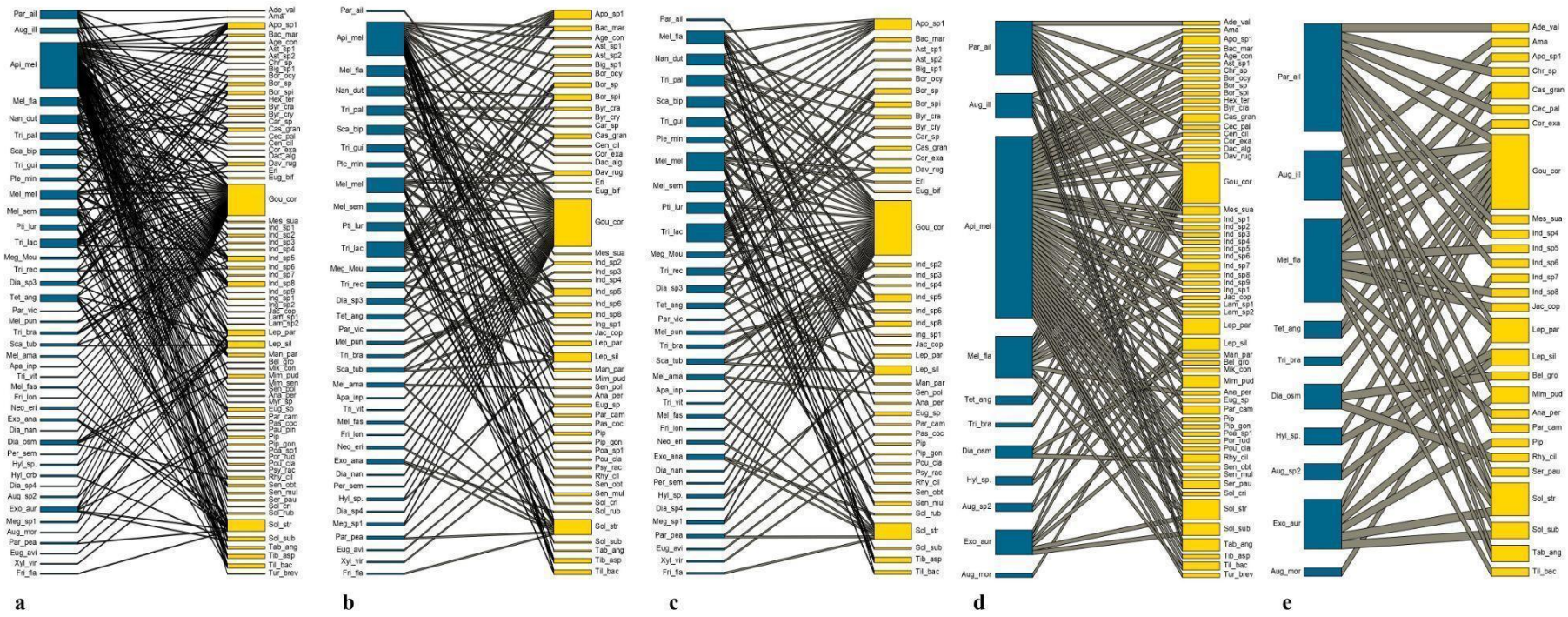

Figure 2. Trophic interaction between bee species and plants in the studied areas in the municipality of Paragominas, State of Pará, Brazil. Interaction network including all areas (A). Interaction networks in the forest edge, including (B) and excluding *Apis mellifera* (C). Interaction networks in the natural regeneration, including (D) and excluding *Apis mellifera* (E). The list of species name abbreviations is provided in Table 1.

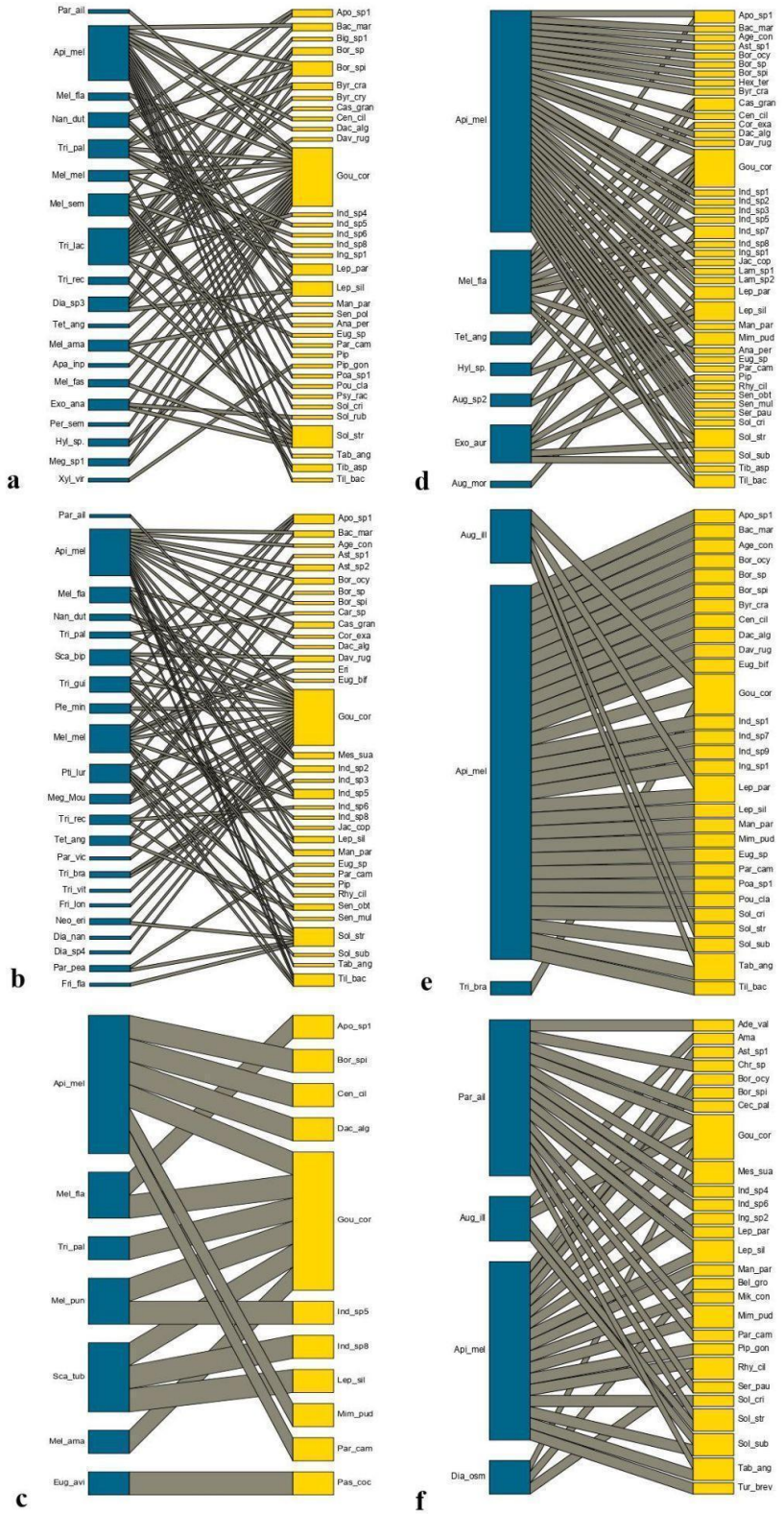

Figure 3. Trophic interaction between bee species and plants found separately for each of the studied areas in the municipality of Paragominas, State of Pará, Brazil. Areas located in the forest edge (A-C) and in the natural regeneration areas (D-F). The list of species name abbreviations is provided in Table 1.

4. Discussion

In this study, the greater diversity of bees in forest edge environments is consistent with previous studies on the effect of forest proximity on environments undergoing restoration (Brosi et al. 2007; Silva et al. *in preparation*). This may be related to the availability of floral resources (Ren et al. 2023) that benefit bees associated with the forest and forest edge (Gutiérrez-Chacón et al. 2018). According to Cerqueira et al. (2021, 2022), plant diversity is significantly higher in the forested areas of Norsk Hydro than in the regeneration areas. In fact, a variation in the sources of floral resources used by bees for food collection was observed between the two studied environments, with forest edges being more diverse, which favors the presence of eusocial bees.

This is particularly evident with stingless bees, which constitute the majority of *G. cornifolia* bee visitors in the forest edge environments. These environments host more tree species with trunks suitable for nesting. Thus, these bees exhibit a wide morphological diversity, with body lengths ranging from 1.8 to 14 mm (Michener 2007). Very small species, such as those from the genera *Trigonisca* (Campbell et al. 2019), *Plebeia* (Silva et al. 2019), and possibly *Nannotrigona*, have a limited foraging range due to their small flight radius, mostly staying near their nests. Larger bees like *Melipona* and *Trigona* forage in the regeneration environments within the study area. However, *Tetragonisca angustula* is an exception, being a very small bee collected in regeneration habitats. This species thrives in degraded environments, building nests in pre-existing cavities, and likely inhabiting these regeneration areas.

The high abundance of the exotic species *A. mellifera* in both environments is probably due to its long flight range, capable of foraging over 5 km (Hagler et al. 2011), in addition to its generality in trophic resource collection. In contrast, we can mention the genus *Melipona*, which, despite having a similar body size to *A. mellifera*, has a flight range of only 2.4 km (Palazuelos-Ballivián 2008).The long flight range of *A. mellifera* allowed it to explore floral resources in forest, forest edge, and natural regeneration areas, expanding its trophic niche compared to other bee species. Among the 47 plant species identified through pollen found on *A. mellifera* in the natural regeneration area, 16 species actually occur in that environment, with four also present in forest edges and two in the forest environment (Cerqueira et al. 2021, 2022). Another 11 species do not occur in natural regeneration, but in other environments (forest edge and forest). This allowed the interaction network in the natural regeneration environments to have more plant species compared to the forest edge networks. In studies conducted in other locations, with bee inventories in areas at different successional stages, *A. mellifera* was also the most abundant species in the initial and intermediate phases (Ramos-Fabiel et al. 2019; Alvarenga et al. 2020).

