

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM

BIODIVERSIDADE

CRISTIANE DE SOUZA PAULINO

**PANORAMA GLOBAL DA POLINIZAÇÃO DE CULTURAS DE FABACEAE E
INFLUÊNCIA DA POLINIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DO FEIJÃO-COMUM
(*Phaseolus vulgaris* L., FABACEAE)**

**RECIFE
2023**

CRISTIANE DE SOUZA PAULINO

**PANORAMA GLOBAL DA POLINIZAÇÃO DE CULTURAS DE FABACEAE E
INFLUÊNCIA DA POLINIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DO FEIJÃO-COMUM
(*Phaseolus vulgaris* L., FABACEAE)**

**Tese de doutorado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Biodiversidade da Universidade
Federal Rural de Pernambuco,
como requisito para obtenção do título
de Doutora em Biodiversidade.**

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Cibele Cardoso de Castro

**Coorientadores: Prof. Dr. Natan Messias de Almeida e Prof. Dr. Emmanuel Santa-
Martinez**

**RECIFE-PE
2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P195p

Paulino, Cristiane

PANORAMA GLOBAL DA POLINIZAÇÃO DE CULTURAS DE FABACEAE E INFLUÊNCIA DA
POLINIZAÇÃO NA PRODUÇÃO DO FEIJÃO-COMUM (*Phaseolus vulgaris* L., FABACEAE) / Cristiane Paulino. - 2023.
125 f. : il.

Orientadora: Cibele Cardoso de Castro.

Coorientador: Natan Messias de Almeida.

Inclui referências.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade,
Recife, 2023.

1. polinização agrícola. 2. serviços ecossistêmicos. 3. abelhas. 4. leguminosas. 5. feijão. I. Castro, Cibele Cardoso de,
orient. II. Almeida, Natan Messias de, coorient. III. Título

CDD 333.95

Grupo de Pesquisa: Ecologia Reprodutiva de Angiospermas**Orientadora:** Cibele Cardoso de Castro

Titulação: Doutorado (2001)

Departamento de Biologia

Área: Botânica

CPF: 182.172.618-90

E-mail: cibele.castro@ufape.edu.br

Data de nascimento: 14/08/70

Bolsista CNPq: Sim

Coorientador: Prof. Dr. Natan Messias de Almeida

Titulação: Doutorado (2014)

Universidade Estadual de Alagoas-Campus de Palmeira dos Índios

CPF: 038.893.724-65

E-mail: natanmessias@yahoo.com.br

Data de nascimento: 16/03/1983

Bolsista CNPq: Não

Coorientador: Prof. Dr. Emmanuel Santa-Martinez

Titulação: Doutorado (2017)

Salt Lake Community – Estados Unidos

E-mail: esantamartinez@gmail.com

Data de nascimento: 09/11/1989

Bolsista CNPq: Não

*Tentar e falhar é, pelo menos,
aprender. Não chegar a tentar é
sofrer a inestimável perda do que
poderia ter sido.”*

Geraldo Eustáquio de Souza

DEDICATÓRIA

À Deus.
Minha família.
Aos amigos.
Por toda compreensão,
carinho e paciência que
sempre tiveram comigo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo término da pesquisa.

Ao meu companheiro Renan por ter me acompanhado em campo.

Aos alunos do PIBIC Beatriz , Henrique e Ítalo por terem me acompanhado sempre que possível ao campo.

Aos produtores, sempre acolhedores, cedendo os ambientes para este estudo.

Em especial, agradeço imensamente a minha orientadora Cibele Cardoso de Castro que além de abrir as portas da sua casa para que eu pudesse fazer o trabalho de campo em Garanhuns, me ajudou nos momentos mais turbulentos com sua empatia, paciência e anizade durante a fase do doutorado.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram de alguma forma com a elaboração e construção desse trabalho.

A todos vocês o meu muito obrigada.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	v
AGRADECIMENTOS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	11
LISTA DE FIGURAS.....	12
RESUMO.....	15
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1 Revisão sobre a biologia reprodutiva de espécies cultivadas no Brasil.....	19
2.2 Família Fabaceae e sua importância econômica.....	20
2.3 <i>Phaseolus vulgaris</i> L. - Aspectos botânicos e ecológicos.....	21
2.4 Vingamento floral do feijão e fatores climáticos.....	23
2.5 Importância econômica do feijão.....	26
2.6 Paisagem - A importância da vegetação nativa para manutenção ecossistêmica.....	27
2.7 Polinização.....	28
2.7.1 Importância da polinização para as culturas agrícolas.....	28
2.7.2 Declínio dos polinizadores e limitação polínica.....	32
2.7.3 Manejo de polinizadores.....	34
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
Article 1.....	61
Global meta-network of legume crops and floral visitors reveals abundance of exotic bees.....	62
Abstract.....	65

1.Introduction.....	65
2. Materials and methods.....	67
2.1 Literature review.....	67
2.2 Analysis.....	68
3. Results.....	70
3.1 Literature review and species composition.....	70
3.2 Meta-network of interactions.....	70
4. Discussion.....	71
5. Conclusions.....	76
6. Conflict of Interest Statement.....	77
7. Author Contribution.....	77
8. Data Availability Statement.....	77
9. References.....	78
Appendix 1. Floral visitors recorded in legumes of economic importance.....	101
Article 2.....	106
Influence of animal pollination in the common bean (<i>Phaseolus vulgaris</i> L., Fabaceae)	
production and seed germination.....	106
Abstract.....	108
1. Introduction.....	109
2.Materials and methods.....	110
2.1 Study areas and crop variety.....	111
2.2 Climate data.....	112
2.3 Floral biology.....	112
2.4 Breeding system and seed germination.....	113
2.5 Frequency of visits and visiting behavior.....	114
2.6 Data analysis.....	114

3.Results.....	114
3.1 Climate data.....	114
3.2 Floral biology and sexual system.....	114
3.3 Mating system and seed germination.....	115
4. Discussion.....	122
5.Conclusions.....	124
6. Acknowledgements.....	125
7. Funding.....	125
8. References.....	125

LISTA DE TABELA

Table 1. Number (and percentage of total) of floral visitor species of different taxonomic groups that interacted with legumes of economic importance in the world. Lepidop: Lepidoptera; Coleop: Coleoptera; Chirop: Chiroptera; Apodif: Apodiformes (hummingbirds); Thysan: Thysanoptera; Hemip: Hemiptera.....94

Table 2: Legumes of economic importance and pollinators with the largest number of partners in the world. We included only two species as pollinators because of the high number of species recorded with three partners.....95

LISTA DE FIGURAS

Article 1

Figure 1. Global distribution of studies that focused on floral visitation of legumes of economic importance96

Figure 2. Number of studies that focused on floral visitation of legumes of economic importance along decades in the world.....97

Figure 3. Structure of the modular meta-network representing legumes of economic importance and their pollinators around the world. Squares: plants; circles: bee; diamonds: lepidopterans; triangles: other pollinators; Ara_hyp: *Arachis hypogaea* (peanut); Cic_ari: *Cicer arietinum* (chickpea); Caj_caj: *Cajanus cajan* (pigeon pea); Cop_lan: *Copaifera langsdorffii* (diesel tree); Dip_ala: *Dipteryx alata* (baru nut); Gl_max: *Glycine max* (soybean); Gli_sep: *Gliricidia sepium* (gliricidia); Gly_wig: *Glycine wightii* (perennial soybean); Hym_sti: *Hymenaea stignocarpa*; Med_sat: *Medicago sativa* (alfalfa); Pha_coc: *Phaseolus coccineus* (runner bean); Pha_vul: *Phaseolus vulgaris* (common bean); Pis_sat: *Pisum sativum* (pea); Vic_fab: *Vicia faba* (faba bean); Vig_ung: *Vigna unguiculata* (cowpea).....98

Figure 4. Correlation graph showing the association and disassociation power of the pollinator and eight modules detected in the meta-net of interactions between legumes of economic importance and pollinators around the world. Positive values in blue indicate attraction/association, and negative values in red indicate disassociation with the module.....99

Figure 5. Roles of species in the meta network of interactions between legumes of economic importance and pollinators around the world according to their degree within the module (z) and connectivity between modules (c) of each species in each group. We used the values of 2.5 for z and 0.62 for c in order to determine the role of each species (lines in $z = 2.5$ and $c = 0.62$ define the role of species).....100

Article 2

Figure 1. Areas of common bean (<i>Phaseolus vulgaris</i> ‘mulatinho’ variety, Fabaceae) planting in NE Brazil: Garanhuns (A: 8°56’41”S and 36°32’56” – 2017, 2018) and São João (B: 8°49’16”S e 36°22’44”W - 2017; C: 8°52’11”S 36°25’43”W – 2017 and 2018; D: 8°52’18” S and 36°26’52”W- 2018). Images obtained in Google Earth version 9.2.91.0 and camera od approx. 2.000m	112
Figure 2. Flower of the common bean (<i>Phaseolus vulgaris</i> , ‘mulatinho’ variety, Fabaceae). Arrow: keel petal, which cover both stamens and pistil	116
Figure 3 – Fruit morphometry and number of seed of the common bean (<i>Phaseolus vulgaris</i> , ‘mulatinho’ variety, Fabaceae) in four planting areas in NE Brazil along two consecutive planting seasons	118
Figure 4. Seed length (mm), width (mm) and weight (kg) of the common bean (<i>Phaseolus vulgaris</i> , ‘mulatinho’ variety, Fabaceae) in four planting areas in NE Brazil along two consecutive planting seasons... ..	119
Figure 5 – Seed germination rate of the common bean (<i>Phaseolus vulgaris</i> , ‘mulatinho’ variety, Fabaceae) in four planting areas in NE Brazil along two consecutive planting seasons... ..	120
Figure 6. Floral visitors of the common bean (<i>Phaseolus vulgaris</i> , ‘mulatinho’ variety, Fabaceae) in four planting areas in NE Brazil along two consecutive planting seasons. A: <i>Urbanus dorantes</i> ; B: <i>Urbanus proteus</i> ; C: Lepidoptera; D: Formicidae; E: <i>Trigona</i> cf. <i>spinipes</i> ; F: <i>Xylocopa</i> sp.	122
Figure 7. Number of floral visitor species of the common bean (<i>Phaseolus vulgaris</i> , ‘mulatinho’ variety, Fabaceae) in four planting areas in NE Brazil along two consecutive planting seasons... ..	122

Figure 8. Number of floral visits to the common bean (*Phaseolus vulgaris*, ‘mulatinho’ variety, Fabaceae) in four planting areas in NE Brazil along two consecutive planting seasons.123

RESUMO -[Panorama global da polinização de culturas de Fabaceae e influência da polinização na produção do feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L., Fabaceae)]. A família Fabaceae é um dos maiores e mais importantes grupos botânicos do mundo, com espécies de grande valor econômico, seja para a alimentação humana ou para animais. Suas espécies também desempenham valioso papel ecológico, pois sustentam populações de polinizadores (especialmente abelhas), em ambientes tropicais e temperados. A polinização é considerada um dos mais importantes serviços ecossistêmicos porque favorece a produção agrícola de mais de 70% das espécies cultivadas. Entretanto, nos últimos anos os polinizadores estão em declínio, resultando em uma já registrada redução na produção agrícola. Há poucos estudos relacionados aos requerimentos reprodutivos de espécies cultivadas de Fabaceae, e não há estudos que compilem e analisem estatisticamente as informações já publicadas sobre o tema. Dentre as Fabaceae cultivadas destaca-se o feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L., Fabaceae), que tem importância ao redor do mundo e, especialmente, no Brasil, país considerado um dos maiores produtores e consumidores mundial desta leguminosa. Assim como ocorre para as demais espécies da família, os requerimentos reprodutivos do feijoeiro são pouco estudados, não havendo um consenso sobre o sistema reprodutivo (autogamia para alogamia) e não estando claro o papel e importância dos polinizadores para a produção. A presente tese tem como objetivos: 1) Integrar dados de polinização através de uma meta-rede em espécies cultivadas de Fabaceae (hipóteses: há predominância de abelhas na polinização e há diferença de estudos conduzidos entre ambientes tropicais e temperados); 2) Analisar a influência da polinização na produção do feijão-comum (*Phaseolus vulgaris*), usando plantios no Agreste Meridional de Pernambuco como modelo. Para o primeiro objetivo, foi realizado um levantamento bibliográfico sistemático em bases de dados e acervos pessoais. Foram coletadas informações sobre os visitantes florais, espécie botânica e domínio climático (temperado-tropical). E, para isso, foram acessados 78 trabalhos (compreendidos em seis décadas) com informações de quinze espécies de leguminosas e 208 visitantes florais. A matriz de interação incluiu 3120 interações. Foram encontrados oito módulos, onde a maioria dos polinizadores e todas as plantas estão incluídas como

periféricas. Não houve diferença na proporção de estudos conduzidos em regiões tropicais e temperadas. Os visitantes florais mais representativos foram as abelhas, principalmente as espécies de caráter generalista. Entretanto, as leguminosas de importância econômica mostraram-se significativas para manter uma fauna diversificada de polinizadores. Para o segundo objetivo, dados de campo de sistema reprodutivo, limitação polínica e polinização foram coletados em duas safras. As seguintes variáveis-resposta foram inseridas nas análises: número, morfometria e peso de frutos, número, morfometria, peso e germinação de sementes. Foram calculados a eficiência reprodutiva e o índice de limitação polínica. Frutos, medidas, peso e germinação oriunda de autopolinização espontânea apresentaram valores maiores em relação à polinização cruzada manual. A eficiência reprodutiva foi alta, e houve limitação polínica apenas em um ano. As flores do feijão receberam visitas de vários grupos de insetos, sendo borboletas o mais frequente. Como nenhum foi considerado polinizador efetivo, não pudemos testar a hipótese de que a produção é favorecida pelos polinizadores. A falta de polinizadores pode ser explicada pelas baixas temperaturas e pela alteração de habitats. O feijão pode ser considerado uma cultura-chave diante da atual crise mundial dos polinizadores, pois não depende de polinizadores para produzir alimento e sustenta populações de vários grupos de insetos.

Palavras-chave: feijão-comum, limitação polínica, autocompatível, Fabaceae

1. INTRODUÇÃO GERAL

Os polinizadores são agentes indispensáveis para as culturas agrícolas, uma vez que seu papel de promover a polinização cruzada contribui para melhorar a qualidade e quantidade de frutos e sementes e, conseqüentemente, propicia um maior rendimento na produção (GARIBALDI *et al.*, 2020). O potencial da polinização como serviço ecossistêmico pode ser ressaltado quando associado à produção de alimentos. A primeira valoração econômica global do serviço ecossistêmico da polinização apontou o montante de US\$ 70 bilhões/ano (Costanza *et al.*, 1997). Mais recentemente, esse serviço ecossistêmico foi avaliado em € 153 bilhões (Gallai *et al.*, 2009). Esse número foi atualizado no Relatório de Avaliação sobre Polinizadores, Polinização e Produção de Alimentos da IPBES, sendo estimado entre US\$ 235 bilhões e US\$ 577 bilhões (IPBES, 2016). No Brasil, calcula-se que a polinização relacionada à produção agrícola tem um valor anual de US\$ 12 bilhões (Giannini *et al.*, 2015b).

Entretanto, devido principalmente às ações antrópicas, o serviço ecossistêmico da polinização encontra-se em declínio (POTTS *et al.*, 2010; LEVY, 2011). Dentre as ações antrópicas que conhecidamente afetam os polinizadores estão o uso indiscriminado de agrotóxicos e a alteração de habitats (GRAB *et al.*, 2019; SGROI *et al.*, 2018), introdução de espécies exóticas e patógenos (ROSA *et al.*, 2019). Além disso, as mudanças climáticas afetam a distribuição geográfica dos polinizadores (ELIAS *et al.*, 2017). Tal declínio tem afetado a produção agrícola mundial, (PALMER *et al.*, 2004; RICKETTS *et al.*, 2008; PINHEIRO; FREITAS, 2010; IMPERATRIZ-FONSECA *et al.*, 2012; ELLIS; MYERS; RICKETTS, 2015), com uma perda econômica em torno de 43 bilhões de dólares/ano no mundo e 12 milhões de dólares/ano no Brasil, uma vez que a presença de polinizadores favorece, de maneira geral, vários aspectos da produção (ASHWORTH *et al.*, 2009; VAISSIÈRE *et al.*, 2011).

Para tentar minimizar os danos causados pela crise dos polinizadores, práticas de manejo são indicadas para a atração ou manutenção dos polinizadores em áreas cultivadas, como: a preservação das áreas de vegetação nativa próximas a campos de agricultura (BOMMARCO *et al.*, 2012; WITTER *et al.*, 2014; MOREIRA; BOSCOLO; VIANA, 2015; SILVA *et al.*, 2018), estratégias para

aumentar a visitação em cultivares (por exemplo, uso de essências) e/ou inclusão de colmeias (POTTS *et al.*, 2010; WOŁOWSKI *et al.*, 2019).

Uma das famílias botânicas que mais se beneficia com o serviço de polinização é Fabaceae, sendo considerada uma das maiores e mais importantes Angiospermas do mundo, apresentando distribuição cosmopolita (LEWIS *et al.*, 2005). Agrega grande valor econômico por ser utilizada na alimentação humana e animal, como por exemplo, *Phaseolus vulgaris* (feijão-comum) e *Medicago sativa* L (alfafa), respectivamente (WATSON; DALLWITZ, 2009). Além disso, as espécies que compõem essa família desempenham serviços ecossistêmicos importantes, suas flores e frutos são recursos essenciais para a fauna (GOULSON *et al.*, 2011) e, na agricultura, são amplamente utilizadas como adubos naturais (LEWIS, 1987).

Espécies da família Fabaceae são mais comumente polinizadas por abelhas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS ESTUDOS COM ABELHAS, 2015). Nas regiões tropicais, as abelhas nativas sem ferrão que pertencem à família Apidae e à tribo Meliponini são as mais expressivas (SILVEIRA *et al.*, 2002; PEDRO, 2014), apesar de algumas ocorrências em regiões temperadas (MICHENER, 2007). As famílias Andrenidae e Colletidae são mais diversificadas nas regiões temperadas (MICHENER, 1979; ROUBIK, 1989; SILVEIRA *et al.*, 2002; SCHLINDWEIN *et al.*, 2006) e, quando não ausentes, são pouco presentes nas regiões tropicais.

Entre as espécies da família Fabaceae, o feijão (*Phaseolus vulgaris* L., Fabaceae), uma das mais importantes culturas no Brasil e no mundo; o Brasil é considerado um dos maiores produtores e consumidores globais (CONAB, 2019). A cultura desse grão apresenta uma importância que extrapola o aspecto econômico do país, devido à sua relevância como componente cultural e alimentício, podendo ser considerado, de acordo com Barbosa e Gonzaga (2012), um dos pilares da dieta brasileira. A importância da polinização no cultivo do feijão é controversa: alguns estudos sugerem que não há diferença significativa na produtividade quando culturas são expostas ou não aos insetos polinizadores (MCGREGOR, 1976; DELAPLANE; MAYER, 2000); outros afirmam que há aumento do número e melhoramento nutricional dos grãos quando as flores recebem as visitas desses animais (KASINA *et al.*, 2009b; MASIGA *et al.*, 2014). Além dos aspectos relacionados à polinização, há também

controvérsias sobre a estratégia reprodutiva: alguns autores assinalam a autogamia preferencial da espécie (VIEIRA; PAULA-JÚNIOR; BORÉM, 2011), outros asseguram que há predominância da alogamia (KINGHA et al., 2012). Dentre os principais polinizadores do feijão destacam-se as abelhas (*Apis mellifera*, *Bombus atratus*, *B. opifex*, *Xylocopa calens*, *X. Incostans*, *X. olivacea*, *Megachile* sp., *Centris* sp., dentre outras (BLISS, 1980; BORÉM, 1999; HOC; GARCIA, 1999; IBARRA-PEREZ et al., 1999; PALMER, 2004; KASINA et al., 2009c; MASIGA et al., 2014; KINGHA et al., 2012).

Partindo das premissas de que trabalhos de revisão sobre polinização são importantes para a identificação de padrões reprodutivos de culturas, especialmente no Brasil, um país tipicamente agrícola, porém são escassos; que a compreensão dos requerimentos reprodutivos de espécies cultivadas e sua associação a fatores abióticos é fundamental para avaliar se estão atingindo seu máximo produtivo; e que o feijão é uma das culturas mais importantes no Brasil e no mundo, porém com dados conflitantes sobre sua reprodução. Portanto, a presente tese tem como objetivos: 1) Integrar dados de polinização através de uma meta-rede em espécies cultivadas de Fabaceae (hipóteses: há predominância de abelhas na polinização e há diferença no número de estudos conduzidos entre ambientes tropicais e temperados); 2) Analisar a influência da polinização e de fatores abióticos e de paisagem na produção do feijão-comum (*Phaseolus vulgaris*), usando plantios situados no Agreste Meridional de Pernambuco, Brasil, como modelo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Revisão sobre a biologia reprodutiva de espécies cultivadas no Brasil

Problemas envolvendo a biologia reprodutiva em sistemas de cultivo já foram relatados como, por exemplo, o declínio de polinizadores (POTTS, 2010; GEMMILL-HERREN, 2016). Tais trabalhos mostram a urgência de estabelecer medidas eficazes para a proteção de polinizadores e seus habitats, e consequentemente garantir a produção agrícola mundial. Uma alternativa viável para colaborar com o conhecimento e reduzir o déficit de polinização de espécies cultiváveis, seria um estudo que compilasse os requerimentos reprodutivos, identificação de polinizadores mais eficientes e respectivo comportamento de forrageamento de espécies cultivadas. Esses estudos permitem desenvolver estratégias específicas envolvendo proteção e restauração do habitat dos polinizadores (SHULER et

al., 2005). Entretanto, estudos com esse enfoque são raros.

O primeiro estudo que tentou formalizar um banco de dados contendo informações revisadas sobre polinizadores de espécies cultivadas no Brasil é o de Giannini et al. (2015 a,b). Anteriormente, existia apenas um estudo pioneiro envolvendo essa interação planta-polinizador que foi proposto por Free (1993), mas não contemplava um banco de dados. O site da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) reúne informações sobre essas interações, mas também não estão disponíveis de forma compilada. Outro estudo incluindo revisão literária publicado recentemente foi o de García et al. (2016), onde fizeram um levantamento com o intuito de verificar qual a tendência de publicações sobre o assunto. Contudo, esse trabalho não engloba especificamente a importância dos polinizadores para cada cultivar. Recentemente, foi lançado o primeiro Relatório Temático sobre Polinização, Polinizadores e Produção de Alimentos no Brasil (BNBES, 2019), onde agrega informações sobre a importância da polinização para diversas culturas brasileiras

2.2 Família Fabaceae e sua importância econômica

Fabaceae constitui uma das maiores e mais importantes famílias de Angiospermas do mundo, constituída por cerca de 727 gêneros e 19.325 espécies (LEWIS et al., 2005). É considerada a terceira maior família botânica do planeta e a maior do Brasil, com 3.033 espécies e 253 gêneros, com 1.588 espécies e 18 gêneros endêmicos (FLORA E FUNGA DO BRASIL, 2023). Apresentam distribuição cosmopolita, ocorrendo em todos os biomas terrestres, estando apenas ausentes na Antártida e nas altas latitudes das margens do Ártico (STEVENS, 2006).

O valor econômico expressivo dessa família é devido ao grande número de espécies vegetais utilizadas como fonte de produtos alimentares, medicinais, ornamentais, madeireiros e fornecedores de forragem, fibras, corantes, gomas, resinas e óleos (DI STASI; HIRUMA-LIMA, 2002; WATSON; DALLWITZ, 2009), sendo considerada a segunda de maior valor econômico (JUDD et al. 2009).

As leguminosas são culturas alimentares respeitáveis que fornecem produtos com grande teor de proteínas e micronutrientes, beneficiando a saúde e os meios de subsistência, principalmente nos países em desenvolvimento (YAHARA et al., 2013).

Dentre as espécies de grande valor econômico e alimentício, destacam-se: *Glycine max* (soja),

Phaseolus vulgaris (feijão), *Vicia faba* (feijão fava), *Vigna unguiculata* (feijão caupi), *Cajanus cajan* (feijão guandu), *Tamarindus indica* (Tamarindo), *Pisum sativum* (ervilha), *Cicer arietinum* (grão-de-bico), *Medicago sativa* (alfafa), *Arachis hypogaea* (amendoim) e *Ceratonia siliqua* (alfarroba).

As espécies que compõem Fabaceae também desempenham um valioso papel ecológico para o ecossistema. Várias leguminosas são boas fornecedoras de néctar, como exemplos, a alfafa (*Medicago sativa*) e o trevo branco (*Trifolium repens*) recurso que atrai visitantes florais e facilita o processo de polinização. Além disso, constituem importante fonte de pólen para a espécie *Bombus hortorum*, de grande importância para a polinização de várias culturas e de árvores de fruto (GOULSON *et al.*, 2011). Essas plantas são bem adaptadas à colonização inicial de uma área e a exploração/estabelecimento de diversos ambientes, devido, em parte, às suas associações com bactérias fixadoras de nitrogênio ou com ectomicorrizas (LEWIS, 1987). Essas leguminosas são valiosíssimas como adubos naturais, uma vez que as bactérias do gênero *Rhizobium*, localizadas em nódulos radiculares encontrados em muitas espécies, convertem o nitrogênio atmosférico em amônia, forma solúvel que pode ser utilizada por outras plantas (LEWIS, 1987; SPRENT, 2001).

2.3 *Phaseolus vulgaris* L. - Aspectos botânicos e ecológicos

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris* L., Fabaceae) é uma espécie herbácea e a mais importante dentro das cinco mais cultivadas do gênero, por ser a mais antiga e a mais cultivada nos cinco continentes (SANTOS; GAVILANES, 2008). Essa leguminosa era cultivada no antigo Egito e na Grécia, sendo também cultuada como símbolo da vida (LAJOLO; GENOVESE; MENEZES, 1996; EMBRAPA, 2010). Teve origem na América Central e na América do Sul, de onde surgiu grande variedade de grãos de diferentes cores, formas e tamanhos (GEPTS; DEBOUCK, 1991), sendo tais características visuais a base para a classificação das atuais classes comerciais de feijão.

Essa espécie possui flores zigomorfas, composta por uma quilha retorcida de duas pétalas, uma pétala maior (estandarte) e duas asas. O gineceu (com ovário multiovulado) e androceu (com dez estames) ficam dentro da quilha. As flores podem ser brancas, rosas ou roxas (GRAHAM; RANALI, 1997).

Quanto ao sistema reprodutivo, *Phaseolus vulgaris* é autocompatível, sendo alogâmica e autogâmica (IBARRA-PEREZ *et al.*, 1999; KINGHA *et al.*, 2012). Para Vieira, Paula-Júnior e

Borém (2011) a espécie tem como modo preferencial de reprodução a autogamia, favorecida pelo mecanismo de cleistogamia, devido à estrutura de suas flores que possuem anteras situadas no mesmo nível do estigma e envolvidas completamente pela quilha, possibilitando que os grãos de pólen caiam sobre o estigma por ocasião da deiscência das anteras. Entretanto, Hoc e Garcia (1999) afirmam que a *P. vulgaris* é preferencialmente alogâmica (atingindo 80% de êxito reprodutivo na presença de polinizadores) e protogínica, utilizando essa estratégia para obter pólen de outras flores no início da antese. Kingha *et al.*, (2012) também afirmam que há predominância de alogamia na reprodução da espécie.

De acordo com Bliss (1980), não existe partenocarpia e nem apomixia em *P. vulgaris* e a uniformidade de vagens é influenciada pela constância do conjunto de sementes: quando todos os óvulos são fertilizados, as vagens crescem uniformemente, dando ao produtor um fruto de primeira qualidade. Por outro lado, a polinização escassa resulta em menos óvulos em desenvolvimento, levando a vagens curvas que são rejeitadas durante a classificação de vagens comercializáveis. Embora os feijões sejam autocompatíveis (WHITE; IZQUIERDO, 1991; VIEIRA; PAULA-JÚNIOR; BORÉM, 2011), os visitantes florais podem aumentar a polinização da espécie (WELLS *et al.*, 1988; IBARRA-PEREZ *et al.*, 1997).

Os insetos, em especial as abelhas, geralmente aumentam o rendimento de frutos e de sementes de muitas espécies de plantas por meio da provisão da polinização (KELLER; WALLER, 2002; SABBAHI *et al.*, 2005; KLEIN *et al.*, 2007; TCHUENGUEM FOHOUE *et al.*, 2009). As abelhas são os polinizadores mais abundantes do feijão quando visitam suas flores para coletar pólen e néctar (BLISS, 1980; BORÉM, 1999; HOC; GARCIA, 1999; IBARRA-PEREZ *et al.*, 1999; PALMER, 2004; MASIGA *et al.*, 2014; KASINA *et al.*, 2009c; KINGHA *et al.*, 2012). Todavia, de acordo com Pinheiro e Farias (2005) as taxas de cruzamento natural do feijão no Brasil são baixas, inferiores a 1%. No exterior as taxas também não são elevadas, girando em torno de 4%. Contudo, esse fato não é regra, uma vez que Antunes, Costa e Oliveira (1973) obtiveram, em Pelotas, RS, cerca de 10,6% de cruzamento natural; já Brunner e Beaver (1988) mencionaram até 17,6% de fecundação cruzada, em Porto Rico; e Wells *et al.* (1988) obtiveram, na Califórnia, EUA, até 85%.

A família Apidae (*Apis* e *Xylocopa*) é a mais abundante nas visitas florais dos feijões (MASIGA

et al., 2014; KASINA *et al.*, 2009b; WIDHIONO; SUDIANA; DARSONO, 2017). Contudo, a exposição de plantas de feijão à polinização com abelhas não resultou em maior produção de sementes secas no Reino Unido nem nos EUA (FREE 1966; MCGREGOR, 1976; DELAPLANE; MAYER, 2000). Em contradição, feijões polinizados por abelhas tiveram aumento do número e melhoramento nutricional de sementes colhidas (MASIGA *et al.*, 2014; KASINA *et al.*, 2009b). Entretanto, de acordo com Moreti *et al.* (1994) as abelhas *Apis melífera* só visitam os cultivares de feijão na falta de outras plantas que estejam floridas na área, além de não aumentarem o sucesso reprodutivo da espécie. Apesar de Masiga *et al.* (2014) afirmarem que o gênero *Apis* é o mais abundante, as espécies do gênero *Xylocopa* foram mais eficientes na polinização. Corroborando com os achados desse autor, Kingha *et al.* (2012) afirma que a taxa de frutificação atribuída à influência da *Xylocopa olivacea* foi de 63,31% quando comparadas as flores sem ação dessas abelhas. Já Ibarra-Perez *et al.* (1999) relataram que abelhas do gênero *Bombus* foram os polinizadores mais eficazes de *P. vulgaris* e suas visitas tiveram um efeito positivo na produção de sementes. Resultado que corrobora com os achados de McGrego (1976) para a América do Norte.

A maioria dos campos de cultivo de feijão possui ciclo vegetativo de 65 a 110 dias, sendo influenciado pela época do plantio e, nesse período, a planta deve ser abastecida de água e nutrientes (KLUTHCOUSKI; STONE; AIDAR, 2009). O surgimento das flores tem início, em geral, até 45 dias após a emergência das plântulas do solo e é variável de acordo com a precocidade do cultivar. A floração dura de 12 a 20 dias (VIEIRA; PAULA-JÚNIOR; BORÉM, 2011).

