

Ecologia da polinização: aplicações no planejamento e manejo de agroecossistemas

Pollination ecology: insights for planning and managing agroecosystems

Gabriela Rabeschini¹, Carlos Eduardo Pereira Nunes², Martin Pareja³

¹ Programa de Pós-Graduação em Ecologia, Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, Brasil. Orcid 0000-0003-4161-8109, gabi.rabeschini@gmail.com (autora correspondente)

² Professor substituto na Faculdade Interdisciplinar de Humanidades da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, Minas Gerais. Doutor em Biologia Vegetal pela Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, Brasil. Orcid 0000-0002-7534-0697, cepnunes@gmail.com

³ Docente no departamento de Biologia Animal, Instituto de Biologia, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, Brasil. Doutor em Interações Inseto-Planta pela Universidade de Reading, Reading, Reino Unido. Orcid 0000-0002-2615-9947, mpareja@unicamp.br

Submetido em 16 mai 2023. Aceito em 28 nov 2023.

RESUMO

Considerar agroecossistemas como partes de paisagens multifuncionais alia agricultura à conservação ecológica e à biodiversidade, melhorando a matriz agrícola dominante e garantindo serviços agroecossistêmicos autônomos, como a polinização. Aqui, discutimos recentes insights da ecologia da polinização transferíveis à agricultura em diferentes escalas e necessidades sociais e econômicas.

Palavras-chave: Agroecossistemas diversificados; Biodiversidade; Cultura-polinizador; Intensificação ecológica; Serviços ecossistêmicos.

ABSTRACT

Considering agroecosystems as parts of multifunctional landscapes combines agriculture with ecological conservation and biodiversity, improving the dominant agricultural matrix and guaranteeing autonomous agroecosystem services, such as pollination. Here, we discuss recent insights from pollination ecology transferable to agriculture at different scales and social and economic needs.

Keywords: Diversified agroecosystems; Biodiversity; Crop-pollinator; Ecological intensification; Ecosystem services.

Acabar com a fome e combater as crises ambientais, econômicas, sociopolíticas e de saúde, provocadas pela agricultura industrial, requer a união urgente da ciência e dos pequenos agricultores e agricultoras (Editorial, 2020). Mais de 2 bilhões de pessoas, correspondendo a 83% da população agrícola mundial, dependem de agroecossistemas de pequena escala para obter renda e fornecem a maior parte da diversidade de alimentos globalmente (Lowder *et al.*, 2014). No entanto, a ciência agrícola tem se concentrado em promover soluções tecnológicas para aumentar os rendimentos e as margens de lucro da agricultura convencional e industrial. Já grande parte da ecologia e conservação tende a se concentrar nos ecossistemas naturais por meio da proteção da “natureza intocada”, a qual tem grande influência sobre os serviços ecossistêmicos e a produção agrícola (Fletcher *et al.*, 2021; Maas *et al.*, 2020). Como resultado, pouca atenção tem sido dada à questão de

como a agricultura tradicional e de pequena escala moldou agroecossistemas e paisagens sociais, econômicas e ecologicamente funcionais (Fletcher *et al.*, 2021). Pequenos agricultores e agricultoras dependem de interações ecológicas dentro de comunidades biológicas diversas para gerenciar a produção agrícola, criando sistemas de produção resilientes (Varah *et al.*, 2020). Essas interações ecológicas podem resultar em serviços ecossistêmicos fundamentais para agroecossistemas, como a polinização ou o controle biológico de pragas.