The simulations excluding *A. mellifera*, revealed the impact this exotic species has on network structure, particularly in natural regeneration, where the number of plant species decreased from 58 to 28, with only 10 occurring in natural regeneration (Cerqueira et al. 2021, 2022). When excluding *A. mellifera* from interaction networks, it was observed that the bee food composition was richer in pollen types in the forest edge environments. This environment benefits a diversity of bee species by providing not only trophic resources but also nesting sites (Bailey et al. 2014).

Overall, the abundance of eusocial species can influence the structure of plant-pollinator mutualistic interaction networks on a spatiotemporal scale (Gruchowski-Woitowicz et al. 2020, 2023). These authors, in their experimental study of the native stingless bee species, *Melipona marginata*, demonstrated its strong influence on the emergent properties of networks, particularly in weighted nesting, asymmetry dependence, and

community-level specialization (Gruchowski-Woitowicz et al. 2020). However, when it comes to native species that have already adapted to specific trophic niches, which allows the accommodation of species in the natural environment, this effect goes unnoticed.

In the forest edge, in addition to *A. mellifera*, the stingless eusocial bee species *Melipona melanoventer*, *Trigona lacteipennis*, and *Melipona flavolineata* were also more generalist in terms of visited food sources. normally, stingless bees exhibit generalist behavior, as their colonies are populous, with a high demand for food and the need to forage on a diversity of flowers, considering a spatiotemporal scale (Faria et al. 2012; Aleixo et al. 2013, 2016; Kleinert et al. 2009; Bueno et al. 2023; Gruchowski-Woitowicz et al. 2020, 2023; Silva et al. 2024).

In the natural regeneration area, non-eusocial bees showed higher species richness (55%), which is common in environments with lower forest cover due to the resources available in these locations, as well as suitable nesting conditions for these bees, the vast majority of which nest in the ground (Alvarenga et al. 2020; Sabino et al. 2018; Martins et al. 2020), in pre-existing cavities (Silva et al. 2014), or decomposing wood (Freitas et al. 2014). Non-eusocial bees in the natural regeneration area exhibited a less rich food composition compared to eusocial species. A narrower trophic niche and specialized diet are commonly observed in species with shorter reproductive cycles (univoltine or bivoltine). Such species can be considered oligolectic, and their reproductive period may be associated with the reproductive phenology of botanical species that are seasonal, i.e., flowering at specific times of the year (Rocha-Filho et al. 2008; Williams 2006; Sabino et al. 2018; Martins et al. 2020, 2024). The amount of food provided to non-eusocial bee nests varies among species (Westerkamp 1991), but generally, the demand is lower compared to eusocial species. Female non-eusocial bees provide food only once to their offspring, which may consist of a few brood cells per nest (Filipiak and Filipiak 2020; Sabino et al. 2018; Martins et al. 2020, 2024). There are bee species that show specialization based on their collecting behavior, such as species that vibrate and can access the pollen of flowers with poricidal anthers (Nunes-Silva et al. 2010; Silva et al. 2016), or specialize in collecting floral oils from specific sources that provide this resource (Silva et al. 2017). There are bee species that show specialization based on their collection behavior, such as species that vibrate and can access pollen from flowers with poricidal anthers (Nunes-Silva et al. 2010; Silva et al. 2016), or that specialize in collecting floral oils from specific sources that provide this resource (Silva et al. 2017). This may be the reason why pollen from *Solanum stramoniifolium* (Solanaceae) was more frequent in samples from non-eusocial bees of the genera *Augochloropsis* and *Exomalopsis*, which collect pollen by vibration since the species has poricidal anthers (Carvalho and Oliveira 2003; Nunes -Silva et al. 2010).

In addition to the non-eusocial species in the natural regeneration area, the eusocial species *A. mellifera*, *Partamona ailyae*, and *M. flavolineata* exhibited generalist feeding behavior, exploring a greater variety of floral sources, both from species naturally occurring in the natural regeneration area and from other environments, highlighting that these bees move between environments in search of food resources. This makes these bees excellent pollinators by promoting cross-pollination between populations, thereby increasing genetic variability and seed viability (Wolowski et al. 2019), providing greater resilience in regenerating areas (García et al. 2020).

Regarding the trophic resources used, a large portion of bees presented *G. cornifolia* pollen on their bodies, as expected, since we used floral visiting bees of this plant to conduct this study. *G. cornifolia* attracts over 200 species of floral visitors, including beetles, ants, wasps, flies, and bees (Silva et al. *in preparation*), with the latter two groups having species considered effective pollinators. The diversity of bees sampled on its

flowers and the analysis of pollen present on their bodies allowed us to understand the other food sources used in the studied areas. The flowers of *G. cornifolia* abundantly offer nectar to visiting insects (Bezerra et al. *in preparation*), making it an important primary or complementary source of trophic resources.

Palynology has been an important science in studies of trophic interaction networks with bees (Rech and Absy 2011; Absy et al. 2013; Silva 2009; Silva et al. 2012, 2014b, 2016, 2017, 2020, 2024). In the present study, it was possible to identify the most frequent pollen types in bees, including those of *Solanum stramoniifolium*, whose flowers offer only pollen as a floral resource, collected by bees capable of pollination by vibration (Bezerra and Machado 2003); the pollen of *Lepidaploa silvae*, *L. paraensis*, and *Tilesia baccata*, species of the Asteraceae family, which have inflorescences in the form of capitulum, making the pollen accessible, in addition to nectar. These three plant species, as well as *G. cornifolia*, are considered generalists in their interaction with floral visitors (Valentin-Silva 2016); the pollen of *Mesosphaerum suaveolens* (Lamiaceae), which is an important source of nectar and pollen for bees (Moraes et al. 2020); *Mimosa pudica* (Fabaceae), which has spike or glomerule-shaped inflorescences with several exposed flowers and stamens (Borges et al. 2022) and also offers abundant pollen to floral visitors (Santos et al. 2018); the Rubiaceae family has a variety of flower shapes, sizes, and colors responsible for attracting a diversity of pollinators (Taylor et al. 2007). Among the Rubiaceae species, *Borreria* spp. are important sources of nectar and pollen for bees (Marques et al. 2011), and their pollen was frequently found in the samples; *Manilkara paraensis* (Sapotaceae) is characterized by its timber importance, with flowers offering resources to various groups of insects (Gomes et al. 2010).

Overall, the trophic interaction network representing all NR areas showed a nested pattern, with interactions between generalist and specialist species, with fewer interactions occurring between specialists (Bascompte et al. 2003). The interaction network in the FE showed less nesting than in the NR. However, when we excluded *A. mellifera*, this scenario was reversed, showing how an exotic species with a high food demand (Polatto et al. 2014) and behavior that allows it to arrive early at plants to exploit floral resources (Menezes et al. 2007) and have a larger flight range than native species (Palazuelos-Ballivián 2008; Hagler et al. 2011) can influence patterns in a community, often not representing the reality of interactions that would naturally occur in a specific environment. Redundant interaction networks with a nested pattern can indicate more stable communities regarding species or interaction loss (Bascompte and Jordano 2006). In the FE, we found a higher richness of native bee species and plants used in the networks, more species with specialized interactions, less niche overlap among them, as well as a predominance of generalist species interacting among themselves and also with a subset of specialist species in the network, indicating greater resilience. On the other hand, in the networks observed in the NR, we found fewer bee species and greater overlap among them in resource use, which can increase interspecific competition when the environment has limited resources (Blüthgen and Klein 2011), as is the case in NR environments.

As evidenced in this study, in the NR environment, *A. mellifera* utilizes a greater number of floral sources (51%), including those occurring in other environments. In this environment, this bee exploits the same floral sources as native bee species. Therefore, we strongly recommend that a more detailed study be conducted relating to the influence of *A. mellifera* on the apifauna in the Amazon Forest, especially in areas of regeneration where the community is in the process of structuring. It is known that *A. mellifera* can alter the foraging pattern of floral resources in native eusocial species (Menezes et al. 2007). Although *A. mellifera* may assume the roles of native bees in pollinating some plant species, reducing the effects of losses caused by pollinator scarcity (Xiao

et al. 2016), its effectiveness as a pollinator for most of the native and cultivated plants studied so far has been debated (Ollerton et al. 2012; Westerkamp 1991). There is strong evidence that *A. mellifera* harms populations of pollinators and native plants, affecting their interactions (Menezes et al. 2007, Goulson and Pardal 2008; Hansen et al. 2002, Yamamoto et al. 2012). Pacheco-Filho et al. (2015) warned that *A. mellifera* is the most abundant species in the main Brazilian biomes, and according to Silva et al. (*in preparation*), this also applies to the Amazon biome, especially in NR areas. Areas in the process of assembling communities should be further studied regarding the facilitator plant species that establish themselves and enable the recovery of ecological interaction networks, as is the case with *G. cornifolia*. Forest areas near an area in the early stages of succession are important because they are where most stingless bees neccessary in pollination services inhabit, accelerating natural regeneration. The movement of some species, especially those of larger size and longer flight range, between natural regeneration and preserved forest environments was evident, expanding their trophic niche, and likely enabling pollen flow between populations, favoring increased genetic variability through cross-pollination.

Finally, the greater wealth of non-eusocial bees in post-mining natural regeneration areas, whose reproductive period may be associated with the botanical species that are seasonal, i.e., flowering at specific times of the year, alerts to the necessary maintenance of a native plant community to favor bees in post-mining forest recovery.

5. Conclusion

This study provides information that can help reduce the knowledge gap on trophic interactions between bees and plants in the Amazon. Our hypotheses were corroborated, showing that forest edge environments have a higher diversity of native bees, greater richness of pollen types, and a more nested interaction network with the exclusion of the exotic species *Apis mellifera*. It was found that *A. mellifera* exploited a greater richness of floral sources due to its foraging range, that facilitates movement between environments. Finally, it was observed that the presence of *A. mellifera* alters the structure of interaction networks, which was more evident in natural regeneration environments. We conclude that trophic interaction networks showed a low nesting index, with differences between the two environments studied, with forest edge networks being more resilient than those found in natural regeneration areas. The presence of more preserved forest environments is essential for restoring ecological interaction networks in areas undergoing regeneration.