Os períodos de semeadura-colheita do feijão apresentam variações de ano para ano, com isso, a produção do feijão, embora distribuída ao longo do ano, necessita do armazenamento para garantir a oferta deste produto em todas as regiões do país, evitando a escassez na entressafra e diminuindo a oscilação de preços no mercado (BRACKMANN *et al.*, 2002).

2.4 Vingamento floral do feijão e fatores climáticos

No feijoeiro, nem todas as flores se transformam em frutos, sendo o número de vagens/planta um dos componentes primários da produção (e um dos mais importantes) (COSTA; ZIMMERMANN, 1988; GUILHERME *et al.*, 2015). Esse abortamento ocorre para ajustar a capacidade de suprimento de fotoassimilados com a demanda dos grãos, fazendo com que as vagens com reduzida capacidade

de demanda sejam abortados e, normalmente, as primeiras flores tem preferência na demanda de fotoassimilados necessários para o enchimento dos grãos, em relação aos frutos mais jovens (DIDONET; SILVA, 2004).

Trabalhos mostram que, em geral, o vingamento floral é baixo e o potencial produtivo da plantanem sempre é atingido. Ramalho e Ferreira (1979) o vingamento foi de apenas 28%; Izquierdo e Hosfield (1981) observaram que, em média, o vingamento floral foi de 39,5%; Reis, Ramalho e Cruz (1985), estudando feijão em consórcio com o milho, o vingamento foi de apenas 31% e que o vingamento floral médio dos feijoeiros consorciados foi inferior ao do monocultivo em 11%.

Inúmeros fatores afetam o vingamento floral, dentre eles, temperatura máxima muito elevada, temperatura mínima muito baixa, umidade do solo, umidade relativa do ar, nutrição mineral inadequada e ataque de insetos (FANCELLI, 2009; ZÍLIO *et al.*, 2011). O feijoeiro é considerado uma espécie muito exigente às condições climáticas, tendo seu desenvolvimento e produção diretamente afetados pelas temperaturas e índices pluviométricos extremos (VIEIRA *et al.*, 2008; LACERDA *et al.*, 2010).

Temperaturas elevadas na fase de antese reduzem o número de vagens e sementes no feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), devido a queda de botões florais, flores e vagens jovens (MONTERROSO; WIEN, 1990). Temperaturas superiores a 29°C podem provocar abortamento de flores e queda de vagens jovens, consequentemente uma redução no número de grãos (SILVA *et al.*, 2006), provocando depreciação na produção e produtividade (BALLARDIN; COSTA; RIBEIRO, 2000).

A temperatura atua de forma significativa as fases fenológicas e o rendimento dos grãos, por influenciarem no abortamento de flores, vagens e grãos; para germinar a semente, temperaturas em torno de 28° C são consideradas ótimas, já para a emergência e maturação fisiológica a temperatura fica em torno de 12°C e 30° C (DIDONET; SILVA, 2004), sendo a temperatura ótima 21° C (HEINEMANN *et al.*, 2009). Observou-se que em temperaturas superiores a 30°C, cultivares mais precoces tiveram maior relação com flores e vagens abortadas (HOFFMAN-JÚNIOR *et al.*, 2007).

No feijoeiro, a redução na produtividade de grãos decorrente de altas temperaturas tem sido relacionada à esterilidade do grão de pólen, redução na taxa de fertilização das flores e ao abortamento

de flores e de vagens (GROSS; KIGEL, 1994; PORCH; JAHN, 2001). O número de sementes em legumes é fortemente afetado por severo estresse térmico à semelhança do que ocorre na deficiência hídrica (GUILIONI et al., 2003), geralmente refletindo-se em menor número de sementes por vagem. No feijão, temperaturas diurnas acima de 30°C e noturnas superiores a 20°C provocam abortamento de órgãos reprodutivos, principalmente, flores e vagens em formação, causando prejuízo de até 75% na produção (KAY, 1979; SILVEIRA *et al.*, 1980; MARIOT, 1989; GONÇALVES *et al.*, 1997).

Baixas temperaturas também influenciam na redução **de** vingamento floral. Temperaturas abaixo de 10° C podem também provocar perdas na produtividade (DIDONET; SILVA, 2004). Farlow (1981) comprovou redução no número de vagens por planta em temperaturas inferiores a 11,4°C; o crescimento do tubo polínico foi retardado com a temperatura inferior a 16,7°C, ocasionando redução no vingamento, ocasionando abortamento de óvulos (FARLOW; BYTH; KRUGER; 1979; DICKSON; BOETTGER, 1984; PAULA JUNIOR; VENZON, 2007).

A demanda hídrica também influencia o vingamento floral (SILVEIRA; STONE, 1994). A produção de vagens do feijão é afetada principalmente em virtude da baixa capacidade de recuperação após a deficiência hídrica, pois possui um sistema radicular pouco desenvolvido (MIRANDA; BELMAR, 1977; GUIMARÃES, 1998; NASCIMENTO, 2009; MIORINI et al, 2011). Os danos causados dependem da duração e severidade do estresse, e também do estágio de desenvolvimento em que a planta se encontra (FOLEGATTI et al., 1997).

Miorini et al. (2011) afirmam que a produtividade do feijão é afetada negativamente quando o plantio sofre estresse hídrico na fase vegetativa (redução de 75,1% do número de vagens) e na floração (redução de 76,2% do número de vagens). Na fase de enchimento dos grãos, a redução foi em torno de 35,8%. Entretanto, a produtividade não é tão afetada quando a supressão de água ocorre na fase de maturação (redução de 5,4% do número de vagens) e na emergência (redução de 10,1 % do número de vagens). Karamanos et al. (1982) e Didonet e Silva (2004), asseguram que a ocorrência de estresse hídrico durante a fase vegetativa inicial leva à redução do crescimento e da superfície fotossintética, ocorrendo menor número de flores, de vagens por planta e de grãos por vagens. De acordo com Guimarães (1998), se o déficit ocorrer durante a floração, há indução de abortamento e queda das

flores, com redução do número de vagens por planta. Ainda de acordo com o mesmo autor, se o déficit ocorrer durante o enchimento de grãos, a formação de sementes será prejudicada e ocorrerá redução de seu peso. A necessidade de água do feijoeiro com ciclo de 60 a 120 dias, varia entre 300 a 500 mm para obtenção de alta produtividade (DOORENBOS; KASSAM, 1979; NETO; FANCELLI, 2000), e 340 a 370 mm (VIEIRA; PAULA-JÚNIOR; BORÉM, 2006). Entretanto, quando os valores de água são muito acima dos valores necessários a produtividade é afetada, isso porque de acordo com Barros et al. (2012), o feijão comum é uma planta sensível ao excesso hídrico do solo e a umidade excessiva do ar, sobretudo porque favorece o aparecimento de fungos causadoras de doenças radiculares. E por apresentar um sistema radicular relativamente curto, um período longo de encharcamento do solo pode apodrecer as raízes. Chuvas prolongadas no período de desenvolvimento da cultura provocam redução na produtividade, atrasa a colheita e provoca o acamamento das plantas, refletindo em baixo rendimento e na baixa qualidade dos grãos (HEINEMANN et al., 2009).

2.5 Importância econômica do feijão

De acordo com a FAO (2019), a produção mundial média de feijões no ano de 2017 foi de 31,4 milhões de toneladas, sendo as Américas o segundo maior produtor mundial (cerca de 25,2% da produção total) e o Brasil o terceiro país que mais produz feijões no mundo, correspondendo a 3,03 milhões de toneladas.

Segundo o 4º levantamento da produção brasileira de feijões da CONAB (2020), na safra de 2020/2021 houve produção de 3.145 t (-2,63%), área plantada de 2.925 mil ha (-0,07%) e produtividade 1.075 kg/ha (-2,57). Ainda de acordo com o CONAB (2020), no estado de Pernambuco foram cultivados 229 mil hectares de feijão, com uma produção de 103 mil toneladas e uma produtividade de 449,78 kg/ha.

Segundo informações do IBGE (2017), o Agreste Meridional de Pernambuco detém a maior produção de feijão no Estado, sendo que o município de São João assume o *ranking* com uma produção de 4800 t, seguido de Jupi e Calçado, 3920 t e 3630 t, respectivamente; Garanhuns ocupa a 14ª posição, com uma produção de 968 t. Quanto ao valor da produção, São João assume a primeira colocação com um valor de R\$ 10.320.000,00, seguido de Jupi (R\$ 9.850.000,00) e Calçado (R\$ 8.871.000,00); Garanhuns fica em 12ª colocação, com um valor aproximado de R\$ 2.600.000,00. Em relação à área plantada, São João lidera juntamente com Araripina, possuindo 12000 ha e Garanhuns assume a 35ª posição, com 2100 ha. Levando em consideração a área colhida, em São João

foi 7600 ha, ficando na 1º colocação, e em Garanhuns foi de 1780 ha, ocupando a 26º posição. No que se refere ao rendimento médio, São João cai para a 13º posição, 632kg/ha e Garanhuns se posiciona no 23º, 544 kg/ha.

O feijão tem especial importância para a agricultura brasileira, principalmente no Nordeste do país, por sua relevância na dieta da população e na geração de receitas dos pequenos produtores que se utilizam da força de trabalho familiar (CONAB, 2018). Entretanto, com o passar dos anos, vem se notando um declínio no consumo de feijões devido à mudança de hábitos alimentares dos brasileiros (EMBRAPA, 2019), onde o consumo no Brasil é de aproximadamente 14 kg/habitante/ano.

O feijão é um excelente alimento, fornecendo nutrientes essenciais ao ser humano, como proteínas, ferro, cálcio, magnésio, zinco, vitaminas (principalmente do complexo B), carboidratos e fibras, representando a principal fonte de proteínas das populações de baixa renda (MESQUITA *et al.*, 2007; PAULA-JUNIOR *et al.*, 2008). Além do mais, a facilidade do cultivo e aspectos culturais destacam o feijão como uma excelente alternativa de exploração agrícola para pequenas propriedades (BARBOSA; GONZAGA, 2012). Além da agricultura familiar, o cultivo também é praticado por grandes agricultores que utilizam modernas tecnologias para a produção (por exemplo, lavouras irrigadas) utilizando muita mão-de-obra durante o ciclo, com possibilidade de cultivo ao longo de todo ano nos estados do território nacional, colocando o feijão como uma excelente opção socioeconômica (POSSE *et al.*, 2010).

2.6 Paisagem - A importância da vegetação nativa para manutenção ecossistêmica

A riqueza e abundância de espécies de polinizadores em culturas diminui, muitas vezes com distância das áreas de vegetação nativa, como apontam os estudos na América do Norte (KREMEN *et al.*, 2004; MORANDIN; WINSTON, 2005), América Central (RICKETTS, 2004), América do Sul (CHACOFF; AIZEN, 2006), incluindo o Brasil (DE MARCO; COELHO, 2004), Ásia (KLEIN *et al.*, 2003), Europa (STEFFAN-DEWENTER *et al.*, 2002) e Austrália (BLANCHE *et al.*, 2006). No entanto, as consequências desse declínio para a produtividade das culturas têm recebido pouca atenção (GHAZOUL, 2005).

Entre os poucos estudos disponíveis, Kremen *et al.* (2002) constataram que a alta abundância e diversidade de abelha foram essenciais para deposição de pólen na melancia e variava positivamente

com a proximidade ao habitat natural. Além disso, Ricketts (2004) demonstraram que as flores de café em plantas a cerca de 100 m do fragmento florestal receberam mais pólen do que as plantas mais distantes, o que registrou uma produção significativamente maior do que a produção nos locais mais afastados das áreas naturais. Outro exemplo é a maior produção de castanhas em cajueiros localizados a menos de 1 km do fragmento florestal quando comparados aos localizados ao longo de 2,5 km (FREITAS et al., 2014).

A proximidade de cultivos agrícolas com paisagens naturais e a implantação de sistemas agroflorestais tem alcançado resultados positivos na obtenção de ambientes com maior conectividade e favorecendo a manutenção da biodiversidade de espécies (VANDERMEER; PERFECTO, 2007). Sabe-se ainda que a polinização na agricultura depende do manejo da cultura e da qualidade dos habitats adjacentes para aumentar sua produtividade (KLEIN et al., 2003).

Entretanto, Masiga et al. (2014) constataram que houve maior rendimento e ganho líquido no cultivo do feijão em áreas mais afastadas da vegetação nativa quando comparadas às áreas mais próximas. Tal fato pode ser explicado porque nas áreas mais distantes existia um número mais expressivo de abelhas do gênero *Xylocopa* que se mostrou mais eficaz na polinização desse grão para essa área estudada.

2.7 Polinização

2.7.1 Importância da polinização para as culturas agrícolas

Há muito tempo a ação dos polinizadores é conhecida e considerada como um elemento chave da produção agrícola e da conservação ambiental (IMPERATRIZ-FONSECA *et al.*, 2012; GIANNINI *et al.*, 2012, 2015a; GARIBALDI *et al.*, 2013, 2014) e o declínio dos polinizadores já causa grande vulnerabilidade na produção de alimentos no mundo (CARVALHEIRO *et al.*, 2010; VIANA *et al.*, 2012).

A polinização é considerada um fator de produção fundamental na condução de muitas culturas agrícolas do planeta. Além do aumento no número de frutos vingados, a polinização bem conduzida também leva a um aumento no número de sementes por fruto, melhora a qualidade dos frutos e diminui os índices de malformação, aumenta o teor de óleos e outras substâncias de interesse,

encurta o ciclo de certas culturas agrícolas e ainda uniformiza o amadurecimento dos frutos diminuindo as perdas na colheita (MALAGODI-BRAGA; KLEINERT, 2004; VAISSIÈRE *et al.*, 2011; BOMMARCO *et al.*, 2012; KLATT *et al.*, 2014; GARRET *et al.*, 2014; JUNQUEIRA; AUGUSTO, 2016).

Segundo Klein *et al.* (2007), ao estudar dados de 200 países, apontaram que a produção de frutas, vegetais e sementes de 86 culturas globais mais importantes dependem da polinização por animais, enquanto que apenas 28 não dependem. Em culturas agrícolas, as abelhas exercem importante papel, sendo responsáveis por até 90% da polinização, entre culturas comerciais e árvores nativas (HALINSKI *et al.*, 2015; CHUTTONG *et al.*, 2016). O papel dos polinizadores na agricultura tem estado mais evidente nas últimas décadas, pois a agricultura tem se beneficiado desses insetos mediante o aumento da produtividade, tanto nos países desenvolvidos quanto em desenvolvimento (GALLAI *et al.*, 2009; VAISSIÈRE *et al.*, 2011). A agricultura nos países em desenvolvimento representa mais de 2/3 da agricultura mundial e é 50% mais dependente da polinização que a agricultura dos países desenvolvidos (AIZEN *et al.*, 2008). No caso das culturas dependentes de polinização nos países em desenvolvimento, na ausência de polinizadores seria necessário plantar uma área seis vezes maior para obter a mesma produtividade que os países desenvolvidos apresentam (AIZEN *et al.*, 2008).

O valor econômico mundial da polinização por insetos é de cerca de US\$200 bilhões/ano, o que corresponde a 10% do total valor econômico gerado (BARBOSA *et al.*, 2017). Entretanto, de acordo com Relatório de Avaliação sobre Polinizadores, Polinização e Produção de Alimentos da IPBES, está estimado entre US\$ 235 bilhões e US\$ 577 bilhões (IPBES, 2016). No Brasil, a contribuição econômica dos polinizadores totaliza quase 30% da produção total, aproximadamente US\$ 12 bilhões de um total de US\$ 45 bilhões, do valor total da produção agrícola anual (GIANNINI *et al.*, 2015b). No entanto, aproximadamente metade destes valores vem da cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merr.), que deve US\$ 5,7 bilhões de sua produção anual de US\$ 22 bilhões à contribuição dos polinizadores. As outras quatro culturas agrícolas, após a soja, com os maiores valores de produção dependentes da contribuição dos polinizadores são o café (*Coffea arabica* L. e *C. canefora* Pierre

ex A. Froehner) com US\$ 1,9 bilhões, o tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) com US\$ 992 milhões, o algodão (*Gossypium hirsutum* L., com US\$ 827 milhões, o cacau (*Theobroma cacao* L.) com US\$ 533 milhões e a laranja (*Citrus aurantium* L. e *C. sinensis* (L.) Osbeck) com US\$ 522 milhões (GIANNINI *et al.*, 2015b).

Exemplos de culturas que comprovadamente são beneficiadas pela presença de polinizadores são o trevo branco (*Trifolium repens* L.), que houve incrementos de 200-300% no rendimento de sementes e o trevo vermelho (*Trifolium pratense* L.) que foram obtidos 500 a 600 kg/ha na presença de abelhas, decrescendo a produção de sementes em 7,2 kg/ha para cada 30 metros de distância do apiário, ambas na Nova Zelândia (CAMACHO; FRANKE, 2008); o abacate (*Persea americana* Mill.), que pode reduzir em até 81% na produção de frutos na ausência de polinizadores (MALERBO-SOUZA *et al.*, 2000); a acerola (*Malpighia emarginata* D.C.), que pode aumentar em até 53%, a produção com visitação adequada dos polinizadores, elevando o peso dos frutos, número de sementes e também tornando a forma do fruto mais regular (VILHENA; AUGUSTO, 2007); o algodão (*Glossypium hirsutum* L.), que exibiu aumento na produção de frutos e sementes em até 24% em cultivos nos Estados Unidos, Rússia, Egito (MCGREGOR *et al.*, 1955); o café (*Coffea arabica* L.), que pode aumentar a produtividade entre 14% (DE MARCO; COELHO, 2004) e 50%, (RICKETTS *et al.*, 2008); a cebola (*Allium cepa* L.) pode exibir aumento do número de sementes entre 20% (WATERS, 1972) e 40% (WITTER; BLOCHTEIN, 2003), e em alguns casos aumentou a produção em 60% (EWIES; EL-SAHAR, 1977); a laranja (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) pode ter aumento de até 35% na produção de frutos quando expostas a ação dos polinizadores (MALERBO-SOUZA *et al.*, 2003), bem como outras espécies e variedades de *Citrus* (MANZOORUL-HAQ *et al.*, 1978, KREZDORN, 1972); o maracujá-amarelo (*Passiflora edulis* Sims.), aumentou a produção de frutos entre 25% (FREITAS; OLIVEIRA-FILHO, 2003) e 700% (CAMILLO, 1996 a,b); e ainda o melão (*Cucumis melo* L.; TRINDADE *et al.*, 2004), o umbu (*Spondias tuberosa* L.; NADIA *et al.*, 2007), a goiaba (*Psidium guajava* L.; ALVES; FREITAS 2007), a alfafa (*Medicago sativa* L.; ROUBIK, 1995) e o morango (*Fragaria x ananassa* Duch; ANTUNES; REISSER-JÚNIOR 2007).

A importância da polinização para a alimentação humana foi enfatizada em um estudo que o declínio de polinizadores pode ter como consequência a redução da produção de frutas e verduras para

números abaixo do necessário para o consumo atual, se pensarmos numa escala global (KLEIN *et al.*, 2007; GALLAI *et al.*, 2009). Nos países em desenvolvimento, os cenários que envolvem a perda de polinizadores são ainda mais preocupantes porque podem implicar uma diminuição mais severa na produção de culturas (AIZEN *et al.*, 2009).

Apesar de muitas culturas (incluindo de Fabaceae) já terem sido estudadas em relação à biologia floral, requerimentos reprodutivos e polinização, tais características e o consequente status dos serviços de polinização, variam muito entre áreas. Muitos estudos da última década mostram que a generalização teórica em polinização agrícola não corresponde à realidade no campo. Cada cultura (variedade, cultivar) possui requerimentos reprodutivos que interagem com as condições de campo (clima, solo, tipo de manejo e paisagem) e, assim, variam entre áreas. Por esta razão, não podemos usar dados de biologia reprodutiva de uma cultura em determinada área, por exemplo, como base para estabelecer diagnóstico de déficit de polinização e manejo de polinizadores em outras áreas (RICKETS *et al.*, 2008; FERNANDES *et al.*, 2019). É necessário, portanto, que os dados de biologia floral, requerimentos reprodutivos e polinizadores sejam coletados em cada área onde se pretende fazer avaliação de déficits de polinização e, caso necessário, estabelecer manejo de polinizadores (AHRENFELD *et al.*, 2015; GEMMIL-HERREN, 2016). Assim, a literatura mostra que é totalmente equivocada a ideia de que, uma vez a cultura já ter sido estudada, nada há mais a acrescentar. O maracujá (*Passiflora edulis*), a uva (*Vitis vinifera* L.), os citros (*Citrus*), as Solanaceae (como tomate- *Solanum lycopersicum* L. e pimentão- *Capsicum annuum* L.), as Cucurbitaceae (abóboras – *Curcubita* spp., chuchu - *Sechium edule* (Jacq.) Swartz, pepino - *Cucumis sativus* L., melão - *Cucumis melo* L., melancia - *Citrullus lanatus* L.), dentre muitos outros exemplos, já foram bastante estudados ao redor do mundo e, no entanto, continuam a ser investigados e os resultados publicados em revistas de alto fator de impacto. Isto porque, assim como ocorre em todas as áreas da ciência, estudar um tema (no caso da polinização agrícola, uma cultura) que já foi investigado não significa necessariamente investigar o mesmo problema.

O fato de ser amplamente aceito que os polinizadores, de maneira geral, aumentam características quantitativas e qualitativas da produção, não é o bastante. Não se pode generalizar, pois esta não é uma verdade para todas as culturas, nem todos os lugares e nem para todas as características

da produção. A polinização pode não alterar a quantidade, mas pode alterar a qualidade dos frutos, como observado em estudos de maracujá (*Passiflora edulis*) (SILVA *et al.*, 2018) e de uva (*Vitis vinifera*) (SILVA, 2013). Tal influência pode também estar atrelada aos fatores abióticos (solo, clima, estação do ano), de paisagem e histórico de uso da área. Por esta razão, há um consenso de que estudos em polinização agrícola incluam em suas análises outros fatores que influenciam a produção (FREITAS *et al.*, 2016). Diante da crise mundial de polinizadores, mensurar quanto cada cultura é dependente de polinizadores, quais os polinizadores mais eficientes são fundamentais para a implementação de manejo de polinizadores e para a modificação do manejo da cultura propriamente dita (como, por exemplo, aplicação de pesticidas). Outro aspecto que deve ser ressaltado em polinização agrícola é que o foco não é somente a produção da cultura, mas também gerar conhecimentos que norteiem ações de conservação de polinizadores.

É preciso saber qual a fauna de visitantes florais que a cultura sustenta; polinizadores de uma cultura podem ser importantes polinizadores de outras.

2.7.2 Declínio dos polinizadores e limitação polínica

Atualmente, agricultores e cientistas vêm percebendo um déficit no serviço ecossistêmico de polinização, acarretando uma redução na produção de alimentos (BARBOSA *et al.*, 2017; BERINGER; MACIEL; TRAMONTINA, 2019; BPBES, 2019). Nas décadas de 1980 e 1990, desaparecimento das abelhas já havia sido reportado, porém de uma forma mais discreta (WILLIAMS *et al.*, 2010). Essa diminuição dos polinizadores já foi avaliada em várias partes do planeta, como é o caso de *A. mellifera* e de espécies do gênero *Bombus* no hemisfério Norte (BUCHMANN; NABHAM 1996; KEARNS *et al.* 1998; BIESMEIJER, 2006; GOULSON *et al.*, 2008; POTTS *et al.*, 2010; CAMERON *et al.*, 2011). Segundo Gianinni *et al.* (2017), no Brasil, é possível prever o declínio dos polinizadores por motivos climáticos.

Com a diminuição da produtividade oriunda do declínio dos polinizadores, a tendência é aumentar o uso da terra para produção agrícola, ou seja, expandir as terras agricultáveis em direção as áreas naturais, fato que se observa principalmente em países em desenvolvimento (AIZEN; HARDER, 2009; IMPERATRIZ-FONSECA *et al.*, 2012). Contudo, a literatura assegura que a intensificação do uso de terras pela agricultura convencional é um dos principais motivos que

causam a diminuição da riqueza e abundância de polinizadores em todo o mundo (TILMAN *et al.*, 2002; KLEIN *et al.*, 2007; TAKI *et al.*, 2011; VIANA *et al.*, 2012).

Cerca de 20 mil espécies estão sob ameaça de extinção (IMPERATRIZ-FONSECA *et al.*, 2012), e como as abelhas são consideradas os polinizadores mais eficientes (PERUQUETTI; TEIXEIRA; COELHO, 2017), o declínio desses insetos age de forma depreciativa na reprodução sexuada e na diversidade genética das plantas, além de afetar a produção de alimentos (KLEIN *et al.*, 2007; VIANA *et al.*, 2012), gerando um forte impacto econômico (GALLAI *et al.*, 2009), podendo levar à extinção de plantas e animais, mudanças na paisagem e nas funções do ecossistema (KEVAN; VIANA, 2003).

A redução dos polinizadores parece envolver vários fatores. Contudo, tem crescido muito o número de evidências que demonstram que a simplificação de paisagens, resultante de modificações no uso do solo em áreas de agricultura intensiva, provoca alterações no comportamento, na riqueza, na composição de espécies e na abundância dos polinizadores no mundo (POTTS *et al.*, 2010; KERR *et al.*, 2010; OLIVEIRA, 2015; LOPES *et al.*, 2018), seja pela ausência de recursos alimentares (MARCO-JR; COELHO, 2004; OLIVEIRA, 2015) ou de substratos para a nidificação (AFONSO, 2012; BARBOSA *et al.*, 2017). Somado a isso, também pode-se citar as mudanças climáticas (GONÇALVES, 2012; ROCHA; ALENCAR, 2012; BARBOSA *et al.*, 2017; BIZAWU; LEMGRUBER, 2018), introdução de animais exóticos que competem com espécies nativas, introdução de espécies de plantas exóticas cultivadas em grandes áreas e que muitas vezes representam recursos escassos para os polinizadores (ROBINSON; SUTHERLAND, 2002; TSCHARNTKE *et al.*, 2002; POTTS *et al.*, 2010), infecção por patógenos (MAIA, 2010; MESSAGE *et al.*, 2012; GOULSON *et al.*, 2015; POTTS *et al.*, 2016) e uso indiscriminado de defensivos agrícolas e pesticidas que repelem, matam ou afetam negativamente a fisiologia dos insetos (RIBAS; MATSUMURA, 2009; POTTS *et al.*, 2010; PETTIS *et al.*, 2013; ARIOLI *et al.*, 2015).

Declínio na frequência de visita pode reduzir a quantidade e qualidade do pólen depositado nos estigmas, que por sua vez pode causar a limitação polínica e afetar a produção de fruta e/ou semente (KNIGHT *et al.*, 2005). A quantidade de pólen para a flor pode estar limitada se os polinizadores são

escassos, se entrar em contato com órgãos sexuais raramente ou se as plantas competem para os serviços de polinizadores compartilhados (BIERZYCHUDEK, 1981). Mesmo com um fornecimento adequado de polinizadores, a qualidade do pólen pode limitar a fecundidade das plantas se, por exemplo, os polinizadores entregarem principalmente pólen do próprio indivíduo ou pólen de parentes próximos (WASER; PRICE, 1991).

Estudos sobre a polinização do maracujá-amarelo (*Passiflora edulis*) na região de Juazeiro da Bahia divisa com Pernambuco, concluíram que existe na região um déficit no serviço de polinização, isto é, ocorre limitação polínica porque as populações das abelhas *Xylocopa* não são suficientes para realizar a polinização das plantações de maracujá (*Passiflora edulis*) da Região. Para suprir a falta de polinizadores dessa região, os produtores contratam mão-de-obra para realizar a polinização manual, com um consequente encarecimento do custo de produção (VIANA *et al.*, 2006; SIQUEIRA *et al.*, 2009). Em uma revisão considerando 482 estudos sobre o efeito da suplementação de pólen em frutos estabelecidos em plantas selvagens, Knight *et al.* (2005) descobriram que 63% das espécies apresentaram limitação polínica. Embora os tamanhos de amostra para plantas cultivadas sejam mais limitados, Thomson e Goodell (2001), encontraram evidências de limitação de pólen entre 59% de 16 espécies de culturas. Esses números sugerem que a limitação do pólen é comum, de modo que qualquer declínio do polinizador associado à destruição do habitat poderia ainda comprometer a reprodução de muitas plantas selvagens e cultivadas (CHACOFF; AIZEN; ASCHERO, 2008).

2.7.3 Manejo de polinizadores

Por serem fundamentais para a produção agrícola, é necessário criar estratégias de manejo de polinizadores que visem aumentar a frequência de visitas nas culturas, aumentando a sua produtividade. Estudos apontam os benefícios da manutenção de fragmentos de áreas nativas para as culturas agrícolas por apresentar um melhor serviço de polinização (DE MARCO; COELHO, 2004; KLEIN *et al.*, 2007; GARIBALDI *et al.*, 2011; BOMMARCO *et al.*, 2012; WITTER *et al.*, 2014). A introdução de ninhos artificiais ou colmeias de abelhas em culturas agrícolas tem sido a estratégia mais utilizada para elevar a quantidade e a qualidade da produção (FREE, 1993; FREITAS, 1998; DAG; EISIKOWITCH, 1995; PARANHOS, 1996; FREITAS; OLIVEIRA-FILHO, 2003; KLEIN *et al.*, 2007; POTTS *et al.*, 2010). Contudo, é recomendado que as espécies polinizadoras apresentem

ampla distribuição geográfica, cujo manejo e multiplicação de ninhos sejam conhecidos como, por exemplo: as abelhas de mel (*Apis mellifera*), amplamente encontradas nas mais diversas culturas agrícolas; as mamangavas (especialmente *Bombus terrestris*), presentes em plantações de tomate, e as abelhas carpinteiras (*Xylocopa* sp.), responsáveis pela polinização do maracujá (*Passiflora edulis*) (YAMAMOTO *et al.*, 2012; COBRA *et al.*, 2015) para que o serviço ambiental prestado seja efetivo (IMPERATRIZ-FONSECA; NUNES-SILVA, 2010; POTTS *et al.*, 2010). Entretanto, a *Apis mellifera* é a espécie mais utilizada e importante nos manejos de polinizadores devido seu caráter generalista (KEVAN, 1997; DELAPLANE;MAYER 2000).

Determinados pesquisadores sugerem que a densidade de colmeias introduzidas depende da atratividade que a cultura em questão promove nos polinizadores (PARANHOS *et al.* 1998; DELAPLANE; MAYER 2000; FINTA, 2004). Ademais, a abundância de abelhas silvestres na cultura está atrelada a uma combinação da paisagem circundante (TAKI *et al.*, 2011; KENNEDY *et al.*, 2013) e às práticas agrícolas favoráveis aos polinizadores (KREMEN; MILES, 2012; KREMEN *et al.*, 2012). Interações interespecíficas e condições climáticas durante a época de floração são fatores importantes que merecem destaque na influência de abelhas silvestres nas culturas (BRITTAİN *et al.*, 2012; BRITTAİN *et al.*, 2013).