A polinização realizada por animais traz benefícios como qualidade, valor de mercado e viabilidade comercial a 85% das 107 culturas de maior importância global (IPBES, 2016). Além disso, as áreas cultivadas com essas espécies dependentes de polinizadores estão expandindo, aumentando a demanda global pela polinização animal (IPBES, 2016). Recentemente, a manutenção da polinização das culturas como um serviço ecossistêmico, vem recebendo atenção considerável, entretanto, as pesquisas se concentram na conservação de habitats não-agrícolas (principalmente vegetação nativa) para melhorar a polinização das culturas (Gemmill-Herren *et al.*, 2020). Embora essa abordagem seja importante e urgente, acreditamos que seja necessário, primeiramente, entender como a polinização pode ser mantida dentro dos agroecossistemas por meio do manejo e da diversificação de culturas. A abordagem alternativa, que trata agroecossistemas como partes funcionais de paisagens com múltiplas funções, torna a agricultura aliada da conservação dos habitats naturais através da melhoria da qualidade da matriz agrícola dominante e da sua integração aos habitats naturais ao redor, garantindo a polinização como um serviço agroecossistêmico autossustentável (Chapagain *et al.*, 2020). Aqui, propomos que o manejo das interações diretas e indiretas que podem aumentar ou inibir a polinização deve ser usado como uma ferramenta complementar para o planejamento de agroecossistemas. Isso visa a aumentar sua produtividade pela intensificação do processo de polinização, atuando como uma forma de intensificação ecológica. Nas seções seguintes (Itens I, II, III e IV), discutimos quatro desenvolvimentos recentes da ecologia da polinização que são transferíveis para a produção agrícola, da escala de uma horta até a escala de paisagens agrícolas (**Figura 1**).

