

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS E LETRAS DE RIBEIRÃO PRETO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENTOMOLOGIA

**Avaliando a diversidade de insetos galhadores e seus efeitos como engenheiros de
ecossistemas no Cerrado**

Fernanda Cristina Franco Cintra

Tese apresentada à Faculdade de Filosofia,
Ciências e Letras de Ribeirão Preto da
Universidade de São Paulo, como parte das
exigências para obtenção do título de Doutora em
Ciências, obtido no Programa de Pós-Graduação
em Entomologia.

VERSÃO CORRIGIDA

Ribeirão Preto - SP

2023

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS E LETRAS DE RIBEIRÃO PRETO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENTOMOLOGIA

**Avaliando a diversidade de insetos galhadores e seus efeitos como engenheiros de
ecossistemas no Cerrado**

Fernanda Cristina Franco Cintra

Tese apresentada à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, como parte das exigências para obtenção do título de Doutora em Ciências, obtido no Programa de Pós-Graduação em Entomologia.

Orientador: Prof. Dr. Jean Carlos Santos

Ribeirão Preto - SP

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Cintra, Fernanda Cristina Franco

Avaliando a diversidade de insetos galhadores e seus efeitos como engenheiros de ecossistemas no Cerrado. Ribeirão Preto, 2023.

158 p.; 30 cm

Tese, apresentada a Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Ciências, obtido no Programa de Pós-Graduação. Área: Entomologia.

Orientador: Santos, Jean Carlos.

1. Facilitação. 2. galhas de insetos. 3. interação inseto-planta. 4. Lepidoptera. 5. ocupantes secundários.

Dedico essa tese, ao meu filho Eduardo,
que me inspira todos os dias com a sua curiosidade infinita.

Dedico também, aos meus avós, Naninha e Nequinha,
minhas fontes de sabedoria.

Agradecimentos

Essa tese é fruto de uma longa trajetória, que se iniciou ainda na minha infância. Por isso, preciso agradecer primeiramente a minha família. Meus pais, Ana e João, nunca mediram esforços para que eu pudesse estudar. Tive que sair de casa muito cedo, para ir estudar na cidade. E aquela menina a quase vinte anos atrás, jamais poderia imaginar onde poderia chegar.

Também preciso agradecer aos meus avós paternos Ana Francisca (Naninha), e João Cândido (Nequinha). Talvez essa trajetória tenha começado, com eles inclusive, que não puderam estudar, mas fizeram de tudo para que os filhos se formassem, e sempre aconselharam os filhos a fazerem o mesmo pelos netos. Essa sementinha plantada por eles rendeu frutos.

Gostaria de agradecer especialmente, a pessoa que escolhi para dividir a vida. Nestes dez anos juntos, o Renato sempre foi um parceiro incentivador do meu crescimento. Topou segurar as pontas enquanto precisei me ausentar para realizar as disciplinas, ou durante as coletas de campo. Segurou as pontas inclusive quando eu estava presente, mas me dedicando as atividades da tese, e sei que sem a sua ajuda eu não teria chegado aqui.

Também preciso agradecer, ao meu filho Eduardo. Por todos os momentos em que foi compreensivo e entendeu que a mamãe precisava estudar.

Agradeço também a Cila, minha sogra, que nos últimos quatro anos sempre me deu suporte, auxiliando nos cuidados com meu filho enquanto precisei me ausentar para realizar as disciplinas da pós, ou durante as coletas de campo.

Não poderia deixar de agradecer, meu orientador, Prof. Jean Carlos Santos, que aceitou me orientar no doutorado, com um grupo de insetos que eu almejava estudar desde a graduação, os insetos galhadores. Muito obrigada por todos os ensinamentos e auxílio.

Agradeço também os colegas de laboratório do LEBIO, em especial o Henrique que me auxiliou muito durante o doutorado, seja me tirando dúvidas ou auxiliando nas coletas de campo no Glória, e o Rodrigo colega de disciplinas e caronas para Ribeirão.

Gostaria de agradecer também os colegas e professores da Pós-graduação em Entomologia. Também gostaria de agradecer a Renata, secretária da pós, que sempre foi muito solícita nas minhas dúvidas e está sempre disposta a ajudar.

Deixo meus sinceros agradecimentos a todos os membros que compuseram a banca examinadora, Prof^a. Dr^a. Juliana Santos Silva, Prof. Dr. Guilherme Ramos Demétrio Ferreira, e Prof^a. Dr^a. Maria Virginia Urso Guimarães.

Agradeço as instituições que contribuíram para a realização dessa tese: Programa de Pós-graduação em Entomologia, da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, da Universidade de São Paulo, Universidade Federal de Uberlândia, Fazenda Experimental do Campus Glória, e Clube Caça e Pesca Itororó de Uberlândia.

O presente trabalho recebeu financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, processo: 140128/2019-0.

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	9
INTRODUÇÃO GERAL	11
Referências	17
CAPÍTULO I.....	21
Abstract	22
Introduction	23
Metadata	25
Class I. Data set descriptors.....	25
Class II. Research origin descriptors	37
Class III. Data set status and accessibility	43
Class IV. Data structural descriptors	43
CLASS V. Supplemental descriptors	49
Literature cited in metadata	49
CAPÍTULO II.....	59
Abstract	60
Introduction	61
Material and methods	63
Results	65
Discussion	75
References	81
Supplementary Information.....	87
CAPÍTULO III	96
Resumo.....	97
Introdução.....	99
Material e métodos	103
Resultados	106
Discussão.....	110
Referências	115
CAPÍTULO IV	122
Resumo.....	123
Introdução.....	125
Material e métodos	128
Resultados	135
Discussão.....	144
Referências	149
Considerações finais.....	158

Cintra, F. C. F. **Avaliando a diversidade de insetos galhadores e seus efeitos como engenheiros de ecossistemas no Cerrado.** Tese – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, 2023, 158 folhas.