O manejo é uma atividade que exige conhecimento sobre os requerimentos reprodutivos da espécie, tais como a morfologia e biologia floral, sua fisiologia, bem como do (s) polinizador (es) mais eficiente (s) e a sua estratégia de forrageio, como horário de atividade, comportamento na flor, frequência de visitas e recurso procurado (FREITAS, 1998). A introdução de colmeias em culturas agrícolas é relativamente comum em países desenvolvidos, tais como Canadá, Estados Unidos e países da União Europeia, mas pouco praticada em países em desenvolvimento (KEVAN; IMPERATRIZ-FONSECA, 2002).

No Brasil, essa prática ainda não é significativa, se levarmos em consideração o número de espécies cultivadas. Existem estudos dessa prática para o cultivo de acerola (*M. emarginata*) (MAGALHÃES; FREITAS, 2013), berinjela (*S. melongena*) (NUNES-SILVA *et al.*, 2013), café (*C. arabica*) (NOGUEIRA-NETO *et al.*, 1959), canola (*B. napus*) (WITTER *et al.*, 2015), goiaba (*P. guajava*) (ALVES; FREITAS, 2006), maçã (*M. domestica*) (VIANA *et al.*, 2014), maracujá (*P. edulis*)

(FREITAS; OLIVEIRA-FILHO, 2003; JUNQUEIRA;AUGUSTO, 2017), morango (*F. x ananassa*)(MALAGODI-BRAGA; PEIXOTO KLEINERT, 2004; ANTUNES *et al.*, 2007; ROSELINO *et al.*,2009; WITTER *et al.*, 2012), palmito (*E. edulis*) (DORNELES *et al.*, 2013), pepino (*C. sativus*) (SANTOS *et al.*, 2008), pimentão (*C. annuum*) (CRUZ *et al.*, 2005; FARIA-JÚNIOR *et al.*, 2008; ROSELINO *et al.*, 2010), tomate (*S. lycopersicum*) (DEL SARTO *et al.*, 2005; SANTOS *et al.*, 2009; BARTELLI; NOGUEIRA-FERREIRA, 2014), dendê (*E. guineensis*) (MOURA *et al.*, 2008) e soja (*Glycine max*) (MILFONT *et al.*, 2013).

Outro modelo de manejo de polinizadores é a aplicação de atrativos nas culturas agrícolas, como empregar essências e extratos florais na área cultivada com a finalidade de atrair animais polinizadores (SILVA *et al.*, 2002; SILVA; MALERBO-SOUZA, 2003). Entretanto, as pesquisas existentes não apontaram incremento na produção (abacate, *Persea americana*), (SILVA;MALERBO- SOUZA;TOLEDO, 2002; SILVA;MALERBO-SOUZA 2003).

3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO, J. 2012. Origem das linhagens mitocondriais nas abelhas africanizadas (*Apis mellifera* L.) do Brasil. Dissertação (Mestrado em Genética Evolutiva e Biologia Molecular) – Programa de Pós-Graduação, Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR, São Carlos.
- AHRENFELD *et al.*, 2015. Pollinator communities in strawberry crops – variation at multiple spatial scales. Bulletin of entomological research 105(04):1-10.
- AIZEN, M.A.; GARIBALDI, L.A.; CUNNINGHAM, S.A.; KLEIN, A.M. 2009. How much does agriculture depend on pollinators? Lessons from long-term trends in crop production. Ann. Bot.103:1579-1588.
- AIZEN, M.A.; GARIBALDI, L.A.; CUNNINGHAM, S.A.; KLEIN, A.M. 2008. Long-term global trends incrop yield and production reveal no current pollination shortage but increasing pollinator dependency. Current Biology.; 18:1572–1575.
- ALLEN-WARDELL, G. *et al.*, 1998. The potential consequences of pollinator declines on the conservation of biodiversity and stability of food crop yields. Conservation Biology 12: 8-17.

- ALVES, J.E.; FREITAS, B.M. 2006. Comportamento de pastejo e eficiência de polinização de cinco espécies de abelhas em flores de goiabeira (*Psidium guajava* L.). Rev Ciênc Agronômica 37:216–220.
- ALVES, J.E.; FREITAS, B.M. 2007. Requerimentos de polinização da goiabeira. Ciência Rural, v. 37, p.1281–1286.
- ANTUNES, I.F.; COSTA, J.G.C.; OLIVEIRA, E.A. 1973. Determinação da porcentagem de cruzamentos naturais em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) no município de Pelotas, RS, Brasil. Pelotas: Ipeas. 5p.
- ANTUNES, L.E.C.; REISSER JÚNIOR, C. 2007. Produção de morangos. Jornal da Fruta, Lages, v.15, n.191, p.22-24.
- ANTUNES, O.T. *et al.*, 2007. Produção de cultivares de morangueiro polinizadas pela abelha jataí em ambiente protegido. Horti Bras 25:94–99.
- ARIOLI, C.J., ROSA, J.M. DA.; BOTTON, M. 2015. Mortalidade de *Apis mellifera* e manejo da polinização em macieira. In: ENCONTRO NACIONAL DE FRUTICULTURA DE CLIMATEMPERADO, 14, 2015, Fraiburgo. Anais ... Florianópolis: Epagri, 2015. p.69- 80.
- ASHWORTH, L.; QUESADA, M.; CASAS, A.; AGUILAR R.; OYAMA, K. 2009. Pollinator-dependent food production in Mexico. Biological Conservation 142(5): 1050–1057.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DAS ABELHAS - A.B.E.L.H.A. 2015. Agricultura e Polinizadores. São Paulo: A.B.E.L.H.A. Disponível em: <abelha.org.br/publicacoes/ebooks/Agricultura-e-Polinizacao.pdf>. Acesso em: 26 de janeiro de 2021.
- BALLARDIN, R. S., COSTA, E. C. C., RIBEIRO, N. D. 2000. Feijão, recomendações técnicas para cultivo no Rio Grande do Sul. Santa Maria, Comissão Estadual de Pesquisa do Feijão – CEPEF,. 80 p.
- BARBOSA, D. *et al.*, 2017. As abelhas e seu serviço ecossistêmico de polinização. Revista Eletrônica

Científica da UERGS, v. 3, n. 4, p. 694-703.

BARBOSA, F. R.; GONZAGA, A. C. de O. 2012. Informações técnicas para o cultivo do feijoeiro-comum na região central-brasileira. Goiânia: EMBRAPA, 247 p.

BARROS, A. H. C.; VAREJÃO-SILVA, M. A.; TABOSA, J. N. 2012. Aptidão climática do Estado de Alagoas para culturas agrícolas. Relatório Técnico. Convênios SEAGRI-AL/Embrapa Solos n.10200.04/0126-6 e 10200.09/0134-5. Recife: Embrapa Solos. 86p.

BARTELLI, B.F., NOGUEIRA-FERREIRA, F.H. 2014. Pollination services provided by *Melipona quadrifasciata* Lepeletier (Hymenoptera: Meliponini) in greenhouses with *Solanum lycopersicum* L. (Solanaceae). *Sociobiology* 61:510–516.

BERINGER, J.; MACIEL, F. L.; TRAMONTINA, F. F. 2019. O declínio populacional das abelhas: causas, potenciais soluções e perspectivas futuras. *Revista Eletrônica Científica Da UERGS* - ISSN: 2448-0479, 5(1), 18-27.

BIERZYCHUDEK, P. 1981. Pollinator limitation on plant reproductive effort. *Am. Nat.* 117, 838–840.

BIESMEIJER, J.C. 2006. Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands. *Science* 313:351–354.

BIZAWU, K.; LEMGRUBER, V. 2018. Aspectos jurídicos da desordem de colapso das colônias: o desaparecimento de abelhas. *Revista Direito Mackenzie*, v. 12, n. 1.

BLANCHE, K. R.; LUDWIG, J. A.; CUNNINGHAM, S. A. 2006. Proximity to rainforest enhances pollination and fruit set in orchards. *J. Appl. Ecol.* 43, 1182–1187.

BLISS, F.A. 1980. Common bean. In Fehr WR, Hadley HH (eds) *Hybridization of crop plants*. American Society of Agronomy & Crop Science Society of America, Madison, WI, pp 273-284.

BNBES. 2019. Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos. Relatório Temático sobre Polinização, Polinizadores e produção de Alimentos no Brasil.

BOMMARCO, R. *et al.*, 2012. Insect pollination enhances seed yield quality and market value in

oilseedrape. *Oecologie* n.169, p.1025-1032.

BORÉM, A. 1999. Hibridação artificial de plantas. Viçosa, MG: UFV, 546 p.

BRACKMANN, A.; STEFFENS, C.A., WACLAWOVSKY, A.J. 2002. Efeito da data de colheita e do armazenamento em atmosfera controlada na qualidade da maçã cv. Braeburn. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.37, n.03, p.371-377.

BRITTAİN, C.; KREMEN, C.; KLEIN, A.M. 2012. Biodiversity buffers pollination from changes in environmental conditions. *Global Change Biology* 19:540-547.

BRITTAİN, C.; WILLIAMS, N; KREMEN, C; KLEIN, A.M. 2013. Synergistic effects of non-Apis bees and honeybees for pollination services. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 280: 20122767.

BRUNNER, B.R.; BEAVER, J.S. 1988. Estimation of outcrossing of dry beans in Puerto Rico. *AnnualReport of Bean Improvement Cooperative*, v.31, p.42-43.

BUCHMANN, S.L.; NABHAM, G.P. 1996 *The forgotten pollinators*. Island Press, Washington, DC.

CAMACHO, J.C.B.; FRANKE, L.B. 2008.Efeito da polinização sobre a produção e qualidade de sementesde *Adesmia latifolia*. *Rev Bras Sementes*, v.30, p. 81-90.

CAMERON, A.S. *et al*, 2011. Patterns of widespread decline in North American bumble bees. *Proc NatlAcad Sci* 108:662–667. 2011.

CAMILLO, E. 1996b. Polinização do maracujá amarelo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE APICULTURA, 11., 1996, Teresina. *Anais...* Teresina: Confederação Brasileira de Apicultura, p.317-321.

CAMILLO, E. 1996a.Utilização de espécies de *Xylocopa* (Hymenoptera, Anthophoridae) na polinização do maracujá amarelo. In: ENCONTRO SOBRE ABELHAS, 2., 1996, Ribeirão Preto. *Anais...* Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo, Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Ribeirão Preto, p.141-146.

- CARVALHEIRO, LG, *et al.*, 2010. Pollination services decline with distance from natural habitat even in biodiversity rich areas. *Journal of Applied Ecology*, 47, 810–820.
- CHACOFF, N. P.; AIZEN, M. A. 2006. Edge effects on flower-visiting insects in grapefruit plantations bordering premontane subtropical forest. *J. Appl. Ecol.* 43, 18–27.
- CHACOFF, N. P.; AIZEN, M.A.; ASCHERO, V. 2008. Proximity to forest edge does not affect crop production despite pollen limitation. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2008; 275:907–913. doi: 10.1098/rspb.2007.1547.
- CHUTTONG, B.; CHANBANG, Y.; SRINGARM, K.; BURGETT, M. 2016. Physicochemical profiles of stingless bee (Apidae: Meliponini) honey from South east Asia (Thailand). *Food Chemistry*, 192:149-155.
- COBRA, S. S. DE O. *et al.*, 2015. Características florais e polinizadores na qualidade de frutos de cultivares de maracujazeiro-azedo. *Pesq. agropec. bras.*, v. 50, n. 1, p. 54–62.
- CONAB. 2019. Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/index.php/safra-serie-historica-dashboard>>. Acesso em: 20 de agosto de 2019.
- CONAB. 2019. Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/perspectivas-para-a-agropecuaria/item/download/22780_ee707c6e6d44f06fe7b6a86ce6141652>. Acesso em 17 de julho de 2018.
- CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. 2020. Disponível em: <<https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/produtos-360.html>>. Acesso em: 25 de Janeiro de 2021.
- COSTANZA, R.; GROOT, R.; BRAAT, L., *et al.*, 2017. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosyst Serv* 28:1–16
- COSTA, J. C. G.; ZIMMERMANN, M. J. O. 1988. Melhoramento genético. In: ZIMMERMANN, M. J.

- O.;ROCHA, M.; YAMADA, T. (Ed.). A cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Potafós, p. 229-245.
- CRUZ, D.D. *et al.*, 2005. Pollination efficiency of the stingless bee *Melipona subnitida* on greenhouse sweetpepper. *Pesqui Agropecu Bras* 40:1197–1201.
- DAG, A.; EISIKOWITCH, D. 1995. The influence of hive location on honeybee foraging activity and fruitset in melons grown in plastic greenhouses. *Apidologie*, v. 26, p. 511- 519.
- DAILY, G. 1997. Nature's servisses: societal dependence on natural ecosystem. Washington: Island.
- DE MARCO JR., P.; COELHO, F.M. 2004. Services performed by the ecosystem: Forest remnants influence agricultural cultures' pollination and production. *Biodiversity and Conservation* 13: 1245- 1255.
- DEL SARTO, M.C.L.; PERUQUETTI, R.C.; CAMPOS, L.A.O. 2005. Evaluation of the neotropical stingless bee *Melipona quadrifasciata* (Hymenoptera: Apidae) as pollinator of greenhouse tomatoes. *J Econ Entomol* 98:260–266.
- DELAPLANE, K. S.; MAYER, D. F. 2000. Crop Pollination by bees. Cambridge: CABI.
- DI STASI, L.C.;HIRUMA-LIMA, C.A. 2002. Plantas medicinais na Amazônia e na Mata Atlântica. 2 ed. revista e ampliada, São Paulo.
- DICKSON, M.H.; BOETTGER, M.A. 1984. Effect of higt and low temperature on pollen germination and seed set in snap beans. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, St. Joseph. v. 109, n. 3, p.372-374.
- DIDONET, A. D.; SILVA, S. C. 2004. Elementos climáticos e produtividade do feijoeiro. *Informe Agropecuário*, v. 25, n. 223, p. 13-19.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. 1979. Yield response to water. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. (FAO irrigation and drainage, paper 33).
- DORNELES, L.L.; ZILLIKENS, A.; STEINER, J; PADILHA, M.T.S. 2013. Biologia da polinização de *Euterpe edulis* Martius (Arecaceae) e associação com abelhas sociais. *Iheringia* 68:47–57.

- ELIAS, M. A., BORGES, F. J., BERGAMINI, L. L., FRANCESCHINELLI, E. V., SUJII, E. R. 2017. Climate change threatens pollination services in tomato crops in Brazil. *Agriculture, ecosystems & environment*, 239, 257-264.
- ELLIS, A. M., MYERS, S. S., & RICKETTS, T. H. 2015. Do pollinators contribute to nutritional health?. *PLoS One*, 10(1), e114805. 2015.
- EMBRAPA. 2019. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/42217659/especialistas-comentam-polemico-declinio-do-consumo-de-feijao-no-brasil>>. Acesso em: 20 de agosto de 2019.
- EMBRAPA. 2010. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Agência de Informação Embrapa: Feijão. 2010. Disponível em: Acesso em 03 ago. 2017.
- FANCELLI, A. L. 2009. Feijão: Tópicos Especiais de Manejo. Piracicaba: ESALQ/USP/LPV. 208 p.
- FAO. 2019. Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura. Disponível em: <FAO. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>> Acesso em: 20 de agosto de 2019.
- FARIA JÚNIOR, L.R.R.; BENDINI, J.N.; BARRETO, L.M.R.C. 2008. Eficiência polinizadora de *Apis mellifera* L. e polinização entomófila em pimentão “Cascadura Ikeda.” *Bragantia* 67:261– 266.
- FARLOW, P. J. 1981. Effect of low temperature on number and location of developed seed in two cultivars of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Australian Journal of Agricultural Research*, Melbourne, v. 32, p. 325-330.
- FARLOW, P. J.; BYTH, D. E.; KRUGER, N. S. 1979. Effect of temperature on seed set and in vitro pollen germination in french beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, Melbourne. v.19, p.725- 731.
- FERNANDES *et al.*, 2019. The Arrival of Steppe and Iranian Related Ancestry in the Islands of the Western Mediterranean, *bioRxiv*.
- FINTA, K. 2004. Insect pollination of apple orchards. University of West Hungary, Faculty of

Agricultural and Food Science.

FLORA E FUNGA DO BRASIL. 2023. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: < <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/> >. Acesso em: 13 jun. 2023

FOLEGATTI, M.V.; PAZ, V.P.S.; PEREIRA, A.S.; LIBARDI, V.C.M. 1997. Efeito de diferentes níveis de irrigação e de déficit hídrico na produção do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L). In: CONGRESSO CHILENO DE ENGENIERIA AGRÍCOLA, 2., Chillán.

FREE, J. B. 1966. The pollination of the beans *Phaseolus multiflorus* and *Phaseolus vulgaris* by honeybees. *Journal of Apicultural Research*, Wales, n. 5, p. 87-91.

FREE, J.B. 1993. *Insect pollination of crops*. Academic, London, UK.

FREITAS, B.M. 1998. As abelhas e o aumento da produção agrícola. In: CONGRESSO NORDESTINO DE PRODUÇÃO ANIMAL, 1, Fortaleza, Anais. Fortaleza., p.385-389.

FREITAS, B.M. *et al.*, 2014. Plano de manejo para polinização da cultura do cajueiro: conservação e manejo de polinizadores para agricultura sustentável, através de uma abordagem ecossistêmica. Rio de Janeiro: FUNBIO.

FREITAS, B.M.; OLIVEIRA FILHO, J.H. 2003. Ninhos racionais para mamangava (*Xylocopa frontalis*) na polinização do maracujá-amarelo (*Passiflora edulis*). *Ciência Rural*, v. 33, p.1135–1139.

FREITAS, B.M.; VAISSIÈRE, B.E.; SARAIVA, A; CAVALHEIRO, L.G.; GARIBALDI LA, N.G.O.H. 2016. Identifying and assessing pollination deficits in crops. In: *Pollination services to agriculture - Sustaining and enhancing a key ecosystem service* (Food and Agriculture Organization of the United Nations). B. Gemmill-Herren, ed. Routledge, New York.

FREITAS, L.; WOŁOWSKI, M.; SIGILIANO, M.I. 2010. Ocorrência de limitação polínica em plantas de Mata Atlântica. *Oecologia Australis*, v. 14, n. 1, p. 251-265.

GALLAI, N., SALLES, J.M., SETTELE, J., VAISSIÈRE, B.E. 2009. Economic valuation of the vulnerability of world agriculture confronted with pollinator decline. *Ecol. Econ.* 68, 810–821.

GARCIA, M.; RIOS OSORIO, L. A.; ALVAREZ DEL CASTILLO, J. 2016. La polinización en los

sistemas de producción agrícola: revisión sistemática de la literatura. Idesia, Arica, v. 34, n. 3, p. 53-68.

GARIBALDI, L. A., SÁEZ, A., AIZEN, M. A., FIJEN, T.; BARTOMEUS, I. 2020. Crop pollination management needs flower-visitor monitoring and target values. *Journal of Applied Ecology*, 57(4), 664-670.

GARIBALDI, L.A. *et al.*, 2013. Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *Science* n. 339, p. 1608-1611.

GARIBALDI, L.A. *et al.* 2014. From research to action: enhancing crop yield through wild pollinators. *Front Ecol Environ* n. 12, p. 439-447.

GARIBALDI, L.A., *et al.* 2011. Global growth and stability of agricultural yield decrease with pollinator dependence. *PNAS* 108, 5909–5914.

GARRET, M.P.D. *et al.*, 2014. Avoiding a bad apple: insect pollination enhances fruit quality and economic value. *Agric. Ecosyst. Environ* n. 184, p. 35-40.

GEMMILL-HERREN, B. 2016. Pollination services to agriculture - Sustaining and enhancing a key ecosystem service (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Routledge, New York.

GEPTS, P.; DEBOUCK, D. 1991. Origin, domestication and evolution of the common bean (*Phaseolus vulgaris*). In: VAN SCHOONHOVEN, A.; VOYSEST, O. (Ed.) *Common beans: Research for crop improvement*. CAB International: Wallingford, p 7-53.

GHAZOU, J. 2005. Buzziness as usual? Questioning the global pollination crisis. *Trends Ecol. Evol.* 20, 367–373.

GIANNINI, T. C. *et al.*, 2012. Pollination services at risk: bee habitats will decrease owing to climate change in Brazil. *Ecological Modelling* 244:127- 131.

GIANNINI, T.C. *et al.*, 2017. Projected climate change threatens pollinators and crop production in Brazil. *Plos One* 12(8): e0182274.

- GIANNINI, T.C. *et al.*, 2015a. Crop pollinators in Brazil: a review of reported interactions. *Apidologie* n. 46,p.209- 223.
- GIANNINI, T.C. *et al.*, 2012. Pollination services at risk, bee habitats will decrease owing to climate change in Brazil. *Ecol.Model.* 244: 127–131.
- GIANNINI, T.C. *et al.*, 2015b. The dependence of crops for pollinators and the economic value of pollination in Brazil. *J. of Economic Entomology* n.108, p. 849-857.
- GONÇALVES, L. S. 2012. O desaparecimento das abelhas, suas causas, consequências e o risco dos neonicotinóides para o agronegócio apícola. *Mensagem doce*, v. 117, p. 2-12.
- GONÇALVES, S. L.; WREGE, M. S; CARAMORI, P. H.; MARIOT, E. J.; NETO, M. A. 1997. Probabilidade de ocorrência de temperaturas superiores a 30°C no florescimento do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivado na safra das águas no Estado do Paraná. *Rev. Bras. Agromet.*,5 (1): 99-107.
- GOULSON, D. *et al.*,2015. Bee declines driven by combined stress from parasites, pesticides, and lack of flowers. *Science* 347: e1255957.
- GOULSON, D., KADEN, J.C., LEPAIS, O., LYE, G.C., DARVILL, B. 2011. Population structure, dispersal and colonization history of the garden bumblebee *Bombus hortorum* in the Western Isles of Scotland. *CONSERVATION GENETICS* 12: 867-879.
- GOULSON, D.; LYE, G.C.; DARVILL, B. 2008. Decline and conservation of bumble bees. *Annual Review of Entomology* 53: 191–208.
- GRAB, H.; BRANSTETTER, M. G.; AMON, N.; URBAN-MEAD, K. R.; PARK, M. G.; GIBBS, J.; DANFORTH, B. N. 2019. Agriculturally dominated landscapes reduce bee phylogenetic diversity and pollination services. *Science*, 363(6424), 282-284.
- GRAHAM, P.H.; RANALLI, P. 1997. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Field Crops Research* 53:131–146.
- GROSS, Y.; J. KIGEL. 1994. Differential sensitivity to high temperature of stages in the

reproductive development of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Field Crops Res., 36 (3): 201-212.

GUILHERME, S. R. *et al.*, 2015. Genetic control of inflorescence in common bean, Genetics and Molecular Research, Ribeirão Preto, v.13, p. 10349–10358.

GUILIONI, L.; WÉRY, J.J.; LECOEUR, J. 2003. High temperature and water deficit may reduce seed number in field pea purely by decreasing plant growth rate. Funct. Plant Biol., 30 (11): 1151-1164.

GUIMARÃES, C.M. 1998. Efeitos fisiológicos do estresse hídrico. In: ZIMMERMANN, M.J. de O.; ROCHA, M.; YAMADA, T. Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: POTAFOS, p. 157-174.

HALINSKI, R.; DORNELES, A. L.; BLOCHTEIN, B. 2015. Bee assemblage in habitats associated with *Brassica napus* L. Revista Brasileira de Entomologia, 59(3):222-228.

HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; SILVA, S. C. Feijão. In: MONEIRO, J. E. B. A. 2009. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília, INMET. p.183-201.

HOC, P.; GARCÍA, M.T. 1999. Biología floral y sistema reproductivo de *Phaseolus vulgaris* var. *aborigeneus* (Fabaceae) Revista de Biología Tropical. 47:59–67.

HOFFMANN JÚNIOR *et al.*, 2007. Resposta de cultivares de feijão à alta temperatura do ar no período reprodutivo. Ciência Rural, 37(6), 1543-1548.

IBARRA-PEREZ, F.J.; BARNHART, D.; EHDAIE, B.; KNIO, K.M.; WAINES, J.G. 1999. Effects of insect tripping on seed yield of common bean. Crop Sci., 39:425-433.

IBARRA-PEREZ, F; EHDAIE, B; WAINES G. 1997. Estimation of out crossing rate in common bean. CropSci. 37:60-65.

em:<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/saojoao/pesquisa/14/10193?tipo=ranking&ano=2017&localidade2=260600&indicador=10287&localidade1=26>>. Acesso em: 20 de agosto de 2019.

IMPERATRIZ-FONSECA, V. L.; NUNES-SILVA, P. 2010. As abelhas, os serviços ecossistêmicos e o Código Florestal Brasileiro. *Biota Neotropica*, 10(4):59-62.

IMPERATRIZ-FONSECA, V.L.; CANHOS, D.A.L.; ALVES, D.A.; SARAIVA, A.M. 2012. Polinizadores no Brasil. Contribuição para a biodiversidade, uso sustentado, conservação e serviços ambientais. São Paulo: Universidade de S. Paulo, 488 p.

IPBES. 2016. The assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production. Potts SG, Imperatriz-Fonseca VL, Ngo HT (eds). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn. 552p.

IZQUIERDO, J.; G.L. HOSFIELD. 1981. A collection receptacle for field abscission studies in common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Crop Science*, v.21, p. 622- 625.

JUDD, W.S., CAMPBELL, C.S., KELLOGG, E.A., STEVENS, P.F., DONOGHUE, M.J. 2009. *Sistemática Vegetal: Um Enfoque Filogenético*. 3. ed. Porto Alegre: Artmed. 612p.

JUNQUEIRA, C.N.; AUGUSTO, S.C. 2016. Bigger and sweeter passion fruits: effect of pollinator enhancement on fruit production and quality. *Apidologie*.

JUNQUEIRA, C.N.; RABELO, L.S.; ALVES FERREIRA BASTOS, E.M.; AUGUSTO, S.C. 2017. Do flexible pollen foraging habits of *Xylocopa frontalis* (Apidae, Xylocopini) contribute to nest management in passion fruit crops? *J Apic Res* 56:646–652.

KARAMANOS, A.J.; ELSTON, J.; WADSWORTH, R.M. 1982. Water stress and leaf growth of field beans (*Vicia faba* L.) in the field: water potentials and laminar expansion. *Annals of Botany*, v.49, n.6, p.815-826.

KASINA, M, *et al.*, 2009c. Diversity and activity density of bees visiting crop flowers in Kakamega,

- westernKenya. Journal of Apicultural Research 48:134-139.
- KASINA, M. *et al.*, 2009b. Bee pollination enhances crop yield and fruit quality in kakamega, western Kenya East African Agricultural and Forestry Journal 75(1):1-11.
- KAY, D. E. 1979. Food legumes. Londres: Tropical Products Institute. 435p
- KEARNS, C.A.; INOUE, D.W.; WASER, N.M. 1998. Endangered mutualisms: the conservation of plant-pollinator interactions. *Annu Rev Ecol Syst* 29:83–112.
- KELLER, L.F.; D.M. WALLER. 2002. Inbreeding effects in wild populations. *Trends in Ecology and Evolution* 17: 230-241.
- KENNEDY, C.M. *et al.*, 2013. A global quantitative synthesis of local and landscape effects on wild beepollinators in agroecosystems. *Ecol Lett*, 16, 584-599.
- KERR, J.T. *et al.*, 2016. Climate change impacts on bumblebees converge across continents. *Science* n. 349, p. 177-180.
- KEVAN, P.; IMPERATRIZ-FONSECA, V.L. 2002. Pollinating bees: the conservation link between Agriculture and Nature. Brasília, DF: Ministry of Environment, 313p.
- KEVAN, P.G.; VIANA, B.F. 2003. The global decline of pollination services. *Biodiversity*, v.4, n. 4, p. 3-8.
- KINGHA, B.M.T.; TCHUENGUEM, F.F.N; NGAKOU, A.; BRÜCKNER, D. 2012 Foraging and pollination activities of *Xylocopa olivacea* (Hymenoptera, Apidae) on *Phaseolus vulgaris* (Fabaceae) flowers at Dang (Ngaoundere-Cameroon) *J. Agric. Extension and Rural Development* 4(6):330- 339.
- KLATT, B.K. *et al.*, 2014. Bee pollination improves crop quality, shelf life and commercial value. *Proc. Biol. Sci.* n. 281, p. 20132440.
- KLEIN, A. M.; STEFFAN-DEWENTER, I.; TSCHARNTKE, T. 2003. Bee pollination and fruit set of *Coffea arabica* and *C. canephora* (Rubiaceae). *Am. J. Bot.* 90, 153–157.
- KLEIN, A.; VAISSIÈRE, B.; CANE, J. H.; STEFFAN-DEWENTER, Ingolf; CUNNINGHAM, S. A.;

- KREMEN, C.; TSCHARNTKE, T. 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society*, v.274, p.303-313.
- KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. 2009. Fundamentos para uma agricultura sustentável, com ênfase na cultura do feijoeiro. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, p. 23-33.
- KNIGHT, T. M. *et al.*, 2005. Pollen limitation of plant reproduction: pattern and process. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, Vol. 36:467-497.
- KREMEN, C.; BACON, C.M.; ILES, A. 2012. Diversified farming systems: an agroecological, systems-based approach *ECOLOGY AND SOCIETY* 17:44-6.
- KREMEN, C.; MILES, A. 2012. Ecosystem services in biologically diversified versus conventional farming systems: benefits, externalities, and trade-offs *Ecology and Society* 17(4): 40.
- KREMEN, C.; WILLIAMS, N. M.; BUGG, R. L.; FAY, J. P.; THORP, R.W. 2004. The area requirements of an ecosystem service: crop pollination by native bee communities in California. *Ecol. Lett.* 7, 1109–1119.
- KREMEN, C.; WILLIAMS, N. M.; THORP, R. W. 2002. Crop pollination from native bees at risk from agricultural intensification. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 99, 16 812–16 816.
- KREZDORN, A. H. 1972. Pollination requirements of citrus. *Citrus Ind.*, v. 53, 5-7.
- LACERDA, C. F.; CARVALHO, C. M.; VIEIRA, M. R.; NOBRE, J. G. A.; NEVES, A. L. R.; RODRIGUES, C. F. 2010. Análise de crescimento de milho e feijão sob diferentes condições de sombreamento. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, v. 5, n. 1, p. 18-24.
- LAJOLO, F. M.; GENOVESE, M. I.; MENEZES, E. W. 1996. Qualidade nutricional. In: ARAÚJO, R. S.; RAVA, C. A.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, M. J. de O. *Cultura do feijoeiro comum no Brasil*. Piracicaba: POTAFOS.
- LEVY, S. 2011. What's best for bees. Pollinating insects are in crisis. Understanding bees' relationships with introduced species could help. *Nature*. 479: 164–165.