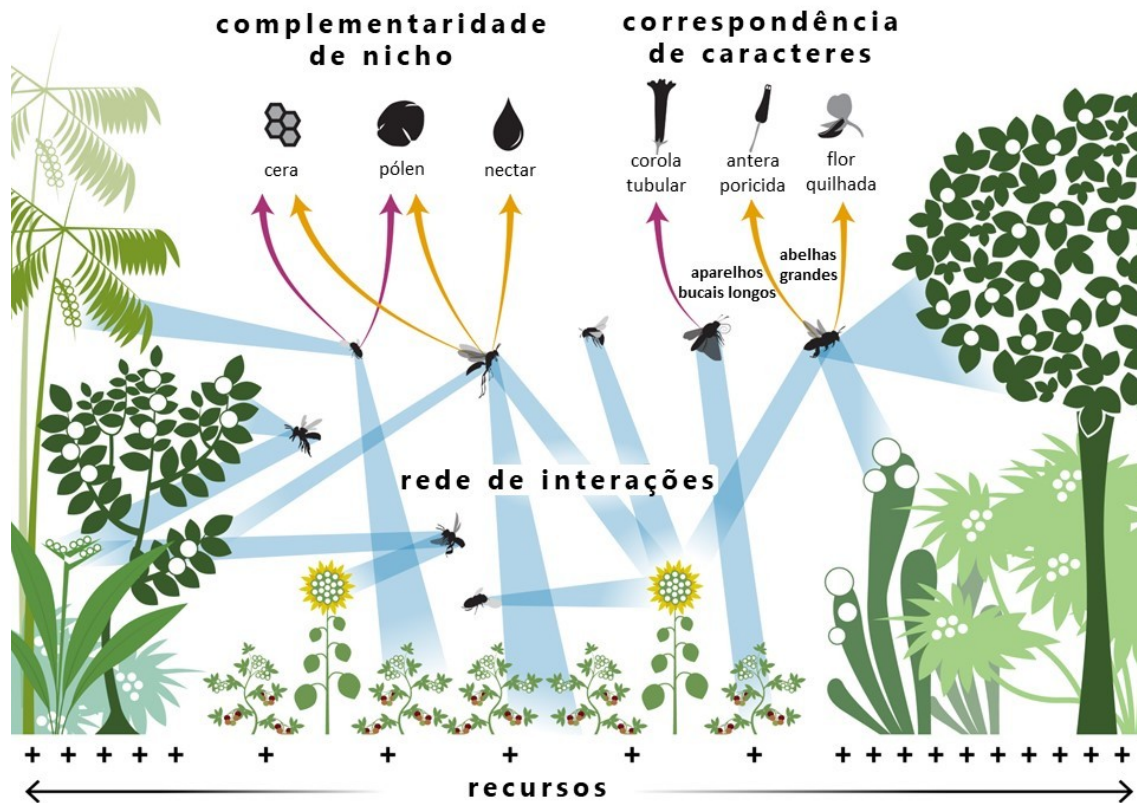


Figura 1. Desenvolvimentos recentes da ecologia da polinização, transferíveis para a produção agrícola: (1) aproveitar recursos florais dentro e ao redor da área de cultivo; (2) aumentar a agrobiodiversidade e da complementaridade de nicho; (3) aumentar a correspondência de caracteres entre plantas e polinizadores; e (4) compreender e manejar redes agroecológicas de polinizadores.

Item I. Aproveitar a disponibilidade de recursos florais dentro e ao redor da área de cultivo para aumentar a polinização

Flores com mais recursos geralmente interagem com mais polinizadores (Cartar, 2009) e, portanto, podem influenciar a polinização de outras espécies em floração. Assim, plantas com menos recursos florais podem se beneficiar de vizinhas com mais recursos e que atraem mais visitantes (Carvalho *et al.*, 2014). Consórcios são grupos de plantas intencionalmente cultivadas juntas, que podem ser combinações de culturas ou culturas e plantas não-cultivadas. Ao planejar consórcios com espécies de cultivo com grandes quantidades de recursos florais, os agricultores e agricultoras podem também cultivar espécies com menos ou nenhum recurso, as quais teriam um menor número ou diversidade de visitantes, se cultivadas como monoculturas. Outra forma de planejar esses consórcios é utilizando espécies que atraem um grande número de visitantes florais e que podem ser utilizadas como adubo verde, com espécies de cultivo que se beneficiam da

polinização cruzada, como o consórcio de *Crotalaria spp.* com soja ou café (Rahayu *et al.*, 2018). As flores dessas espécies podem alimentar visitantes florais menos competitivos, excluídos de melhores recursos por competidores mais vorazes. Embora essas práticas ainda representem desafios de manejo para a agricultura mecanizada em larga escala, elas são comuns a muitos sistemas tradicionais de pequena escala e podem ser fundamentais para sustentar a produtividade e a biodiversidade desses sistemas (Pereira-Filho *et al.*, 2019). Em todos os casos é importante ajustar as abundâncias das espécies de plantas de acordo com a comunidade local de polinizadores. Isso se dá porque as interações de facilitação ou de competição por polinizadores entre as plantas podem ser influenciadas de acordo com diferentes combinações entre a densidade de plantas e a abundância de polinizadores (Ye *et al.*, 2014).

Item II. Facilitar a polinização através do aumento da diversidade e da complementaridade de nicho

A complementaridade de nicho ocorre quando diferentes espécies se complementam em uma função, por exemplo, quando uma espécie de planta fornece pólen e outra fornece néctar para uma espécie de abelha. Os efeitos da facilitação pela biodiversidade normalmente envolvem complementaridade de nicho, pois os visitantes florais podem diferir nos recursos que buscam e na distribuição das rotas de forrageamento no espaço e no tempo (Blüthgen e Klein, 2011). Consórcios de espécies com diferentes recompensas florais para polinizadores, como néctar, pólen ou ceras, podem resultar em facilitação se os visitantes se especializarem em diferentes recursos (Ghazoul, 2006). A facilitação também pode surgir de mudanças nos nichos dos polinizadores, seguindo padrões de uso dos recursos no espaço e no tempo ou riqueza de espécies de plantas. A combinação de culturas com o mesmo período de floração, mas diferentes tempos de abertura e altura das flores, pode resultar em atração de polinizadores combinada com uma menor competição por visitantes, quando há mudanças no nicho dos polinizadores (Venjakob *et al.*, 2016). Mais estudos sobre o estabelecimento de populações locais de polinizadores ligadas à complementaridade de recursos em agroecossistemas diversificados nos ajudarão a entender como melhorar a estabilidade dos serviços de polinização.