RESUMO

A região Neotropical apresenta alta riqueza de espécies de insetos galhadores, e grande parte dessa riqueza se encontra no Cerrado, um dos ecossistemas mais ricos em insetos galhadores do mundo. A grande diversidade de plantas hospedeiras no Cerrado é um fator que pode influenciar a diversidade deste grupo de insetos herbívoros neste ecossistema. As galhas são estruturas induzidas sobre as plantas hospedeiras através do crescimento no volume celular (hipertrofia celular) e/ou no número de células (hiperplasia celular), provocados por parasitas ou patógenos, que se desenvolvem dentro dessas estruturas. Podem ser induzidas por muitos grupos de organismos, como bactérias, fungos, nematoides, ácaros e principalmente por insetos. Várias vantagens estão associadas ao hábito de indução de galhas, incluindo proteção contra variações microclimáticas e contra inimigos naturais, e melhora na qualidade nutricional do tecido da planta hospedeira. A presença das galhas cria uma micro-heterogeneidade ambiental sobre a planta hospedeira, o que permite a exploração por outras espécies não indutoras de galhas após a saída do indutor e, por isso, os insetos galhadores podem ser considerados engenheiros de micro-habitats. Neste contexto, a presente tese teve como objetivo conhecer e caracterizar a diversidade de plantas hospedeiras no Cerrado brasileiro e estimar a riqueza de espécies dos insetos galhadores, entre estes, aqueles que atuam como engenheiros de ecossistemas. Além disso, também foi objetivo deste trabalho entender como a presença de galhas de insetos em plantas do Cerrado pode influenciar a diversidade local de artrópodes, uma vez que, as galhas podem oferecer recursos alimentares e abrigo contra condições adversas para outros artrópodes. No primeiro capítulo, buscou-se estabelecer o estado atual do conhecimento sobre as comunidades de insetos galhadores e de plantas hospedeiras no Cerrado, por meio de um levantamento de dados de inventários sobre insetos galhadores e suas plantas hospedeiras publicados na literatura. No segundo capítulo, com base nos dados levantados no primeiro capítulo, foi possível testar hipóteses ecológicas sobre a diversidade de insetos galhadores e plantas. Foi encontrado que os táxons de plantas hospedeiras mais diversos abrigam uma grande riqueza de insetos indutores de galhas. Além disso, foi encontrado entre as plantas hospedeiras do cerrado, plantas ameaçadas de extinção que podem abrigar muitas espécies de insetos indutores, incluindo espécies da família Asteraceae, o táxon com o maior número de plantas hospedeiras e insetos galhadores. No terceiro capítulo, o objetivo foi compreender quais fatores explicam a ocupação das galhas por ocupantes secundários. Neste caso, foi encontrada uma

relação positiva entre o volume das galhas e a presença de ocupantes secundários. Outras características morfológicas também influenciaram na ocupação das galhas, como a presença de tricomas e o órgão de ocorrência das galhas. Além disso, dentre os locais amostrados, o ambiente mais conservado apresentou mais galhas colonizadas por artrópodes. Por fim, no quarto capítulo foram testados, experimentalmente, os efeitos das galhas caulinares induzidas por uma espécie de microlepidóptero na planta hospedeira *Bauhinia brevipes* (Fabaceae) sobre a comunidade de artrópodes no Cerrado. Os experimentos conduzidos com galhas naturais e artificiais, mostraram que insetos indutores de galhas podem desempenhar um importante papel como engenheiros de ecossistemas. Tanto as galhas naturais, quanto as artificiais proporcionaram micro-habitats nas plantas hospedeiras, resultando em um aumento na riqueza e abundância de artrópodes.

PALAVRAS-CHAVE: Facilitação, galhas de insetos, interação inseto-planta, Lepidoptera, ocupantes secundários.

Cintra, F. C. F. **Assessing the diversity of gall-inducing insects and their effects as ecosystem engineers in the Cerrado.** Tese – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, 2023, 158 folhas.

ABSTRACT

In the Neotropical region, gall-inducing insects are highly diverse, with a significant portion of this species richness found in the Cerrado, one of the world's most insect-rich ecosystems for gall-inducing species. The wide diversity of host plants in the Cerrado can influence the diversity of herbivorous insect groups in tropical environments. Galls are structures induced in host plants and are characterized by inducing cellular differentiation (by hyperplasia and/or hypertrophy) caused by parasites or pathogens that develop within these structures. They can be induced by a variety of organisms, including bacteria, fungi, nematodes, and mites, and primarily by insects. Several advantages are associated with gall induction habits, including protection against microclimatic variations and natural enemies as well as improved nutritional quality of the host plant tissue. The presence of galls creates micro-environmental heterogeneity in the host plant, allowing exploitation by other non-gall-inducing species after the gall inducer has left; for this reason, gall-inducing insects can be considered engineers of microhabitats. In this context, this thesis aimed to understand and characterize the diversity of host plants in the Brazilian Cerrado and estimate the species richness of gall-inducing insects, including those that act as ecosystem engineers. Additionally, we sought to understand how the presence of insect galls in Cerrado plants can influence the local diversity of arthropods, as galls can provide food resources and shelter against adverse conditions for other arthropods. In the first chapter, through a review of data from inventories of gall-inducing insects and their host plants published in the literature, the current state of knowledge about gall-inducing insect and host plant communities in the Cerrado is established. In the second chapter, based on the data gathered in the first chapter, ecological hypotheses regarding the diversity of gall-inducing insects and plants are tested. The most diverse host plant taxa harbored a high richness of gall-inducing insects. Moreover, among the Cerrado host plants, threatened plant species have been found to host many species of gall-inducing insects, including species from the Asteraceae family, the taxon with the highest number of host plants, and gall-inducing insects. In the third chapter, the objective is to understand the factors that explain the occupation of galls by secondary occupants. In this case, a positive relationship was found between the gall volume and the presence of secondary occupants. Other morphological characteristics also influenced gall occupation, such as the presence of trichomes and the organ in which the galls occurred. Additionally, more preserved environments showed more galls colonized by arthropods.

Finally, in the fourth chapter, the effects of stem galls induced by a microlepidopteran species on the arthropod community of the host plant *Bauhinia brevipes* in the Cerrado were experimentally tested. Experiments conducted with natural and artificial galls have shown that gall-inducing insects can play an important role in ecosystem engineering. Both natural and artificial galls provided microhabitats for host plants, resulting in an increase in arthropod richness and abundance.

KEYWORDS: Facilitation, insect galls, insect-plant interactions, Lepidoptera, secondary users.