- LEWIS, G. P. 1987. Legumes of Bahia. Royal Botanic Gardens, Kew. p. 369.
- LEWIS, G.P.; SCHRIRE, B.D.; MACKINDER, B.A.; LOCK, J.M. 2005. Legumes of the World. Kew Royal Botanic Gardens.
- LOPES, I.S.; ZONARO, L.D.; CALVALCANTE, M.; DOS SANTOS, T.C.; SILVA, P.M.; LEGENDRE, A.O.; TALMON, J.L.B. 2018. Agrotóxicos: A Ameaça De Extinção Das Abelhas No Brasil. Programa Educativo e Social JC na Escola: Ciência Alimentando o Brasil, 95-110.
- MAGALHÃES, C.B.; FREITAS, B.M. 2013. Introducing nests of the oil-collecting bee *Centris analis* (Hymenoptera: Apidae: Centridini) for pollination of acerola (*Malpighia emarginata*) increases yield. *Apidologie* 44:234–239.
- MAIA, F. M. C. ; LOURENÇO, D. A. L.; TOLEDO, V. A. A. 2010. Aspectos econômicos e sustentáveis da polinização por abelhas. *Sistemas de Produção Agropecuária (Ciências Agrárias, Animais e Florestais)*.
- MALAGODI-BRAGA, K.S.; KLEINERT, A.M.P. 2004. Could *Tetragonisca angustula* Latreille (Apinae, Meliponini) be effective as strawberry pollinator in greenhouses? *Aust. J. Agric. Res.* n. 55, p.771-773.
- MALAGODI-BRAGA, K.S; PEIXOTO KLEINERT, A.D.M. 2004. Could *Tetragonisca angustula* Latreille (Apinae, Meliponini) be effective as strawberry pollinator in greenhouses? *Aust J Agric Res* 55:771–773.
- MALERBO-SOUZA, D. T. *et al.*, 2000. Polinização em flores do abacateiro (*Persea americana* Mill.). *ActaScientiarum*, Maringá, v.22, n.4, p.937-941.
- MALERBO-SOUZA, D.T.; NOGUEIRA-COUTO, R.H.; COUTO, L.A. 2003. Polinização em cultura de laranja (*Citrus sinensis* L. Osbeck, var. Pera-Rio). *Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science*, v. 40, p.237–242.
- MANZOOR-UL-HAQ; RAFIE-UL-DIN, M.; GHAFAR, A. 1978. Effect of insect pollination on fruit bearing in Kinnow Mandarin (*Citrus reticulata*), and physical and chemical properties of the

fruit. J. Apic. Res., v. 19,p. 83-88.

MARCO JR, P.;COELHO, F.M. Services performed by the ecosystem: forest remnants influence agricultural cultures pollination and production. Biodiversity and Conservation 13: 1245-1255.2004.

MARIOT, E. J. 1989.Ecofisiologia do feijoeiro. p. 25-41. In Iapar. O feijão no Paraná. Londrina. 303 p

MASIGA, R. *et al.*, 2014. Do French beans (*Phaseolus vulgaris*) grown in proximity to Mt Kenya forest inKenya experience pollination deficit? Journal of Pollination Ecology, 14(24), 255-260. 2014.

MCGREGOR, S. E. *et al.*, 1955. The role of honeybees in cotton pollination. Agron. Jour., v.47, p.23-25.

McGREGOR, S. E. 1976. Insect Pollination of Cultivated Crop Plants. USDA, 849p.

MESQUITA, F.R. *et al.*, 2012. Linhagens de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.): composição química e digestibilidade protéica. Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v.31, p.1114-1121, Revista de Ciências Agroveterinárias, Lages, v.11, n.1.

MESSAGE, D. *et al.*, 2012. Situação da sanidade das abelhas no Brasil. In: FONSECA VLI *et al.* (Orgs.). Polinizadores no Brasil: contribuição e perspectivas para a biodiversidade, uso sustentável, conservação e serviços ambientais. São Paulo: EDUSP. p.237-256.

MICHENER, C. D. 2 0 0 7 . The Bees of the World. Baltimore, Johns Hopkins University Press. 953p.

MICHENER, C. D. 1979. The Social Behavior of the Bees – A Comparative Study. Cambridge, Harvard University, 404p.

MILFONT, M.O.; ROCHA, E.E.M.; LIMA, A.O.N.; FREITAS, B.M. 2013. Higher soybean production using honeybee and wild pollinators: a sustainable alternative to pesticides and autopollination.Environmental Chemistry Letters 11:335-341.

- MIORINI, T. J. J.; SAAD, J. C. C.; MENEGALE, M. L. 2011. Supressão de água em diferentes fases fenológicas do feijoeiro. *Irriga, Botucatu*, v. 16, n. 4, p. 360-368.
- MIRANDA, N.O.; BELMAR, N.C. 1977. Dèficit hídrico y frecuencia de riego en frijol (*Phaseolus vulgaris*L.). *Agricultura TÈcnica*, v.37, n.3, p.111- 117.
- MONTERROSO, V. A., WIEN, H. C. 1990. Flower and Pod Abscission Due to Heat Stress in Beans. *Journal of the American Society for Horticultural Science, Melbourne*, v. 115, p. 631–634.
- MORANDIN L.A.; WINSTON M.L. 2005. Wild bee abundance and seed production in conventional, organic, and genetically modified canola. *Ecological Applications*, 15, 871-881.
- MOREIRA, E. F.; BOSCOLO, D.; VIANA, B. F. 2015. Spatial heterogeneity regulates plant-pollinator networks across multiple landscape scales. *PloS one*, 10(4), e0123628.
- MORETI, A.C.C.C.; SILVA, R.M.B.; SILVA, E.C.A. *et al.*, 1994. Polinização do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) efetuada por *Apis mellifera* L. B. *Indústr. anim.*, Nova Odessa, v.51, n.2, p.119-124. 1994.
- MOURA, J.I.L.; CIVIDANES, F.J.; DOS SANTOS FILHO, L.P.; VALLE, R.R. 2008. Polinização do dendezeiro por besouros no sul da Bahia. *Pesqui Agropecu Bras* 43:289–294.
- NADIA, T.L.; MACHADO, I.C.; LOPES, A.V. 2007. Fenologia reprodutiva e sistema de polinização de *Ziziphus joazeiro* Mart. (Rhamnaceae): atuação de *Apis mellifera* e de visitantes florais autóctones como polinizadores. *Acta Botanica Brasilica*, v. 21, p. 835-845.
- NASCIMENTO, S. P. 2009. Efeito do déficit hídrico em feijão-caupi para identificação de genótipos com tolerância à seca. 2009. 109 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Piauí. Teresina-PI.
- NETO, D. D. ; FANCELLI, A. L. 2000. Produção de Feijão. Editora Agropecuária. Guaíba, RS.
- NOGUEIRA-NETO, P.; CARVALHO, A.; ANTUNES-FILHO, H. 1959. Efeito da exclusão dos insetos polinizadores na produção do café Bourbon. *Bragantia* 18:441–468.

- NOVAIS, S. M.; NUNES, C. A.; SANTOS, N. B.; DAMICO, A. R.; FERNANDES, G. W.; QUESADA, M.; NEVES, A. C. O. 2016. Effects of a possible pollinator crisis on food crop production in Brazil. *PloS one*, 11(11), e0167292.
- NUNES-SILVA, P. *et al.*, 2013. Stingless bees, *Melipona fasciculata*, as efficient pollinators of eggplant(*Solanum melongena*) in greenhouses. *Apidologie* 44:537–546.
- OLIVEIRA, M. O. 2015. Declínio populacional das abelhas polinizadoras de culturas agrícolas. *ACTAApicola Brasilica*, v. 3, n. 2, p. 01-06.
- PALMER, M. *et al.*, 2004. Ecology for a crowded planet. *Science*, 304: 1251-1252.
- PARANHOS B.A.J.; WALDER J.M.M.; MARCHINI L.C. 1998. Densidade de colméias de abelhas africanizadas, *Apis mellifera* L. 1758 (Hymenoptera: Apidae), para polinizar maçã cv. Scientia Agricola 55: 85-88.
- PARANHOS, B.A.J. 1996 Aumento da produção e qualidade de laranjas Hamlin, Natal, Valência e Pera (*Citrus sinensis* O.), através da polinização por abelhas, *A. mellifera* L. 1758 (Hymenoptera: Apidae). Tese de Doutorado, Faculdade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Universidade Estadual Paulista.
- PAULA JUNIOR, T. J.; VENZON, M..2007. Culturas: Manual de Tecnologias Agrícolas.
- PAULA JÚNIOR, T. J.; VIEIRA, R. F.; TEIXEIRA, H.; COELHO, R. R.; CARNEIRO, J. E. S.; ANDRADE, M. J. B.; RESENDE, A. M. 2008. Informações técnicas para o cultivo de feijoeiro-comum na região central brasileira: 2007-2009. Viçosa: EPAMIG 180p.
- PEDRO, S. R. M. 2014. The Stingless Bee Fauna In Brazil (Hymenoptera: Apidae). *Sociobiology*, 61(4), 348–354. DOI: 10.13102/sociobiology. v61i4.348-354.
- PERUQUETTI, R.C.; TEIXEIRA, L. V.; COELHO, F. M. 2017. Introdução ao estudo sobre polinização. Grupo de estudos sobre abelhas. Disponível em: <<http://www.ufac.br/ppgespa/polen>>. Acesso em: 15 de out. 2018.

- PETTIS, J.S. *et al.*, 2013. Crop pollination exposes honeybees to pesticides which alters their susceptibility to the gut pathogen *Nosema ceranae*. *PloS one* 8: 9p.
- PINHEIRO, J.N.; FREITAS, B.M. 2010. Efeitos letais dos pesticidas agrícolas sobre polinizadores e perspectivas de manejo para os agroecossistemas brasileiros. *Oecologia Australis*, v. 14, p.266-281.
- PINHEIRO, P.V. FARIA, J.C. 2005. Fluxo gênico em feijoeiro comum: ocorrência e possíveis consequências. Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA. 28p.
- PORCH, T. G.; M. JAHN. 2001. Effects of high-temperature stress on microsporogenesis in heat-sensitive and heat-tolerant genotypes of *Phaseolus vulgaris*. *Plant Cell Envir.*, 24 (7): 723-731.
- POSSE, S. C. P. *et al.*, 2010. Informações técnicas para o cultivo do feijoeiro comum na região central-brasileira: 2009-2011. Vitória: INCAPER, 245 p.
- POTTS, S.G. *et al.*, 2010. Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends Ecol. Evol.* n. 25, p. 345- 353.
- POTTS, S.G. *et al.*, 2016. Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature* 540:220– 229.
- RAMALHO, M.A.P.; FERREIRA, M.M. 1979. Comportamento de cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em relação ao florescimento e vingamento das vagens. *Ciência e Prática*, Lavras, v. 3, n. 1, p. 80-83.
- REIS, W.P.; RAMALHO, M.A.P; CRUZ, J.C. 1985. Arranjos e populações do feijoeiro na consorciação com o milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 20, n. 5, p. 575- 584.
- RIBAS, P. P.; MATSUMURA, A. T. S. 2009. A química dos agrotóxicos: impacto sobre a saúde e meio ambiente. *Revista Liberato*, v. 10, n. 14.
- RICKETTS, H.T. *et al.*, 2004. Economic value of tropical forest to coffee production. *Proceedings of National Academy of Sciences*, v. 101 n. 34, p. 12579-12582.

- RICKETTS, T.H. *et al.*, 2008. Landscape effects on crop pollination services: are there general patterns? *Ecology Letters* 11: 499–515.
- ROBINSON, R.A; SUTHERLAND, W.J. 2002. Post-war changes in arable farming and biodiversity in Great Britain. *J Appl Ecol* 39:157–176.
- ROCHA, M.C.L.S.A.; ALENCAR, S. 2012. Efeitos dos agrotóxicos sobre as abelhas silvestres no Brasil: proposta metodológica de acompanhamento. Brasília: Ibama.
- ROSA J. M., ARIOLI C. J., NUNES-SILVA P., GARCIA F. R. M. 2019. Desaparecimento de abelhas polinizadoras nos sistemas naturais e agrícolas: Existe uma explicação?. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 18 (1), 154-162.
- ROSELINO, A.C.; SANTOS, A.S.B.; BEGO, L.R. 2010. Qualidade dos frutos de pimentão (*Capsicum annuum* L.) a partir de flores polinizadas por abelhas sem ferrão (*Melipona quadrifasciata anthidioides* Lepeletier 1836 e *Melipona scutellaris* Latreille 1811) sob cultivo protegido. *Rev Bras Biociências* 8:154–158.
- ROSELINO, A.C.; SANTOS, S.B. HRNCIR, M.; BEGO, L.R. 2009. Differences between the quality of strawberries (*Fragaria x ananassa*) pollinated by the stingless bees *Scaptotrigona* aff. *depilis* and *Nannotrigona testaceicornis*. *Genet Mol Res* 8:539–545.
- ROUBIK, D.W. 1989. Ecology and natural history of tropical bees. New York, Cambridge University Press, 314p.
- ROUBIK, D.W. 1995. Pollination of cultivated plants in the tropics. *FAO Agricultural Services Bulletin*, 118p.
- SABBAHI, R.; DE OLIVEIRA, D.; MARCEAU, J. 2005. Influence of honey bee (Hymenoptera: Apidae) density on the production of canola (Crucifera: Brassicaceae). *J. Econ. Entomol.* 98, 367–372.
- SANTOS, A.S.B.; ROSELINO, A.C.; BEGO, L.R. 2008. Pollination of cucumber, *Cucumis sativus* L. (Cucurbitales: Cucurbitaceae), by the stingless bees *Scaptotrigona* aff. *depilis* Moure and

Nannotrigona testaceicornis Lepeletier (Hymenoptera: Meliponini) in greenhouses. Neotrop Entomol 37:506–512.2008.

SANTOS, J. S. do. GAVILANES, M. L. Botânica. In:VIEIRA. C.; PAULA JÚNIOR.T. J.; BORÉM.A.2008. Feijão. 2a edição atualizada e ampliada, Viçosa. UFV. p. 41 -65.

SANTOS, S.A.B.; ROSELINO, A.C.; HRNCIR, M.; BEGO, L.R. 2009. Pollination of tomatoes by the stingless bee *Melipona quadrifasciata* and the honey bee *Apis mellifera* (Hymenoptera, Apidae). Genet Mol Res 8:751–757.

SCHLINDWEIN, C. et al. Diagnóstico e manejo dos polinizadores de mangabeira e aceroleira. In: ENCONTRO SOBRE ABELHAS, 7., 2006, Ribeirão Preto. Anais... Ribeirão Preto: Universidade de São Paulo, FFCLRP, 2006, p. 443-454.

SGROI, F.; PILATI, L.; COLUMBA, P.; FONTANA, P. 2018. Ecosystem services for farms: a methodological evaluation proposal of the pollination ecosystem service. In 55. Complesso monumentale di San Pietro. *Dipartimento di Scienze agrarie, alimentari e ambientali*. PERUGIA.

SHULER, R. E.; ROULSTON, T. H.; FARRIS, G. E. 2005. Farming practices influence wild pollinator populations on squash and pumpkin. J Econ Entomol 98: 790-795.

SILVA, C.I.; BORDON, N.G.; FILHO, L.C. R.; GARÓFALO, C.A. 2012. The importance of plant diversity in maintaining the pollinator bee, *Eulaema nigrata* (Hymenoptera: Apidae) in sweet passion fruit fields. Rev Biol Trop 60:1553–1565.

SILVA, N.N.A. 2013. Influência da proximidade de vegetação nativa na produção de *Vitis labrusca* L. CV. Isabel (Vitaceae) na em uma área da Zona da Mata Norte de Pernambuco. Dissertação (Mestrado em Botânica).

SILVA, S.R. ; ALMEIDA, N. M. ; SIQUEIRA, K.M. ; SOUZA, J. F. ; CASTRO, C.C. 2018. Isolation from natural habitat reduces yield and quality of passion fruit. PLANT BIOLOGY, v. 00, p. on line.

- SILVA, S.R.; MALERBO-SOUZA, D.T. 2003. Eficiência de extratos de plantas medicinais e aromáticas em atrair abelha africanizada (*Apis mellifera* L.) em cultura de abacateiro (*Persea americana* Mill.). Rev. Bras. Pl Med 6:56–59.
- SILVA, S.R.; MALERBO-SOUZA, D.T.; TOLEDO, V.D.A.A.D. 2002. Métodos para atrair a abelha *Apis mellifera* L. em cultura de abacate (*Persea americana* Mill.). Acta Sci Anim Sci 24:889–896. 2002.
- SILVA, V.R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. 2006. Variação na temperatura do solo em três sistemas de manejo na cultura do feijão. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 30(3), 391-399.
- SILVEIRA, F. S.; MELO, G. A. R.; ALMEIDA, E. A. B. 2002. Abelhas Brasileiras, Sistemática e Identificação. Belo Horizonte, Fernando A. Silveira. 253p.
- SILVEIRA, P. M. da; STONE, L. F. 1994. Irrigação do feijoeiro por aspersão. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v.17, n.178, p.28-34.
- SILVEIRA, P. M.; PORTES, T.A.; STONE, L. F. 1980. Idade de floração e vingamento de flores em duas cultivares de feijão. Pesq. Agropec. Bras., 15 (2): 229-232.
- SIQUEIRA, K.M.M. *et al.*, 2009. Ecologia da polinização do maracujá-amarelo, na região do Vale do Submédio São Francisco. Revista Brasileira de Fruticultura, 1:1–12.
- SPRENT, J.I. 2001. Nodulation in legumes. Kew: Royal Botanic Gardens. 146p.
- STEFFAN-DEWENTER, I.; POTTS, S. G.; PACKER, L. 2005. Pollinator diversity and crop pollination services are at risk. Trends Ecol. Evol. 20, 651.
- STEVENS, P. F. 2006. «Fabaceae». Angiosperm Phylogeny Website. Version 7 May 2006. Consultado em 28 Abril 2008
- TAKI, H. *et al.*, 2011. Plantation vs. natural forest: Matrix quality determines pollinator abundance in crop fields. Scientific Reports, v.1, n. 132, p.1-4.
- TCHUENGUEM FOHOUE, F.N. *et al.*, 2009. Pollination and yield responses of cowpea (*Vigna*

- unguiculata L. Walp.) to the foraging activity of *Apis mellifera adansonii* (Hymenoptera: Apidae) at Ngaoundéré (Cameroon). *African Journal of Biotechnology*, 8: 1988-1996.
- THOMSON, J. D.; GOODELL, K. 2001. Pollen removal and deposition by honeybee and bumblebee visitors to apple and almond flowers. *J. Appl. Ecol.* 38, 1032–1044.
- TILMAN, D.; CASSMAN, K.; MATSON, P.; NAYLOR, R.; POLASKY, S. 2002. Agricultural sustainability and the costs and benefits of intensive production practices. *Nature* 418, 671–677.
- TRINDADE, R.C. *et al.*, 2004. *Candida sergipensis* a new asexual yeast species isolated from frozen pulp of tropical fruits. *Antonie van Leeuwenhoek*, v. 86, p. 27-32.
- TSCHARNTKE, T. *et al.*, 2002. Contribution of small habitat fragments to conservation of insect communities of grassland-cropland landscapes. *Ecol Appl* 12:354–363.
- VAISSIÈRE, B.E.; FREITAS, B.M.; GEMMILL-HERREN, B. 2011. Protocol to detect and assess pollination deficits in crops: a handbook for its use. FAO, Rome.
- VANDERMEER, J.; PERFECTO, I. 2007. The Agricultural Matrix and a Future Paradigm for Conservation. *Conservation Biology* 21(1):274-7.
- VIANA, A.P. *et al.*, 2006. Genetic diversity in yellow passion fruit populations. *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, v.6, p.87-94.
- VIANA, B.F. *et al.*, 2012. How well do we understand landscape effects on pollinators and pollination services? *J Pollinat Ecol* 7:31–41.
- VIANA, B.F. *et al.*, 2014. Stingless bees further improve apple pollination and production. *Journal of Pollination Ecology* 14:261–269.
- VIEIRA, C.; PAULA JÚNIOR, T. J. de; BORÉM, A. 2011. Feijão. 2. ed. Viçosa, MG: UFV. 600 p.
- VIEIRA, C.; PAULA JÚNIOR, T. J. ; BORÉM, A. 2006. Feijão. 2a Edição. Editora UFV. Viçosa, MG.

- VIEIRA, C.; PAULA JÚNIOR.T. J.; BORÉM.A. 2008. Feijão. 2a edição atualizada e ampliada,Viçosa. UFV. p. 41 - 65.
- VILHENA, A.M.G.F.; AUGUSTO, S.C. 2007. Polinizadores da aceroleira *Malpighia emarginata* DC (Malpighiaceae) em área de cerrado no Triângulo Mineiro. Bioscience Journal, v. 23, p.14-23.
- WASER, N. M.; PRICE, L. W. 1991. Outcrossing distance effects in *Delphinium nelsonii*: pollen loads, pollen tubes, and seed set. Ecology 72, 171–179.
- WATERS, N.D. 1972. Honey Bee activity in blooming onion fields in Idaho. American Bee Journal,v. 112,p.218-219.
- WATSON, L.; DALLWITZ, M.J. 2009. The families of flowering plants: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. Disponível em <http://delta-intkey>. Acesso em 10 de maio de 2017.
- WELLS, W. C.; ISOM, W. H.; WAINES, J. G. 1988.Outcrossing rates of six common bean lines. Crop Science, Madison, v. 28, n. 1, p. 177-178.
- WHITE, J.W.; IZQUIERDO, J. 1991. Physiology of yield potential and stress tolerance. In: Van Schoonhoven A, Voysest O, eds. Common beans: research for crop improvement. Wallingford, UK: CAB International and CIAT, 287–380.
- WIDHIONO, I; SUDIANA,E; DARSONO, D. 2017. Diversity of Wild Bees along Elevational Gradient in an Agricultural Area in Central Java, Indonesia. Psyche A Journal of Entomology 2017(9):1- 5.
- WILLIAMS, G. R. *et al.*, 2010. Colony collapse disorder in context. Bioessays, v. 32, n. 10, p. 845-846.
- WITTER, S. *et al.*, 2012. Desempenho de cultivares de morango submetidas a diferentes tipos de polinizaçãoem cultivo protegido. Pesqui Agropecu Bras 47:58–65.
- WITTER, S. *et al.*, 2014. The bee community and its relationship to canola seed production in homogenousagricultural areas. Journal of Pollination Ecology, v.12, n.3, p.15-21.

- WITTER, S. *et al.*, 2015. Stingless bees as alternative pollinators of canola. *Journal of Economic Entomology* 108:880– 886.
- WITTER, S.; BLOCHTEIN, B. 2003. Efeito da polinização por abelhas e outros insetos na produção desementes de cebola. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, v. 38, p. 1399–1407.
- WOLOWSKI, M.; AGOSTINI, K.; RECH, A.; VARASSIN, I.; MAUES, M. FREITAS, L.; CARNEIRO, L.; BUENO, R.; CONSOLARO, H.; CARVALHEIRO, L.; SARAIVA, A.; SILVA, C. 2019. Relatório Temático sobre Polinização, Polinizadores e Produção de Alimentos no Brasil. 10.4322/978-85-60064-83-0.
- YAHARA, T. *et al.*, 2013. Global legume diversity assessment: concepts, key indicators, and strategies. *Taxon* 62, 249–266.
- YAMAMOTO, M. *et al.*, 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*, v. 43, p. 515–526.
- ZILIO, M. *et al.*, 2011. Contribuição dos componentes de rendimento na produtividade de genótipos crioulos de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 42, n. 2, p. 429-438.

Article 1

Global meta-network of legumes crops and floral visitors reveals abundance of exotic bees

Article published in Journal of Applied Entomology

ORIGINAL PAPER**Global meta-network of legume crops and floral visitors reveals abundance of exotic bees**

Cristiane de Souza Paulino¹; Camila Silveira Souza², Emmanuel Santa-Martinez³, Natan Messias Almeida⁴, Cibele Cardoso Castro^{1,5*}

¹Programa de Pós-Graduação em Botânica - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brazil, cristianepaulino2004@hotmail.com

²Campus Centro Politécnico, Departamento de Botânica, Programa de Pós-Graduação em Botânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brazil

³Department of Biology, Salt Lake Community College, Salt Lake City, Utah, United States of America, esantamartinez@gmail.com

⁴Universidade Estadual de Alagoas - Campus de Palmeira dos Índios, Alagoas, Brazil, natan.almeida@uneal.edu.br

⁵Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Garanhuns, PE, Brazil, cibele.castro@ufape.edu.br

*Corresponding author

Aknowledgements. We thank the Brazilian National Council for Scientific and Technological Development (CNPq; grants numbers 428303/2018-8 and 309668/2018-2), the Coordination of Superior Level Staff Improvement (CAPES; Finance code 001), CAPES/PNPD/UFPR (grant number 88887.318827/2019-00), the Programa de Pós-Graduação em Botânica da Universidade Federal Rural de Pernambuco and the Universidade Federal do Agreste de Pernambuco for the logistic support.

ORIGINAL CONTRIBUTION

Global meta-network of legume crops and floral visitors reveals abundance of exotic bees

Abstract. Legume crops (family Fabaceae, order Fabales) constitute a relevant component of the human food supply. In view of the global decline in crop production, as a result of increasing threats (such as habitat fragmentation and land use change) to pollinators, knowledge concerning legume floral visitors can contribute to world food security. In this study, a synthesis was performed of global data on interactions between legume crops and their floral visitors, in order to improve understanding of the structure of crop-floral visitor interactions and the roles of different species. A literature review was conducted using three databases, considering 15 legumes of economic importance, enabling the construction of a meta-network of plant-floral visitor interactions. Soybean, alfalfa, and common bean received the highest numbers of floral visitor species. A total of 208 floral visitor species were recorded, distributed in eight orders. The most diverse group was Hymenoptera (mainly bees), followed by Lepidoptera. The European honeybee *Apis mellifera* interacted with the highest number of plant species. Modularity analysis identified eight modules that included more than one order of floral visitors. Most species were classified as peripherals, with few links restricted to their own module. The three connector species were the bees *Bombus pascuorum*, *B. terrestris*, and *Megachile rotundata*. The only network hub was *A. mellifera*. The predominance of bees seemed to be related to the predominant floral morphology among the crops. The connector and hub species were typically generalists, and all except one species (*B. pascuorum*) were used as managed pollinators. The crops studied have an important role in global pollination resilience, maintaining a diversified fauna of pollinators other than bees.

1. Introduction

Legumes (family Fabaceae, order Fabales) constitute the second most important group of crops worldwide, after wind-pollinated grasses (Stagnari et al., 2017), with a global annual economic value of more than 160 billion dollars (90 billion and 70 billion dollars for soybean and other legumes, respectively; data for 2016, excluding alfalfa; FAOSTAT, 2020). This economic potential is related to the fact that legumes are adaptable to a broad range of edaphoclimatic conditions (Lewis et al., 2005),

and their leaves and seeds have valuable nutritional compositions for humans and livestock (Voisin et al., 2014; Stagnani et al., 2017). Furthermore, these species are used in consociation with crops of diverse plant families, due to their ability to fix nitrogen in the soil (Voisin et al., 2014; Stagnani et al., 2017). Given the threat of further reductions in pollination services, due to the decline in pollinators for pollinator-dependent crops (Potts et al., 2010; Reilly et al., 2020), it is evident that knowledge concerning legume pollination can contribute to world food security (Eilers et al., 2011; Smith et al., 2015). However, there has been no previous study that has integrated the available data on the interactions between pollinators and Fabaceae species of economic importance. Understanding of the structure of Fabaceae crop-pollinator interactions and the roles of pollinator species in these networks will assist in quantifying pollinator dependence and identifying particularly vulnerable crop species.

Many Fabaceae species of economic importance are autogamous (setting fruits after self-pollination, with some species being cleistogamous, where the flowers do not open and self-pollination is mandatory) and therefore do not depend on pollinators to set fruits and seeds. Nonetheless, the visits of pollinators to legume flowers can increase productivity and seed setting of the crop, with improvements of both quantity and quality, similar to the effects observed for crops in general (Potts et al., 2016). Examples of legumes that benefit from pollination services are white clover (*Trifolium repens* L.), red clover (*T. pratense* L.; Camacho & Franke, 2008), alfalfa (*Medicago sativa*; Riday et al., 2015), and soybean (Milfont et al., 2013). The Fabaceae is the fifth largest Angiosperm plant family, including around 720 genera and more than 19,300 species (Flora do Brasil, 2019). Members of this family are widely cultivated, occupying around 247 million hectares (FAOSTAT, 2018). Therefore, it is reasonable to suppose that the Fabaceae contribute to pollination resilience, since their flowers constitute a relevant source of floral resources for pollinators worldwide (Klein et al., 2018). This plant family is known to provide floral resources for a vast number of pollinator species, including invertebrates (bees, flies, moths, butterflies, and beetles) (Dutra et al., 2009; Goulson et al., 2011) and vertebrates (mainly birds and bats) (Gibbs et al., 1999; Oliveira & Sigrist, 2008).

The Fabaceae includes 15 species of economic importance that are used as human food and/or animal fodder, such as soybean [*Glycine max* (L.) Merr.], several beans, and alfalfa (*Medicago sativa*). Legume species are visited by both exotic and native pollinators. In tropical areas, the native bee species (Apidae: Meliponini) are the most frequently observed pollinators (Silveira et al., 2002; Pedro, 2014). These bees are less common in temperate regions (Michener, 2007), where the Andrenidae and Colletidae families are more important (Michener, 1979; Roubik, 1989; Silveira et al., 2002; Schlindwein, 2003), while the latter families are less frequent in tropical areas. In the USA, alfalfa flowers are commonly pollinated by managed colonies of honeybees, such as the exotic *Apis mellifera* L. in California and the leafcutting bee *Megachile rotundata* F. in the Pacific Northwest, as well as by some exotic *Bombus* species (Brunet and Stewart, 2010). In both tropical and temperate regions, native and exotic pollinators can improve legume crop productivity.

This study synthesizes global data on economically important Fabaceae species and their floral visitors, in order to answer the following questions: 1) How are plant-floral visitor interactions structured? 2) What roles do different species have, in terms of importance in the structure of the network interactions?

2. Materials and methods

2.1 Literature review

A literature review of the interactions reported globally between legume crops and pollinators was performed using three academic databases, without year restriction (the last search was conducted in September 2019): Web of ScienceTM (<https://www.webofknowledge.com>), Google Scholar[®] (www.scholar.google.com), and SciELO (<http://www.scielo.br>). The following keywords were combined with the scientific and popular names of 15 legume crops: ‘crop pollination’, ‘reproductive

requirements', 'crop yield', 'pollination', 'pollinator', 'reproductive efficiency', 'reproductive biology', and 'breeding system'. The crops were selected after a preliminary review of legumes used for food (human and cattle), wood production, and medicine. The species were the annuals alfalfa (*Medicago sativa* L.), peanut (*Arachis hypogaea* L.), pea (*Pisum sativum* L.), faba bean (*Vicia faba* L.), cowpea [*Vigna unguiculata* (L.) Walp.], common bean (*Phaseolus vulgaris* L.), runner bean (*Phaseolus coccineus* L.), pigeon pea [*Cajanus cajan* (L.) Millsp.], chickpea (*Cicer arietinum* L.), soybean [*Glycine max* (L.) Merr.], and perennial soybean [*Glycine wightii* (Graham ex Wight & Arn.) Verdc.], together with the woody species baru nut (*Dipteryx alata* Vogel), diesel tree (*Copaifera langsdorffii* Desf), gliricidia [*Gliricidia sepium* (Jacq.) Steud.], and jatobá (*Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne). The factor 'cultivar' was not included in the review.