Item III. Aumentar a correspondência de caracteres (*trait-matching*) entre plantas e comunidade de polinizadores

A correspondência de caracteres (*trait-matching*) ocorre quando espécies que interagem têm características que refletem a coevolução entre polinizadores e plantas com flores, como combinações entre os formatos florais e os aparelhos bucais dos polinizadores (Peralta *et al.*, 2020). A correspondência de caracteres entre polinizadores nativos e culturas aumenta a provisão e a persistência dos serviços de polinização e prediz o sucesso da frutificação dos cultivos (Garibaldi *et al.*, 2015). Isto é particularmente importante dado que a maioria das culturas não são nativas de suas áreas de cultivo e interagem principalmente com polinizadores com os quais não coevoluiram (Kuriakose *et al.*, 2009). Em casos extremos, os níveis de correspondência de caracteres podem ser tão baixos que nenhum polinizador local é capaz de realizar serviços de polinização na cultura (Li *et al.*, 2019). Paisagens agrícolas com culturas diversificadas e espécies não-cultivadas têm maiores chances de correspondência de caracteres entre flores e polinizadores. Isso se dá porque a presença de vários tipos florais garante a visitação de uma diversidade de polinizadores com características morfológicas variadas (Laha *et al.*, 2020). O manejo de espécies de cultura com características correspondentes aos dos polinizadores nativos pode, não apenas melhorar a frutificação, mas também melhorar o funcionamento do agroecossistema e diminuir uma potencial dependência em suplementação de polinizadores. Assim, é essencial combinar os cultivos locais com o conhecimento tradicional da história natural dos sistemas de produção, para alcançar níveis mais elevados de correspondência de caracteres planta-polinizador (Maas *et al.*, 2020). Idealmente, ao incluir culturas não-nativas, estas devem ser escolhidas para caracteres relevantes para os polinizadores locais (como cor e cheiro) e recursos florais que correspondam às suas preferências. Por exemplo, áreas com espécies de abelhas silvestres grandes, que realizam polinização vibratória, podem fornecer melhores serviços de polinização para plantas com flores quilhadas (por exemplo, espécies de Fabaceae) ou anteras poricidas (por exemplo, espécies de Solanaceae).

Item IV. Compreender e manejar redes agroecológicas de polinizadores

Outro aspecto fundamental para o planejamento e manejo de agroecossistemas é entender como as redes planta-polinizadores estão estruturadas nesses sistemas. As redes de interação planta-polinizador não são simples adições de interações isoladas. Assim, muitos aspectos das interações de polinização nas comunidades influenciam o funcionamento do agroecossistema e requerem observações no contexto de rede para serem compreendidos (Losapio *et al.*, 2019). As abordagens de rede podem ajudar a entender como as combinações de cultivo e não-cultivo afetam os serviços de polinização em um agroecossistema (Badillo-Montaña *et al.*, 2019). Por exemplo, avaliar e manter espécies-chave conectoras, que podem modificar a abundância de outras espécies, nas redes planta-polinizadores para cultivos e não-cultivos ao longo das diferentes estações do ano cria redes mais robustas. Isso acontece porque um número menor de espécies conectoras torna o sistema mais propenso à fragmentação da comunidade (Chakraborty *et al.*, 2021). Gerenciar a estrutura de rede para obter aninhamento e módulos bem conectados pode ser fundamental para promover comunidades estáveis e biodiversidade a longo prazo, ou mesmo restabelecer espécies localmente extintas (Borchard *et al.*, 2021). Em redes aninhadas, espécies generalistas interagem com generalistas e especialistas, mas há poucas interações entre especialistas. Em módulos bem conectados, grupos específicos de plantas interagem preferencialmente com grupos específicos de polinizadores. Além disso, estudar estruturas de rede ajuda a desvendar quais características específicas das plantas e dos polinizadores estão associadas a uma maior provisão dos serviços de polinização (Vázquez *et al.*, 2009). O uso dessa abordagem de redes nos permite entender melhor como as culturas e as espécies nativas estão conectadas e como isso afeta o funcionamento dos serviços de polinização. Além disso, podemos estudar as interações facilitadoras indiretas das plantas e ligar as métricas de rede e biodiversidade às métricas de produtividade do agroecossistema (Bergamo *et al.*, 2020). Finalmente, aplicando uma abordagem de escala explícita, pode-se examinar como a estrutura da rede na escala do agroecossistema se relaciona com a rede regional e como o manejo da paisagem afeta a estrutura da rede local. Essa integração metodológica é uma ferramenta poderosa para que as partes interessadas avaliem o desenvolvimento e a sustentabilidade de agroecossistemas complexos e paisagens agroecológicas.