6. Acknowledgments

We would like to thank the Graduate Program in Biodiversity and Evolution (PPGBE) at the Emílio Goeldi Museum (MPEG). We extend our gratitude to the Bauxite Mining Company Norsk Hydro for funding field and laboratory materials, logistical support, transportation, and infrastructure, which were essential for the completion of this work (Process number: 01205.000250/2017-62), and the post-doctoral scholarship for MBS (Process number: 1323.250321.0009), CIS (Process number: 1323.261222.0001), and RSB (Process number: 1323.120123.0005). This research received financial support from the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) in the form of a research scholarship for JSC (Process number: 88887.689548/2022-00). We also thank Jesiane Cardoso and Ronaldo Roberto for their logistic support during fieldwork. Special thanks to the coordinators of the following laboratories: Laboratory of Molecular Biology, Laboratory of Insect Ecology, Multi-User Laboratory of Chemical Analysis, and Palynology Laboratory, all at MPEG, for providing infrastructure and necessary equipment for processing pollen material.

7. References

Absy ML, Ferreira MG, Souza ACM (2013) Recursos tróficos obtidos por abelhas sem ferrão na Amazônia central e sua contribuição à meliponicultura regional. In: Bermudez EGC, Telles BC, Rocha RA (Org) Entomologia na Amazônia Brasileira, 1ª ed. INPA, Manaus, pp 147–158

Agostini K, Lopes AV, Machado IC (2014) Recursos florais. In: Rech AR, Agostini K, Oliveira PE, Machado IC (org) Biologia da polinização, 1ª ed. Projeto Cultural, Rio de janeiro, pp 259–275

Aleixo KP, Biral LF, Imperatriz-Fonseca VF, Garófalo CA, Silva CI (2013) Pollen collected and foraging activities of *Frieseomelitta varia* (Lepeletier) (Hymenoptera: Apidae) in an urban landscape. Sociobiology 60:266–276. https://doi.org/10.13102/sociobiology.v60i3.266–276

Aleixo KP, Menezes C, Imperatriz-Fonseca VL, Silva CI (2016) Seasonal availability of floral resources and ambient temperature shape stingless bee foraging behavior (*Scaptotrigona* aff. *depilis)*. Apidologie 47: 1–11. https://doi.org/10.1007/s13592-016-0456-4

Almeida-Neto M, Guimarães PR, Guimarães Junior PR, Loyola RD, Ulrich W (2008) A consistent metric for nestedness analysis in ecological systems: reconciling concept and measurement. Oikos 117:1227–1239

Alvarenga AS,Silveira FA, Júnior JES, Novais SMA, Quesada M, Neves FS (2020) Vegetation composition and structure determine wild bee communities in a tropical dry forest. J Insect Conserv 24:487–498. https://doi.org/10.1007/s10841-020-00231-5

Alves, LWR, Carvalho EJM, Silva LGT (2014) Diagnóstico agrícola do município de Paragominas, PA. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (INFOTECA-E). Embrapa Amazônia Oriental, Belém

Alves-dos-Santos I, Machado IC, Gaglianone MC (2007) História natural das abelhas coletoras de óleo. Oecol Bras 11:544–557. https://doi.org/10.4257/oeco.2007.1104.06

Alves-dos-Santos I, Aizen MA, Silva CI (2014) Conservação dos Polinizadores. In: Rech AR, Agostini K, Oliveira PE, Machado IC (org) Biologia da Polinização, 1ª ed. Projeto Cultural, Rio de janeiro, pp 493–524

Barth OM, Carreira LMM (2016) Recent Palynology in Caxiuana, Pará, Brazil. Open Access Library Journal 3(5):1–7. https://doi.org/10.4236/oalib.1102684

Bascompte J, Jordano P, Melián CJ, Olesen JM (2003) The nested assembly of plant-animal mutualistic networks. Proc Natl Acad Sci USA 100:9383–9387

Bascompte J, Jordano P (2006) The structure of plant-animal mutualistic networks. In: Pascual M, Dunne, JA (eds) Food webs as complex adaptive networks: linking structure to dynamics. Oxford University Press, Oxford, pp 143–159

Bailey S, Requier F, Nusillard B, Roberts SPM, Potts SG, Bouget C (2014) Distance from the forest edge effects pollinating bees in rapeseed fields. Ecol Evol 4(4): 370–380. https://doi.org/10.1002/ece3.924

Bawa KS, Perry DR, Beach JH (1985) Reproductive biology of tropical lowland rain forest trees. I. Sexual systems and incompatibility mechanisms. Am J Bot 72(3):331–345. https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1985.tb05357.x

Bawa KS (1990) Plant-pollinator interactions in tropical rain forests. Annu Rev Ecol Syst 21(1):399–422

Bezerra LA, Campbell AJ, Brito TF, Menezes C, Maués MM (2020) Pollen loads of flower visitors to açaí palm (*Euterpe oleracea*) and implications for management of pollination services. Neotrop Entomol 49:482–490. https://doi.org/10.1007/s13744-020-00790-x

Bezerra ELS, Machado IC (2003) Biologia floral e sistema de polinização de *Solanum stramonifolium* Jacq.

(Solanaceae) em remanescente de Mata Atlântica, Pernambuco. Acta Bot Bras 17:247–257 https://doi.org/10.1590/S0102-33062003000200007

Blüthgen N, Klein AM (2011) Functional complementarity and specialisation: the role of biodiversity in plant–pollinator interactions. Basic Appl Ecol 12 (4):282–291 https://doi.org/10.1016/j.baae.2010.11.001

Bueno FGB, Kendall L, Alves DA, Tamara ML, Heard T, Latty T, Gloag R (2023) Stingless bee floral visitation in the global tropics and subtropics. Global Ecol Conserv 43:1–13. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02454

Borges RC, Padovani K, Imperatriz-Fonseca VL, Giannini TC (2020) A dataset of multi-functional ecological traits of Brazilian bees. Sci. Data 7:1–9. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0461-3

Borges RLB, Silva J, Santos JN (2022) Perfil botânico do pólen apícola produzido por *Apis mellifera* L., 1758 em um apiário localizado no semiárido baiano. Paubrasilia, 5:1–11. https://doi.org/10.33447/paubrasilia.2022.e0085

Brosi BJ, Diary GC, Ehrlich PR (2007) The bee community changes with landscape context in a tropical rural area. Ecol Appl 17(2):418-430. https://doi.org/10.1890/06-0029

Campbell AJ, Carvalheiro LG, Maués MM, Jaffé R, Giannini TC, Freitas MAB, Coelho BWT, Menezes C (2018) Anthropogenic disturbance of tropical forests threatens pollination services to açaí palm in the Amazon river delta. J Appl Ecol 55:1725–1736. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13086

Campbell AJ, Carvalheiro LG, Gastauer M, Giannini TC (2019) Pollinator restoration in Brazilian ecosystems relies on a small but phylogenetically-diverse set of plant families. Sci Rep 9(1):1–10. https://doi.org/10.1038/s41598-019-53829-4

Campbell AJ, Silva FDS, Maués MM, Leão KL, Carvalheiro LG, Moreira EF, Mertens F, Konrad MLF, Queiroz JAL, Menezes C (2023) Forest conservation maximises açaí palm pollination services and yield in the Brazilian Amazon. J Appl Ecol 1:1–13. https://doi.org/10.1111/1365-2664.14460

Cane JH (2001) Habitat fragmentation and native bees: a premature verdict? Conservation Ecology 5(1):1–7

Cane JH, Sipes S (2006) Floral specialization by bees: analytical methods and a revised lexicon for oligolecty. In Waser NM; Ollerton J (eds) Specialization and generalization in plant-pollinator interactions. Univ. Chicago, Chicago, IL, USA, pp 99–122

Carreira LMM, Barth OM (2003) Atlas de Pólen da vegetação de canga da Serra de Carajás (Pará, Brasil). Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém.

Carvalho DA, Oliveira PE (2003) Biologia reprodutiva e polinização de *Senna sylvestris* (Vell.) HS Irwin & Barneby (Leguminosae, Caesalpinioideae). Rev Bras Bot 26:319–328. https://doi.org/10.1590/S0100-84042003000300005

Cavalcante MC, Maués MM, Freitas BM (2012) Pollination requirements and the foraging behavior of potential pollinators of cultivated Brazil nut (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) trees in central Amazon rainforest. Psyche: J. Entomol. 2012:1–9. https://doi.org/10.1155/2012/978019

Cavalcante AM, Silva CI, Nogueira DS, Pinto GS, Parente MC, Freitas BM (2023) Pollen Niche from *Tetrapedia diversipes* Klug (Hymenoptera: Apidae: Tetrapediini) in a Brazilian Semi-deciduous Lowland Forest. Sociobiology 70 (2):1–14. https://doi.org/10.13102/sociobiology.v70i2.8346

Cerqueira RM, Jardim MAG, Júnior LLMS, Paixão LP, Martins MB (2021) Fitossociologia do estrato arbóreo em floresta nativa e em áreas do programa de recuperação de áreas degradadas sob influência da mineração,

Paragominas, Pará, Brasil. Nature and Conservation 14(3): 22–41.http://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2021.003.0002

Cerqueira RM, Jardim MAG, Bitencourt MM, Martins MB (2022) Fitossociologia do sub-bosque de florestas nativas e PRAD sob influência da mineração, Paragominas, Pará, Brasil. Nature and Conservation 15(2): 1–19. https://doi.org/10.6008/CBPC2318-2881.2022.002.0001

Dantas M, Rodrigues IA (1980) Plantas invasoras de pastagens cultivadas na Amazônia. Embrapa Amazônia Oriental, Belém

Decaens T., Martins MB, Feijoo A, Oszwald J, Dolédec S, Mathieu J, Sartre XA, Bonilla D, Brown GG, Criollo YAC, Florença D, Furtado I, Gond V, Gordillo E, Clec'h SL, Marichal R, Mitja D, Souza IM, Praxedes C, Rougerie R, Ruiz DH, Otero JT, Sanabria C, Velásquez A, Zararte LEM, Lavelle P (2018). Biodiversity loss along a gradient of deforestation in Amazonian agricultural landscapes. Conserv Biol 32(6):1380–1391.https://doi.org/ 10.1111/cobi.13206