After the review, the scientific names of the plants were checked and updated using SpeciesLink (<http://inct.splink.org.br/>) and the Missouri Botanical Garden's Tropicos (<http://www.tropicos.org>). For the floral visitors, Moure's Bee Catalogue (moure.cria.org.br) and the Global Names Resolver (resolver.globalnames.org) were employed. In order to avoid duplicates in the analysis, use was only made of the studies that presented plants and animals identified at the species level.

For the selected studies, recording was made of the study location (country), year of data collection, plant identities, and floral visitors reported in the interaction.

2.2 Analysis

A meta-network of global plant-floral visitor interactions (*sensu* Heilmann-Clausen, 2016; Araújo et al., 2018; Nascimento et al., 2020) was constructed using a binary matrix with floral visitors as columns and plants as lines, in which 1 indicated a reported interaction and zero represented no interaction reported. A modularity analysis with the meta-network was then performed to characterize the associations between the plants and the floral visitors. The existence of modules in pollination networks reflects preferential interaction between partners within the modules (Olesen et al., 2007; Araújo et al., 2018). In addition, modularity analysis allows subsequent evaluation of the roles of

species, identifying species important in maintaining the structure of the entire network (Olesen et al., 2007; Araújo et al., 2018).

The following analysis was performed using R software (R Core Team, 2016). The modularity was calculated with the DIRTLPAb + algorithm, which was recently implemented (Beckett, 2016; Liu and Murata, 2010). The computeModules function was estimated using the bipartite package (Dormann et al., 2008), defining the number of steps at 10^9 , and using default options. The modularity analysis was performed 1,000 times, in order to check the stabilization.

Since the network metrics may be affected by intrinsic characteristics such as the number of interacting species (Blüthgen et al., 2006; Fründ et al., 2016; Vizentin-Bugoni et al., 2016), the modularity significance observed was evaluated by comparing it with a null model. Here, the swap.web binary null model was used, similar to that proposed by Vázquez et al. (2005), which constrains the connectance and marginal totals. The 95% confidence interval for the modularity (DIRTLPAb +) metric was estimated from 10,000 simulated values, with a metric value being considered significant if the confidence intervals did not overlap (0.025-0.975). Finally, two indexes related at the species level were calculated: *c* (connectivity between modules) and *z* (degree of connectivity within the module). The *c* index quantifies the importance of a species as a connector of different modules, while the *z* index is the importance of the species within its own module (Olesen et al., 2007). According to the *c* and *z* values, species were classified as module hubs (generalists, being highly connected species linked to many species within their own modules), connectors (linking several modules), peripherals (specialists with only a few links, mostly to species within their own modules), and network hubs (super-generalists, acting as both connectors and module hubs), following the limits established by Olesen et al. (2007).

The difference in floral visitor composition among modules was illustrated using a correlation matrix of the composition of floral visitor orders as functional groups (Olesen et al., 2007), module

identity employing the corrplot package (Wei and Simko, 2017), and testing using the Chi square test. The network was illustrated using Pajek 4.09 software (Batagelj and Mrvar, 2003), with the method “Kamada-Kawai - separate components”, where the vertices (species) with the highest numbers of connections were attracted to the network center.

3. Results

3.1 Literature review and species composition

A total of 87 studies were found, of which 9 were excluded because they did not identify plants (4) or floral visitors (5) at the species level. Hence, the results presented are from 78 studies. There was a small difference in the proportions of studies conducted in tropical (34 studies, 46.6%) and temperate (44 studies, 56.4%) regions (Fig. 1). The oldest study was published in 1966. Most studies (80.7%) were published from the 2000s onwards (Fig. 2).

The plants that received the highest numbers of floral visitor species were *G. max* (60), *M. sativa* (40), *P. vulgaris* (33), *V. faba* (30), and *C. cajan* (21) (Table 1). A total of 208 floral visitors, distributed in eight orders (six invertebrate and two vertebrate), were recorded visiting the flowers of legume crops. The most diverse group was Hymenoptera (160 species, 76.9%), with bees as the majority (148 species, 92.5%). The second most representative group was Lepidoptera (16 species, 7.7%), followed by Diptera (13 species, 6.25%), Coleoptera (eight species, 3.8%), Hemiptera (three species, 1.4%), and Thysanoptera (three species, 1.4%). Vertebrates were represented by bats (Chiroptera, three species, 1.4%) and hummingbirds (Apodiformes, two species, 1%). The bee *A. mellifera* was the visitor that interacted with the highest number of plant species (11 species), being recorded in 57.6% (45) of the studies.

3.2 Meta-network of interactions

The interaction matrix included 3,120 interactions between plants and floral visitors (Fig. 3). The modularity analysis identified eight modules with a relatively high level of modularity ($Q = 0.73$, $p < 0.01$ for null models; Fig. 3). All the modules included more than one order of floral visitors, but the

frequencies of the orders differed among modules ($X^2 = 267.09$, $df = 63$, $p < 2.2e-16$; Fig. 3). For example, module 1 was strongly associated with bees, module 2 with bees and thrips, module 3 with dipterans, module 4 with hummingbirds, module 5 with bats, module 6 with lepidopterans, module 7 with thrips, and module 8 with beetles and flower bugs (Fig. 4).

Most of the 223 species (219 species, 98.20%) were classified as peripherals, with few links restricted to their own module (Fig. 5). Within the peripherals, 93.15% (204 species) were animals and 6.85% (15 species) were plants. The three connector species (1.34%) were bees (*Bombus pascuorum* Scopoli, 1763, *B. terrestris* Linnaeus, 1758, and *Megachile rotundata* Fabricius, 1793). The bee *A. mellifera* was the only network hub.

4. Discussion

The review showed heterogeneity in the number of studies, among the crops analyzed. Some crops were overrepresented, such as alfalfa (21 studies, 26.9%) and faba bean (20 studies, 25.6%). This overrepresentation did not reflect the production economic value, since only ten studies included soybean (12.8%), whose production is much higher than that of other crops. The high number of studies concerning alfalfa may have been due to its great importance as a cover and fodder crop in the United States, while pollinator management studies using *Megachile rotundata* started in around the 1950s (Kemp & Bosch, 2000).

The increasing number of studies since the 2000s may indicate the growing concern regarding the global pollinators' crisis, which has been reported since the late 1990s (Buchman & Nabhan, 1996), with increasing attention to this issue in the decades of 2000 and 2010 (Klein et al., 2007; Potts et al., 2010; Garibaldi et al., 2014; Giannini et al., 2017). The similar proportions of studies conducted in tropical regions (e.g., Ramos et al., 2018; Shebl & Mahmoud, 2015) and temperate regions (e.g., Marzinzig et al., 2018; Banaszak-Cibicka et al., 2019) reinforce those concerns regarding the link between crop production and pollination services are well established worldwide, with many studies focusing on mitigation of the pollinators crisis. The increase of publications since 2000 could also reflect the increased spread of crops around the world, together with increased cultivation areas. Thus,

studies concerning the pollinators of legumes could have been intensified by the introduction of outcrossing legume crops to different countries. It should be noted that prior to 1990, there were many studies related to crop pollination, but they were published in non-indexed journals and are absent in the most important current scientific databases (Giannini et al., 2015).

The floral visitor groups recorded here corroborated the tendency for grouping in distinct modules that has been observed in previous studies (Danieli-Silva et al., 2012; Watts et al., 2016; Nascimento et al., 2020). The interaction patterns in the modules seemed to be guided, in a general manner, by the spatial co-occurrence and similarity of the organisms (plants and floral visitors). This tendency was mainly observed in studies that covered large areas, although there are few studies on this theme (Heilmann-Clausen et al., 2016; Araújo et al., 2018). The studies indicated the maintenance of a high diversity of pollinators by legume crops worldwide.

The four plant species that were visited by the highest numbers of floral visitors were those included in the highest numbers of studies, namely alfalfa (21), faba bean (20), soybean (10), and common bean (8). The highest numbers of floral visitors may represent a sampling bias, due to higher numbers of studies on those species. Irrespective of such bias, it is important to note that crops visited by a high number of floral visitors tend to be less susceptible to the pollinators' crisis, compared to crops with a more restricted group of pollinators. Therefore, alfalfa, faba bean, soybean, and common bean could be considered as key species, within Fabaceae, for pollination resilience and global food security. They are mostly self-compatible, widely cultivated, provide floral resources for a wide range of pollinators, produce seeds and/or leaves with high nutritional value for humans and livestock, and fix nitrogen in the soil, which improves the conditions for cultivation of other crops (Stagnari et al. 2017).

On the other hand, plant species that interacted with a restricted number of pollinator species (fewer than 5) and/or that were included in isolated modules, such as perennial soybean (*H. stagnocarpa*) in module 5, and pea, peanut, and diesel tree in module 7, may represent groups more prone to be negatively impacted by the global pollinator crisis. These species were cited in few studies, which may explain the lower numbers of floral visitors recorded, so they deserve more attention in

future investigations.

Similar to previous findings for Angiosperms (Imperatriz-Fonseca et al., 2012) and Fabaceae species (Goulson et al., 2011), most studies (97.4%) recorded a predominance of floral visits by bees, which constituted the most diversified group observed here, being present in seven out of eight modules. The predominance of bees could be explained by the fact that most of the species studied here belong to the subfamily Faboidae, characterized by complex zygomorphic flowers with petals including a keel housing the stamens and pistil (Polhill, 1981). Such morphology implies a specialized pollination system, requiring pollinators with suitable size, strength, and behavior to be able to force their way into the keel and come into contact with the anthers and stigma during the collection of nectar, which is accumulated at the base of the flower. It is believed that the evolution of keel flowers has been mediated by insects of the order Hymenoptera, especially bees (Endress, 1994), and with large body size (Frankie et al., 1983). Faboidae flowers also have other characteristics associated with bee pollination, such as banner petals and/or landing platforms, colors ranging from white to purple, diurnal anthesis, and pollen and nectar as resources (Faegri & van der Pijl, 1979, but see Ollerton et al., 2009).

The greater association of modules 2 (*Vicia faba*) and 7 (*Pisum sativum*, *Arachis hypogaea*, and *Copaifera langsdorffii*) with thrips can be explained by the fact that these insects were only observed on the plants of those modules. Thrips feed on floral tissues, nectar, and pollen (Kirk, 1984), usually of unattractive flowers (Norton, 1984). These floral characteristics are observed in broad bean (Bond & Poulsen, 1983; Everwand et al., 2017) and peanut (Judd et al., 2009), species on which these insects were observed. The inefficiency of thrip movement, associated with the self-compatibility of these legume species, suggest that thrips may be pollinators for autogamous systems or in populations of species with high density and aggregate distribution (such as the cultivation of broad beans and peanuts), although no fruit set was tested after thrip pollination. However, thrips are pests, and some can transmit viruses, negatively affecting the plant (Jones, 2005; Riley et al., 2011).

The dipterans were the floral visitors with the highest power of association in module 3, with *C. arientinum* as the only plant species. The color of its flowers (from white to purplish) varies among

cultivars. The other floral features are those already mentioned for Faboidae and, therefore, do not explain the visitation of this specific group. Some Diptera, such as syrphids, can land on plants with petals in the same way as bees, because they are bee mimics, which might explain this association (Sadeghi, 2008; Doyle et al., 2020). Module 4 (*C. cajan*, *V. unguiculata*, *G. sepium*, and *D. alata*) was strongly associated with hummingbirds, due to the presence of *D. alata*, a tree whose attributes are often associated with pollination by birds, such as diurnal anthesis, abundance of nectar, absence of odor, and nectary distant from stigma and anthers (Oliveira & Sigrist, 2008). The strong association of module 5 (*G. wightii* and *H. stignocarpa*) with bats could be explained by the presence of *H. stignocarpa* and its large, dish-shaped (typical of the subfamily Detarioideae), clear, nocturnal flowers that produce a nectar with acrid odor, corresponding to a chiropterophily pollination system (Souza et al., 2016). Bats clearly formed a module loosely connected to the other modules, reinforcing that some vertebrate pollinators can form modules weakly connected to the rest of the pollinator community (Maruyama et al., 2019; Nascimento et al., 2020). It is interesting to note that module 4, which also included vertebrate pollinators (hummingbirds) and invertebrates associated with a tree species (*D.*

alata), had several connections with other modules, which could be explained by the greater number of invertebrate species (especially bees), compared to the bat module (module 5).

Module 6, composed of *P. vulgaris* (flowers ranging from white to purple) and *P. coccineus* (red flowers), presented some characteristics attractive to lepidopterans, such as the presence of nectar at the bottom of the flowers, diurnal anthesis, and mild odor. It is important to note that such insects usually act as nectar robbers, since they are not able to move the keel and come into contact with the sexual organs of the flower. Lastly, module 8 (*M. sativa*) was more closely associated with beetles. However, similar to the observations for module 3, its floral characteristics (small flowers arranged in dense inflorescences, with colors ranging from white to purple, and pollen and nectar as floral resources) are not necessarily typical of beetle flowers (robust petals and sepals, actinomorphic, large, individual, and with strong odor). It is important to stress that some of the beetle genera recorded visiting alfalfa flowers (*Lytta* and *Mylabris*) can eat leaf and flower parts, occasionally acting as pollinators (Bohart, 1958). *Cajanus cajan*, *P. sativum*, *C. langsdorffii*, *G. wightii*, and *G. sepium* were visited by only one functional group of floral visitors, which could be indicative of a specialized pollination system. However, this result may represent a sampling bias, since the analysis only included studies that provided the identification of floral visitors at the species level.

All the plant species were classified as peripherals. The connector species recorded here (*B. pascuorum*, *B. terrestres*, and *M. roduntata*) are typically generalists capable of exploiting many types of flower morphologies and floral resources, consequently visiting a higher number of plant species, compared to other bee species. Similarly, the only network hub, *A. mellifera* (which had the highest number of partners) also has a generalist foraging behavior and is widely recorded in crops and non-crop species worldwide (Garibaldi et al., 2014). Generalist pollinators are important for crop production because they are adapted to forage on, and efficiently pollinate, a broad range of floral types. This is the reason why *A. mellifera* and *B. terrestris* are two of the most used pollinators in agriculture, having considerable economic value (Kevan, 1997; Delaplane & Mayer, 2000).

However, it is important to stress that *A. mellifera* and *B. terrestris* are exotic species in many ecosystems and may cause critical ecological problems. *Apis mellifera*, for example, is known to negatively impact the relations between plants and native pollinators, reducing the diversity of the latter and the numbers of interactions in the pollination networks, consequently impacting the reproductive success of plants pollinated by native pollinators (Valido et al., 2019; Baronio et al., 2021, in press). Honeybees may also behave as nectar robbers, which can reduce the reproductive success of legume crops such as alfalfa (Cane, 2002), and may be inefficient pollinators for many crops, impacting crop yields (Garratt et al., 2014). Similarly, the introduction of *B. terrestris* beyond its native area may lead to a number of environmental problems, such as hybridization with subspecies or local species (resulting in the loss of valuable local adaptations), competition with other bees for food resources and nesting sites (which may lead to the extinction of native species), and the introduction of diseases and parasites (Velthuis & Doorn, 2006). Given the conflicting effects of exotic pollinators (considering that they are necessary to maintain world food production, but can also have negative impacts), it seems that combining exotic and native pollinators could be an attractive management strategy for improving crop production (Garibaldi et al., 2013, 2014).

Trigona spinipes, the other connector species, is a social bee known as a generalist pollinator that exhibits low selectivity in terms of habitat and nest requirements (Roubik, 2006; Antonini et al., 2013), and is benefited by environmental disturbances such as those caused by agriculture (Giannini et al., 2015). These features could provide an explanation for its role in the meta-network. Similarly, *B. pascuorum* is also considered to be a generalist forager that is well adapted to temperate regions, where, like other bumblebees, it is an important pollinator (Goulson, 2003).

5. Conclusions

A synthesis was performed using six decades of worldwide data on legumes of economic importance and potential pollinators. Most studies were conducted after the year 2000, when the global

pollinator crisis became well documented, and in similar proportions for tropical and temperate environments. Bees were the most important group of pollinators, especially those exhibiting generalist behavior and that might negatively impact the relations between plants and native bee species. Legumes of economic importance have an important role in global pollination resilience, maintaining a diversified fauna of pollinators other than bees, such as butterflies, flies, thrips, hummingbirds, and bats. Although the review of relevant studies undertaken in this work was extensive, it should be noted that several studies were not included here, because they were published in sources that were unavailable in the databases employed. The data revealed crops that have been less studied, as well as crops that are more prone to be negatively affected by the global pollinator crisis.

6. Conflict of Interest Statement

The authors declares that they do not have any kind of conflict of interests.

7. Author Contribution

Author 1, author 2 and author 6 conceived research.

Author 1 conducted data collection.

Author 2 analyzed data and conducted statistical analyses.

All authors wrote the manuscript.

Author 6 secured funding.

All authors read and approved the manuscript.

8. Data Availability Statement

All data used in this study are available at Castro (2021): Legumes meta-network. DOI: (<https://10.6084/m9.figshare.14417654>).

9. References

- Antonini, Y, Martins, R.P., Aguiar, L.M. & Loyola, R.D. (2013). Richness, composition and trophic niche of stingless bee assemblages in urban forest remnants. *Urban Ecosystems*, 16, 527-541.
- Araujo, A.C., González, A.M.M., Sandel, B., Maruyama, P.K., Fischer, E., Araújo, F.P., Coelho, A.G., Faria, R.R., Kohler, G., Las-Casas, F.M.G., Lopes, A.V., Machado, A.O., Machado, C.G., Machado, I.C., McGuire, J.A., Moura, A. C., Oliveira, G.M., Oliveira, P.E., Rocca, M.A., Rodrigues, L.C., Rodrigues, M., Rui, A.M., Sazima, I., Varassin, I.G., Wang, Z, Dalsgaard, B. & Svenning, J.C. (2018). Spatial distance and climate determine modularity in a cross-biomes plant–hummingbird interaction network in Brazil. *Journal of Biogeography*, 45, 1846-1858.
- Banaszak-Cibicka, W, Takács, V., Kęsy, M., Langowska, A., Blecharczyk, A., Sawińska, Z., Sparks, T. H., & Tryjanowski, P. (2019). Manure application improves both bumblebee flower visitation and crop yield in intensive farmland. *Basic and Applied Ecology*, 36, 26-33.
- Baronio, G., Souza, C.S., Silva, N.N.A. et al. (2021). Different visitation frequencies of native and non-native bees to vines: how much vegetation is necessary to improve fruit production? *Plant Biology* in press.
- Batagelj, V. & Mrvar, A. (2003). Pajek: Analysis and visualization of large networks. - *Preprint series*, 41, 1-28.
- Beckett, S. J. (2016). Improved Community detection in weighted bipartite networks. *Royal Society Open Science*, 3, 1-18. DOI: 10.1098/rsos.140536.
- Blüthgen, N., Menzel, F. & Blüthgen, N. (2006). Measuring specialization in species interaction networks. *Ecology*, 6, 1–12.
- Bohart, G. E. (1958). Alfalfa Pollinators with Special Reference to Species Other than Honey Bees. *Proc. 10th International Congress of Entomology*, 1956, 4, 929-937.

- Bond, D.A. & Poulsen, M.H. (1983). Pollination. In: Hebblethwaite, P.D. (Ed.), *The Faba Bean (Vicia Faba L.)*. (pp. 77–101). Butterworth, London.
- Brazil Flora G (2020): Brazilian Flora 2020 project - Projeto Flora do Brasil 2020. v 393.269. Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Dataset/Checklist. DOI:10.15468/1mtkaw
- Brunet, J. & Stewart, C. (2010). Impact of Bee Species and Plant Density on Alfalfa Pollination and Potential for Gene Flow. *Psyche: A Journal of Entomology*, 2010, 7.
- Buchmann, S.L. & Nabhan, G.P. (1996). *The Forgotten Pollinators*. Washington, DC: Island Press.
- Camacho, J.C.B. & Franke, L.B. (2008). Efeito da polinização sobre a produção e qualidade de sementes de *Adesmia latifolia*. *Revista Brasileira de Sementes*, 30, 81-90.
- Cane, J. (2002). Pollinating bees (Hymenoptera: Apiformes) of U.S. alfalfa compared for rates of pod and seed set. *Journal of Economic Entomology*, 95, 22–27.
- Danieli - Silva, A., Souza, J.M.T., Donatti, A.J., Campos, R.P., Vicente - Silva, J, Freitas, L. & Varassin, I.G (2012). Do pollination syndromes cause modularity and predict interactions in a pollination network in tropical high-altitude grasslands? *Oikos*, 121, 35-43.
- Delaplane, K.S. & Mayer, D.F. (2000). *Crop Pollination by bees*. Cambridge: CABI.
- Dormann, C.F., Frund, J. & Gruber, B. (2008). Introducing the bipartite package: analysing ecological networks. - *R News*, 8, 8–11.
- Doyle, T., Hawkes, W.L.S., Massy, R., Powney, G.D, Mensz, M.H.M. & Wotton, K. R. (2020). Pollination by hoverflies in the Anthropocene. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 287, 20200508
- Dutra, V.F., Vieira, M.F., Garccia, F.C.P. & Lima, H.C. (2009). Fenologia reprodutiva, síndromes de polinização e dispersão em espécies de Leguminosae dos campos rupestres do Parque Estadual do Itacolomi, Minas Gerais, Brasil. *Rodriguésia*, 60, 371-387.

- Eilers, E.J., Kremen, C., Smith Greenleaf, S., Garber, A.K. & Klein, A.M.. (2011). Contribution of Pollinator-Mediated Crops to Nutrients in the Human Food Supply. *PLoS One*, 6, e21363.
- Endress P. K. (1994). Diversity and evolutionary biology of the tropical flowers. Cambridge: Cambridge University Press.
- Everwand, G., Cass, S., Dauber, J., Williams, M. & Stout, J. (2017). Legume crops and biodiversity. In: Murphy-Bokern, D., Stoddard, F.L., Watson, C.A. (Eds.). *Legumes in Cropping Systems*. Wallingford: CAB International.
- Faegri, K. & van der Pijl, L. (1976). The principles of pollination ecology. Oxford: Pergamon Press.
- FAOSTAT – Food And Agriculture Organization Of The United Nations Statistics. <http://faostat.fao.org/>. Access in April 2020.
- Frankie, G.W., Haber, W.A. & Bawa, K.S. (1983). Characteristics and organization of the large bee pollination system in the Costa Rican dry forest. In Jones, C.E. & Little, R.J. (Eds.). *Experimental Pollination Biology* (pp. 411-447.). New York: Scientific and Academic Editions.
- Fründ, J., McCann, K.S. & Williams, N.M. (2016). Sampling bias is a challenge for quantifying specialization and network structure: lessons from a quantitative niche model. *Oikos*, 125, 502–513. DOI: 10.1111/oik.02256
- Garibaldi, L.A., Steffan-Dewenter, I., Winfree, R. et al. (2013). Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honeybee abundance. *Science*, 339 (6127), 1608-1611.
- Garibaldi, L.A., Carvalheiro, L.G., Leonhardt, S.D., Aizen, M.A., Blaauw, B.R., Isaacs, R., Kuhlmann, M., Kleijn, D., Klein, A.M., Kremen, C., Morandin, L., Scheper, J. & Winfree, R. (2014). From research to action: enhancing crop yield through wild pollinators. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 12, 439–447.
- Garratt, D.J., Coston, C.L., Truslove, M.G., Lappage, C., Polce, R., Dean, J.C., Biesmeijer, & Potts, S.G. (2014). The identity of crop pollinators helps target conservation for improved ecosystem services. *Biological Conservation*, 169, 128-135.
- Giannini, T. C., Cordeiro, G.D., Freitas, B.M., Saraiva, A. M. & Imperatriz-Fonseca, V. L. (2015). The

dependence of crops for pollinators and the economic value of pollination in Brazil. *Journal of Economic Entomology*, 108, 849-857.

Giannini, T.C., Costa, W.F., Cordeiro, G.D., Imperatriz-Fonseca, V.L., Saraiva, A.M., Biesmeijer, J. & Garibaldi, L.A. (2017). Projected climate change threatens pollinators and crop production in Brazil. *PLoS ONE*, 12(8), e0182274.

Gibbs, P. E., Oliveira, P. E. & Bianchi, M. B. (1999). Postzygotic control of selfing in *Hymenaea stigonocarpa* (Leguminosae - Caesalpinioideae), a bat-pollinated tree of the Brazilian cerrados. *International Journal of Plant Science*, 160, 72-78.

Goulson, D. (2003). *Bumblebees: Ecology and Behaviour*. Oxford: University Press.

Goulson, D., Kaden, J.C., Lepais, O., Lye, G.C. & Darvill, B. (2011). Population structure, dispersal and colonization history of the garden bumblebee *Bombus hortorum* in the Western Isles of Scotland. *Conservation Genetics*, 12, 867-879.

Heilmann-Clausen J. (2016). Citizen science data reveal ecological, historical and evolutionary factors shaping interactions between woody hosts and wood-inhabiting fungi. *New Phytologist*, 212, 1072-1082.

Imperatriz-Fonseca, V.L., Canhos, D.A.L., Alves, D.A. & Saraiva, A.M. (2012). *Polinizadores no Brasil. Contribuição para a biodiversidade, uso sustentado, conservação e serviços ambientais*. São Paulo: Universidade de São Paulo.

- Jones, D.R. (2005). Plant viruses transmitted by thrips. *European Journal of Plant Pathology*, 113, 119–157.
- Judd, W.S., Campbell, C.S., Kellogg, E.A., Stevens, P.F. & Donoghue, M.J. (2009). *Sistemática vegetal: Um enfoque filogenético*. 3.ed. Porto Alegre: Artmed.
- Kemp, W. & Bosch, J. (2000). Development and emergence of the alfalfa pollinator *Megachile rotundata* (Hymenoptera: Megachilidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 93, 904–911.
- Kevan, P.G. (1997). Honeybees for better apples and much higher yields: study shows pollination services pay dividends. *Canadian Fruitgrower*, 14, 16.
- Kirk, W.D.J. (1984). Pollen feeding in thrips (Insecta: Thysanoptera). *Journal of Zoology*, 204, 107–117.
- Klein, A.M., Boreux, V., Fornoff, F., Mupepele, A.C. & Pufal, G. (2018). Relevance of wild and managed bees for human well-being. *Current Opinion on Insect Science*, 26, 82-88.
- Klein, A.M., Vaissière, B.E., Cane, J H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C. & Tscharntke, T. (2007). Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 274, 303–313.
- Lautenbach, S., Seppelt, R., Liebscher, J. & Dormann, C.F. (2012). Spatial and temporal trends of global pollination benefit. *PloS One*, 7(4), e35954.
- Lewis, G., Schrire, B., Mackinder, B. & Lock, M. (2005). *Legumes of the world*. Kew: The Royal Botanic Gardens.
- Liu, X. & Murata, T. (2010). An efficient algorithm for optimizing bipartite modularity in bipartite networks. *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, 14, 408–415.
- Maruyama, P.K., Bonizario, C., Marcon, A.P., D'Angelo, G., Silva, M. M., Silva Neto, E. N., Oliveira,

- P. E., Sazima, I., Sazima, M., Vizentin-Bugoni, J., Anjos, L., Rui, A. M. & Marcal Junior, O. (2019). Plant-hummingbird interaction networks in urban areas: Generalization and the importance of trees with specialized flowers as a nectar resource for pollinator conservation. *Biological Conservation*, 230, 187-194.
- Marzinzig, B., Brünjes, L., Biagioni, S., Behling, H., Link, W. & Westphal, C. (2018). Bee pollinators of faba bean (*Vicia faba* L.) differ in their foraging behaviour and pollination efficiency. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 264, 24-33.
- Michener, C.D. (1979). Biogeography of the bees. *Annals of the Missouri Botanical Gardens*, 66, 277–347.
- Michener, C.D. (2007). *The Bees of the World*. 2nd Edition. Baltimore: John Hopkins University Press.
- Milfont, M. O., Rocha, E., Lima, A. O. N. & Freitas, B. (2013). Higher soybean production using honeybee and wild pollinators: a sustainable alternative to pesticides and autopollination. *Environment Chemical Letters*, 11, 335-341.
- Nascimento, V.T., Agostini, K., Souza, C.S., & Maruyama, P.K. (2020). Tropical urban areas support highly diverse plant-pollinator interactions: an assessment from Brazil. *Landscape and Urban Planning*, 198, 103801.
- Norton, S.A. (1984). Thrips pollination in the lowland forest of New Zealand. New Zealand. *Journal of Ecology*, 7, 157–164.
- Olesen, J.M., Bascompte, J., Dupont, Y.L. & Jordano, P. (2007). The modularity of pollination networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 19891-19896.
- Oliveira, M.B. & Sigrist, M.R. (2008). Fenologia reprodutiva, polinização e reprodução de *Dipteryx alata* Vogel (Leguminosae - Papilionoideae) em Mato Grosso do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Botânica*, 31, 195-207.

- Ollerton, J., Alarcón, R., Waser, N. M., Price, M. V., Watts, S., Cranmer, L., Hingston, A., Peter, C. I., & Rotenberry, J. (2009). A global test of the pollination syndrome hypothesis. *Annals of Botany*, 103(9), 1471- 1480.
- Pedro, S.R.M. (2014). The stingless bee fauna in Brazil (Hymenoptera: Apidae). *Sociobiology*, 61, 348-354.
- Polhill, R.M. (1981). Papilionoideae. In Polhill, R. M. & Raven, P. H (Eds.) *Advances in Legume Systematics*. (pp.191-208). Kew: Royal Botanic Gardens.
- Potts, S. G., Biesmeijer, J. C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O. & Kunin, W. E. (2010). Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology and Evolution*, 25, 345-353.
- Potts, S.G., Imperatriz-Fonseca, V., Ngo, H.T., Aizen, M.A., Biesmeijer, J.C., Breeze, T.D., Dicks, L.V., Garibaldi, L.A., Hill, R., Settele, J. & Vanbergen, A.J. (2016). Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*, 540, 220-229.
- R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Ramos, D.L., Bustamante, M.M.C., Silva, F.D.S. & Carneiro, L.G. (2018) Crop fertilization affects pollination service provision – Common bean as a case study. *PLoS ONE* 13(11): e0204460. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0204460>
- Reilly, J. R., Artz, D. R., Biddinger, D., Bobiwash, K., Boyle, N. K., Brittain, C., Brokaw, J., Campbell, J. W., Daniels, J., Elle, E., Ellis, J. D., Fleischer, S. J., Gibbs, J., Gillespie, R. L., Gundersen, K. B., Gut, L., Hoffman, G., Joshi, N., Lundin, O., Mason, K., McGrady, C. M., Peterson, S. S., Pitts-Singer, T. L., Rao, S., Rothwell, N., Rowe, L., Ward, K. L., Williams, N. M., Wilson, J. K., Isaacs, R. & Winfree, R. (2020). Crop production in the USA is frequently limited by a lack of pollinators. *Proceedings of the Royal Society B*, 287, 20200922.
- Riday, H., Reisen, P., Raasch, J.A., Santa-Martínez, E. & Brunet, J. (2015). Selfing rate in an alfalfa seed production field pollinated with leafcutter bees. *Crop Science of America*, 55,1–9.