Aplicações e lacunas no conhecimento

O gerenciamento de consórcios pode ser uma das aplicações agrícolas mais difundidas e promissoras do conhecimento da ecologia da polinização. Plantas com flores em consórcio podem resultar em maior atração de polinizadores e maior produção agrícola (Rabeschini *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2013), e a competição por polinizadores pode ser contrabalançada usando espécies com níveis variados de dependência em polinização por animais. Além disso, a disponibilidade de recursos florais para os polinizadores no campo pode ser prolongada pelo manejo das espécies de plantas para que tenham floração sequencial. Os agricultores e agricultoras que cultivam espécies de ciclos de vida curtos podem consorciá-los com espécies de ciclos de vida intermediários, perenes ou uma diversidade de árvores (Bezerra *et al.*, 2019). A rotação sazonal de espécies, que atuam como “pontes temporais” nas redes de interação planta-polinizador, aumenta a disponibilidade de recursos para os polinizadores ao longo do tempo, melhorando a estabilidade do serviço de polinização na unidade de cultivo (Chakraborty *et al.*, 2021). Além disso, espécies de culturas manejadas podem, potencialmente, apoiar espécies não-cultivadas locais ameaçadas por meio do aumento da abundância de polinizadores (Wei *et al.*, 2021). Portanto, investir em pesquisas sobre como a polinização funciona em consórcios pode render ganhos, tanto em nossa compreensão dos efeitos indiretos nas interações planta-planta, quanto na produtividade do campo de cultivo.

Além disso, pesquisas recentes mostram que as plantas podem sentir o ambiente para detectar a identidade do vizinho e possíveis ameaças (Bilas *et al.*, 2021). No entanto, não temos conhecimento sobre como a detecção mediada por voláteis afeta a floração e as características das flores (Ninkovic *et al.*, 2021). Para explorar efetivamente essa ferramenta potencial, é importante estudar como a detecção de voláteis nas plantas afeta a produção de voláteis de flores, a floração e o investimento de recursos em flores (número de flores ou proporções de flores masculinas/femininas). Assim, pesquisas nesse sentido prometem informações importantes sobre como diferentes combinações de plantas em agroecossistemas afetam a biologia floral, a reprodução e a produtividade.

Agricultoras e agricultores levam em consideração uma variedade de fatores ao escolher quais culturas cultivar, como a preferência alimentar local/regional, a disponibilidade de

sementes, o acesso ao mercado e requisitos de mão de obra. O conhecimento ecológico para o manejo de agroecossistemas que descrevemos acima, pode ser uma ferramenta adicional ao planejamento de agroecossistemas funcionais mais autônomos. Esses processos podem ser adaptados para atender às necessidades de diferentes realidades locais, onde as pessoas escolhem dentre uma variedade de culturas, dependendo dos aspectos sociais, econômicos, ecológicos e culturais de suas comunidades. Muito do conhecimento que listamos já está disponível, embora também esteja desaparecendo rapidamente dentro dos sistemas tradicionais de conhecimento (Fletcher *et al.*, 2021). Acreditamos que parte do nosso papel como cientistas é entender os mecanismos por trás de muitas das bem-sucedidas misturas de culturas, usando uma abordagem horizontal que incorpora diferentes sistemas de produção de conhecimento. Se quisermos melhorar a sustentabilidade e a qualidade de nossos sistemas de produção de alimentos e obter segurança alimentar para todas e todos, devemos avançar para sistemas de produção intensivos com conhecimentos que promovam e conservem a diversidade de interações planta-polinizador em qualquer escala (Nicholls e Altieri, 2013). Para isso, é fundamental entender a polinização como um serviço ecossistêmico autônomo e impulsionado pela biodiversidade que emerge por meio do manejo de agroecossistemas.