Di Pasquale G, Salignon M, Le Conte Y, Belzunces LP, Decourtye A, Kretzschmar A, Suchail S, Brunet JL, Alaux C (2013) Influence of pollen nutrition on honey bee health: do pollen quality and diversity matter? PLoS One 8(8):1–13. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0072016

Eltz T, Sager A, Lunau K (2005) Juggling with volatiles: exposure of perfumes by displaying male orchid bees. J Comp Physiol, A 191 (7):575–581

Ertdman G (1960) The acetolized method. Svensk Botanisk Tidskrift 54:561–564

Faria LB, Aleixo KP, Imperatriz-Fonseca VF, Garófalo CA, Silva CI (2012). Foraging of *Scaptotrigona* aff. *depilis* (Hymenoptera, Apidae) in an urbanized area: seasonality in resource availability and visited plants. Psyche: J. Entomol. 212:1–12. https://doi.org/10.1155/2012/630628

Ferreira MG, Absy ML (2015) Pollen niche and trophic interactions between colonies of *Melipona* (*Michmelia*) *seminigra merrillae* and *Melipona* (*Melikerria*) *interrupta* (Apidae: Meliponini) reared in floodplains in the Central Amazon. Arthropod-Plant Interact 12(9):263–279

Ferreira MG, Absy ML (2017) Pollen niche of *Melipona* (*Melikerria*) *interrupta* (Apidae: Meliponini) bred in a meliponary in a terra-firme forest in the central Amazon. Palynology 42(2):199–209. https://doi.org/10.1080/01916122.2017.1332694

Ferreira PA, Danilo B.L, Lopes E, Carvalheiro LG, Biesmeijer JC, Rocha, PLB, Viana BF (2020). Forest and connectivity loss simplify tropical pollination networks. Oecologia 192:577–590

Filipiak ZM, Filipiak M (2020) The scarcity of specific nutrients in wild bee larval food negatively influences certain life history traits. Biology 9(12):1–17. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13797

Freitas BM, Pacheco-Filho AJS, Andrade PB, Lemos CQ, Rocha EEM, Pereira NO, Bezerra ADM, Nogueira DS, Alencar RL, Rocha RF, Mendonça KS (2014) Forest remnants enhance wild pollinator visits to cashew flowers and mitigate pollination deficit in NE Brazil. Journal of Pollination Ecology 12(4):22–30. https://doi.org/10.26786/1920-7603(2014)10

García C, Espelta JM, Hampe A (2020) Managing forest regeneration and expansion at a time of unprecedented global change. J Appl Ecol 57(12):2310–2315. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13797

Gomes R, Pinheiro MCB, Lima HA, Santiago-Fernandes LDR (2010) Biologia floral de Manilkara subsericea e de S*ideroxylon obtusifolium* (Sapotaceae) em restinga. Rev Bras Bot 33:271–283. https://doi.org/10.1590/S0100-84042010000200008

Gottsberger G (2016) Generalist and specialist pollination in basal angiosperms (ANITA grade, basal monocots, magnoliids, Chloranthaceae and Ceratophyllaceae): what we know now. Plant Diversity and Evolution 131: 263–362

Goulson D, Sparrow KR (2008) Evidence for competition between honeybees and bumblebees; effects on bumblebee worker size. J. Insect Conserv 13(2):177–181

Gruchowski-Woitowicz FC, Silva CI, Ramalho M (2020) Experimental field test of the influence of generalist stingless bees (Meliponini) on the topology of a bee–flower mutualistic network in the tropics. Ecol Entomol 45:854–866. https://doi.org/10.1111/een.12862

Gruchowski-Woitowicz FC, Silva CI, Ramalho M (2023) Influence of generalist stingless bees on the structure of mutualistic flower–pollinator networks in the tropics: Temporal variation. Ecol Entomol 49(3): 338–356. https://doi.org/10.1111/een.13308

Guimarães PR, Guimarães P (2006) Improving the analyses of nestedness for large sets of matrices. Environ Modell Software 21:1512–1513

Gutiérrez-Chacón C, Dormann CF, Klein AM (2018) Bees associated with forest edges benefit from the proportion of the rainforest, regardless of the length of the edge. Biol Conserv 220:149–160 https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.02.009

Hansen DM, Olesen JM, Jones CG (2002) Trees, birds and bees in Mauritius: exploitative competition between introduced honey bees and endemic nectarivorous birds? J. Biogeogr 29 (5–6):721–734

Hagler JR, Mueller S, Teuber LR, Machtley SA, Van Deynze A (2011): Foraging range of honey bees, *Apis mellifera*, in alfalfa seed production fields. J Insect Sci 11(144). https://doi.org/ 10.1673/031.011.14401

Jordano P, Bascompte J, Olesen JM (2003) Invariant properties in coevolutionary networks of plant-animal interactions. Ecol Lett 6:69–81. https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2003.00403.x

Kisser J (1935) Bemerkungen Zum Einschluss in glycerin-gelatine. Z Wiss Mikrosk Mikrosk Tech 51:372–374

Kleinert AMP, Ramalho M, Cortopassi-Laurino M, Ribeiro MF Imperatriz-Fonseca VL (2009) Abelhas Sociais (Meliponini, Apinini, Bombini). In: Panizzi, AR, Parra, JRP (eds) Bioecologia e Nutrição de Insetos. Base para o Manejo Integrado de Pragas. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, pp 371–424

Köppen W (1948) Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra. Fondo de Cultura Econômica, México

Lima RB, Giullieti AM (2005) Rhamnaceae. In: Wanderley MGL, Shepherd GJ, Melhem TS, Martins SE, Kirizawa M, Giulietti AM (eds) Flora Fanerogâmica do Estado de São Paulo. Instituto de Botânica, São Paulo, pp 331–342

Lima RB (in memoriam), Barbosa MRV, Giulietti AM, Figueira M (2024) Rhamnaceae *in* Flora e Funga do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <https://floradobrasil.jbrj.gov.br/FB116075>. Acesso em: 08 março 2024

MapBiomas Alerta - Sistema de Validação e Refinamento de Alertas de Desmatamento com Imagens de Alta Resolução: https://alerta.mapbiomas.org/faq. Acessado em 08 de março de 2024

Marques LJP, Muniz FH, Lopes GS, Silva JM (2011) Levantamento da flora apícola em Santa Luzia do Paruá, Sudoeste da Amazônia, Maranhão. Acta Bot Bras 25:141–149. https://doi.org/10.1590/S0102-33062011000100017

Martins WBR, Dionisio WS, Bezerra TG, Santos, ML, Ferreira, GC, Barbosa VM, Oliveira FA (2020) Survival, growth and regeneration of forest species in mining areas in the Eastern Amazonia. Scientia Plena 16(6): 1–

13 DOI: http://doi.org/10.14808/sci.plena.2020.060204

Martins HOJ, Oliveira-Rebouças PL, Aguiar CML, Silva CI, Ferreira VS (2020) Nesting biology of *Centris (Paracentris) xanthomelaena* (Hymenoptera: Apidae: Centridini). J Apic Res 62(2):222–232. https://doi.org/10.1080/00218839.2020.1828234

Martins HOJ, Dórea MDC, Ferreira VS, Silva CI, Alves-dos-Santos I (2024) Range and trophic niche overlap of two sympatric species of floral oil collecting bees in a fragment of dry forest. Frontiers in Bee Science 2: 1–14. https://doi.org/10.3389/frbee.2024.1383589

Maués MM (2002) Reproductive phenology and pollination of the brazil nut tree (*Bertholletia excelsa* Humb.& Bonpl.) in eastern Amazônia. In: Kevan P, Imperatriz-Fonseca V (eds) Pollinating Bees-The conservation link between agriculture and nature, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, pp 245–254.

Menezes C, Silva CI, Singer RB, Kerr WE (2007) Competição entre abelhas durante forrageamento em *Schefflera arboricola* (Hayata) Merr. Bioscience Journal 2:63–69

Michener CD (2007) The Bees of the World, The Johns Hopkins University Press, Baltimore, Md, USA

Moraes JIS, Lopes MTR, Ferreira-Gomes LR, Lopes ACA, Pereira FM, Souza BA, Pereira LA (2020) Bee flora and use of resources by africanized bees. Floresta e Ambiente, 27(3):1–9. https://doi.org/10.1590/2179-8087.008317

Moure JS (2022) Catálogo de Abelhas (Hymenoptera, Apoidea) da Região Neotropical - versão online. Disponível em http://www.moure.cria.org.br/catalogue . Acesso em: 25 março de 2024

Nascimento JEM, Freitas BM, Pacheco-Filho AJS, Pereira ES, Meneses HM, Alves JE, Silva CI (2019) Temporal variation in production and nutritional value of pollen used in the diet of *Apis mellifera* L. in a seasonal semideciduous forest. Sociobiology 66:263–273. https://doi.org/10.13102/sociobiology.v66i2.2879

Neto ABB, Schwartz G, Noronha NC, Gama MAP, Ferreira GC (2021) Natural regeneration for restoration of degraded areas after bauxite mining: A case study in the Eastern Amazon. Ecol Eng 171:1–9. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106392

Nunes-Silva P, Hrncir M, Silva CI, Roldão YS, Imperatriz-Fonseca VL (2013) Stingless bees, *Melipona fasciculata*, as efficient pollinators of eggplant (*Solanum melongena*) in greenhouses. Apidologie 44: 537–546

Ollerton J, Price V, Armbruster WS, Memmott J, Watts S, Waser NM, Totland Ø, Goulson D, Alarcón R, Stout JC, Tarrant S (2012) Overplaying the role of honey bees as pollinators: A comment on Aebi and Neumann. Trends Ecol Evol 27(3):141–142

Pacheco Filho AJDS, Verola CF, Lima Verde LW, Freitas BM (2015) Bee-flower association in the Neotropics: implications to bee conservation and plant pollination. Apidologie 46:530–541

Paulino-Neto HF (2014) Polinização por besouros. In: Rech AR, Agostini K, Oliveira PE, Machado IC (org) Biologia da polinização, 1ª ed. Projeto Cultural, Rio de janeiro, pp 259–275.