INTRODUÇÃO GERAL

Estima-se que a riqueza global de insetos galhadores esteja entre 21.000 e 211.000 espécies, com uma média aproximada de 132.000 espécies (Espírito-Santo & Fernandes 2007). A região Neotropical apresenta alta riqueza de insetos galhadores, no entanto, são pouco conhecidos do ponto de vista taxonômico (Fernandes et al. 2001, Gonçalves-Alvim & Fernandes 2001). Boa parte dessa riqueza de insetos galhadores encontra-se no Cerrado, região central do Brasil, um dos ecossistemas mais ricos em insetos galhadores do mundo (Araújo et al. 2014). O Cerrado apresenta uma grande diversidade de características de vegetação, incluindo campos, savanas e formações florestais (Ribeiro e Walter 2008), e as diferenças entre esses tipos de habitats podem ter um impacto direto na distribuição das espécies de insetos galhadores (Fernandes e Price 1992). Outro fator que pode influenciar a diversidade e distribuição de insetos herbívoros em ambientes tropicais é a diversidade de plantas hospedeiras (Strong et al. 1984). Isso acontece porque, à medida que as comunidades de plantas se tornam mais diversas, a diversidade de herbívoros aumenta (Cuevas-Reyes et al. 2004; Meyer et al. 2017), uma vez que, comunidades de plantas mais diversas representam um maior número de recursos e nichos a serem usados e colonizados pelas espécies de insetos herbívoros (Cuevas-Reyes et al. 2004). Várias hipóteses têm sido propostas para tentar explicar a variação na diversidade de insetos galhadores em diferentes escalas espaciais e temporais, como por exemplo, a riqueza de espécies de plantas, a idade do táxon, a complexidade estrutural das plantas, a densidade das plantas e a sincronização de recursos (Price et al. 1998; Gonçalves-Alvim e Fernandes 2001; Mendonça 2001; Cuevas-Reyes et al. 2004; Miller e Raman 2019).

As galhas são estruturas induzidas nas plantas hospedeiras através do crescimento no volume celular (hipertrofia celular) e/ou no número de células (hiperplasia celular), provocados por parasitas ou patógenos, que se desenvolvem dentro dessas estruturas (Price et al 1987). Estas estruturas podem ser induzidas por uma diversidade de organismos como bactérias, fungos, nematoides, ácaros e principalmente por insetos (Santos et al. 2012). Várias vantagens

estão associadas ao hábito de indução de galhas, incluindo a melhora do microclima, proteção contra inimigos naturais (Price et al. 1987, Stone & Schonrögge 2003), manipulação do metabolismo da planta para melhorar a qualidade nutricional do tecido (Fernandes et al. 2014). Os insetos galhadores são espécie-específicos, e em raríssimas exceções podem ocorrer em mais de uma espécie da planta hospedeira (Carneiro et al. 2009). Geralmente as galhas ocorrem em folhas e caules, mas também podem ocorrer em quaisquer partes vegetativas e reprodutivas das plantas. Indutores de galhas são capazes de controlar a morfologia da galha produzindo uma enorme variedade de estruturas com diferentes tipos, complexidade, cores, pelos e tipos de tecido (Stone & Schonrögge 2003). A formação de galhas pode alterar a arquitetura do órgão atacado e até da planta inteira (Fernandes et al. 1993, Gonçalves-Alvim et al. 1999, Crutsinger et al. 2008).

Quando as galhas persistem no ambiente após o abandono ou morte do indutor podem ser utilizadas por outros organismos, como onívoros, herbívoros e predadores. As vantagens para os usuários secundários das galhas incluem, a ausência de custo energético e tempo gasto na construção de abrigos (Fukui 2001), assim, o custo energético e tempo gasto por estes organismos podem ser investidos em crescimento e outros atributos de performance (Fukui 2001). Além dos insetos galhadores, vários artrópodes como aranhas, besouros, formigas e lagartas possuem a capacidade de manipular folhas de plantas para construir abrigos que são utilizados em algum estágio do desenvolvimento do construtor (Lill & Marquis 2007). A construção de abrigos (por exemplo, minas, galhas e folhas enroladas) pode aumentar a sobrevivência do inseto, e influenciar outros organismos da comunidade através de efeitos: (a) não tróficos diretos, quando o abrigo é co-ocupado, e (b) não tróficos indiretos, quando o abrigo é ocupado após o abandono do construtor, colocando os construtores de abrigos no contexto da engenharia de ecossistemas (Fukui 2001).

Engenheiros de ecossistemas são espécies que possuem a capacidade de causar modificações estruturais no ambiente (Jones et al. 1994, 1997), e podem controlar direta ou indiretamente a disponibilidade de recursos para outros indivíduos por manutenção e/ou criação de novos habitats (Jones et al. 1994). A engenharia de ecossistemas pode ser considerada um tipo de interação positiva que envolve interações não tróficas entre espécies (Jones & Gutiérrez 2007). Sua definição se baseia na teoria de facilitação, onde os organismos criam ou modificam estruturas físicas, alterando o ambiente local através da modificação do habitat ou na melhoria de estresse abiótico, com efeitos diretos e indiretos sobre outros componentes das comunidades e propriedades do ecossistema (Cuddington et al. 2007). De acordo com a teoria da facilitação (Stachowicz 2001), pelo menos uma espécie é beneficiada e não há prejuízo para outras espécies envolvidas. A influência da facilitação em virtude da ação do engenheiro pode variar, sendo influenciada por fatores como o estresse ambiental, a sazonalidade, o risco de predação e o tamanho do habitat (Jones et al. 1997). Os engenheiros de ecossistemas e suas consequências podem abranger toda a amplitude da ecologia e seus efeitos podem ser medidos a nível de população, de comunidade e de ecossistema (Hastings et al. 2007). A melhoria das condições adversas, manipulação da qualidade da planta hospedeira, e proteção contra inimigos naturais têm sido sugeridos como potenciais forças na evolução e manutenção do hábito de construção de abrigos em insetos (Lill & Marquis 2007).