Copyright (©) 2024 Gabriela Rabeschini, Carlos Eduardo Pereira Nunes e Martin Pareja.

REFERÊNCIAS

BADILLO-MONTAÑO, Raul; AGUIRRE, Armando; MUNGUÍA-ROSAS, Miguel A. Pollinator-mediated interactions between cultivated papaya and co-flowering plant species. **Ecology and evolution**, v. 9, n. 1, p. 587-597, 2019.

BERGAMO, Pedro J. *et al.* Pollination outcomes reveal negative density-dependence coupled with interspecific facilitation among plants. **Ecology letters**, v. 23, n. 1, p. 129-139, 2020.

BEZERRA, Leile P.; *et al.* Participatory construction in agroforestry systems in family farming: ways for the agroecological transition in Brazil. **Agroecology and sustainable food systems**, v. 43, n. 2, p. 180-200, 2019.

BILAS, Roza D.; BRETMAN, Amanda; BENETT, Tom. Friends, neighbours and enemies: an overview of the communal and social biology of plants. **Plant, Cell & Environment**, v. 44, n. 4, p. 997-1013, 2021.

BLÜTHGEN, Nico; KLEIN, Alexandra M. Functional complementarity and specialisation: the role of biodiversity in plant–pollinator interactions. **Basic and Applied Ecology**, v. 12, n. 4, p. 282-291, 2011.

BORCHARDT, Kate E. *et al.* Plant-pollinator conservation from the perspective of systems-ecology. **Current Opinion in Insect Science**, p. 2214-5745, 2021.

CARTAR, Ralph V. Resource-tracking by bumble bees: What explains local responses to density of bergamot (*Monarda fistulosa*) flowers?. **Ecoscience**, v. 16, n. 4, p. 470-475, 2009.

CARVALHEIRO, Luísa G. *et al.* The potential for indirect effects between co-flowering plants via shared pollinators depends on resource abundance, accessibility and relatedness. **Ecology letters**, v. 17, n. 11, p. 1389-1399, 2014.

CHAKRABORTY, Pushan *et al.* Seasonal dynamics of plant pollinator networks in agricultural landscapes: how important is connector species identity in the network?. **Oecologia**, v. 196, p. 825-837, 2021.

CHAPAGAIN, Tejendra; LEE, Elizabeth A.; RAIZADA, Manish N. The Potential of Multi-Species Mixtures to Diversify Cover Crop Benefits. **Sustainability**, v. 12, n. 5, p. 2058, 2020.

EDITORIAL. To end hunger, science must change its focus. (2020, October 15). **Nature**, v. 586, p. 336-336. 2020.

FLETCHER, Michael-Shawn *et al.* Indigenous knowledge and the shackles of wilderness. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 118, e2022218118, 2021.

GARIBALDI, Lucas A. *et al.* EDITOR'S CHOICE: REVIEW: Trait matching of flower visitors and crops predicts fruit set better than trait diversity. **Journal of Applied Ecology**, v. 52, n. 6, p. 1436-1444, 2015.

GEMMILL-HERREN, Barbara *et al.* Conservation of natural and semi-natural habitat providing resources for pollinators. In **Towards sustainable crop pollination services: Measures at field, farm and landscape scales**, p.151-158, FAO, 2020.

GHAZOUL, Jaboury. Floral diversity and the facilitation of pollination. **Journal of ecology**, v. 94, n. 2, p. 295-304, 2006.

INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES - IPBES. Assessment report on pollinators, pollination and food production. Potts S.G., Imperatriz-Fonseca V.L., Ngo H.T. (eds). **Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services**, Bonn, p. 552, 2016.