Palazuelos-Ballivián JMP (2008) Abelhas nativas sem ferrão. Oikos, São Leopoldo

Pedro SRM (2014) The stingless bee fauna in Brazil (Hymenoptera: Apidae). Sociobiology 61(4):348–354. https://doi.org/10.13102/sociobiology.v61i4.348-354

Polatto LP, Chaud-Neto J, Alves-Junior VV. (2014) Influence of abiotic factors and floral resource availability on daily foraging activity of bees. J Insect Behav 27:593–612. https://doi.org/10.1007/s10905-014-9452-6

Pool A (2014) Taxonomic revision of *Gouania* (Rhamanceae) for North America. Ann Mo Bot Gard 99:490–552 https://doi.org/10.3417/2013016

Potts SG, Biesmeijer JC, Kremen C, et al. (2010) Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. Trends Ecol Evol 25:345–353. https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.01.007

Ramos-Fabiel MA, Pérez-García EA, González EJ, Yáñez-Ordoñez O, Meave JA (2019) Successional dynamics of the bee community in a tropical dry forest: insights from taxonomy and functional ecology. Biotropica 51(1):62–74. https://doi.org/10.1111/btp.12619

RCPol – Redes de Catálogos Polínico online (2020) https://rcpol.mn.ufrj.br/pt/home/. Acessado em 08 de março de 2024

Rech AR, Absy ML (2011) Pollen sources used by species of Meliponini (Hymenoptera: Apidae) along the Rio Negro channel in Amazonas, Brazil. Grana 50(2):150–161. https://doi.org/10.1080/00173134.2011.57962

Reissek S (1861) Rhamneae. In: Martius CFP, Urban I (eds) Flora brasiliensis, Frid Fleischer, Lipsiae, pp 81–116

Ren P, Didham RK, Murphy MV, Zeng D, Si X, Ding P (2023) Forest edges increase pollinator network robustness to extinction with declining area. Nat Ecol Evol 7(3):393-404. https://doi.org/10.1038/s41559-022-01973-y

Rocha-Filho LC, Silva CI, Gaglianone MC, Augusto SC (2008) Nesting behavior and natural enemies of *Epicharis* (*Epicharis*) *bicolor* Smith 1854 (Hymenoptera Apidae). Tropical Zoology 21(2):227–242

Sabino WO, Alves-dos-Santos I, Silva CI. (2018) Versatility of the trophic niche of *Centris* (*Paracentris*) *burgdorfi* (Apidae, Centridini). Arthropod-Plant Interact 13:227–237. https://doi.org/10.1007/s11829-018-9654-5

Santos FAR, Kiill LHP, Carneiro-Torres DS, Lima LCL, Silva TMS, Novais JS, Dórea MC, Carneiro CE, Correia MCN (2018) Espécies prioritárias Melíferas. In: Coradin L, Camillo J, Pareyn FGC (eds) Espécies Nativas da Flora Brasileira de Valor Econômico Atual ou Potencial. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, pp 971–1010

Silva CI (2009) Distribuição espaço-temporal de recursos florais utilizados por *Xylocopa* spp. e interação com plantas de cerrado sentido restrito no Triângulo Mineiro. 287p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia

Silva CI, Maia-Silva C, Santos FAR, Bauermann SG (2012) O uso da palinologia como ferramenta em estudos sobre ecologia e conservação de polinizadores no Brasil. In: Imperatriz-Fonseca VL, Canhos DAL, Alves DA, Saraiva AM (Org.). Polinizadores no Brasil: contribuição e perspectivas para a biodiversidade, uso sustentável, conservação e serviços ambientais, EDUSP, São Paulo, pp 369–384

Silva CI, Aleixo KP, Nunes-Silva B, Freitas BM, Imperatriz-Fonseca VL (2014a) Guia ilustrado de abelhas polinizadoras no Brasil. Instituto Avançado da Universidade de São Paulo, São Paulo

Silva CI (Org.), Imperatriz-Fonseca VL, Groppo M, Bauermann SG, Saraiva AA, Queiroz EP, Evaldit ACP, Aleixo KP, Castro MMN, Faria LB, Ferreira-Caliman MJ, Wolff JL, Paulino-Neto HF, Garófalo CA (2014b) Catálogo polínico das plantas usadas por abelhas no campus da USP de Ribeirão Preto. Holos, Ribeirão Preto

Silva CI, Castro MMN, Alves-dos-Santos IA, Garófalo CA (2016). High prevalence of *Miconia chamissois*

(Melastomataceae) pollen in brood cell provisions of the orchid bee *Euglossa townsendi* in São Paulo State, Brazil. Apidologie 47:855–866.https://doi.org/10.1007/s13592-016-0441-y

Silva CI, Hirotsu CM, Pacheco-Filho AJS, Queiroz EP, Garófalo CA (2017) Is the maximum reproductive rate of *Centris analis* (Hymenoptera, Apidae, Centridini) associated with floral resource availability? Arthropod Plant Interact 11:1–14. https://doi.org/10.1007/s11829-017-9513-9

Silva CI, Freitas BM (2018). Rearing carpenter bees (*Xylocopa* spp.) for crop pollination. In: Roubik DW (ed) The pollination of cultivated plants. A compendium for practitioners. Smithsonian Tropical Research Institute, Balboa, Ancon, Republic of Panama, pp 89–100

Silva CI, Radaeski JN, Arena MVN, Bauermann SG (2020) Atlas of pollen and plants used by bees. CISE-Consultoria Inteligente em Serviços Ecossistêmicos, Rio Claro

Silva CI, Pacheco-Filho AJS, Toppa RH, Arena MVN, Oliveira PE (2021) Seasonal and vertical distribution of floral resources and its implications for the conservation of pollinators. Flora 278:151787. https://doi.org/10.1016/j.flora.2021.151787

Silva CI, Arena MVN, Silva ECM, Martines MR, Malaspina O, Chiovatto G, Nascimento JEM, Tadei R, Toppa, RH (2024) Landscape and land use affect composition and nutritional values of bees' food. J Environ Manage 352:120031. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120031

Silva JG, Meneses HM, Freitas BM (2019) Foraging behavior of the small-sized stingless bee *Plebeia* aff. *flavocincta*. Revista Ciência Agronômica 50(3):484–492. https://doi.org/10.5935/1806-6690.20190057

Sonter LJ, Herrera D, Barrett DJ, Galford GL, Moran C, Soares-Filho BS (2017) Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. Nat commun 8(1):1–7. https://doi.org/10.1038/s41467-017-00557-w

Taylor CM, Campos MTVA, ZAPPI D (2007) Flora da Reserva Ducke, Amazonas, Brasil: Rubiaceae. Rodriguésia 58:549–616. https://doi.org/10.1590/2175-7860200758306

Vaudo AD, Tooker JF, Grozinger CM, Patch HM (2015) Bee nutrition and floral resource restoration. Curr Opin Insect Sci 10:133–141

Valentin-Silva A, Godinho MAS, Cruz KC, Lelis SM, Vieira MF (2016) Three psychophilic species of Asteraceae with distinct reproductive mechanisms in southeastern Brazil. N Z J Bot 4:498–510 .https://doi.org/10.1080/0028825X.2016.1236735

Vogel S (1990) History of the Malpighiaceae in the light of pollination ecology. Mem N Y Bot Gard 55:130–142

Westerkamp C (1991) Honeybees are poor pollinators why? Plant Syst Evol 177:71–75. https://doi.org/10.1007/BF00937827

Williams IH (2006) Insect pollination and crop production: a European perspective. In: Kevan PG; Imperatriz-Fonseca VL (eds.) Pollinating bees: the conservation link between agriculture and nature. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, pp 65–71

Wolowski M, Agostini K, Rech AR, Varassin IG, Maués MM, 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. Editora Cubo, São Paulo

Xiao Y, Li X, Cao Y, Dong M (2016) The diverse effects of habitat fragmentation on plant-pollinator interactions. Plant Ecol 217:857–868.

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.

Zimmermann Y, Roubik DW, Eltz T (2006) Species specific attraction to pheromonal analogues in orchid bees. Behav Ecol Sociobiol 60(6):833–843

Appendix 1

Table 1. Slides with pollen from plant species that were sampled in the areas studied at the Bauxite Mining Company Norsk Hydro (Hydro), in the municipality of Paragominas, State of Pará, Brazil, which were incorporated into the pollen reference collection at the Emílio Goeldi Museum (MPEG).

Family	Species	Herbarium Voucher	Pollen collection Voucher
Apocynaceae	*Malouetia lata* Markgr.	HF4136	2338
Boraginaceae	*Cordia exaltata* Lam.	HF4118	2339
	Varronia polycephala Lam.	HF4116	2340
Dichapetalaceae	*Dichapetalum rugosum* (Vahl) Prance	HF4548	2341
Dilleniaceae	*Davilla rugosa* Poir.	HF4344	2342
Euphorbiaceae	*Croton matourensis* Aubl.	HF4093	2343
Fabaceae	*Mimosa sensitiva* L.	HF4135	2344
	Schnella kunthiana (Vogel) Wunderlin	HF4341	2345
	Senna latifolia (G.Mey.) H.S.Irwin & Barneby	HF4119	2346
	Senna multijuga (Rich.) H.S.Irwin & Barneby	HF4335	2347
	Senegalia multipinnata (Ducke) Seigler & Ebinger	HF4100	2348
Hypericaceae	*Vismia guianensis* (Aubl.) Choisy	HF4325	2349
Malpighiaceae	*Byrsonima cracifolia* (L.) Kunth	HF4096	2350
	Byrsonima crispa A. Juss.	HF4424	2351
	Heteropterys nervosa A. Juss.	HF4334	2352
Malvaceae	*Pavonia malacophylla* (Link & Otto) Garcke	HF4323	2353
Passifloraceae	*Passiflora coccinea* Aubl.	HF4094	2354
Poaceae	*Cenchrus ciliares* L.	HF4104	2355
	Dactyloctenium algyptuim (L.) Willd.	MG245327	2356
Rhamnaceae	*Gouania cornifolia* Reissek	HF4373	2357
Rubiaceae	*Borreria ocymifolia* (Roem. & Schult.) Bacigalupo & E.L.Cabral	HF4252	2358
	Casearia grandiflora Cambess	HF4313	2359
	Neoptychocarpus apodanthus (Kuhlm.) Buchheim	HF4336	2360
Sapindaceae	*Serjania paucidentata DC*	HF4330	2361
	Solanum rubiginosum Vahl	HF4001	2362
	Solanum stramoniifolium Jacq.	HF4086	2363
	Solanum subinerme Jacq.	HF4105	2364
Urticaceae	*Cecropia sciadophylla* Mart.	HF4572	2365

Appendix 2. Pollen types used by bees.