Os insetos galhadores podem ser considerados engenheiros de micro-habitats (Sanver & Hawkins 2000), pois, através de manipulações do tecido da planta hospedeira podem criar uma estrutura para o seu desenvolvimento criando uma heterogeneidade ambiental que permite a exploração por outras espécies (Jones et al. 1994, Sugiura & Yamazaki 2009). Geralmente uma maior heterogeneidade de habitats suporta maior riqueza de espécies (Stein et al. 2014). Portanto, as galhas podem fornecer novas estruturas físicas que aumentam a diversidade de habitats em plantas hospedeiras. Estas estruturas podem ser um recurso atraente para várias

espécies, entre eles, parasitoides, predadores, inquilinos, cecidófagos e cleptoparasitas, servindo como local de alimentação e/ou refúgio para as espécies (Maia & Fernandes 2004, Sugiura & Yamazaki 2009). Em um estudo de Waltz & Whitan (1997) a remoção de galhas do afídeo *Pemphigus betae* (Donae, 1900) (Hemiptera: Aphididae) em algodoeiros híbridos diminuiu a riqueza de artrópodes em 32%, e a abundância relativa de artrópodes em 55%. O que comprova que neste sistema as galhas forneciam abrigos para outras espécies. Um estudo experimental realizado por Uesugi et al. (2016) em plantas de *Solidago altissima* L. (Asteraceae), avaliou como a infestação inicial de galhas do tipo roseta causadas por *Rhopalomyia solidaginis* (Loew, 1862) (Diptera: Cecidomyiidae), pode influenciar na colonização do besouro *Microrhopala vittata* (Fabricius, 1798) (Coleoptera) através de respostas induzidas na planta. Por meio de observações em campo, ensaios comportamentais e análises químicas, os autores demonstraram que a presença de *R. solidaginis* pode impactar fortemente o comportamento de colonização e padrão de distribuição dos besouros, não apenas por alterar a morfologia da planta, mas também a qualidade nutricional e por alterar a indução de resposta da planta beneficiando a ocupação dos besouros. Também observaram que a diversidade de artrópodes foi significativamente maior em plantas com galhas, quando comparadas com plantas sem galhas. As galhas podem frequentemente abrigar usuários secundários, e as formigas são os artrópodes mais comumente encontrados em galhas. Wheeler & Longino (1988) encontraram oito espécies de formigas e dezesseis espécies de artrópodes (Araneae, Coleoptera, Hymenoptera, Lepidoptera, Neuroptera e Diplopoda) em galhas caulinares de carvalhos feitas por *Disholcaspis cinerosa* (Bassett, 1881).

No Cerrado brasileiro o uso secundário de galhas senescentes por formigas já foi descrito em diferentes estudos como as seguintes plantas hospedeiras: *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish (Asteraceae) (Almeida et al. 2014, Santos et al. 2017), *Diospyrus hispida* (DC.) (Ebenaceae) (Araújo et al. 1995), e *Xylopia aromatica* (Lam.) Mart.

(Annonaceae) (Fernandes et al. 1988, Craig et al. 1991). Estes estudos reforçam que o uso secundário de galhas por formigas em espécies do Cerrado pode aumentar a diversidade local de formigas através da disponibilização de locais para nidificação em plantas. Estas interações positivas citadas acima, incluindo a engenharia de ecossistemas por insetos, foram pouco estudadas por estudos observacionais e experimentais quando comparados aos outros tipos de interações (Cornelissen et al. 2016), principalmente em regiões tropicais. Neste sentido, a presente tese teve como objetivo conhecer e caracterizar a diversidade de plantas hospedeiras no Cerrado brasileiro, e estimar a riqueza de espécies dos insetos galhadores, entre estes, aqueles que atuam como engenheiros de ecossistemas no Cerrado. Além disso, entender como a presença de galhas de insetos em plantas do cerrado podem influenciar a diversidade local de artrópodes, uma vez que, as galhas podem oferecer recursos como abrigo e recurso alimentar para outros artrópodes. Para alcançar esses objetivos a tese foi estruturada em quatro capítulos:

Capítulo I - Plant-galling insect interactions: a data set of host plants and their gall-inducing insects for the Cerrado. *Objetivo geral:* Compilar dados de vários inventários de comunidades de insetos galhadores, e informações sobre a diversidade e distribuição de galhas de insetos e suas plantas hospedeiras no bioma do Cerrado, e identificar possíveis lacunas no conhecimento e oportunidades para futuras pesquisas sobre padrões de diversidade e distribuição, fornecendo uma base para gerar e testar novas hipóteses ecológicas.

Capítulo II - Diversity patterns of host plants and their gall-inducing insects in the Brazilian Cerrado: testing ecological and historical hypotheses. *Objetivo geral:* caracterizar a diversidade de plantas hospedeiras e dos seus insetos galhadores no Cerrado brasileiro; estimar a riqueza de espécies dos insetos galhadores para a vegetação de Cerrado; determinar se a riqueza de espécies de insetos galhadores está relacionada a riqueza de espécies de plantas; analisar o número de espécies por comunidades de plantas hospedeiras e estimar o número de espécies de insetos galhadores (co-ameaçadas) em plantas ameaçadas de extinção.

Capítulo III - O que explica a colonização das galhas por ocupantes secundários?

Objetivo geral: Compreender quais são os fatores que levam a ocupação das galhas induzidas por insetos em plantas hospedeiras do bioma Cerrado.

Capítulo IV – Testando os efeitos da remoção e adição de galhas de insetos sobre a diversidade da artropodofauna em plantas no Cerrado. Objetivo geral: Avaliar os efeitos das galhas caulinares induzidas por um microlepidóptero na planta hospedeira *Bauhinia brevipes* sobre a comunidade de artrópodes no Cerrado.

Referências

- Almeida MFB, Santos LR, Carneiro MAA (2014) Senescent stem-galls in trees of *Eremanthus erythropappus* as a resource for arboreal ants. *Rev Bras Entomol* 58:265-272
- Araújo LM, Lara ACF, Fernandes GW (1995) Utilization of *Apion* sp. (Coleoptera Apionidae) galls by an ant community in southeastern Brazil. *Trop Zool* 8:319-324
- Araújo, W. S., B. B. Santos., F. A. G. Guilherme, and C. Scareli-Santos. 2014. Galling insects in the Brazilian Cerrado: ecological patterns and perspectives. Pages 257-272 in G. W. Fernandes, and J. C. Santos, editors. *Neotropical insect Galls*. Springer, New York, USA.
- Carneiro MAA, Branco CSA, Braga CED, Almada ED, Costa MBM, Maia VC, Fernandes GW (2009) Are gall midge species (Diptera, Cecidomyiidae) host-plant specialists? *Rev Bras Entomol* 53:365-378
- Cornelissen T, Cintra F, Santos JC (2016) Shelter-building insects and their role as ecosystem engineers. *Neotrop Entomol* 45: 1-12
- Cuevas-Reyes P, Quesada M, Hanson P, et al (2004) Diversity of gall-inducing insects in a Mexican tropical dry forest: the importance of plant species richness, life-forms, host plant age and plant density. *J Ecol* 92:707–716. <https://doi.org/10.1111/J.0022-0477.2004.00896.X>
- Craig TP, Araújo LM, Itami JK, Fernandes GW (1991) Development of the insect community centered on a leaf bud gall formed by a weevil (Coleoptera: Curculionidae) on *Xylopia* (Annonaceae). *Rev Bras Entomol* 35:311-317
- Crutsinger GM, Habenicht MN, Classen AT, Schweitzer JA, Sanders NJ (2008) Galling by *Rhopalomyia solidaginis* alters *Solidago altissima* architecture and litter nutrient dynamics in an old-field ecosystem. *Plant Soil* 303:95-103
- Cuddington K, Byers J, Hastings A, Wilson W (2007) *Ecosystem engineers: plants to protists*. Academic Press, Elsevier, New York, 405p
- Espírito-Santo MM, Fernandes GW (2007) How many species of gall inducing insects are there on earth, and where are there? *Ann Entomol Soc Am* 100:95-99
- Fernandes GW, Boecklen WJ, Martins RP, Castro AG (1988) Ants associated with a coleopterous leaf-bud gall on *Xylopia aromatica* (Annonaceae). *Proc Entomol Soc Wash* 91:81-87
- Fernandes GW, Coelho M, Santos JC (2014) Neotropical insect galls: status of knowledge and perspectives. In: Fernandes GW, Santos JC (eds) *Neotropical insect galls*, Springer, Netherlands, pp 1-14