- Riley, D.G., Joseph, S.V., Srinivasan, R. & Diffie, S. (2011). Thrips vectors of tospoviruses. *Journal of Integrated Pest Management*, 2, 1–10
- Roubik, D.W. (1989). Ecology and natural history of tropical bees. New York: Cambridge University Press.
- Roubik, D.W. (2006). Stingless bee nesting biology. *Apidologie*, 37, 124-143.
- Sadeghi, H. (2008). Abundance of adult hoverflies (Diptera: Syrphidae) on different flowering plants. *Caspian Journal of Environmental Sciences*, 6, 47-51.
- Schindwein C. (2003). Panurginae (Hymenoptera, Andrenidae) in Northeastern Brazil, p. 217–222. In: G. A. R. Melo & I. Alves-dos-Santos (Eds.). *Apoidea Neotropica: Homenagem aos 90 Anos de Jesus Santiago Moure*. (pp. 320). Criciúma: Editora UNESC.
- Shebl, M. & Mahmoud, F. (2015). Bee diversity (Hymenoptera: Apoidea) visiting broad bean (*Vicia faba* L.) flowers in Egypt. *Zoology in the Middle East*, 61, 256-263.
- Silveira, F. S., Melo, G. A. R. & Almeida, E. A. B. (2002). *Abelhas brasileiras: sistemática e identificação*. Belo Horizonte: Editora Eletrônica Composição e Arte.
- Smith, M., Singh, G., Mozaffarian, D. & Myers, S (2015). Effects of decreases of animal pollinators on human nutrition and global health: a modelling analysis. *The Lancet*, 386, 1964-1972.
- Souza, I., Funch, L. & Queiroz, L. (2016). Flora da Bahia: Leguminosae – *Hymenaea* (Caesalpinioideae: Detarieae). SITIENTIBUS, Série Ciências Biológicas. 16. DOI: 10.13102/scb1092.
- Stagnari, F., Maggio, A., Galieni, A. & Pisante, M. (2017). Multiple benefits of legumes for agriculture sustainability: an overview. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 4, 2.
- Valido A., Rodríguez-Rodríguez, M.C. & Jordano, P. (2019). Honeybees disrupt the structure and functionality of plant-pollinator networks. *Scientific Reports*, 9(1):4711.
- Vázquez, D.P., Morris, W.F. & Jordano, P. (2005). Interaction frequency as a surrogate for the total

effect of animal mutualists on plants. *Ecology Letters*, 8, 1088–1094.

- Velthuis, H.H.W. & van Doorn, A. (2006). A century of advances in bumblebee domestication and the economic and environmental aspects of its commercialization for pollination. *Apidologie*, 37, 421–451.
- Vizentin-Bugoni, J., Maruyama, P. K., Debastiani, V.J., Duarte, L.S., Dalsgaard, B. & Sazima, M. (2016). Influences of sampling effort on detected patterns and structuring processes of a Neotropical plant–hummingbird network. *Journal of Animal Ecology*, 85, 262–272.
- Voisin, A. S., Gueguen, J., Huyghe, C., Jeuffroy, M.H., Magrini, M. B., Jean-Marc, M., Mougél, C., Pellerin, S. & Pelzer, E. (2013). Legumes for feed, food, biomaterials and bioenergy in Europe: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34. DOI: 10.1007/s13593-013-0189-y.
- Watts, S., Dormann, C.F., González, A.M.M, Ollerton, J. (2016). The influence of floral traits on specialization and modularity of plant–pollinator networks in a biodiversity hotspot in the Peruvian Andes. *Annals of Botany*, 118, 415–429.
- Wei, T. & Simko, V. (2017). R package "corrplot": Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.84). <https://github.com/taiyun/corrplot>. Access in 10 jan 2019.
- Yahara, T., Javadi, F., Onoda, Y., Queiroz, L., Faith, D., Prado, D., Akasaka, M., Kadoya, T., Ishihama, F., Davies, S., Slik, F., Yi, T., Ma, K., Bin, C., Darnaedi, D., Pennington, R. T., Tuda, M., Shimada, M., Ito, M. & Nkonki, T (2013). Global legume diversity assessment: concepts, key indicators, and strategies. *Taxon*, 62, 249–266.

FIGURE LEGENDS

Figure 1. Global distribution of studies that focused on floral visitation of legumes of economic importance.

Figure 2. Number of studies that focused on floral visitation of legumes of economic importance along decades in the world.

Figure 3. Structure of the modular meta-network representing legumes of economic importance and their pollinators around the world. Squares: plants; circles: bee; diamonds: lepidopterans; triangles: other pollinators; Ara_hyp: *Arachis hypogaea* (peanut); Cic_ari: *Cicer arietinum* (chickpea); Caj_caj: *Cajanus cajan* (pigeon pea); Cop_lan: *Copaifera langsdorffii* (diesel tree); Dip_ala: *Dipteryx alata* (baru nut); Gl_max: *Glycine max* (soybean); Gli_sep: *Gliricidia sepium* (gliricidia); Gly_wig: *Glycine wightii* (perennial soybean); Hym_sti: *Hymenaea stignocarpa*; Med_sat: *Medicago sativa* (alfalfa); Pha_coc: *Phaseolus coccineus* (runner bean); Pha_vul: *Phaseolus vulgaris* (common bean); Pis_sat: *Pisum sativum* (pea); Vic_fab: *Vicia faba* (faba bean); Vig_ung: *Vigna unguiculata* (cowpea).

Figure 4. Correlation graph showing the association and disassociation power of the pollinator groups and eight modules detected in the meta-net of interactions between legumes of economic interest and pollinators around the world. Positive values in blue indicate attraction/association, and negative values in red indicate disassociation with the module.

Figure 5. Roles of species in the meta network of interactions between legumes of economic importance and pollinators around the world according to their degree within the module (z) and connectivity between modules (c) of each species in each group. We used the values of 2.5 for z and 0.62 for c in order to determinate the role of each species (lines in $z = 2.5$ and $c = 0.62$ define the role of species)

Table 1. Number (and percentage of total) of floral visitor species of different taxonomic groups that interacted with legumes of economic importance in the world. Lepidop: Lepidoptera; Coleop: Coleoptera; Chirop: Chiroptera; Apodif: Apodiformes (hummingbirds); Thysan: Thysanoptera; Hemip: Hemiptera.

Legume species	Hymenoptera			Lepidop	Coleop	Diptera	Chirop	Apodif	Thysan	Hemip
	Apidae	Vespidae	Formicidae							
<i>Arachis hypogaea</i>	6 (2.88)	-	-	-	1 (0.48)	-	-	-	1 (0.48)	-
<i>Cajanus cajan</i>	21 (10.10)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Cicer arietinum</i>	3 (1.44)	2 (0.96)	-	2 (0.96)	-	6 (2.88)	-	-	-	-
<i>Copaifera langsdorffii</i>	3 (1.44)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Dipteryx alata</i>	7 (3.36)	-	-	-	-	-	-	2 (0.96)	-	-
<i>Gliricidia sepium</i>	1 (0.48)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Glycine max</i>	56 (26.92)	-	-	-	-	4 (1.92)	-	-	-	-
<i>Glycine wightii</i>	-	-	-	-	-	1 (0.48)	-	-	-	-
<i>Hymenaea stigonocarpa</i>	-	-	-	2 (0.96)	-	-	3 (1.44)	-	-	-
<i>Medicago sativa</i>	24 (11.54)	3 (1.44)	-	3 (1.44)	4 (1.92)	4 (1.92)	-	-	-	2 (0.96)
<i>Phaseolus coccineus</i>	16 (7.69)	2 (0.96)	1 (0.48)	-	1 (0.48)	1 (0.48)	-	-	-	-
<i>Phaseolus vulgaris</i>	17 (8.17)	3 (1.44)	1 (0.48)	9 (4.33)	1 (0.48)	1 (0.48)	-	-	-	1 (0.48)
<i>Pisum sativum</i>	1 (0.48)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>Vicia faba</i>	27 (12.98)	-	-	-	1 (0.48)	-	-	-	2 (0.96)	-
<i>Vigna unguiculata</i>	3 (1.44)	-	-	1 (0.48)	-	-	-	-	-	-

Table 2: Legumes of economic importance and pollinators with the largest number of partners in the world. We included only two species as pollinators because of the high number of species recorded with three partners.

Organism	Family/Subfamily	Number of partners
Pollinators		
<i>Apis mellifera</i>	Apidae	11
<i>Trigona spinipes</i>	Apidae	4
Plants		
<i>Glycine max</i>	Faboideae	60
<i>Medicago sativa</i>	Faboideae	40
<i>Phaseolus vulgaris</i>	Faboideae	33
<i>Vicia faba</i>	Faboideae	30
<i>Cajanus cajan</i>	Faboideae	21

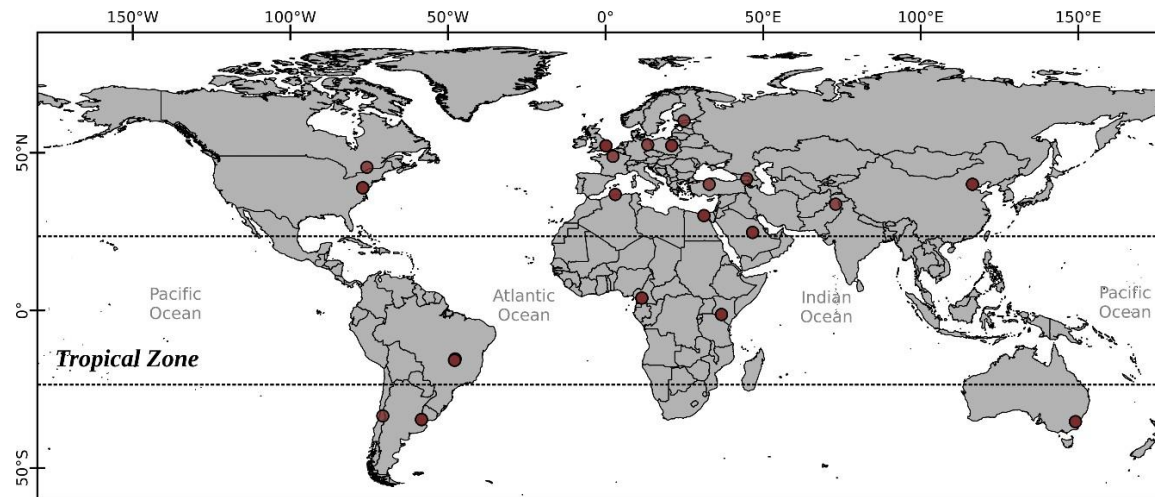


Figure 1. Global distribution of studies that focused on floral visitation of legumes of economic importance.

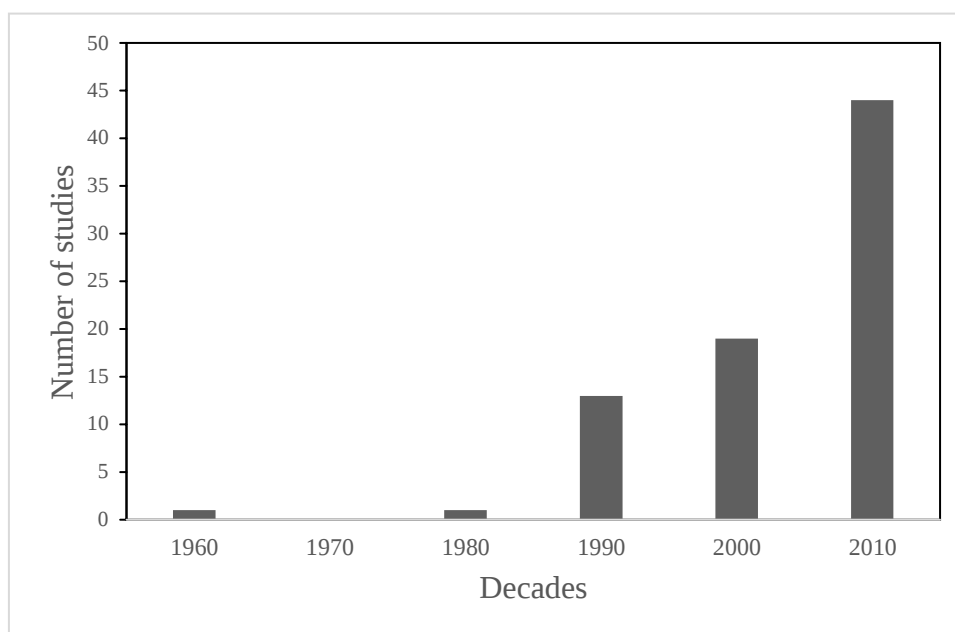


Figure 2. Number of studies that focused on floral visitation of legumes of economic importance along decades in the world.

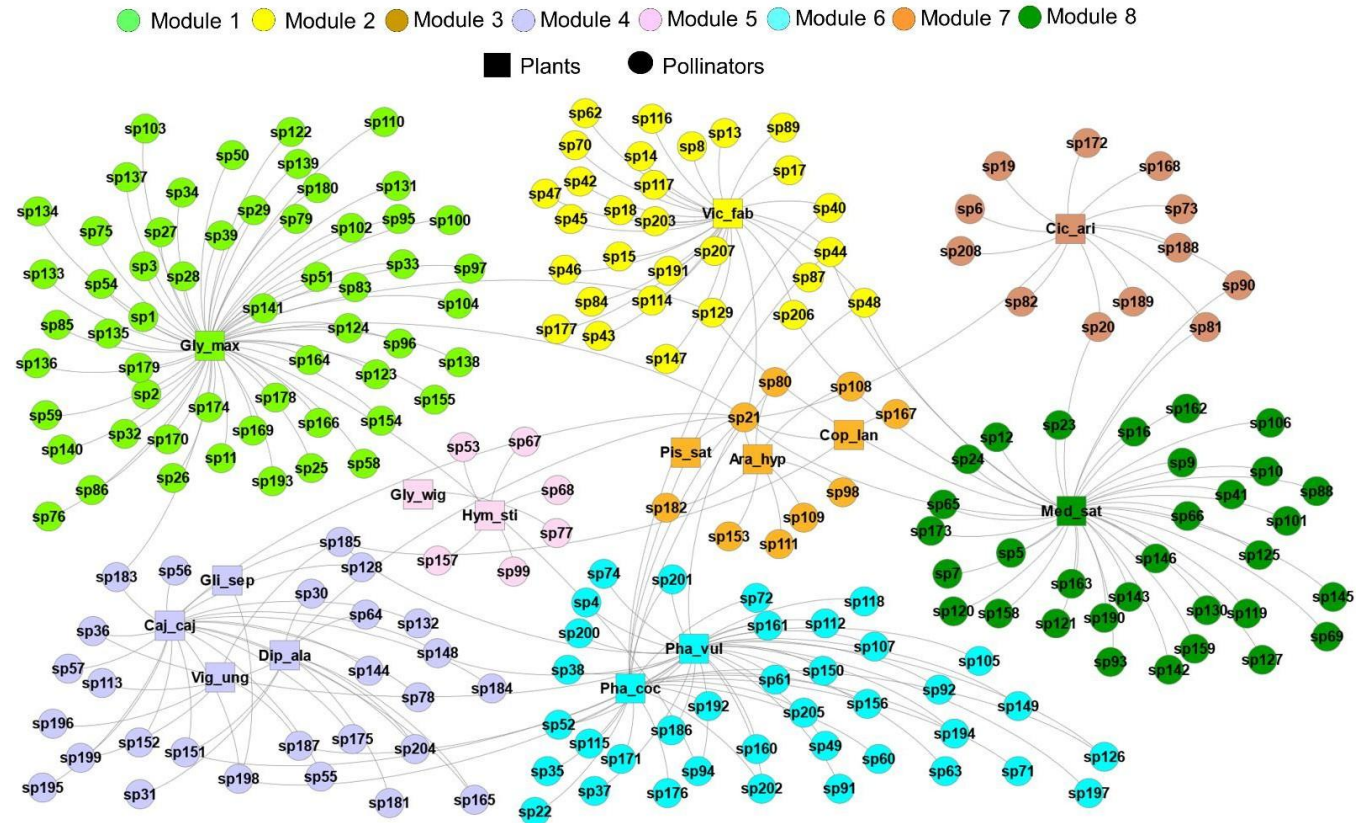


Figure 3. Structure of the modular meta-network representing legumes of economic importance and their pollinators around the world. Squares: plants; circles: bee; diamonds: lepidopterans; triangles: other pollinators; Ara_hyp: *Arachis hypogaea* (peanut); Cic_ari: *Cicer arietinum* (chickpea); Caj_caj: *Cajanus cajan* (pigeon pea); Cop_lan: *Copaifera langsdorffii* (diesel tree); Dip_ala: *Dipteryx alata* (baru nut); Gl_max: *Glicine max* (soybean); Gli_sep: *Gliricidia sepium* (gliricidia); Gly_wig: *Glycine wightii* (perennial soybean); Hym_sti: *Hymenaea stignocarpa*; Med_sat: *Medicago sativa* (alfalfa); Pha_coc: *Phaseolus coccineus* (runner bean); Pha_vul: *Phaseolus vulgaris* (common bean); Pis_sat: *Pisum sativum* (pea); Vic_fab: *Vicia faba* (faba bean); Vig_ung: *Vigna unguiculata* (cowpea).

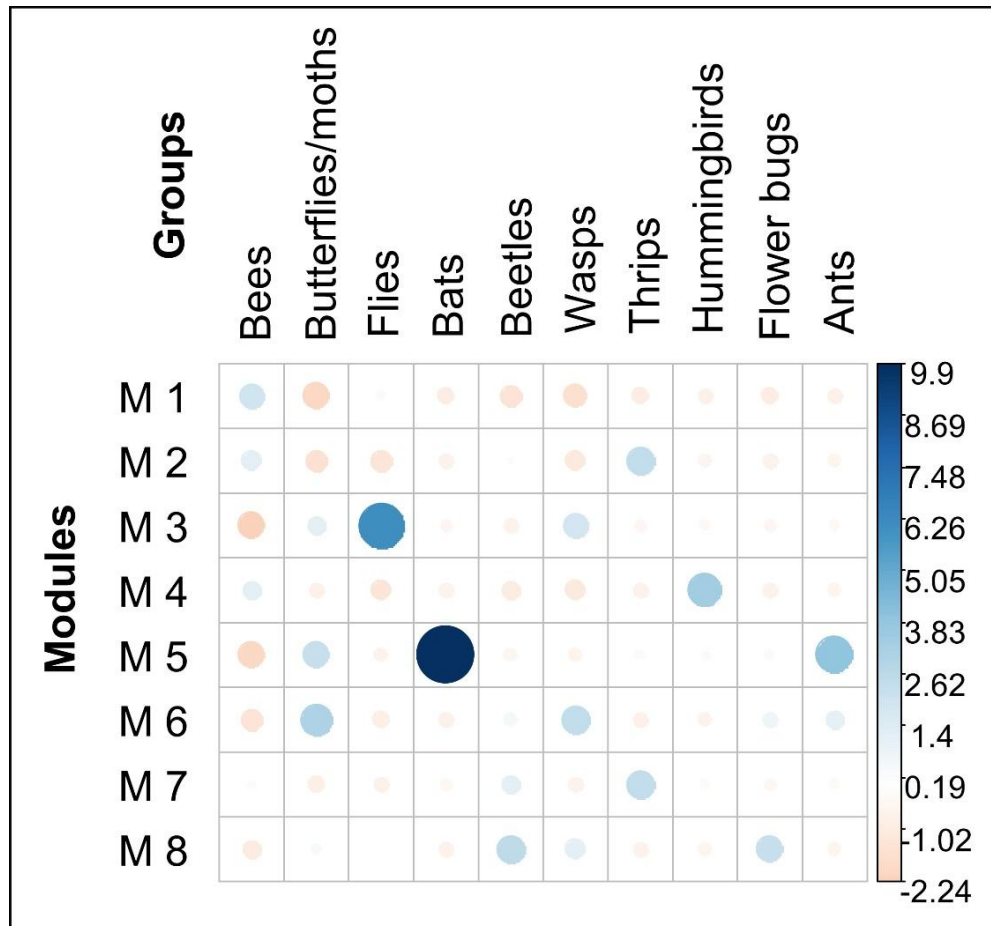


Figure 4. Correlation graph showing the association and disassociation power of the pollinator groups and eight modules detected in the meta-net of interactions between legumes of economic interest and pollinators around the world. Positive values in blue indicate attraction/association, and negative values in red indicate disassociation with the module.

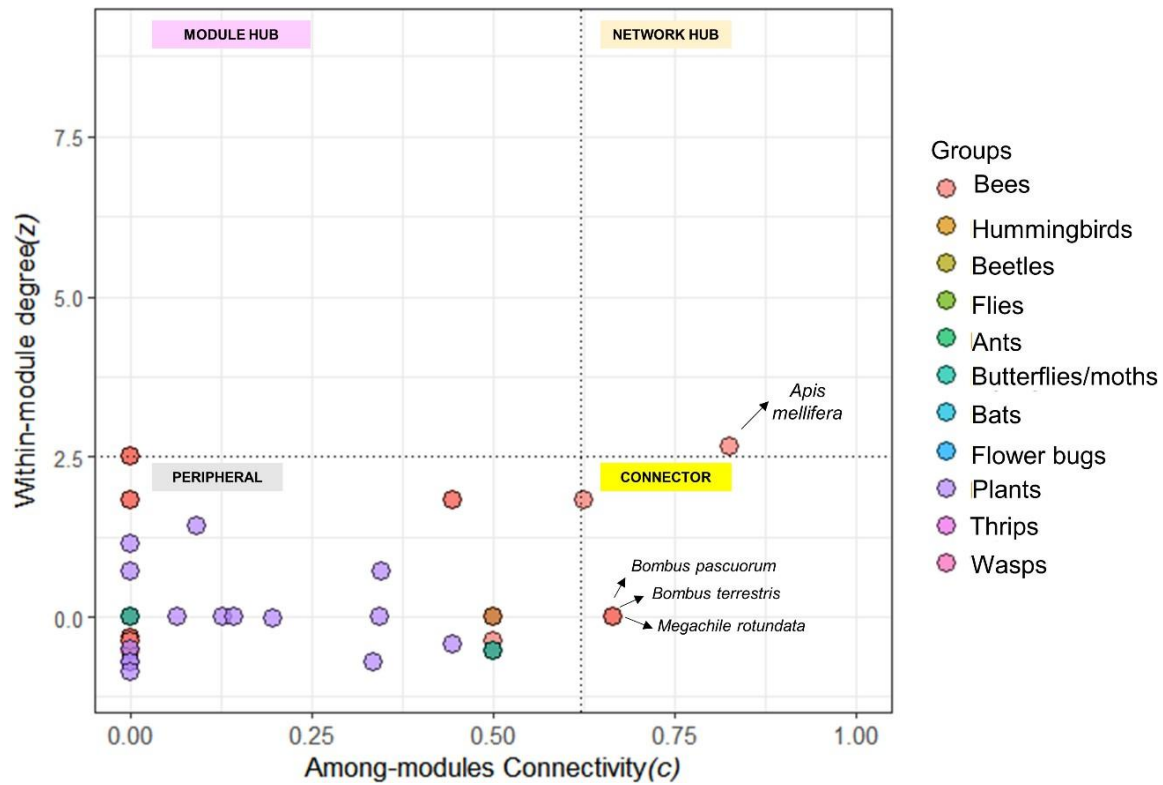


Figure 5. Roles of species in the meta network of interactions between legumes of economic importance and pollinators around the world according to their degree within the module (z) and connectivity between modules (c) of each species in each group. We used the values of 2.5 for z and 0.62 for c in order to determinate the role of each species (lines in $z = 2.5$ and $c = 0.62$ define the role of species).

Appendix 1. Floral visitors recorded in legumes of economic importance.

Species number	Species identification
sp1	<i>Acamptopoeum prinii</i> Holmberg, 1884
sp2	<i>Agapostemon texanus</i> Cresson, 1872
sp3	<i>Agapostemon virescens</i> Fabricius, 1775
sp4	<i>Aguna asander</i> Hewitson, 1867
sp5	<i>Ammophila infesta</i> Smith, 1873
sp6	<i>Anapheis aurota</i> Fabricius, 1793
sp7	<i>Andrena chengtehensis</i> Yasumatsu, 1935
sp8	<i>Andrena ovatula</i> Kirby, 1802
sp9	<i>Andrena minutula</i> Kirby, 1802
sp10	<i>Andrena squamata</i> Wu, 1990
sp11	<i>Andrena wilkella</i> Kirby, 1802
sp12	<i>Anthidium florentinum</i> Fabricius, 1775
sp13	<i>Anthophora aegyptiaca</i> Dalla Torre & Friese, 1895
sp14	<i>Anthophora dispar</i> Lepeletier, 1841
sp15	<i>Anthophora hispanica</i> Fabricius, 1787
sp16	<i>Anthophora melanognatha</i> Cockerell, 1911
sp17	<i>Anthophora plumipes</i> Pallas, 1772
sp18	<i>Apion vorax</i> Herbst, 1797
sp19	<i>Apis dorsata</i> Fabricius, 1793
sp20	<i>Apis florae</i> Fabricius, 1787
sp21	<i>Apis mellifera</i> Linnaeus, 1758
sp22	<i>Apis mellifera adansonii</i> Latreille, 1804
sp23	<i>Apis mellifera carnica</i> Pollmann, 1879
sp24	<i>Pieris rapae</i> Linnaeus, 1758
sp25	<i>Augochlora (Augochlora) phoemonoe</i> Schrottky, 1909
sp26	<i>Augochlora (Oxystoglossella) iphigenia</i> Holmberg, 1886
sp27	<i>Augochlora (Augochlora) nausicaa</i> Schrottky, 1909
sp28	<i>Augochloropsis pomona</i> Holmberg, 1903
sp29	<i>Augochlorella aurata</i> Smith, 1853
sp30	<i>Augochloropsis callichroa</i> Cockerell, 1900
sp31	<i>Augochloropsis cupreola</i> Cockerell, 1900
sp32	<i>Augochloropsis euterpe</i> Holmberg, 1886
sp33	<i>Augochloropsis metallica</i> Fabricius, 1793
sp34	<i>Augochloropsis tupacamaru</i> Holmberg, 1884
sp35	<i>Belonogaster juncea</i> Fabricius, 1781
sp36	<i>Bombus (Fervidobombus) morio</i> Swederus, 1787
sp37	<i>Bombus atratus</i> Franklin, 1913
sp38	<i>Bombus (Fervidobombus) brevivillus</i> Franklin, 1913
sp39	<i>Bombus griseocollis</i> DeGeer, 1773
sp40	<i>Bombus hortorum</i> Linnaeus, 1761
sp41	<i>Bombus impatiens</i> Cresson, 1863

sp42	<i>Bombus lapidarius</i> Linnaeus, 1758
sp43	<i>Bombus lucorum</i> Linnaeus, 1761
sp44	<i>Bombus pascuorum</i> Scopoli, 1763
sp45	<i>Bombus pratorum</i> Linnaeus, 1761
sp46	<i>Bombus (Megabombus) ruderus</i> Fabricius, 1775
sp47	<i>Bombus subterraneus</i> Linnaeus, 1758
sp48	<i>Bombus terrestris</i> Linnaeus, 1758
sp49	<i>Brachygastra lecheguana</i> Latreille, 1824
sp50	<i>Caenonomada bruneri</i> Ashmead, 1899
sp51	<i>Calliopsis andreniformis</i> Smith, 1853
sp52	<i>Camponotus flavomarginatus</i> Mayr, 1862
sp53	<i>Carollia perspicillata</i> Linnaeus, 1758
sp54	<i>Centris (Melacentris) rhodoprocta</i> Moure & Seabra, 1960
sp55	<i>Centris (Centris) caxiensis</i> Ducke, 1907
sp56	<i>Centris (Trachina) fuscata</i> Lepeletier, 1841
sp57	<i>Centris (Hemisiella) tarsata</i> Smith, 1874
sp58	<i>Ceratina calcarata</i> Robertson, 1900
sp59	<i>Chalepogenus luciane</i> Urban, 1995
sp60	<i>Megachile cincta</i> Fabricius, 1781
sp61	<i>Megachile rufipes</i> Fabricius, 1781
sp62	<i>Megachile (Chalicodoma) siculum</i> Rossi 1792
sp63	<i>Chioides catillus</i> Cramer, 1779
sp64	<i>Chlorostibon aureoventris</i> Orbigny & Lafresnaye, 1838
sp65	<i>Coccinella septempunctata</i> Linnaeus, 1758
sp66	<i>Coccinella undecimpunctata</i> Linnaeus, 1758
sp67	<i>Cocytius antaeus</i> Drury, 1773
sp68	<i>Cocytius duponchel</i> Poey, 1832
sp69	<i>Colias eurytheme</i> Boisduval, 1852
sp70	<i>Colletes lacunatus</i> Dours, 1872
sp71	<i>Nomia chandleri</i> Ashmead, 1899
sp72	<i>Dactylurina staudingeri</i> Gribodo, 1893
sp73	<i>Danaus chrysippus</i> Linnaeus, 1758
sp74	<i>Diabrotica speciosa</i> Germar, 1824
sp75	<i>Diadasina distincta</i> Holmberg, 1903
sp76	<i>Dieunomia heteropoda</i> Say, 1824
sp77	<i>Ectatomma quadridens</i> Fabricius, 1793
sp78	<i>Epanthidium tigrinum</i> Schrottky, 1905
sp79	<i>Epeolus pusillis</i> Cresson, 1864
sp80	<i>Epicauta strigosa</i> Gyllenhal, 1817
sp81	<i>Episyrrhus balteatus</i> De Geer, 1776
sp82	<i>Eristalinus aeneus</i> Scopoli, 1763
sp83	<i>Eristalis tenax</i> Linnaeus, 1758
sp84	<i>Eucera alternans</i> Brullé, 1832
sp85	<i>Eucera dubitata</i> Cresson, 1878

sp86	<i>Eucera hamate</i> Bradley, 1942
sp87	<i>Eucera numida</i> Lepeletier, 1841
sp88	<i>Eucera pekingensis</i> Yasumatsu, 1946
sp89	<i>Eucera pulveracea</i> Dours, 1873
sp90	<i>Eupeodes corollae</i> Fabricius, 1794
sp91	<i>Eurema elathea</i> Cramer, 1777
sp92	<i>Euschistus heros</i> Fabricius, 1794
sp93	<i>Megachile</i> (<i>Eutricharaea</i>) <i>manchuriana</i> Yasumatsu,1939
sp94	<i>Exomalopsis</i> (<i>Exomalopsis</i>) <i>analisis</i> Spinola, 1853
sp95	<i>Exomalopsis</i> (<i>Exomalopsis</i>) <i>subtilis</i> Timberlake, 1980
sp96	<i>Exomalopsis</i> (<i>Exomalopsis</i>) <i>tomentosa</i> Friese, 1899
sp97	<i>Exomalopsis</i> (<i>Exomalopsis</i>) <i>ypirangensis</i> Schrottky, 1910
sp98	<i>Frankliniella fusca</i> Hinds, 1902
sp99	<i>Glossophaga soricina</i> Pallas, 1766
sp100	<i>Halictus confusus</i> Smith, 1853
sp101	<i>Halictus fulvipes</i> Klug, 1817
sp102	<i>Halictus ligatus</i> Say, 1837
sp103	<i>Halictus rubicundus</i> Christ, 1791
sp104	<i>Halictus tripartitus</i> Cockerell, 1895
sp105	<i>Helicoverpa zea</i> Boddie, 1850
sp106	<i>Phalaena dipsacea</i> Linnaeus, 1767
sp107	<i>Heliothis virescens</i> Fabricius, 1777
sp108	<i>Lasioglossum murrayi</i> Cockerell, 1905
sp109	<i>Lasioglossum urbanum</i> Smith, 1879
sp110	<i>Hylaeus affinis</i> Smith, 1853
sp111	<i>Hylaeus elegans</i> Smith, 1853
sp112	<i>Hylephila phyleus</i> Drury, 1773
sp113	<i>Hylocharis chrysura</i> Shaw, 1812
sp114	<i>Kakothrips pisivorus</i> Westwood, 1880
sp115	<i>Lagria villosa</i> Fabricius, 1781
sp116	<i>Lasioglossum clavipes</i> Dours, 1872
sp117	<i>Lasioglossum villosulum</i> Kirby, 1802
sp118	<i>Lipotriches collaris</i> Vachal, 1903
sp119	<i>Lygus hesperus</i> Knight, 1917
sp120	<i>Lygus pratensis</i> Linnaeus, 1758
sp121	<i>Lytta caraganae</i> Pallas, 1781
sp122	<i>Megachile</i> (<i>Dasymegachile</i>) <i>joergenseni</i> Friese, 1908
sp123	<i>Megachile</i> (<i>Pseudocentron</i>) <i>gomphrenae</i> Holmberg, 1886
sp124	<i>Megachile</i> (<i>Pseudocentron</i>) <i>gomphrenoides</i> Vachal, 1909
sp125	<i>Megachile abluta</i> Cockerell, 1911
sp126	<i>Megachile bituberculata</i> Ritsema, 1880
sp127	<i>Megachile minutissima</i> Radoszkowski, 1876
sp128	<i>Megachile</i> (<i>Leptorachis</i>) <i>paulistana</i> Schrottky, 1902
sp129	<i>Megachile rotundata</i> Fabricius, 1793