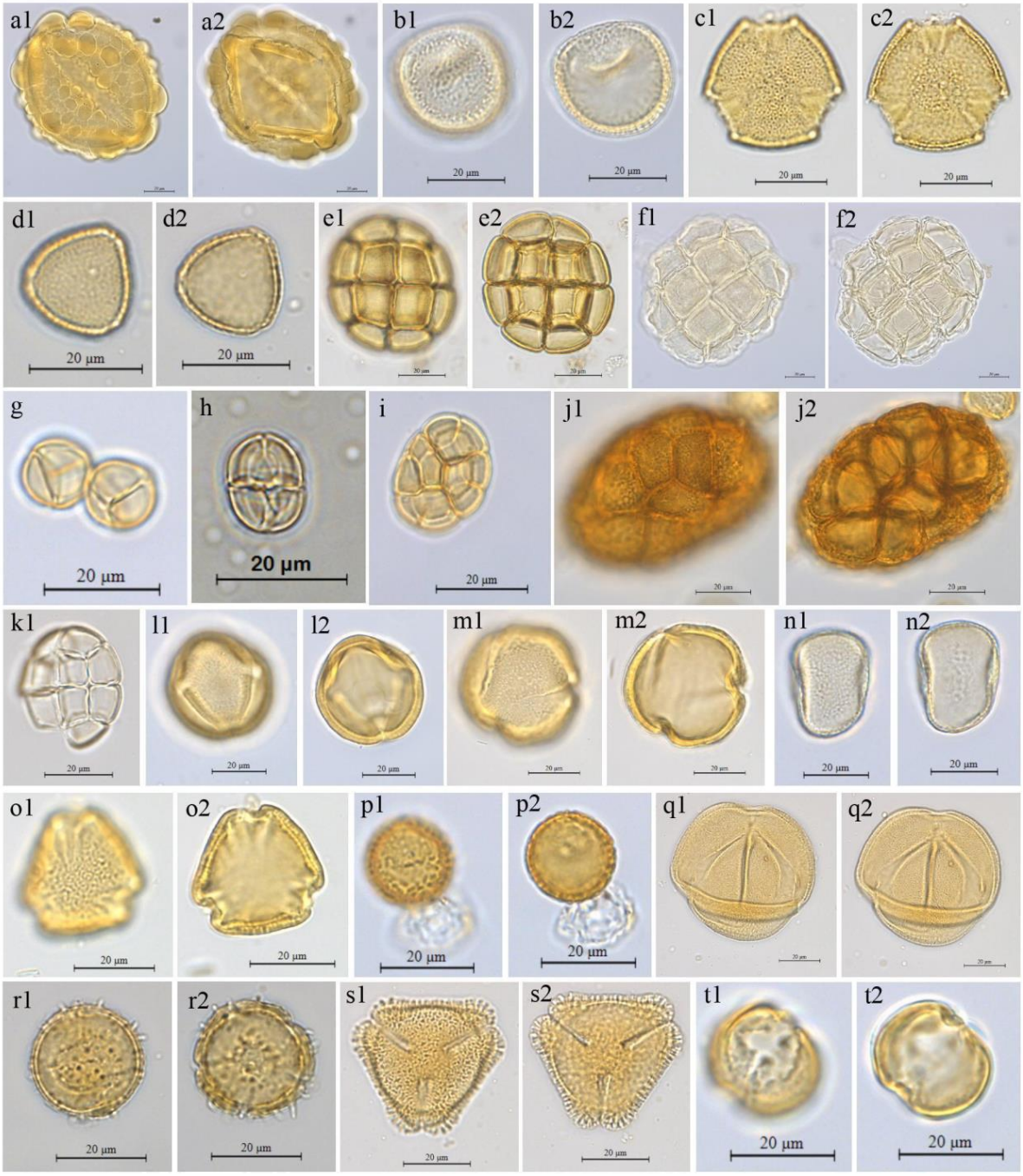

Figure 1. Pollen identified on the bodies of bees sampled in the areas at the Bauxite Mining Company Norsk Hydro (Hydro), in the municipality of Paragominas, State of Pará, Brazil. Amaranthaceae (a), Apocynaceae sp1 (b), *Tabernaemontana angulata* (c1-c2), *Bactris maraja* (d), *Ageratum conyzoides* (e1-e2), Asteraceae sp1 (f1-f2), Asteraceae sp2 (g1-g2), *Chromolaema* sp. (h1-h2), *Lepidaploa paraensis* (i1-i2), *Lepidaploa silvae* (j1-j2), *Mikania congesta* (k1-k2), *Porophyllum ruderale* (l1-l2), *Tilesia baccata* (m1-m2), *Adenocalymma validum* (n), Bignoniaceae sp1 (o1-o2), *Jacaranda copaia* (p1-p2), *Cordia exaltata* (q1-q2).

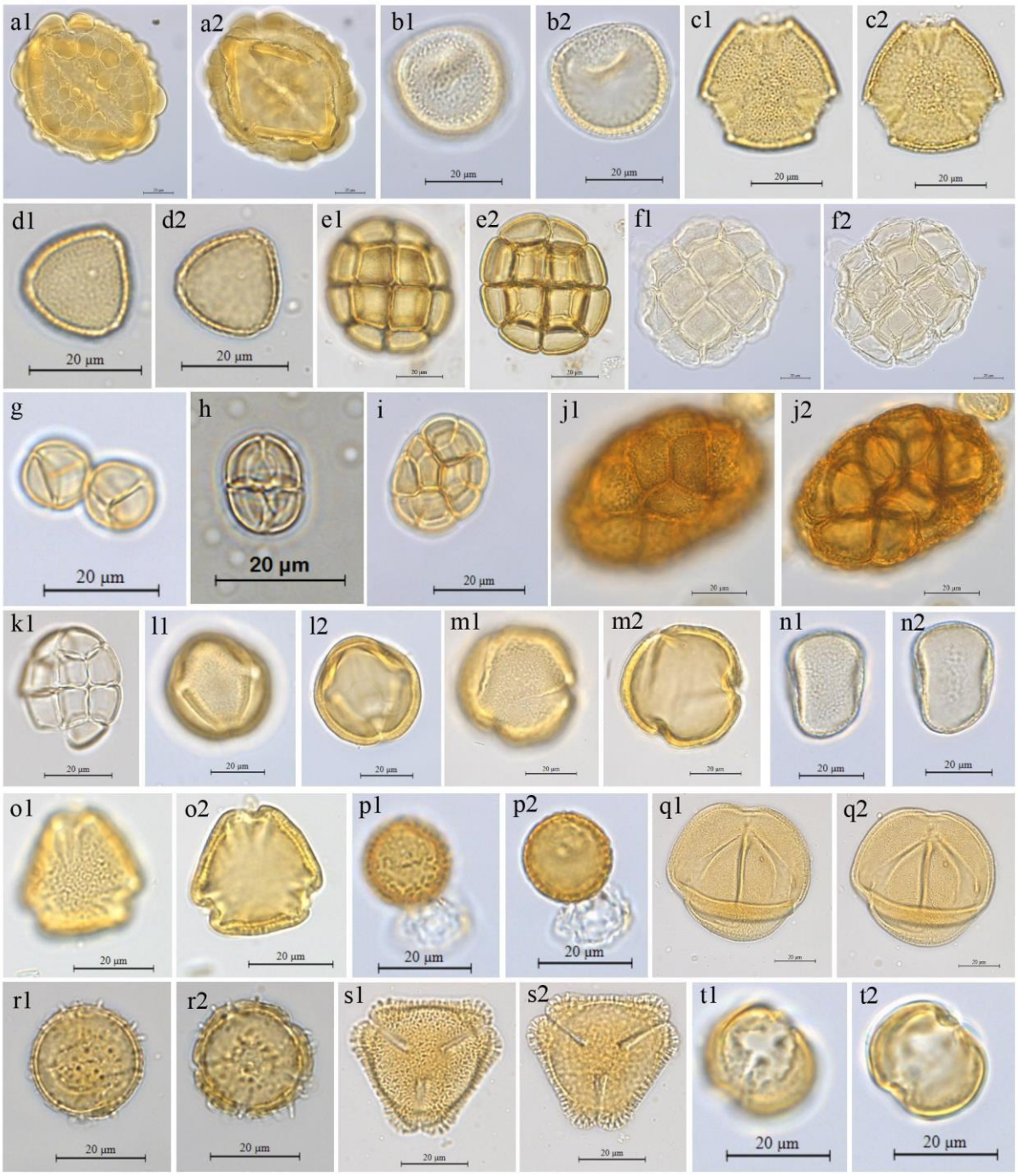

Figure 2. Pollen identified on the bodies of bees sampled in the areas at the Bauxite Mining Company Norsk Hydro (Hydro), in the municipality of Paragominas, State of Pará, Brazil. *Caryocar* sp (a1-a2), *Rhyncospora ciliata* (b1-b2), *Davilla rugosa* (c1-c2), *Erithryna* sp. (d1-d2), *Inga* sp1 (e1-e2), *Inga* sp2 (f1-f2), *Mimosa pudica* (g), *Mimosa sensitiva* (h), *Senegalia polyphylla* (i), *Anadenanthera peregrina* (j1-j2), *Piptadenia gonoacantha* (k), *Senna obtusifolia* (l1-l2), *Senna multijuga* (m1-m2), Indet sp1 (n1-n2), Indet sp2 (o1-o2), Indet sp3 (p1-p2), Indet sp4 (q1-q2), Indet sp5 (r1-r2), Indet sp6 (s1-s2), Indet sp7 (t1-t2).