- Fernandes GW, Julião GR, Araújo RC, Araújo SC, Lombardi JA, Negreiros D, Carneiro MAA (2001) Distribution and morphology of insect galls of the Rio Doce Valley, Brazil. *Naturalia* 26: 211-244
- Fernandes, G. W., and P. W. Price. 1992. The adaptive significance of insect gall distribution: Survivorship of species in xeric and mesic habitats. *Oecologia* 90: 14-20.
- Fernandes GW, Souza AL, Sacchi CF (1993) Impact of a Neolasioptera (Cecidomyiidae) stem gall on its host plant *Mirabilis linearis* (Nyctaginaceae). *Phytophaga* 5:1-6
- Fukui A (2001) Indirect interactions mediated by leaf shelter in animal-plant communities. *Popul Ecol* 43:31-40
- Gonçalves-Alvim SJ, Fernandes GW (2001) Biodiversity of galling insects: historical, community and habitat effects in four neotropical savannas. *Biodivers Conserv* 10: 79-98
- Gonçalves-Alvim SJ, Landau EC, Fagundes M, Silvia VG, Nunes RF, Fernandes GW (1999) Abundance and impact of a lepidopteran gall on *Machaeiera* sp. (Melastomataceae) in the neotropics. *Int J Ecol Environ Sci* 25:115-125
- Hastings A, Byers JE, Crooks JA, Cuddington K, Jones CG, Lambrinos JG, Talley TS, Wilson WG (2007) Ecosystem engineering in space and time. *Ecol Lett* 10:153-164
- Jones CG, Gutiérrez JL (2007) On the purpose, meaning, and usage of the physical ecosystem engineering concept. In: Cuddington K, Byers JE, Hastings A, Wilson WG (eds) *Ecosystem engineers: plants to protists*. Academic Press, Elsevier, New York, pp 3-24
- Jones CG, Lawton JH, Shachak M (1994) Organisms as ecosystem engineers. *Oikos* 69: 373-386
- Jones CG, Lawton JH, Shachak M (1997) Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers. *Ecology (Wash D C)* 78: 1946-1957.
- Lill JT, Marquis RJ (2007) Microhabitat manipulation: ecosystem engineering by shelter-building insects. In: Cuddington K, Byers JE, Hastings A, Wilson WG (eds) *Ecosystem engineers: plants to protists*. Academic Press, Elsevier, New York, pp 107-138
- Maia VC, Fernandes GW (2004) Insect galls from Serra de São José (Tiradentes, MG, Brazil). *Braz J Biol* 64: 423-445
- Mendonça Jr MS (2001) Galling insect diversity patterns: the resource synchronisation hypothesis. *Oikos*, 95:171–176. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2001.950120.x>
- Meyer ST, Scheithe L, Hertzog L, et al (2017) Consistent increase in herbivory along two experimental plant diversity gradients over multiple years. *Ecosphere* 8:e01876. <https://doi.org/10.1002/ECS2.1876>

- Miller DG, Raman A (2019) Host–plant relations of gall-inducing insects. *Ann Entomol Soc Am* 112:1–19. <https://doi.org/10.1093/AESA/SAY034>
- Price PW, Fernandes GW, Waring GL (1987) Adaptive nature of insect galls. *Environ Entomol* 16:15-24
- Price PW, Wilson Fernandes G, Lara ACF, et al (1998) Global patterns in local number of insect galling species. *J Biogeogr* 25:581–591. <https://doi.org/10.1046/J.1365-2699.1998.2530581.X>
- Ribeiro, J. F., and B. M. T. Walter. 2008. As principais fitofisionomias do Bioma Cerrado. Pages 151-212 in S. M. Sano, S. P. Almeida, and J. F. Ribeiro, editors. *Cerrado: ecologia e flora*. Embrapa, Brasília, BR.
- Santos JC, Carneiro MAA, Fernandes GW (2012) Insetos galhadores neotropicais: diversidade e ecologia evolutiva dos herbívoros mais sofisticados da natureza. In: Del-Claro K, Torezan-Silingardi HM (eds) *Ecologia das interações plantas-animais: uma abordagem ecológico-evolutiva*, Technical Books, Rio de Janeiro, pp 183-199
- Santos LR, Feitosa RM, Carneiro MAA (2017) The role of Senescent Stem-Galls over Arboreal Ant Communities Structure in *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish (Asteraceae) Trees. *Sociobiolog* 64:7-13
- Sanver D, Hawkins BA (2000) Galls as habitats: the inquiline communities of insect galls. *Basic Appl Ecol* 1:3-11
- Stachowicz JJ (2001) Mutualism, facilitation, and the structure of ecological communities. *Bioscience* 51:235-246
- Stein, A., Gerstner, K., & Kreft, H. (2014). Environmental heterogeneity as a universal driver of species richness across taxa, biomes and spatial scales. In *Ecology Letters* (Vol. 17, Issue 7, pp. 866–880). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/ele.12277>
- Stone GN, Schonrögge K (2003) The adaptive significance of insect gall morphology. *Trends Ecol Evol* 18:512-522
- Strong DR, Lawton JH, Southwood TRE (1984) *Insect on plants: community patterns and mechanisms*. Backwell Science, London
- Sugiura S, Yamazaki K (2009) Gall-attacking behavior in phytophagous insects, with emphasis on Coleoptera and Lepidoptera. *Terr Arthropod Rev* 2: 41-61
- Uesugi A, Morrell K, Poelman EH, Raaijmakers CE, Kessler A (2016) Modification of plant-induced responses by an insect ecosystem engineer influences the colonization behaviour of subsequent shelter-users. *J Anim Ecol* 104: 1096-1105