KURIAKOSE, Giby; SINU, Palatty A.; SHIVANNA, K.R. Domestication of cardamom (*Elettaria cardamomum*) in Western Ghats, India: divergence in productive traits and a shift in major pollinators. **Annals of Botany**, v. 103, n. 5, p. 727-733, 2009.

LAHA, Supratim *et al.* Exploring the importance of floral resources and functional trait compatibility for maintaining bee fauna in tropical agricultural landscapes. **Journal of Insect Conservation**, v. 24, n. 3, p. 431-443, 2020.

LI, Kevin *et al.* Critical factors limiting pollination success in oil palm: A systematic review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 28, p. 152-160, 2019.

LOSAPIO, Gianalberto *et al.* Plant interactions shape pollination networks via nonadditive effects. **Ecology**, v. 100, n. 3, e02619, 2019.

LOWDER, Sarah K.; SKOET, Jakob; SINGH, Saumya. What do we really know about the number and distribution of farms and family farms in the world. **Background paper for the State of Food and Agriculture**, v. 8, p. 1-45, 2014.

MAAS, Bea *et al.* Transforming Tropical Agroforestry towards High Socio-Ecological Standards. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 35, p. 1049-1052, 2020.

NICHOLLS, Clara I.; ALTIERI, Miguel A. Plant biodiversity enhances bees and other insect pollinators in agroecosystems. A review. **Agronomy for Sustainable development**, v. 33, n. 2, p. 257-274, 2013.

NINKOVIC, Velemir; MARKOVIC, Dimitrije; RENSING, Merlin. Plant volatiles as cues and signals in plant communication. **Plant, Cell & Environment**, v. 4, n. 4, p. 1030-1043, 2021.

PERALTA, Guadalupe *et al.* Trait matching and phenological overlap increase the spatio-temporal stability

and functionality of plant–pollinator interactions. **Ecology letters**, v. 23, n. 7, p. 1107-1116, 2020.

PEREIRA FILHO, Antonio *et al.* Nutrient cycling in multifunctional agroecosystems with the use of plant cocktail as cover crop and green manure in the semi-arid. **African Journal of Agricultural Research**, v. 14, n. 5, p. 241-251, 2019.

RABESCHINI, Gabriela; NUNES, Carlos E. P.; PAREJA, Martin. The power of sister crops: intercropping courgette and common bean changes floral morphology and increases diversity of flower visitors. **Biodiversity**, v. 24, n. 1-2, p. 55-65, 2023.

RAHAYU, S.K.; WIJAYANTI, R; PUTRI, R.B.A. Diversity of flower visiting insects on intercropping between soybean and sunn hemp (*Crotalaria juncea*). **Indonesian Journal of Entomology**, v. 15, n. 1, p. 23-30, 2018.

VARAH, Alexa *et al.* Temperate agroforestry systems provide greater pollination service than monoculture. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 301, n. 1, p. 107031, 2020.

VÁZQUEZ, Diego P.; CHACOFF, Natacha P.; e CAGNOLO, Luciano. Evaluating multiple determinants of the structure of plant–animal mutualistic networks. **Ecology**, v. 90, n. 8, p. 2039-2046, 2009.

VENJAKOB, Christine; *et al.* Plant diversity increases spatio-temporal niche complementarity in plant–pollinator interactions. **Ecology and evolution**, v. 6, n. 8, p. 2249-2261, 2016.

WEI, Na *et al.* Pollinators contribute to the maintenance of flowering plant diversity. **Nature**, v. 597, n. 7878, p. 688-692, 2021.

YANG, Chun-F.; WANG, Qing-F.; GUO, You-H. Pollination in a patchily distributed lousewort is facilitated by presence of a co-flowering plant due to enhancement of quantity and quality of pollinator visits. **Annals of botany**, v. 112, n. 9, p. 1751-1758, 2013.

YE, Zhong-M. *et al.* Competition and facilitation among plants for pollination: can pollinator abundance shift the plant–plant interactions? **Plant Ecology**, v. 215, n. 1, p. 3-13, 2014.