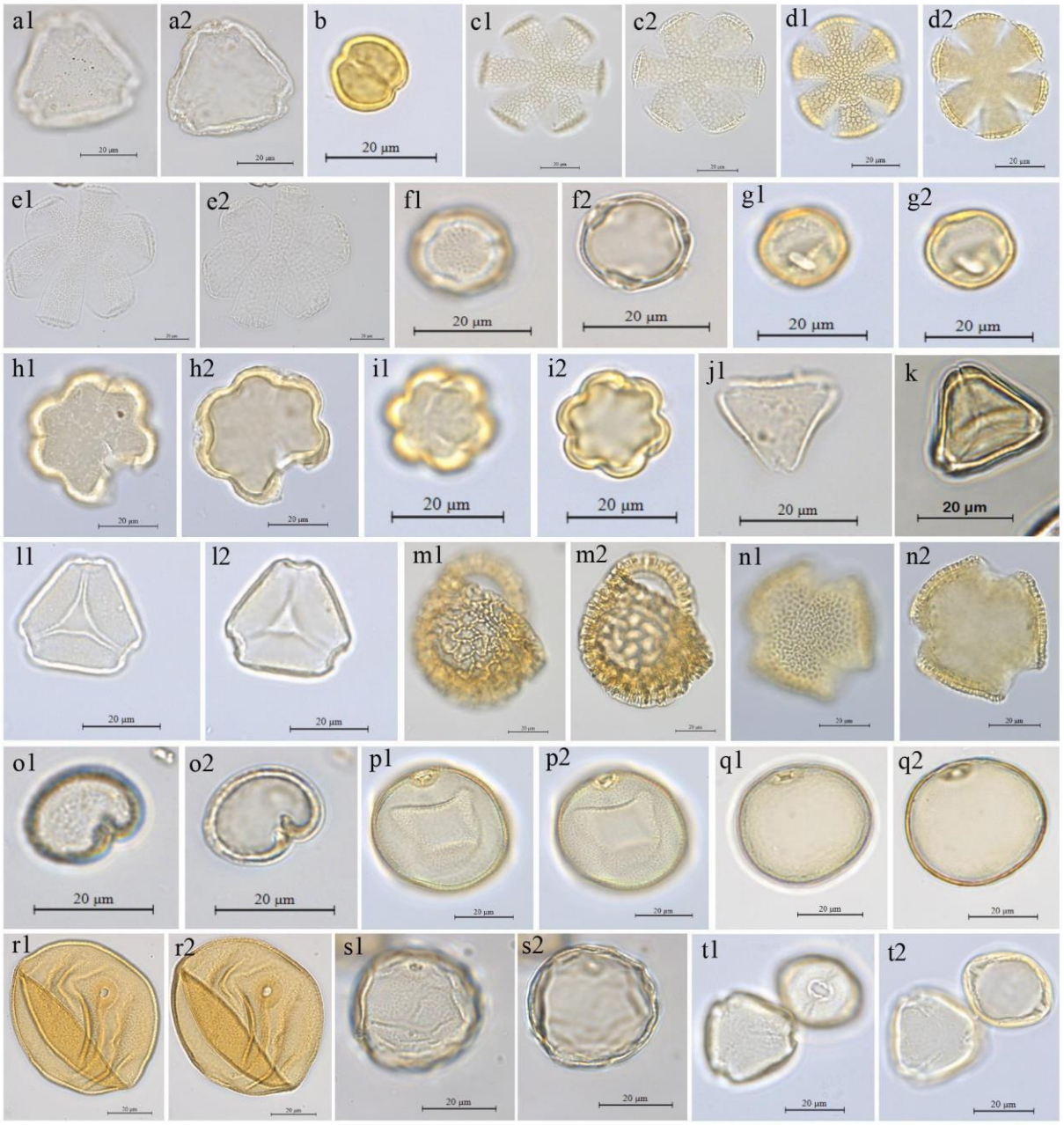

Figure 3. Pollen identified on the bodies of bees sampled in the areas at the Bauxite Mining Company Norsk Hydro (Hydro), in the municipality of Paragominas, State of Pará, Brazil. Indet sp8 (a1-a2), Indet sp9 (b), *Mesosphaerum suaveolens* (c1-c2), Lamiaceae sp1 (d1-d2), Lamiaceae sp2 (e1-e2), *Byrsonima crassifolia* (f1-f2), *Byrsonima cryspa* (g1-g2), *Bellucia grossularioides* (h1-h2)), *Tibouchina aspera* (i1-i2), *Eugenia biflora* (j1-j2), *Myrcia* sp1 (k1-kk2), *Eugenia* sp1 (l1-l2), *Passiflora coccinea* (m1-m2), *Turnera breviflora* (n1-n2), Piperaceae (o1-o2), *Cenchrus ciliaris* (p1-p2), *Dactyloctenium algyptuim* (q1-q2), *Pariana campestris* (r1-r2), *Poaceae* sp1 (s1-s2), *Gouania cornifolia* (t1-t2).

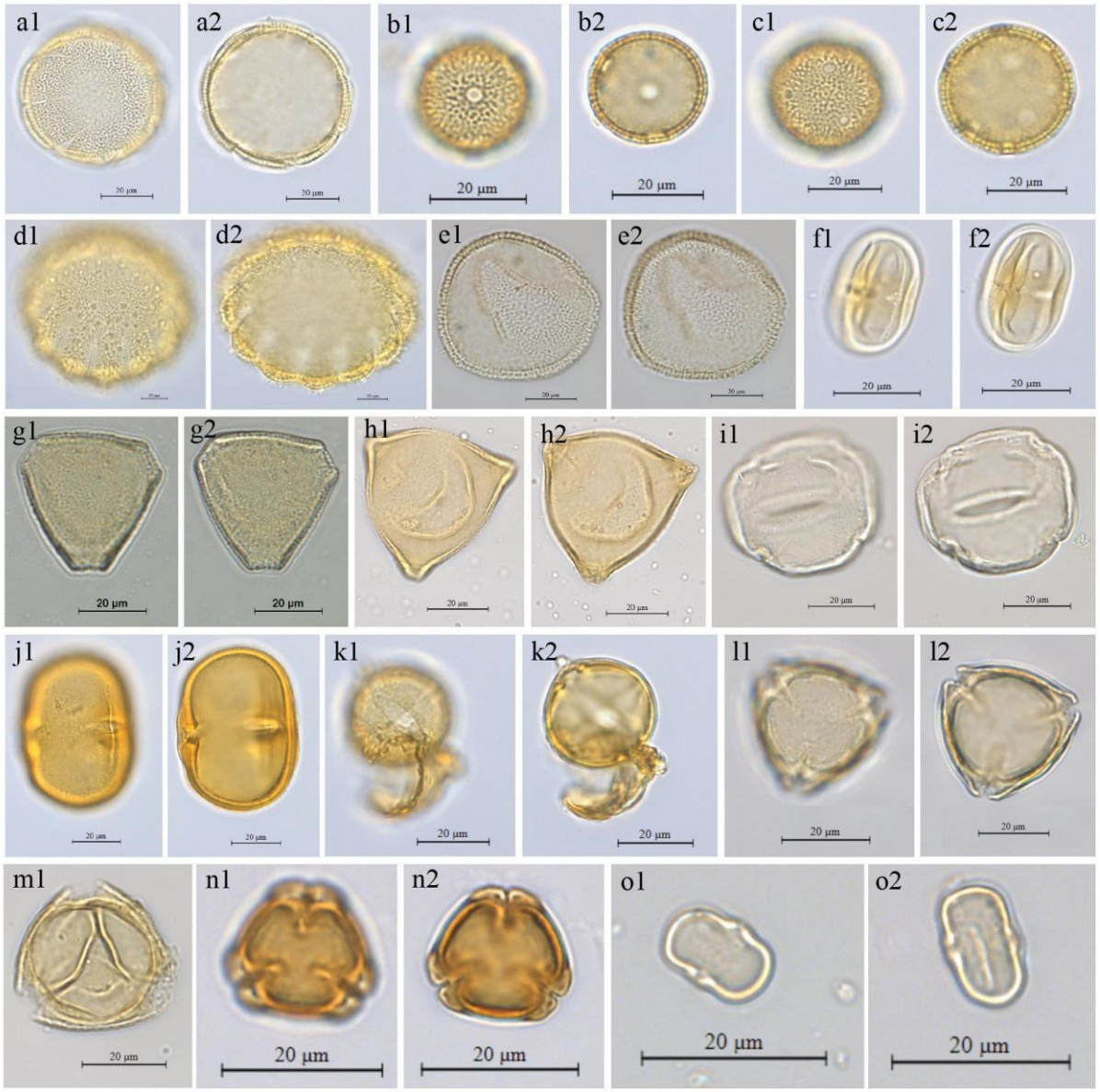

Figure 4. Pollen identified on the bodies of bees sampled in the areas at the Bauxite Mining Company Norsk Hydro (Hydro), in the municipality of Paragominas, State of Pará, Brazil. *Borreria ocymifolia* (a1-a2), *Borreria* sp1 (b1-b2), *Borreria spinosa* (c1-c2), *Hexasepalum teres* (d1-d2), *Psychotria racemosa* (e1-e2), *Casearia grandiflora* (f1-f2), *Paullinia pinnata* (g1-g2), *Serjania paucidentata* (h1-h2), *Manilkara paraensis* (i1-i2), *Pouteria cladanta* (j1-j2), *Solanum crinitum* (k1-k2), *Solanum rubiginosum* (l1-l2), *Solanum stramoniifolium* (m), *Solanum subinerme* (n1-n2), *Cecropia palmata* (o1-o2).

Attachments. Normas Editoriais do Journal Arthropod-Plant Interactions

Instruções para Autores
Submissão de manuscrito
A submissão de um manuscrito implica: que o trabalho descrito não tenha sido publicado anteriormente; que não está sendo considerada para publicação em nenhum outro lugar; que a sua publicação tenha sido aprovada por todos os coautores, se houver, bem como pelas autoridades responsáveis – tácita ou explicitamente – do instituto onde o trabalho foi realizado. O editor não será legalmente responsável caso haja qualquer pedido de compensação.