- Waltz AM, Whitham TG (1997) Plant development affects arthropod communities: opposing impacts of species removal. *Ecology (Wash D C)* 78: 2133-2144
- Weiss M, Lind EM, Jones MT, Long JD, Mauplin JL (2004) Uniformity of leaf shelter construction by larvae of *Epargyreus clarus* (Hesperiidae), the silver-spotted skipper. *J Insect Behav* 16:465-480
- Wheeler J, Longino JT (1998) Arthropods in live oak galls in Texas. *Entomol News* 991:25-29

CAPÍTULO I

PLANT-GALLING INSECT INTERACTIONS: A DATA SET OF HOST PLANTS AND THEIR GALL-INDUCING INSECTS FOR THE CERRADO

Fernanda C. F. Cintra¹, Walter S. de Araújo², Valéria C. Maia³, Maria V. Urso-Guimarães⁴,
Henrique Venâncio¹, Janete F. Andrade⁵, Marco A. A. Carneiro⁶, Wanessa R. de Almeida⁷ &
Jean C. Santos⁷

¹ Programa de Pós-Graduação em Entomologia, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, São Paulo, Brazil.

² Departamento de Biologia Geral, Universidade Estadual de Montes Claros Montes Claros, Minas Gerais, Brazil.

³ Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil.

⁴ Departamento de Biologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brazil.

⁵ Programa de Pós-graduação em Biologia Vegetal, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brazil.

⁶ Departamento Biodiversidade, Evolução e Meio Ambiente, Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil.

⁷ Departamento de Ecologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brazil.

Data paper published in *Ecology*

Cintra, F. C. F., Araújo, W. S., Maia, V. C., Urso-Guimarães, M. V., Venâncio, H., Andrade, J. F., Carneiro, M. A. A., Almeida, W. R., & Santos, J. C. (2020). Plant-galling insect interactions: a data set of host plants and their gall-inducing insects for the Cerrado. *Ecology*, 101(11). <https://doi.org/10.1002/ECY.3149>

Plant-galling insect interactions: a data set of host plants and their gall-inducing insects for the Cerrado

Fernanda C. F. Cintra¹, Walter S. de Araújo², Valéria C. Maia³, Maria V. Urso-Guimarães⁴, Henrique Venâncio¹, Janete F. Andrade⁵, Marco A. A. Carneiro⁶, Wanessa R. de Almeida⁷ & Jean C. Santos⁷

Abstract

Recent decades have seen increased research interest in the processes and mechanisms related to insect gall richness and host plants. The data set provided here includes 968 records of interactions between galling insects and host plants for the Cerrado biome. The data set comprises 505 species of 222 genera and 67 families of host plants. The botanical families most represented in the data set are Asteraceae, Fabaceae, Myrtaceae, Malpighiaceae, and Melastomataceae, which account for ~48.5% of all records and 52% of the total number of species. The gall-inducing insects listed in the data set include 48 species of Cecidomyiidae and one species of Tephritidae. This data set is the first to compile inventories of plant-galling insect communities and information about the diversity and distribution of insect galls and their host plants in the Cerrado. The data set reveals knowledge gaps and opportunities for future research on patterns of diversity and distribution, and provides a basis for generating and testing new ecological hypotheses. Please cite this data paper when using the current data in publications and let us know how the data are used in the publications. There are no copyright restrictions.

Key words: Asteraceae; Cecidomyiidae; Diptera; Fabaceae; host-plant communities; insect galls; Neotropical savannah; Tephritidae.

Introduction

Galling insects are considered the most specialized guild of phytophagous insects. Their unique ability to modify plant tissues before their consumption is remarkable (Shorthouse et al. 2005). Such changes in plant tissues are attributed to abnormal growth and development of plant cells (hyperplasia and hypertrophy) induced by specific stimuli from an ovipositing female and/or her prole (Hartley 1998, Moura et al. 2008, Giron et al. 2016). This ability has evolved independently in many different taxa within six insect orders: Diptera, Hemiptera, Hymenoptera, Coleoptera, Thysanoptera and Lepidoptera (Shorthouse et al. 2005, Price 2005). There exists great diversity of galling insects in the Neotropics (Gagné 1994, Fernandes and Santos 2014), but mainly in the Cerrado (Brazilian Savannah) of central Brazil (Araújo et al. 2014), which includes campos rupestres (rupestrian fields; Lara and Fernandes 1996).

The Cerrado is the second largest phytogeographic biome in Brazil, occupying ca. 2 million km² or 23% of the national territory (Oliveira and Ratter 2002). As a continuous area, the Cerrado completely covers the states of Goiás and Tocantins and the Federal District, as well as portions of the states of Bahia, Ceará, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Piauí, Rondônia and São Paulo. Disjointed areas also occur the north, in the states of Amapá, Amazonas, Pará and Roraima, and in the south, as small “islands” in the state of Paraná (Ribeiro and Walter 2008). The Cerrado is among the most botanically diverse biome in the world with over 12,000 species (Klink and Machado 2005, Mendonça et al. 2008), which represent potential host plants for galling insects (Fernandes and Gonçalves-Alvim 2006).

The Cerrado includes a wide variety of phytophysiognomies, such grassland, savanna and forest formations (Ribeiro and Walter 2008). Differences among habitat types can directly affect the distribution of galling species (Fernandes and Price 1992). There have been many inventories of insect gall diversity in mesic (non-sclerophyllous) and xeric (sclerophyllous) vegetation of the Cerrado (review in Araújo et al. 2019). Recent evidence indicates that

interactions between galling insects and host plants can form complex ecological networks in the Cerrado (Araújo et al. 2019). Despite advances in knowledge of local interactions, there has been no synthesis to better understand patterns at regional and macroecological scales.