sp130	<i>Megachile spissula</i> Cockerell, 1911
sp131	<i>Melanostoma mellinum</i> Linnaeus, 1758
sp132	<i>Melipona scutellaris</i> Latreille, 1811
sp133	<i>Melissodes agilis</i> Cresson, 1878
sp134	<i>Melissodes bimaculata</i> Lepeletier, 1825
sp135	<i>Melissodes communis</i> Cresson, 1878
sp136	<i>Melissodes druriella</i> Kirby, 1802
sp137	<i>Melissodes nivea</i> Robertson, 1895
sp138	<i>Melissodes trinodis</i> Robertson, 1901
sp139	<i>Melissoptila carinata</i> Urban, 1998
sp140	<i>Melissoptila tandilensis</i> Holmberg, 1884
sp141	<i>Melitomella grisescen</i> Ducke, 1907
sp142	<i>Musca domestica</i> Linnaeus, 1758
sp143	<i>Mylabris calida</i> Pallas, 1782
sp144	<i>Nannotrigona testaceicornis</i> Lepeletier, 1836
sp145	<i>Nomia melanderi</i> Cockerell, 1906
sp146	<i>Osmia cornifrons</i> Radoszkowski, 1887
sp147	<i>Osmia submicans hebraea</i> Benoist, 1934
sp148	<i>Oxaea flavescens</i> Klug, 1807
sp149	<i>Palpada vinetorum</i> Fabricius, 1799
sp150	<i>Panoquina lucas</i> Fabricius, 1793
sp151	<i>Paratrigona lineata</i> Lepeletier, 1836
sp152	<i>Partamona helleri</i> Friese, 1900
sp153	<i>Patellapis stirlingi</i> Cockerell, 1910
sp154	<i>Peponapis fervens</i> Smith, 1879
sp155	<i>Peponapis pruinosa</i> Say, 1837
sp156	<i>Philanthus triangulum</i> Fabricius, 1775
sp157	<i>Platyrrhinus lineatus</i> E. Geoffroy, 1810
sp158	<i>Polistes foederata</i> Kohl, 1898
sp159	<i>Polistes olivaceus</i> De Geer, 1773
sp160	<i>Polybia dimidiata</i> Olivier, 1791
sp161	<i>Polybia ignobilis</i> Haliday, 1836
sp162	<i>Proxyllocopa nitidiventris</i> Smith, 1878
sp163	<i>Proxyllocopa xinjiangensis</i>
sp164	<i>Pseudagapostemon puelchanus</i> Holmberg, 1886
sp165	<i>Pseudaugochlora graminea</i> Fabricius, 1804
sp166	<i>Ptilothrix relata</i> Holmberg, 1903
sp167	<i>Scaptotrigona depilis</i> Moure, 1942
sp168	<i>Sphaerophoria bengalensis</i> Macqaurt, 1842
sp169	<i>Svastra (Svastra) detecta</i> Holmberg, 1884
sp170	<i>Svastra obliqua</i> Say, 1837
sp171	<i>Synagris cornuta</i> Linnaeus, 1758
sp172	<i>Syritta pipiens</i> Linnaeus, 1758
sp173	<i>Tabanus taeniola</i> Palisot de Beauvois, 1806

sp174	<i>Tapinotaspis chalybaea</i> Friese, 1899
sp175	<i>Tetragonisca angustula</i> Latreille, 1811
sp176	<i>Thrinchostoma wissmanni</i> Blüthgen, 1930
sp177	<i>Thrips imaginis</i> Bagnall, 1926
sp178	<i>Thygater (Thygater) analis</i> Lepeletier, 1841
sp179	<i>Toxomerus geminates</i> Say, 1923
sp180	<i>Toxomerus marginatus</i> Say, 1823
sp181	<i>Trigona branneri</i> Cockerell, 1912
sp182	<i>Tetragonula carbonaria</i> Smith, 1854
sp183	<i>Trigona fuscipennis</i> Friese, 1900
sp184	<i>Trigona hyalinata</i> Lepeletier, 1836
sp185	<i>Trigona spinipes</i> Fabricius, 1793
sp186	<i>Urbanus dorantes</i> Stoll, 1790
sp187	<i>Urbanus proteus</i> Linnaeus, 1758
sp188	<i>Provespa anomala</i> de Saussure, 1854
sp189	<i>Vespa orientalis</i> Linnaeus, 1761
sp190	<i>Megachile(Xanthosaurus)remota</i> Smith, 1879
sp191	<i>Xylocopa aestuans</i> Linnaeus, 1758
sp192	<i>Xylocopa albiceps</i> Fabricius, 1804
sp193	<i>Xylocopa augusti</i> Lepeletier, 1841
sp194	<i>Xylocopa calens</i> Lepeletier, 1841
sp195	<i>Xylocopa carbonaria</i> Smith, 1854
sp196	<i>Xylocopa cearensis</i> Ducke, 1911
sp197	<i>Xylocopa flavorufa</i> DeGeer, 1778
sp198	<i>Xylocopa frontales</i> Olivier, 1789
sp199	<i>Xylocopa griscescens</i> Lepeletier, 1841
sp200	<i>Xylocopa incostans</i> Smith, 1874
sp201	<i>Xylocopa nigrita</i> Fabricius, 1775
sp202	<i>Xylocopa olivacea</i> Fabricius, 1778
sp203	<i>Xylocopa pubescens</i> Spinola, 1838
sp204	<i>Xylocopa suspecta</i> Moure & Camargo, 1988
sp205	<i>Xylocopa torrida</i> Westwood, 1838
sp206	<i>Xylocopa valga</i> Gerstäcker, 1872
sp207	<i>Xylocopa violacea</i> Linnaeus, 1758
sp208	<i>Zizeeria karsandra</i> Moore, 1865

Article 2

**Influence of animal pollination in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L., Fabaceae)
production and seed germination**

Article submitted to the Scientia Horticulturae

**Influence of animal pollination in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L., Fabaceae)
production and seed germination**

Cristiane de Souza Paulino^a; Liedson Tavares de Souza Carneiro^b; Natan Messias de Almeida^{a,c};
Emmanuel Santa-Martinez^d, Cibele Cardoso de Castro^{a,e*}

^aPrograma de Pós-Graduação em Biodiversidade, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brazil.

^b East Tennessee State University, Department of Biological Sciences, Johnson City, Tennessee, United States of America.

^c Universidade Estadual de Alagoas, Campus de Palmeira dos Índios, Alagoas, Brazil

^dDepartment of Biology, Salt Lake Community College, Salt Lake City, Utah, United States of America.

^eUniversidade Federal do Agreste de Pernambuco, Garanhuns, Pernambuco, Brazil

Corresponding author: cibele.castro@ufape.edu.br

Influence of animal pollination in the common bean (*Phaseolus vulgaris* L., Fabaceae) production and seed germination

Abstract. The influence of animal pollination on the common bean (*Phaseolus vulgaris* L., Fabaceae) production is quite variable, but there is a tendency towards the predominance of strong self-fertility. Few studies tested for the influence of pollination on quality aspects of production and seed germination. In view of the global economic importance of the common bean, and the pollinator crisis that the planet is experiencing, the objective of this study was to investigate the influence of animal pollination in the amount and quality of fruits, seeds, and seed germination of the common bean, using four plantations of the ‘mulatinho’ variety in a region under semiarid climate of NE Brazil as a model. Our hypotheses are: 1) Flowers are visited mainly by bees; 2) The production of fruits, seeds and seed germination are favored by pollinators. Data were collected during the 2017 and 2018 plantings, when data on floral visitors were collected. Controlled crosses (spontaneous self-, cross- and natural pollinations) were performed and the number and morphometry of fruits, number, morphometry, and germination of seeds were compared between the experiments. Reproductive efficiency (RE) and pollen limitation index (PLI) were calculated. Number of formed fruits, measurements, weight, and germination resulting from spontaneous self-pollination showed higher values than those formed by natural and cross-pollination. In 2017, the RE was high (1.44) and the ILP was 0.14, indicating no pollen limitation. In 2018, RE was also high (1.8), but the ILP was 0.3, indicating pollen limitation. Overall, the frequency of visits on focal individuals was low. Conversely to what was expected, butterflies and moths were the most frequent floral visitors, although the flowers were also visited by bees, ants, flies beetles and spiders. None were considered pollinators because they did not touch the reproductive structures of the flower. The bee *Xylocopa* sp. was the only species capable of pollinating the flowers, as its size allows it to expose the reproductive parts present inside the keel when it lands on the flower to collect the floral resource. However, its frequency was very low, and it did not visit

the focal plants. Apparently, low temperatures and high rainfall negatively interfered with pollination and, consequently, with the production. The common bean can be considered a relevant crop in the face of the current global pollinator crisis, as it does not depend on pollinators to produce food, flowers are used by several pollinator groups and, additionally, it contributes to soil nitrogenating, reducing input costs for farmers.

Keywords: crop pollination, legumes, seed quality, self-fertility.

1. Introduction

The importance of animal pollination to produce fruits and seeds in greater quantity (fruit and seed sets) and quality (fruit and seed characteristics, as well as seed germination rate) is broadly demonstrated (Klein et al., 2007; Klatt et al. 2014; IPBES 2016). Therefore, pollination by animals reduces harvest losses and adds value to the production, being considered an important ecosystem service (Garibaldi et al. 2013; Garibaldi et al. 2016; Costanza et al. al. 2017; IPBES, 2016). However, the increasing habitats loss and alteration and the inappropriate use of pesticides have caused the decline of pollinator populations worldwide and, consequently, of agricultural productivity (Potts et al., 2010).

To verify whether a crop needs pollination management, it is necessary to have prior knowledge of its reproductive requirements, as well as to calculate the reproductive efficiency (RE, which determines how effective the species is in the formation of fruits (Freitas and Oliveira, 2002). In addition, it is important to obtain the degree of pollen limitation (CLI) of the crop, which indicates whether its production in each area or growing season is being limited by the arrival of pollen, in terms of quantity and quality (Larson and Barrett, 2000; Ashman et al., 2004; Knight et al., 2005).

The common bean (*Phaseolus vulgaris* L., Fabaceae) is the most economically important species within the five most cultivated species of the genus (Santos and Gavilanes, 2008.), and Brazil is the

third largest producer and consumer (CONAB 2016; FAOSTAT, 2021). There are controversies in the literature about the reproductive requirements of *P. vulgaris*. Some studies indicate that the species is mostly self-compatible; however, common bean can also reproduce by allogamy (Vieira et al, 2011; Ibarra-Perez et al., 1999). On the other hand, other investigations suggest a predominance of allogamy (Kingha et al., 2012). Thus, the knowledge acquired so far shows a high variation in natural cross-fertilization rates (1-85%) in bean cultivation on a global scale (Pacova and Rocha, 1975; Pereira Filho and Cavarani, 1984; Wells et al., 1988). There are no more recent studies that can corroborate these data.

Bees are the most abundant bean pollinators, obtaining pollen and nectar from flowers (Masiga et al., 2014; Kasina et al. 2009a; Kingha et al., 2012). Representatives of the genera *Apis* and *Xylocopa* have been the most frequent species as shown in previous studies (Masiga et al., 2014; Kasina et al. 2009b; Widhiono et al., 2017). The presence of these pollinators in bean crops can have both a positive (Kasina et al. 2009b; Masiga et al., 2014; Kingha et al., 2012; Douka and Tchuenguem, 2013) and a neutral effect on production (McGregor, 1976; Delaplane and Mayer 2000). The increase in the number and nutritional improvement of seeds have been observed as a positive result of pollination by bees (Kasina et al. 2009b; Masiga et al., 2014; Kingha et al., 2012; Douka and Tchuenguem, 2013).

Given the relevance of pollinators for agricultural production, the economic importance of the common bean on a global scale, this study aims to investigate the influence of pollination on production of fruits, seeds and on seed germination of this crop in areas under semiarid climate.

2. Materials and methods

2.1 Study areas and crop variety

The study was carried out in four private areas of common bean planting in neighboring municipalities located in the State of Pernambuco the *Agreste* of Pernambuco, northeast of Brazil, under semi-arid climate: one area in the municipality of Garanhuns (A) and three areas in the municipality of São João (B, C and D. Data were collected in the years 2017 and 2018. For each year, three areas were sampled (Fig. 1). Local farmers use seeds from the previous year's crop. In the region farmers use the common bean of the variety 'mulatinho'.

2.2 Climate data

Because pollinator activity is strongly influenced by temperature and rainfall, those data were obtained from the websites of the National Institute of Meteorology and the Pernambuco Water and Climate Agency (<http://www.inmet.gov.br> and <http://www.apac.pe.gov.br>), respectively, for the study areas and for the periods from 05/01 to 07/31 in 2017 and 2018. Such periods correspond, approximately, to the beginning of planting until harvest.

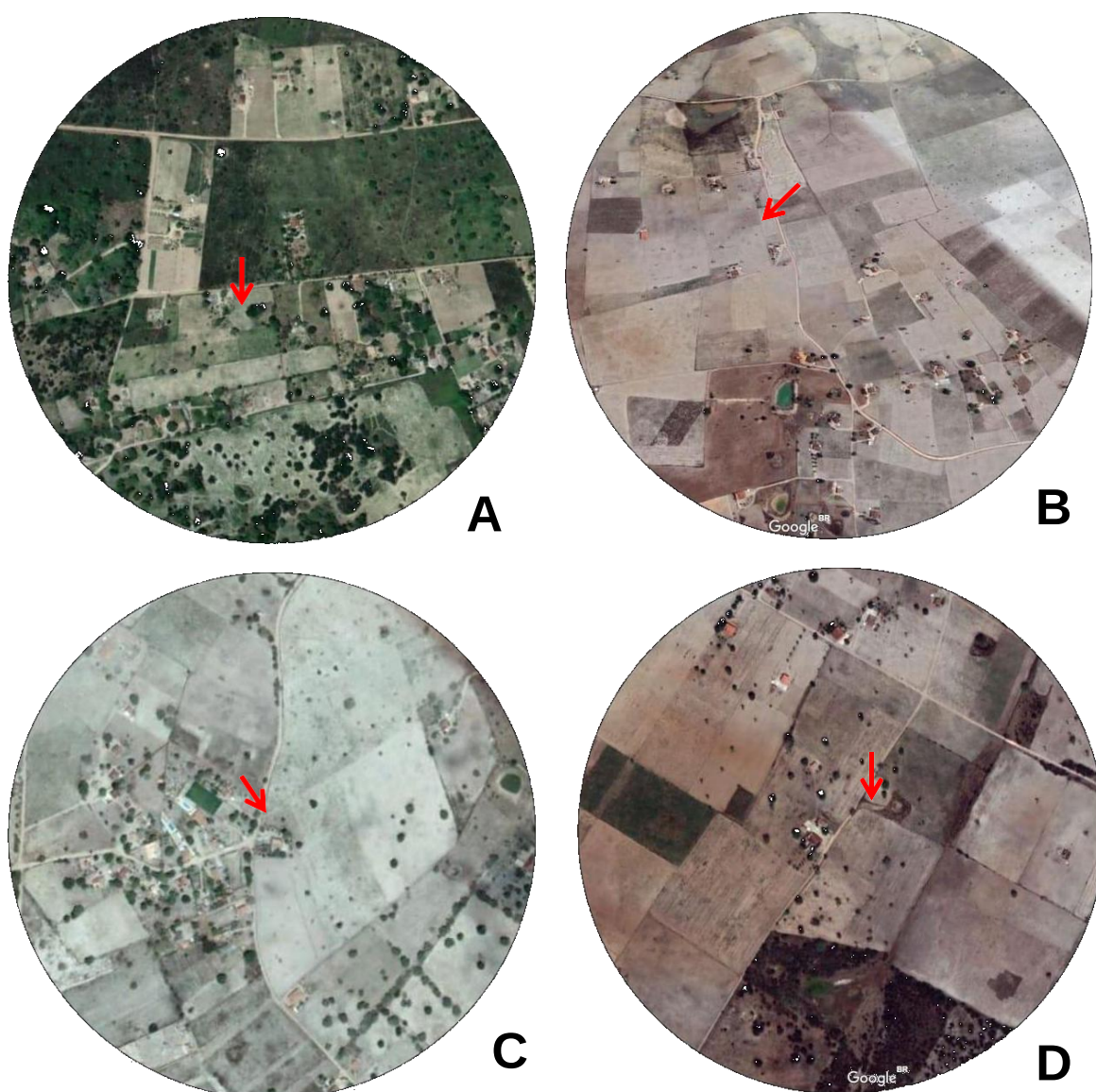


Figure 1. Areas of common bean (*Phaseolus vulgaris* ‘mulatinho’ variety, Fabaceae) planting in NE Brazil: Garanhuns (A: 8°56’41”S and 36°32’56” – 2017, 2018) and São João (B: 8°49’16”S e 36°22’44”W - 2017; C: 8°52’11”S 36°25’43”W – 2017 and 2018; D: 8°52’18” S and 36°26’52”W-2018). Images obtained in Google Earth version 9.2.91.0 and camera od approx. 2.000m.

2.3 Floral biology

Since there is variation in floral attributes between crop varieties, the floral biology, reproductive system, and morphometry were studied in each of the areas to capture such variation. The following floral biology data were collected from 30 flowers followed from pre-anthesis to senescence, distributed in 30 individuals, using usual methods in reproductive biology (Dafni, 2005): duration of the flower (observing from the pre-anthesis period to senescence), pollen viability (by macerating the anthers in neutral red on a slide to count the viable grains), period of stigmatic receptivity (using hydrogen peroxide on the stigmas), pollen availability (observing the anthers with the aid of a magnifying glass), odor-emitting regions (dipping the flowers in neutral red and observing the parts that were marked) and odor classification (covering some flowers in the pot, leave it for 1 hour and then open the jar and smell what was exhaled for a better characterization of the odor).

The following floral attributes, related to the plant-pollinator interaction, were quantified: corolla diameter and length, and androecium and gynoecium length. These measurements were sampled from 30 flowers (fixed in 70% alcohol) distributed among 30 individuals and obtained using a digital caliper.

2.4 Breeding system and seed germination

To determine the influence of pollinators on bean production, a controlled pollination experiment was carried out with the following treatments: spontaneous self-pollination, cross-pollination, and natural pollination (control). It was used at least 50 flowers distributed in 30 individuals for each treatment. The flowers were bagged in pre-anthesis using mesh bags, except for the control treatment, in which flowers were kept available for visitation. For the cross-pollination treatment, newly opened flowers received a mixture of fresh pollen from flowers of two or more different individuals, being rebagged later. These pollen donor flowers were kept in gearbox boxes containing 2% agar solution to prevent dehydration. For the spontaneous self-pollination treatment, all open flowers of each inflorescence were removed, leaving only the buds. The inflorescences were kept in bags until the end of the anthesis of all the flowers. Fruit formation was recorded three weeks after anthesis. Ripe fruits were collected and dried in the sun, following the procedure conducted by the farmers. After drying,

the following attributes were obtained: length, width, and weight of the pod, and number, length, and weight of the seeds.

Reproductive efficiency (RE) was calculated by dividing the percentage of fruits from natural pollination by the percentage of fruiting by cross-pollination; values below 0.66 indicate low RE, between 0.67 and 0.80 indicate medium RE and values above 0.81 indicate high RE (Freitas e Oliveira, 2002). The pollen limitation index (CLI) was calculated as $CLI = 1 - (N/S)$, where N = set of seeds formed by natural pollination and S = number of seeds formed from cross-pollination; Negative values up to 0.2 indicate absence of pollen limitation (Freitas et al., 2010).

The germination rate of all seeds from the pollination treatments was obtained after being placed under sand in plastic cups and watered daily with 25ml of water. Seeds were inspected daily for 40 days to record germination. At the end of the experiment, the total germination of each treatment (%) was counted.

2.5 Frequency of visits and visiting behavior

The frequency and behavior of floral visitors were evaluated through focal observations in the field during a day in the peak of flowering period (which varies between 12 and 20 days, according to Vieira et al., 2011), totaling 11 hours of observation for each area. Six focal individuals were selected in each area and each individual was inspected for five minutes per hour, from 06:00 to 17:00.

The number of floral visiting individuals was counted at each observation interval. All morphospecies of floral visitors were photographed and collected for later identification by specialists.

Visiting behavior (contact with reproductive structures and interaction with other visitors) and the resource collected were also recorded throughout the observations. According to the visiting behavior and frequency of visits, visitors were classified as effective pollinators (contacted the reproductive structures and had a frequency greater than or equal to ten visits per hour), occasional pollinators (contacted the reproductive structures and had a lower frequency of ten visits per hour) and robbers (they used the floral resource without contacting the reproductive structures, or only contacting anthers or stigma; Inouye, 1980).

2.6 Data analysis

The effect of treatments on fruit characteristics (including number of seeds per fruit) and seeds, and on germination rate was tested with mixed models. Treatments were included in the models as a fixed effect. A hierarchical component considering the year of the experiment and the area of study was used as a random effect, considering these variables as a source of variation in data on fruit characteristics and seed germination rate. For seed traits, the identity of the plants and fruits that originated them was also inserted as a random effect. For seed germination rate, mixed generalized models were fitted for binomial distribution (germination/non-germination). The models were compared with their respective null models using maximum likelihood estimation. The models were run in the R environment (R Core Team, 2019) with the help of the *lm4* package.

3. Results

3.1 Climate data

The average temperature for the study regions was 19.5°C (2017 and 2018), with maximum and minimum temperatures, respectively, of 23.3°C and 17.5°C (2017) and 24.2°C and 17.0°C (2018). The accumulated rainfall for 2017 was 892.1 mm (Garanhauns) and 654.5 mm (São João). In 2018 it was 293.1mm (Garanhuns) and 230.8mm (São João).

3.2 Floral biology and sexual system

The flowers are grouped in inflorescences, are white, small (diameter: 19.34 ± 0.73 mm; length: 12.41 ± 0.21 mm) and have the typical zygomorphic, 5-petal morphology of the Faboidae subfamily: an upper petal (standard), two wings and a keel, formed by two petals and which houses the androecium and gynoecium (Fig. 2). The androecium is composed of ten twisted stamens, one free (11.42 ± 0.66 mm long) and nine fused, forming the staminal tube. Of the nine fused stamens, four are shorter (5.75 ± 0.30 mm) and five are longer (14.96 ± 1.47 mm). Pollen has high viability (90.04%)



Figure 2. Flower of the common bean (*Phaseolus vulgaris*, 'mulatinho' variety, Fabaceae). Arrow: keel petal, which cover both stamens and pistil.

Anthesis started around 04:30-05:00 a.m. and, as the flower ages, it acquires a yellowish color, starting the senescence process around 12:00. The yellowish flower remains on the individual for about two days, is visited and has reduced viability compared to fresh flowers due to the number of visits. The flowers have odor-emitting regions across the surface of the corolla and a sweet odor.

3.3 Mating system and seed germination

There was no significant difference between treatments for fruit length ($\chi^2 = 0.317$; gl = 2, $p = 0.8536$), width ($\chi^2 = 3.245$; gl = 2, $p = 0.1974$), weight ($\chi^2 = 1.357$; gl = 2, $p = 0.5075$) and seed number ($\chi^2 = 0.317$; gl = 2, $p = 0.8536$; Fig.3). There was also no significant difference between seed length ($\chi^2 = 2.159$; gl = 2, $p = 0.3397$), width ($\chi^2 = 2.026$; gl = 2, $p = 0.3631$) and weight ($\chi^2 = 0.454$; gl = 2, $p = 0.797$; Fig. 4). However, there was a significant difference in germination rates ($\chi^2 = 10.32$; gl = 2, $p = 0.006$), with spontaneous self-pollination exhibiting higher values than cross pollination ($z = 2.63$, $p = 0.023$). No differences were found in germination rates between self-pollination and natural pollination ($z = 1.62$, $p = 0.235$) nor between cross pollination and natural pollination ($z = -1.50$, $p = 0.289$; Fig. 5).

In 2017 the reproductive efficiency was high (1.44) and the CLI was 0.14, indicating no pollen limitation; in 2018 the reproductive efficiency was also high (1.8), but the CLI was 0.3, indicating the presence of pollen limitation.

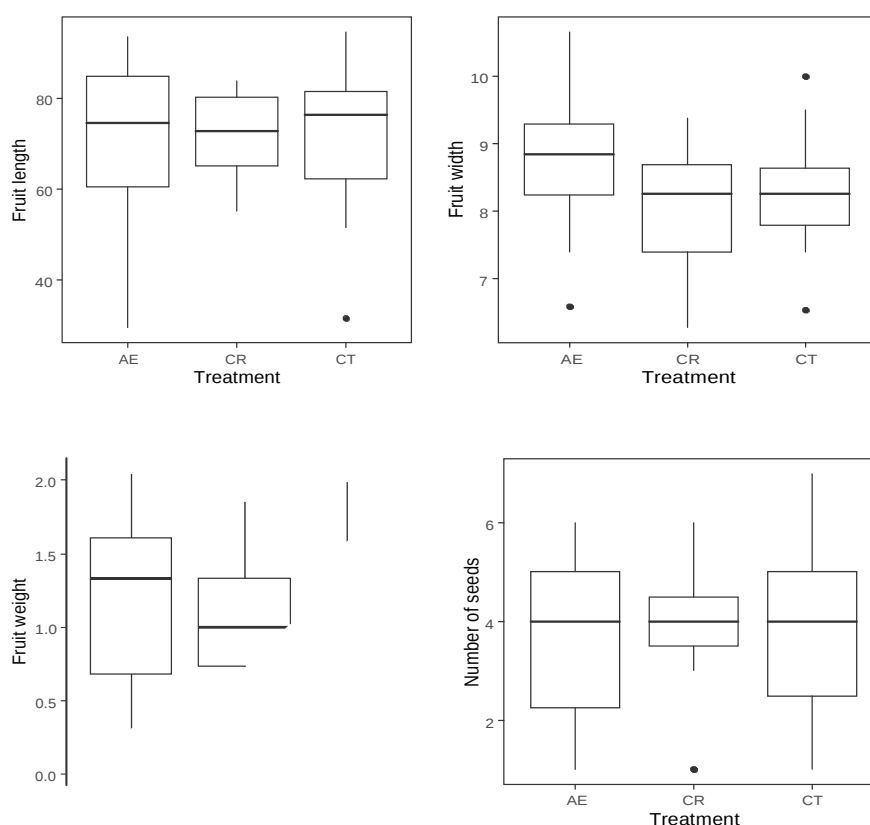


Figure 3 – Fruit morphometry and number of seed of the common bean (*Phaseolus vulgaris*, ‘mulatinho’ variety, Fabaceae) in four planting areas in NE Brazil along two consecutive planting seasons.

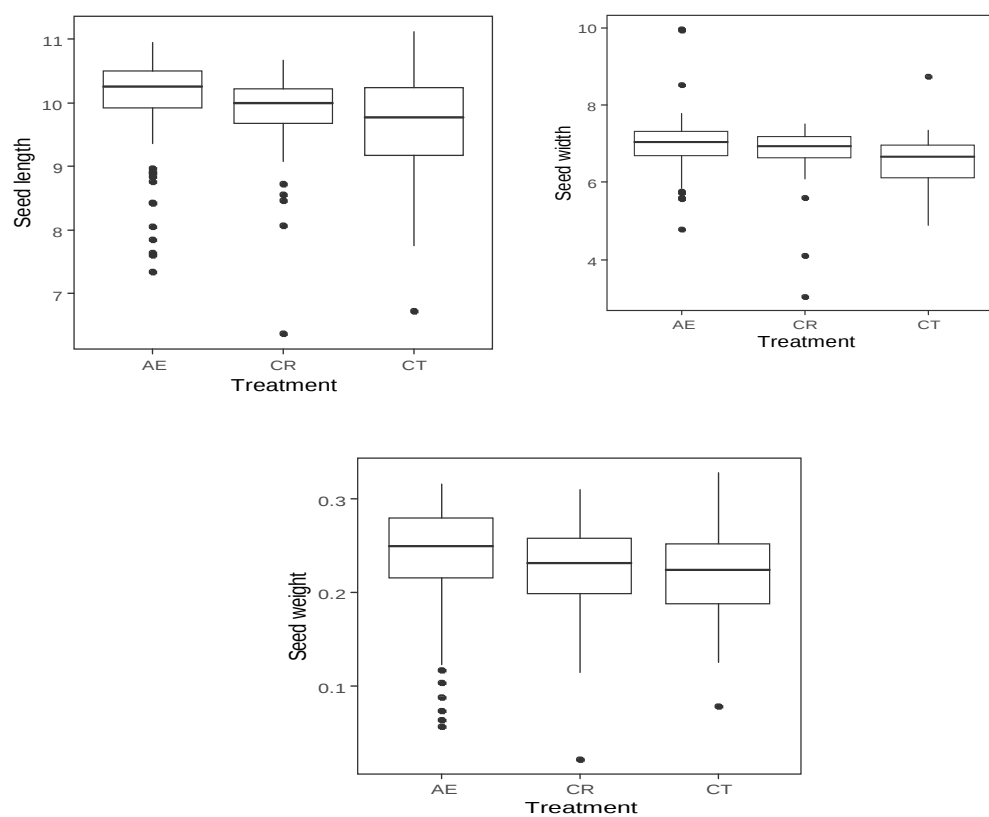


Figure 4. Seed length (mm), width (mm) and weight (kg) of the common bean (*Phaseolus vulgaris*, ‘mulatinho’ variety, Fabaceae) in four planting areas in NE Brazil along two consecutive planting seasons

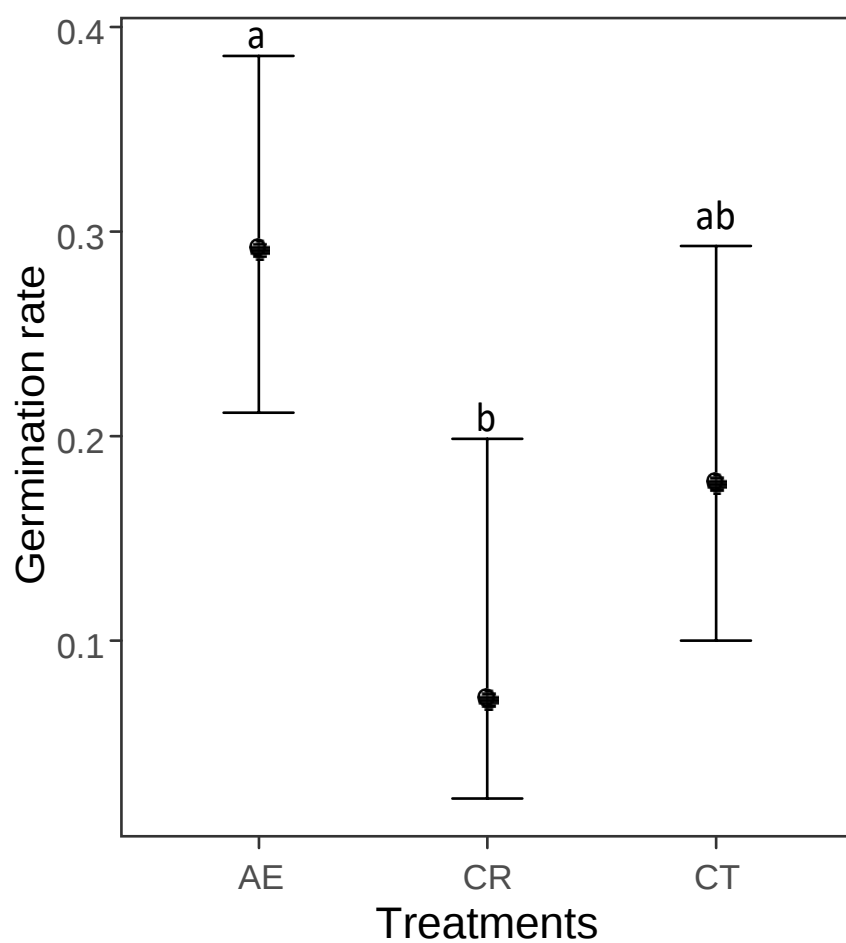


Figure 5 – Seed germination rate of the common bean (*Phaseolus vulgaris*, ‘mulatinho’ variety, Fabaceae) in four planting areas in NE Brazil along two consecutive planting seasons.