Permissões
Os autores que desejam incluir figuras, tabelas ou passagens de texto que já foram publicadas em outro lugar são obrigados a obter permissão do(s)proprietário(s) dos direitos autorais para o formato impresso e on-line e incluir evidências de que tal permissão foi concedida ao enviar seus artigos. Qualquer material recebido sem tal evidência será considerado originário dos autores.

Folha de rosto
Certifique-se de que sua página de título contenha as seguintes informações.

Título

O título deve ser conciso e informativo.

Informação sobre o autor

- O(s) nome(s) do(s) autor(es)
- A(s) afiliação(ões) do(s) autor(es), ou seja, instituição, (departamento), cidade, (estado), país
- Uma indicação clara e um endereço de e-mail ativo do autor correspondente
- Se disponível, o ORCID de 16 dígitos do(s) autor(es)

Se as informações de endereço forem fornecidas com a(s) afiliação (ões), elas também serão publicadas.

Para autores que não sejam (temporariamente) afiliados, capturaremos apenas a cidade e o país de residência, e não o endereço de e-mail, a menos que seja especificamente solicitado.

Modelos de linguagem grande (LLMs), como ChatGPT , atualmente não atendem aos nossos critérios de autoria . Notavelmente, uma atribuição de autoria acarreta responsabilidade pelo trabalho, que não pode ser efetivamente aplicada aos LLMs. O uso de um LLM deve ser devidamente documentado na seção Métodos (e se uma seção Métodos não estiver disponível, em uma parte alternativa adequada) do manuscrito.

Abstrato
Forneça um resumo de 150 a 250 palavras. O resumo não deve conter abreviaturas indefinidas ou referências não especificadas.

Apenas para revistas de ciências biológicas (quando aplicável)

- Número de registro do ensaio e data de registro para ensaios registrados prospectivamente

- Número de registro do ensaio e data de registro, seguido de “registrado retrospectivamente”, para ensaios registrados retrospectivamente

Palavras-chave
Forneça de 4 a 6 palavras-chave que possam ser usadas para fins de indexação.

Declarações e Declarações
As seguintes declarações devem ser incluídas sob o título “Declarações e Declarações” para inclusão no artigo publicado. Tenha em atenção que as submissões que não incluam declarações relevantes serão devolvidas como incompletas.

- **Conflitos de interesses:** Os autores são obrigados a divulgar interesses financeiros ou não financeiros que estejam direta ou indiretamente relacionados ao trabalho submetido para publicação. Consulte “Interesses Concorrentes e Financiamento” abaixo para obter mais informações sobre como preencher esta seção.

Consulte as seções relevantes nas diretrizes de submissão para obter mais informações, bem como vários exemplos de redação. Revise/personalize os exemplos de declarações de acordo com suas próprias necessidades.

Texto

Formatação de texto
Os manuscritos deverão ser submetidos em Word.

- Use uma fonte normal e simples (por exemplo, Times Roman de 10 pontos) para o texto.
- Use itálico para dar ênfase.
- Use a função de numeração automática de páginas para numerar as páginas.
- Não use funções de campo.
- Use tabulações ou outros comandos para recuos, não a barra de espaço.
- Use a função de tabela, e não planilhas, para criar tabelas.
- Use o editor de equações ou MathType para equações.
- Salve seu arquivo em formato docx (Word 2007 ou superior) ou formato doc (versões mais antigas do Word).

Títulos
Utilize no máximo três níveis de títulos exibidos.

Abreviações
As abreviaturas devem ser definidas na primeira menção e usadas de forma consistente a partir de então.

Notas de rodapé
As notas de rodapé podem ser utilizadas para fornecer informações adicionais, que podem incluir a citação de uma referência incluída na lista de referências. Não devem consistir apenas em uma citação de referência e nunca devem incluir os detalhes bibliográficos de uma referência. Também não devem conter figuras ou tabelas.

As notas de rodapé do texto são numeradas consecutivamente; aqueles nas tabelas devem ser indicados por letras minúsculas sobrescritas (ou asteriscos para valores de significância e outros dados estatísticos). As notas de rodapé do título ou dos autores do artigo não recebem símbolos de referência.

Sempre use notas de rodapé em vez de notas finais.

Agradecimentos

Agradecimentos a pessoas, subsídios, fundos, etc. devem ser colocados em uma seção separada na página de título. Os nomes das organizações financiadoras devem ser escritos por extenso.

Referências

Citação

Citar as referências no texto por nome e ano entre parênteses. Alguns exemplos:

- A pesquisa em negociação abrange muitas disciplinas (Thompson 1990).
- Este resultado foi posteriormente desmentido por Becker e Seligman (1996).
- Este efeito foi amplamente estudado (Abbott 1991; Barakat et al. 1995a, b; Kelso e Smith 1998; Medvec et al. 1999, 2000).

Lista de referência

A lista de referências deverá incluir apenas trabalhos citados no texto e que tenham sido publicados ou aceitos para publicação. Comunicações pessoais e trabalhos inéditos deverão ser mencionados apenas no texto.

As entradas da lista de referências devem ser organizadas em ordem alfabética pelos sobrenomes do primeiro autor de cada trabalho. Por favor, coloque-os em ordem alfabética de acordo com as seguintes regras: 1) Para um autor, por nome do autor e depois cronologicamente; 2) Para dois autores, por nome do autor, depois nome do coautor e depois cronologicamente; 3) Para mais de dois autores, pelo nome do primeiro autor, depois cronologicamente.

Se disponível, inclua sempre DOIs como links completos de DOI em sua lista de referências (por exemplo, “https://doi.org/abc”).

- artigo de jornal

  Gamelin FX, Baquet G, Berthoin S, Thevenet D, Nourry C, Nottin S, Bosquet L (2009) Efeito do treinamento intermitente de alta intensidade na variabilidade da frequência cardíaca em crianças pré-púberes. Eur J Appl Physiol 105:731-738. https://doi.org/10.1007/s00421-008-0955-8

  Idealmente, os nomes de todos os autores devem ser fornecidos, mas também será aceito o uso de “et al” em longas listas de autores:

  Smith J, Jones M Jr, Houghton L et al (1999) Futuro do seguro saúde. N Engl J Med 965:325–329

- Artigo por DOI

  Slifka MK, Whitton JL (2000) Implicações clínicas da produção desregulada de citocinas. J Mol Med. https://doi.org/10.1007/s001090000086

- Livro

  South J, Blass B (2001) O futuro da genômica moderna. Blackwell, Londres

- Capítulo de livro

Brown B, Aaron M (2001) A política da natureza. In: Smith J (ed) A ascensão da genômica moderna, 3ª ed. Wiley, Nova York, pp 230-257

- Documento on-line

  Cartwright J (2007) As grandes estrelas também têm clima. Publicação IOP PhysicsWeb. http://physicsweb.org/articles/news/11/6/16/1. Acessado em 26 de junho de 2007

- Dissertação

  Trent JW (1975) Insuficiência renal aguda experimental. Dissertação, Universidade da Califórnia

Sempre use a abreviatura padrão do nome de um periódico de acordo com a lista ISSN de abreviações de palavras de título, consulte

ISSN LTDA

Se não tiver certeza, use o título completo do periódico.

Tabelas

- Todas as tabelas devem ser numeradas com algarismos arábicos.
- As tabelas devem ser sempre citadas no texto em ordem numérica consecutiva.
- Para cada tabela, forneça uma legenda (título) explicando os componentes da tabela.
- Identifique qualquer material publicado anteriormente, fornecendo a fonte original na forma de uma referência no final da legenda da tabela.
- As notas de rodapé das tabelas devem ser indicadas por letras minúsculas sobrescritas (ou asteriscos para valores de significância e outros dados estatísticos) e incluídas abaixo do corpo da tabela.

Letras de Figuras

- Para adicionar letras, é melhor usar Helvetica ou Arial (fontes sem serifa).
- Mantenha as letras com tamanhos consistentes em todo o seu trabalho artístico de tamanho final, geralmente cerca de 2–3 mm (8–12 pt).
- A variação do tamanho do tipo em uma ilustração deve ser mínima, por exemplo, não use fonte de 8 pt em um eixo e fonte de 20 pt para o rótulo do eixo.
- Evite efeitos como sombreamento, contorno de letras, etc.
- Não inclua títulos ou legendas em suas ilustrações.

Numeração de Figura

- Todas as figuras devem ser numeradas em algarismos arábicos.
- As figuras devem ser sempre citadas no texto em ordem numérica consecutiva.
- As partes da figura devem ser indicadas por letras minúsculas (a, b, c, etc.).
- Caso apareça um apêndice em seu artigo que contenha uma ou mais figuras, continue a numeração consecutiva do texto principal. Não numere as figuras do apêndice, "A1, A2, A3, etc." As figuras nos apêndices online [Informações Suplementares (SI)] devem, no entanto, ser numeradas separadamente.

Legendas de figuras

- Cada figura deve ter uma legenda concisa descrevendo com precisão o que a figura representa. Incluir as legendas no arquivo de texto do manuscrito e não no arquivo de figuras.

- As legendas das figuras iniciam com o termo Fig. em negrito, seguido do número da figura, também em negrito.
- Nenhuma pontuação deve ser incluída após o número, nem qualquer pontuação deve ser colocada no final da legenda.
- Identifique todos os elementos encontrados na figura na legenda da figura; e usar caixas, círculos, etc., como pontos coordenados em gráficos.
- Identifique o material publicado anteriormente, fornecendo a fonte original na forma de uma citação de referência no final da legenda da figura.

Colocação e tamanho da figura

- As figuras deverão ser apresentadas no corpo do texto. Somente se o tamanho do arquivo do manuscrito causar problemas no upload, as figuras grandes deverão ser submetidas separadamente do texto.
- Ao preparar suas figuras, dimensione-as para caber na largura da coluna.
- Para periódicos de grande porte, as figuras devem ter largura de 84 mm (para áreas de texto de coluna dupla) ou 174 mm (para áreas de texto de coluna única) e não superiores a 234 mm.
- Para revistas de pequeno porte, os números devem ter 119 mm de largura e não ultrapassar 195 mm.