The present study compiled data from several inventories of galling insects in the Cerrado biome, community studies about species of Diptera with gall-inducing habit and host plants attacked by several galling insect species. The resulting data set contains 49 described species of Diptera (Cecidomyiidae and Tephritidae) and 505 species of host plants of 32 communities distributed throughout the Cerrado. All records of galling species were confirmed, and the taxonomic nomenclature of host plants was updated to assure all data are robust and reliable. The aim of compiling this dataset was to fill a knowledge gap about the geographical distribution of host plants and gall-inducing insects in an area considered a global biodiversity hotspot.

The data set can contribute to several areas of knowledge, including natural history, ecology, botany, zoology and evolution. Gall-inducing insects have proven to be good study models because they: (a) have high taxonomic and ecological diversity; (b) are sedentary during the larval phase, which facilitates sampling on host plants; (c) are abundant on host plants; (d) occur in all biogeographic regions of the world; (e) possess a high level of specificity for their host plants; (f) are easily identified through gall morphology since galls are considered an extended phenotype of gall inducers; (g) have an important functional role in ecosystems through herbivory; and (h) have predictable responses to environmental variation as a function of their close relationship with host plant species. For all these reasons, gall-inducing insects are good tool for basic, applied and experimental studies. They are also useful for understanding ecological, evolutionary and mechanistic aspects, such as: host-plant preferences and selection; the process of adaptive radiation; how patterns of geographic distribution and diversity of host plants affect galling insects; phytochemical patterns in host plants; plant defense against gall

induction; theory of island biogeography applied to host plants; and several hypotheses about plant architecture, plant vigor and preference performance, among others (Price et al. 2004, Price 2005, Fernandes et al. 2011, Stone & Schönrogge 2003, Fernandes and Santos 2014, Tooker and Helms 2014, Carneiro et al. 2015, Grandez-Rios et al. 2015, Giron et al. 2016, Oates et al. 2016).

Metadata

Class I. Data set descriptors

A. Data set identity:

Title: Plant-galling insect interactions: a data set of host plants and their gall-inducing insects for the Cerrado.

B. Data set and metadata identification codes:

Suggested data set identity codes:

plant-galling_insect_diptera.csv

plant-galling_insect_host_plants_information.csv

plant-galling_insect_host_plant_references.csv

C. Data set description

Principal investigators:

1. *Fernanda Cristina Franco Cintra*. Programa de Pós-Graduação em Entomologia, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, São Paulo, Brazil.
2. *Walter Santos de Araújo*. Departamento de Biologia Geral, Universidade Estadual de Montes Claros (UNIMONTES), Montes Claros, Minas Gerais, Brazil.

3. *Valéria Cid Maia*. Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil.
4. *Maria Virginia Urso-Guimarães*. Departamento de Biologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brazil.
5. *Henrique Venâncio*. Programa de Pós-Graduação em Entomologia, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, São Paulo, Brazil.
6. *Janete Ferreira Andrade*. Programa de Pós-graduação em Biologia Vegetal, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brazil.
7. *Marco Antônio Alves Carneiro*. Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil.
8. *Wanessa Rejane de Almeida*. Departamento de Ecologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brazil.
9. *Jean Carlos Santos*. Departamento de Ecologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brazil.

Abstract: Recent decades have seen increased research interest in the processes and mechanisms related to insect gall richness and host plants. The data set provided here includes 968 records of interactions between galling insects and host plants for the Cerrado biome. The data set comprises 505 species of 222 genera and 67 families of host plants. The botanical families most represented in the data set are Asteraceae, Fabaceae, Myrtaceae, Malpighiaceae and Melastomataceae, which account for ca. 48.5% of all records and 52% of the total number of species. The gall-inducing insects listed in the data set include 48 species of Cecidomyiidae and one species of Tephritidae. This data set is the first to compile inventories of plant-galling insect communities and information about the diversity and distribution of insect galls and their

host plants in the Cerrado. The data set reveals knowledge gaps and opportunities for future research on patterns of diversity and distribution, and provides a basis for generating and testing new ecological hypotheses.

D. Key words: Asteraceae, insect galls, Fabaceae, Neotropical savannah, host plant communities, Diptera, Cecidomyiidae, Tephritidae

E. Description: The data set developed here is restricted to the Cerrado biome and comprises data only from peer reviewed scientific publications. The Cerrado has been the most studied Brazilian biome with regard to galling insects (Araújo et al. 2019). The data set includes only the occurrence of insect-gall host plants and gall-inducing species of Diptera, and excludes all other galling insect taxa (e.g., Hemiptera, Hymenoptera and Lepidoptera). In addition, other gall-inducing interactions are not included, such as those involving mites, nematodes, fungi, bacteria and viruses. The data set consists of 968 records of 505 species, 222 genera and 67 families of host plants. Nine of the species are considered either Vulnerable (VU) or Endangered (EN), according to the red list of flora in Brazil (MMA Ordinance # 443/2014; CNCFlora 2020). The three Vulnerable species are *Baccharis concinna* G.M.Barroso (Asteraceae), *Lychnophora ramosissima* Gardner (Asteraceae) and *Lychnophora tomentosa* (Mart. ex DC.) Sch.Bip. (Asteraceae). The six Endangered species are *Anemopaegma arvense* (Vell.) Stelfeld ex de Souza (Bignoniaceae), *Lychnophoriopsis candelabrum* (Sch.Bip.) H.Rob. (Asteraceae), *Baccharis elliptica* Gardner (Asteraceae), *Mikania glabra* D.J.N.Hind (Asteraceae), *Mikania glauca* Mart. ex Baker (Asteraceae) and *Peixotoa cipoana* C.E.Anderson (Malpighiaceae).

Most of the sampled communities are located in the states of Minas Gerais (n=13; 41%), Goiás (n=9; 28%) and Bahia (n=7; 22%), which accounted for ca. 91% of all the communities

in the data set (Figure 1). The concentration of most of the sampling effort in these states is a consequence of logistics, with it being dominated by just a few research groups based in Minas Gerais, Goiás and Bahia.

More studies were conducted outside (n=18; 62%) than inside (n=11; 38%) protected areas; two studies (6%) did not state whether they occurred in a protected area or not, while only one study (6%) was conducted both inside and outside of a protected area (see Carneiro et al. 2009). Among the studies conducted in protected areas, 55% (N=6) occurred in state protected areas, 36% (N=4) in federal protected areas and one (9%) in a Private Natural Heritage Reserve and in state-level protected areas (see Carneiro et al. 2009). Multiple phytophysionomies of the Cerrado were sampled, including: Cerrado-Caatinga transition, cerrado *sensu stricto*, campo rupestre (rupestrian fields), campo cerrado, campo sujo, cerradão, cerrado rochoso, campo limpo, seasonal forest, seasonal deciduous forest, seasonal semideciduous forest, riparian rainforest, gallery forest, ciliary forest, dry forest, and semideciduous forest. In addition, many studies did not report the phytophysionomy in which they took place (see Oliveira-Filho and Ratter 2002 for the classification system of Cerrado phytophysionomies).