3.4 Floral visitors

The flowers were visited by 132 floral visitors (Fig. 6). Individuals distributed in 12 morphospecies belonging to the orders Hymenoptera (*Apis mellifera*, *Trigona* sp, Formicidae and Vespidae – four morphospecies, 85 visits), Lepidoptera (*Urbanus dorantes*, *U. proteus*, - four morphospecies of butterflies, 20 visits) Diptera (Muscidae - two morphospecies, 16 visits), Coleoptera (two morphospecies, 7 visits) and Araneae (one morphospecies, 4 visits; Figs. 7 and 8).

Most visits were from butterflies, distributed in four morphospecies, which had a peak between 10:00 am and 11:00 am. *Urbanus dorantes* Stoll and *U. proteus* L. were abundant and two other species were rare. Despite the low representation of the species *U. proteus* in the focal individuals, it was quite common in the area.

None of the visitors was considered an effective pollinator in the individuals predetermined for observation, as they only landed on the petals (flies, butterflies, bees) and/or walked through the calyx and corolla (beetle and ants).

Species of Hymenoptera (two species of bees and one of ant) and Lepidoptera (butterflies) were found in non-focal individuals. Ants and the bee *Trigona* sp. they walked among buds and flowers; the butterfly landed on the flower and possibly collected nectar by inserting its proboscis. And among these visitors, the species that is probably *Xylocopa* sp.4.



Figure 6. Floral visitors of the common bean (*Phaseolus vulgaris*, ‘mulatinho’ variety, Fabaceae) in four planting areas in NE Brazil along two consecutive planting seasons. A: *Urbanus dorantes*; B: *Urbanus proteus*; C: Lepidoptera; D: Formicidae; E: *Trigona cf. spinipes*; F: *Xylocopa* sp.

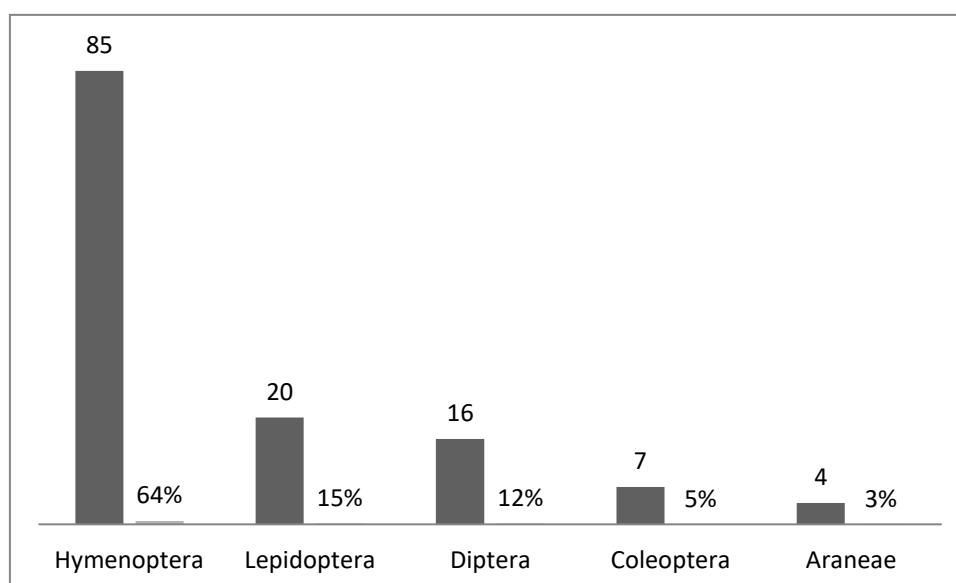


Figure 7. Number of floral visitor species of the common bean (*Phaseolus vulgaris*, ‘mulatinho’ variety, Fabaceae) in four planting areas in NE Brazil along two consecutive planting seasons.

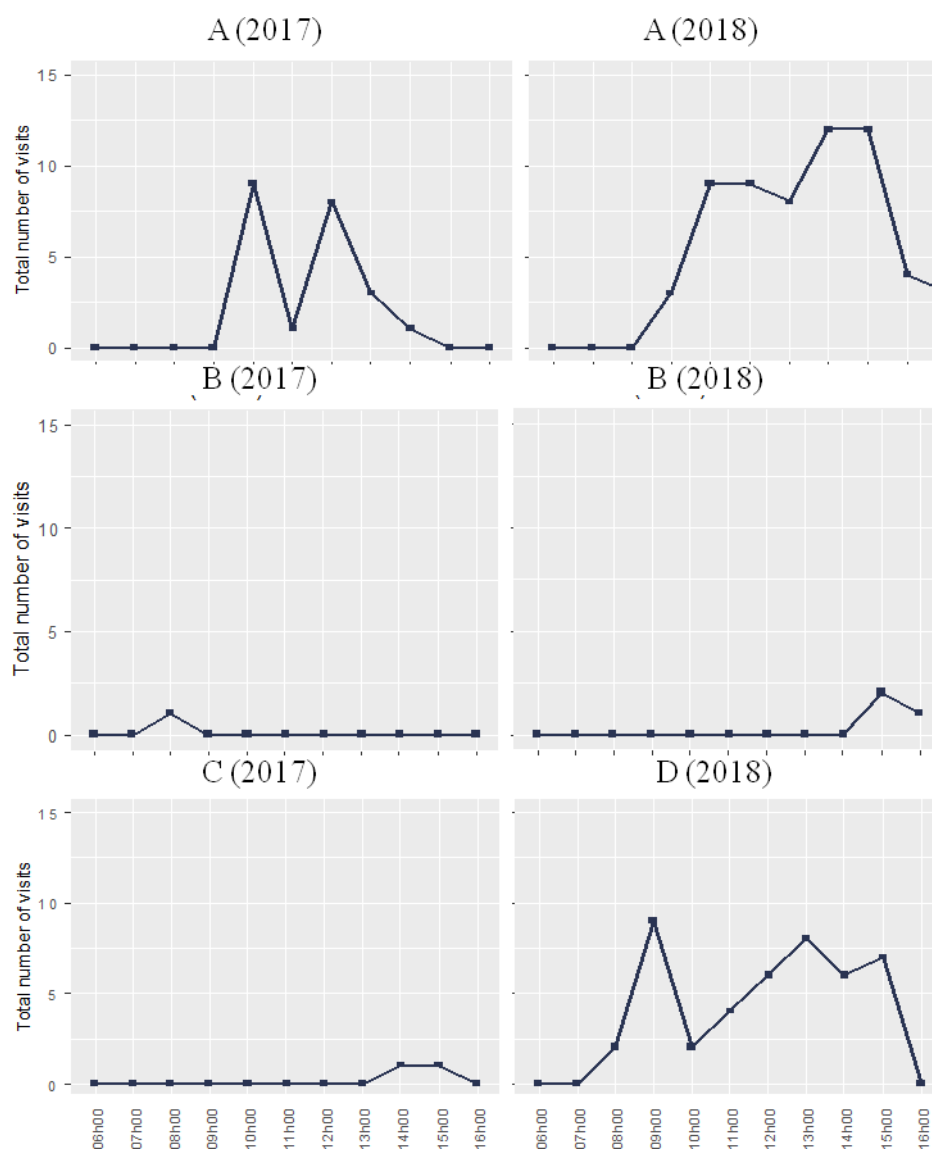


Figure 8. Number of floral visits to the common bean (*Phaseolus vulgaris*, 'mulatinho' variety, Fabaceae) in four planting areas in NE Brazil along two consecutive planting seasons.

4. Discussion

The average temperature of the study areas is within the temperature gradient supported by the common bean crop, according to Didonet and Silva (2004) and Heinemann et al. (2009). As for the rainfall indices, the values indicate that the bean crop suffered water stress (lack and excess), which may have impaired productivity (Doorenbos and Kassam, 1979; Dourado Neto and Fancelli, 2000; Vieira et al., 2006)

According to Vidal and Vidal (2005) the flowers are grouped in inflorescences of the axillary type (indeterminate growth habit) and terminal type (determinate growth habit). As for the structure of the flower, the data corroborate the findings of Vieira et al. (2006).

The fact that self-spontaneous germination experiments show a more evident significant difference than natural and cross-pollination may be linked to the plant being sensitive to manipulation and/or indicating that the bean crop is self-sufficient in its productivity, suggesting that Vieira et al (2011) are closer to reality when they state that the species is mostly self-compatible. This data corroborates some studies, since the exposure of bean plants to bee pollination did not result in higher production of dry seeds in the UK or in the US (Free 1966; McGregor, 1976; Delaplane and Mayer, 2000). In contrast, beans pollinated by bees had an increase in the number of seeds in some studies (Masiga et al., 2014; Kasina et al, 2009b).

The absence of pollen limitation may be related to the self-compatibility of the species, reducing its dependence on cross-pollination (Larson and Barret, 2000) and facilitating the production of fruits from self-pollination (Larson and Barret, 2000; Ashman et al, 2004). On the other hand, the presence of pollen limitation in 2018 indicates a lack of pollinators (Freitas et al., 2010), which may be caused by the lack of native vegetation close to the cultures studied.

It was observed that areas A and D were the ones with the highest presence of insects, which can be explained by the proximity to the native vegetation of the study areas (Fig. 1 and Fig. 7). The presence and diversity of habitats close to crops are important requirements for pollinators, so the

absence of these habitats can lead to the complete loss of pollinator groups or pollination systems (Viana et al. 2012). Heterogeneous landscapes favor the maintenance and increase of pollinator populations, by offering resources and nesting sites, and the stability of the pollination service (Viana et al. 2012; Ferreira et al. 2015). These landscape characteristics have a direct effect on agricultural productivity (Saturni et al., 2016; Hipólito et al., 2018), due to the increase in bee visits to crops (Franceschinelli et al. 2017). The lack of nesting spaces can be a limiting factor for the presence of bees in cultivated areas, as the requirements are diverse.

The low fruit formation in the experiments may be related to the low floral setting, since not all the flowers produced by the plant turn into fruits (Costa and Zimmermann, 1988; Didonet; Silva, 2004; Guilherme et al., 2015). Low flower set was observed by Ramalho and Ferreira (1979; 28%), Izquierdo and Hosfield (1981, 39.5%) and Reis et al. (1985, 31%). This high abortion is understood because of the priority allocation of resources to the most vigorous pods that will provide quality grains; in addition, the first flowers of the flowering tend to have a greater fruit set when compared to the flowers that open later (Didonet and Silva, 2004).

The low reproductive success may also be related to water stress, since the accumulated rainfall was above the optimal gradient that favors fruit production. In 2017, the study areas suffered from an atypical, very rigorous winter, with heavy rains, which can cause low grain yield and quality (Heinemann et al., 2009). In addition, exposure of the crop to excess water promotes the appearance of fungal diseases, reducing the amount of fruit formed (Barros et al., 2012). In the field, it was observed in some plants the appearance of a kind of mold in the aerial parts.

The butterflies and moths landed on the petals and introduced their proboscis into the flowers, which we can suggest that they were looking for nectar, but they were unable to shoot the keel due to the lightness of their touching the flowers and, consequently, they did not touch the reproductive parts, being considered looters.

The large bee *Xylocopa* sp. apparently it is the only species able to pollinate the bean, as its robust size managed to expose the reproductive parts present inside the keel when it landed on the flower to collect the floral resource (Marques Jr. and Ramalho, 1995; Barbosa e Souza, 2016). However, the frequency of this bee was very low. Although the species was visited by several groups of pollinators, a low frequency of bees was noted, which was not expected, since bees are the most abundant pollinators of beans when they visit its flowers to collect pollen and nectar (Borém, 1999; Hoc and Garcia, 1999; Ibarra-Perez et al., 1999; Kasina et al, 2009; Kingha et al., 2012; Masiga et al., 2014). According to Bugalho (2009), in a study with *Apis mellifera*, the rains have little influence on the activities of the workers inside the hive, however it prevents them from leaving. Also, according to the author, the behavior of bees is influenced by external stimuli such as, for example, precipitation, temperature, humidity, winds and light intensity, which corroborates the results obtained, since during the study period the plantations were affected by a high level of rainfall and low temperatures (year 2017). The rapid visitation of bees on bean flowers can be caused by the low amount of nectar (Moreti et al, 1994).

5. Conclusions

Although the literature points out that bees are the most abundant pollinators of common bean, in the areas studied this condition was not observed, possibly due to low temperatures and high rainfall in 2017. In addition, butterflies and moths are scavengers, which does not contribute to pollination. Thus, we can conclude that *Phaseolus vulgaris* is a preferentially self-compatible species since it manages to form fruits by spontaneous self-pollination. Although pollinators are important for production, beans can be considered an important crop for maintaining the populations of animals that visit it. Sustaining pollinators, but not depending on them, makes beans a key crop for pollinator conservation and for agricultural production in the face of a pollinator crisis, in addition to nitrogenizing the soil, favoring other crops.

6. Acknowledgements

The authors thank J. H. Silva and M. B. G. Silva for the support during the collection of seed data, Programa de Pós-graduação em Biodiversidade (Universidade Federal Rural de Pernambuco) for logistical support and the anonymous farmers for allowing fieldwork in their properties.

7. Funding

This study was funded by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (grant code 001), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (428303/2018–8 and 309668/2018–2).

8. References

- APAC. Agência Pernambucana de Água e Clima. 2019. Disponível em: <http://www.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php> Acesso em: 20 de agosto de 2019.
- Ashman, T.L., Knight, T.M., Steets, J.A., Amarasekare, P., Burd, M., Campbell, D.R., Dudash, M.R., Johnston, M.R., Mazer, S.J., Mitchell, R.J., Morgan, M.T., Wilson, W.G., 2004. Pollen limitation of plant reproduction: ecological and evolutionary causes and consequences. *Ecology* 85: 2408–2421. <https://doi.org/10.1890/03-8024>
- Barbosa V. M. and Sousa L. M. E. 2016. Biologia floral da polinização e eficiência da produção de sementes de feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) em sistemas agrícolas. *Gaia Scientia*, V. 10. N.4. Disponível em: <https://periodicos.ufpb.br/index.php/gaia/article/view/26684>. Acesso em: 10 dez. 2022.
- Barros, A. H. C., Varejão-Silva, M. A., Tabosa, J. N., 2012. Aptidão climática do Estado de Alagoas para culturas agrícolas. Relatório Técnico. Convênios SEAGRI-AL/Embrapa Solos n.10200.04/0126-6 e 10200.09/0134-5. Recife: Embrapa Solos, 86p.
- Bommarco, R., Marini, L., Vaissière, B. E. 2012. Insect pollination enhances seed yield, quality, and

marked value in oilseed rape. *Oecologia*, v. 169, p. 1025-1032. doi: 10.1007/s00442-012-2271-6.

Borém, A., 1999. Hibridação artificial de plantas. Viçosa, MG: UFV, 546 p.

Bugalho, V.A., 2009. Influência das precipitações pluviométricas e da atividade forrageira das abelhas africanizadas (*Apis mellifera* L.) no comportamento higiênico. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2009. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/59/59131/tde-14082009-101149/>. Acesso em: 10 dez. 2022.

Chacoff, N.P., Aizen, M.A. 2006., Edge effects on flower-visiting insects in grapefruit plantations bordering premontane subtropical forest. *Journal of Applied Ecology* 43: 18–27. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2005.01116.x>

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), 2016. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_04_12_08_25_29_boletim_graos_abril_2017.pdf>. Acesso em: 12 de Abril de 2017.

Costa, J.C.G., Zimmermann, M.J.O., 1988. Melhoramento Genético. In: Zimmermann, M.J.O., Rocha, M., Yamada, T. (Ed.). A cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Potafós. p. 229-245.

Costanza, R., de Groot, R., Braat, L., et al. (2017) Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosyst Serv* 28:1–16. doi: 10.1016/j.eco - ser.2017.09.008

Dafni, A. 2005. Pollination ecology: a practical approach. New York, Oxford: University Press.

Delaplane, K. S., Mayer, D. F. 2000. Crop Pollination by bees. Cambridge: CABI.

- Didonet, A. D., Silva, S. C. ,2004. Elementos climáticos e produtividade do feijoeiro. Informe Agropecuário, v. 25, n. 223, p. 13-19.
- Doorenbos, J., Kassam, A. H., 1979. Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Roma : FAO, 212 p. (Estudio FAO: Riego y Drenaje, 33)
- Douka, C, Tchuenguem, F.F.N.,2013. Foraging and pollination behavior of *Apis mellifera adansonii* L. (Hymenoptera, Apidae) on *Phaseolus vulgaris* (Fabaceae) flowers at Maroua (Cameroon). International Journal of Plant Sciences. 4(2): 45 - 54.
- Dourado Neto, D., Fancelli, A. L. 2000. Produção de feijão. Guaíba: Agropecuária, 385 p.
- FAOSTAT. 2021.Crops. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 08 out. 2021.
- Ferreira, P.A., Boscolo, D., Carvalheiro LG, et al., 2015. Responses of bees to habitat loss in fragmented landscapes of Brazilian Atlantic Rain - forest. Landsc Ecol 30:2067–2078. doi: 10.1007/s10980-015-0231-3
- Franceschinelli, E.V., Elias, M.A.S., Bergamini, L.L., et al., 2017. Influence of landscape context on the abundance of native bee pollinators in tomato crops in Central Brazil. Journal of Insect Conservation 21:715–726. doi: 10.1007/s10841-017- 0015-y
- Free, J. B., 1966. The pollination of the beans *Phaseolus multiflorus* and *Phaseolus vulgaris* by honeybees. Journal of Apicultural Research, Wales, n. 5, p. 87-91. <https://doi.org/10.1080/00218839.1966.11100139>
- Freitas, C.V. and Oliveira, P.E. 2002. Biologia reprodutiva de *Copaifera langsdorffii* Desf. (Leguminosae, Caesalpinioideae). Revista Brasileira de Botânica 25:311-321. <https://doi.org/10.1590/S0100-84042002000300007>
- Freitas, L., Wolowski, M. and Sigiliano, M.I. 2010. Ocorrência de limitação polínica em plantas de Mata Atlântica. Oecologia Australis 14:251-265. doi:10.4257/oeco.2010.1401.15

- Garibaldi, L.A., Steffan-Dewenter, I., Winfree, R., Aizen, M.A., Bommarco, R., Cunningham, S.A., Kremem, C., Carvalheiro, L.A., Harder, L.D., Afik, O., Bartomeus, I., Benjamin, F., Boreux, V., Cariveau, D., Chacoff, N.P., Dudenhöffer, J.H., Freitas, B.M., Ghazoul, J., Greenleaf, S., Hipólito, J., Holzschuh, A., Howlett, B., Isaacs, R., Javorek, S.K., Kennedy, C.M., Krewenka, K.M., Krishnan, S., Mandelik, Y., Mayfield, M.M., Motzke, I., Munyuli, T., Nault, B.A., Otieno, M., Petersen, J., Pisanty, G., Potts, S.G., Rader, R., Ricketts, T.H., Rundlöf, M., Seymour, C.L., Schüepp, C., Szentgyörgyi, H., Taki, H., Tscharntke, T., Vergara, C.H., Viana, B.F., Wanger, T.C., Westphal, C., Williams, N., Klein, A., 2013. Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey bee abundance. *Science* 339 (6127): 1608-1611. DOI:10.1126/science.1230200
- Garibaldi, L., Carvalheiro, L., Vaissière, B., Gemmill-Herren, B., Hipólito, J., Freitas, B., Ngo, H. T., Azzu, N., Saez, A., Åström, J., An, J., Blochtein, B., Buchori, D., Chamorro, F., Silva, F., Devkota, K., Ribeiro, M., Freitas, L., Gaglianone, M. C., Zhang, H., 2016. Mutually beneficial pollinator diversity and crop yield outcomes in small and large farms. *Science* 351:388–391. DOI: [10.1126/science.aac7287](https://doi.org/10.1126/science.aac7287)
- Guilherme, S.R., Ramalho, M.A.P. , Abreu, A. de F.B. and Pereira, L.A., 2015. Genetic control of inflorescence in common bean, *Genetics and Molecular Research*, Ribeirão Preto, v.13, p. 10349–10358. DOI: <https://doi.org/10.4238/2014.December.4.30>
- Heinemann, A. B., Stone, L. F., Silva, S. C., 2009. Feijão. In: Moneiro, J. E. B. A (Ed.). *Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola*. Brasília, INMET. p.183-201.
- Hipólito, J., Boscolo, D., and Viana, B.F., 2018. Landscape and crop management strategies to conserve pol - lination services and increase yields in tropical cof - fee farms. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 256:218–225. doi: 10.1016/j.agee.2017.09.038

- Hoc, P., García, M.T. 1999. Biología floral y sistema reproductivo de *Phaseolus vulgaris* var. aborigeneus (Fabaceae) Revista de Biología Tropical. 47:59–67.
- Ibarra-Perez, F.J., Barnhart, D., Ehdaie, B., Knio, K.M. and Waines, J.G. 1999. Effects of insect tripping on seed yield of common bean. Crop Sci., 39:425-433.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1999.0011183X0039000200022x>
- IPBES, 2019: Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E. S., Ngo, H. T., Guèze, M., Agard, J., Arneth, A., Balvanera, P., Brauman, K. A., Butchart, S. H. M., Chan, K. M. A., Garibaldi, L. A., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S. M., Midgley, G. F., Miloslavich, P., Molnár, Z., Obura, D., Pfaff, A., Polasky, S., Purvis, A., Razzaque, J., Reyers, R., Roy Chowdhury, R., Shin, Y.J, Visseren-Hamakers, I.J., Willis, K.J. and Zayas, C. N. (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 56 pages. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. 2019. Disponível em:
<http://sisdagro.inmet.gov.br/sisdagro/app/monitoramento/bhc>. Acesso em: 20 de agosto de 2019.
- Inouye, D.W., 1980. The terminology of floral larceny. Ecology 61: 1251-1253.
DOI:10.2307/1936841
- Izquierdo, J. and G.L. Hosfield. 1981. A collection receptacle for field abscission studies in common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). Crop Science, v.21, p. 622- 625.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100040035x>
- Kasina, M., Kraemer, M., Martius, C., Wittmann, D. 2009a. Diversity and activity density of bees visiting crop flowers in Kakamega, western Kenya. Journal of Apicultural Research 48:134-139.
<https://doi.org/10.3896/IBRA.1.48.2.08>
- Kasina, M., Hagen, M., Kraemer, M., Nderitu, J., Martius, C., Wittmann, D. 2009b. Bee pollination enhances crop yield and fruit quality in kakamega, western Kenya. East African Agricultural and Forestry Journal 75(1): 1-11. <https://doi.org/10.1007/BF00032148>
- Kevan, G., Eisikowitch, D. 1990. The effects of insect pollination on canola (*Brassica napus* L. cv. O.

- A. C. Triton) of seed germination. *Euphytica*, vol. 45, p. 39-41.
<https://doi.org/10.1007/BF00032148>.
- Kingha, B.M.T., Tchuenguem, F.F.N., Ngakou, A., Brückner, D. 2012. Foraging and pollination activities of *Xylocopa olivacea* (Hymenoptera, Apidae) on *Phaseolus vulgaris* (Fabaceae) flowers at Dang (Ngaoundere-Cameroon) *J. Agric. Extension and Rural Development* 4(6):330- 339.
<https://doi.org/10.5897/JAERD11.151>
- Klatt, B.K., Holzschuh, A., Westphal, C., Clough, Y., Smit, I., Pawelzik, E., Tscharnkte, T. 2014. Bee pollination improves crop quality, shelf life and commercial value. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 281(1775). <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2440>
- Klein, A.M., Vaissière, B.E., Cane, J.H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S.A., KREMEN, C., Tscharnkte, T. 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society of London (B)* 274: 303–313.
- Knight, T.M., Steets, J.A., Vamosi, J.C., Mazer, S.J., Burd, M., Campbell, D.R., DUDASH, M.R., Johnston, M.O., Mitchell, R.J., Ashman, T.L. 2005. Pollen limitation of plant reproduction: pattern and process. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 36, 467–497.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.36.102403.115320>
- Larson, B.M.H. and Barrett, S.C.H.A. 2000. Comparative analysis of pollen limitation in 375 flowering plants. *Biological Journal of the Linnean Society*, 69, 503–520.
[doi:10.1006/bijl.1999.0372](https://doi.org/10.1006/bijl.1999.0372)
- Marques Junior, O. G. and Ramalho, M. A. P. Determinação da taxa de fecundação cruzada do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) nas diferentes épocas de semeadura em Lavras – Minas Gerais. *Ciência e Prática*, V. 19, n. 3, 339-341 p., Lavras, 1995.
- Masiga, R., Kasina, M., Mbugi, J., Odhiambo, C., Kinuthia, W., Gemmill-Herren, B., and Vaissière, B., 2014. Do French beans (*Phaseolus vulgaris* L.) grown in proximity to Mt Kenya forest- Kenya experience pollination deficit?. *Journal of Pollination Ecology*, 14, 255–260.
[https://doi.org/10.26786/1920-7603\(2013\)25](https://doi.org/10.26786/1920-7603(2013)25)
- McGregor, S. E. 1976. *Insect Pollination of Cultivated Crop Plants*. USDA, 849p.

- Milfont, M.O., Rocha, E.E.M., Lima, A.O. N, Freitas, B.M. 2013. Higher soybean production using honeybee and wild pollinators, a sustainable alternative to pesticides and autopolination. *Environmental Chemistry Letters*, 11:335-341. DOI:10.1007/s10311-013-0412-8
- Moreti, A. C. C. et al. 1994. Polinização do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) efetuada por *Apis mellifera* L. *Boletim de Industria Animal*, v. 51, n. 2, p. 119-124.
- Pacova, B.E.V. and Rocha, A.C.M. 1975. Hibridação natural no feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em Linhares, Espírito Santo. *Revista Ceres*, 22: 157-158.
- Pereira Filho, I.A., Cavariani, C. 1984. Taxa de hibridação natural do feijoeiro comum em Patos de Minas, Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 19: 1181-1183.
- Potts, S.G., Biesmeijer, J.C., Kremen, C., Neumann, P., Schweiger, O., Kunin, W.E. 2010. Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology and Evolution* 25: 345-353. doi: 10.1016/j.tree.2010.01.007
- Ramalho, M.A.P. and Ferreira, M.M. 1979. Comportamento de cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em relação ao florescimento e vingamento das vagens. *Ciência e Prática*, Lavras, 3 (1): 80-3.
- R Core Team, 2019. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Reis, W. P., Ramalho, M. A. P. and Cruz, J. C. 1985. Arranjos e populações do feijoeiro na consorciação com o milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 20, n. 5, p. 575-584.
- Ricketts, T.H., Regetz, J., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S.A., Kremen, C., Bogdanski, A., Gemmill-Herren, B., Greenleaf, S.S., Klein, A.M., Mayfield, M.M., Morandin, L.A., Ochieng, A. and Viana, B.F. 2008. Landscape effects on crop pollination services: are there general patterns? *Ecology Letters* 11: 499–515. doi: 10.1111/j.1461-0248.2008.01157.x.
- Roubik, D.W. 2018. The pollination of cultivated plants: a compendium for practitioners. Food and Agriculture Organization of The United Nations (FAO), Roma.
- Santos, J. S. do; Gavilanes, M. L. Botânica. In: Vieira. C., Paula Júnior. T. J. and Borém, A. (Editores.). Feijão. 2a edição atualizada e ampliada, Viçosa. UFV, 2008. p. 41 - 65.

- Saturni, F.T., Jaffé, R. and Metzger, J.P., 2016 Landscape structure influences bee community and coffee pollination at different spatial scales. *Agric Ecosyst Environ* 235:1–12. doi: 10.1016/j.agee.2016.10.008
- Viana, B. F., Boscolo, D., Mariano Neto, E., Lopes, L., Lopes, A., Fereira, P., Pigozzo, C. M., and Primo, L. 2012. How well do we understand landscape effects on pollinators and pollination services? *J Pollinat Ecol* 7:31–41. [https://doi.org/10.26786/1920-7603\(2012\)2](https://doi.org/10.26786/1920-7603(2012)2)
- Vidal, W. N. and Vidal, M. R. R. *Botânica organografia*. Viçosa: Ed: UFV, 2005, 124p
- Vieira, C, Paula Júnior, T.J., and Borém, A. 2011. *Feijão*. 2. ed. Viçosa, MG: UFV. 600 p.
- Vieira, C.; Paula Júnior, T.J. De and Borém, A. (Ed.). 2006. *Feijão*. Viçosa: UFV, 600p.
- Wells, W.C., Isom, W.H. and Waines, J.G. 1988. Outcrossing rates of six common bean lines. *Crop Science* .28: 177-178. <https://doi.org/10.2135/cropsci1988.0011183X002800010038x>
- Widhiono, I., Sudiana, E. and Darsono, D. 2017. Diversity of Wild Bees along Elevational Gradient in an Agricultural Area in Central Java, Indonesia. *Psyche* Volume 2017, 5 p. <https://doi.org/10.1155/2017/2968414>