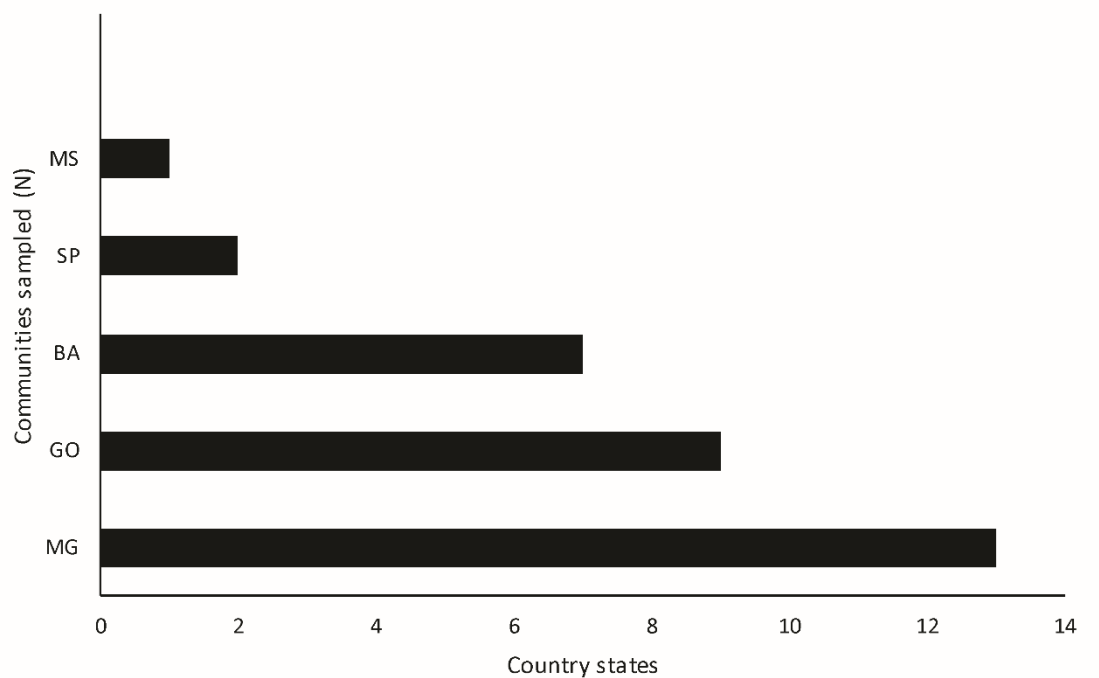


Figure 1. Number of communities sampled per Brazilian states in this study, from a total of 32 communities. The abbreviations of states are: BA = Bahia, GO = Goiás, MG = Minas Gerais, MS = Mato Grosso do Sul and SP = São Paulo.

The fourteen most frequently recorded plant species represent about 14.7% of all the records: *Copaifera langsdorffii* Desf. (Fabaceae), *Duguetia furfuracea* (A.St.-Hil.) Saff. (Annonaceae), *Erythroxylum suberosum* A.St.-Hil. (Erythroxylaceae), *Qualea parviflora* Mart. (Vochysiaceae), *Roupala montana* Aubl. (Proteaceae), *Caryocar brasiliense* Cambess. (Caryocaraceae), *Qualea grandiflora* Mart. (Vochysiaceae), *Eugenia puniceifolia* (Kunth) DC. (Myrtaceae), *Protium heptaphyllum* (Aubl.) Marchand (Burseraceae), *Bauhinia brevipes* Vogel (Fabaceae), *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish (Asteraceae), *Handroanthus ochraceus* (Cham.) Mattos (Bignoniaceae), *Palicourea rigida* Kunth (Rubiaceae) and *Terminalia argentea* Mart. (Combretaceae). Many of these species are typical of the Cerrado and are widely distributed throughout the biome. Of the 505 species recorded, 328 (ca. 65%) are registered only once, which represents about 34% of all the records.

Eight plant genera stand out for having large numbers of records: *Baccharis* N=62, 6.4%), *Byrsonima* (N=36, 3.7%), *Erythroxylum* (N=30, 3.1%), *Qualea* (N=30, 3.1%), *Bauhinia*

(N=29, 3.0%), *Eugenia* (N=29, 3.0%), *Myrcia* (N=25, 2.6%) and *Copaifera* (N=21, 2.2%; Table 1). These eight genera account for ca. 27% of the recorded plant species. The genera with the most recorded species are: *Baccharis* (N=44 spp., 8.7%), *Byrsonima* (N=14 spp., 2.8%), *Myrcia* (N=12 spp., 2.4%), *Eugenia* (N=11 spp., 2.2%), *Bauhinia* (N=10 spp., 2%), *Erythroxylum* (N=10 spp., 2%), *Chamaecrista* (N=9 spp., 1.8%) and *Croton* (N=9 spp., 1.8). These results show the importance of the diversity of *Baccharis* as a super host genus of insect galls.

Table 1. Genera of host plants of galling insects from the Cerrado. Also includes the number of records and the number of species for each genus.

Host genera	Species records (N)	Species records (%)	Host plant richness (N)	Host plant richness (%)
<i>Achyrocline</i>	2	0.2	2	0.4
<i>Acritopappus</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Aegiphila</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Ageratum</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Agrianthus</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Alibertia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Amorimia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Amphilophium</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Anacardium</i>	6	0.6	2	0.4
<i>Anadenanthera</i>	8	0.8	2	0.4
<i>Andira</i>	8	0.8	4	0.8
<i>Anemopaegma</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Annona</i>	11	1.1	6	1.2
<i>Aspidosperma</i>	12	1.2	6	1.2
<i>Aspilia</i>	4	0.4	4	0.8
<i>Astronium</i>	2	0.2	2	0.4
<i>Baccharis</i>	62	6.4	44	8.7
<i>Banisteriopsis</i>	6	0.6	6	1.2
<i>Bauhinia</i>	29	3.0	10	2.0
<i>Blepharocalyx</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Bocageopsis</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Bowdichia</i>	3	0.3	1	0.2
<i>Bredemeyera</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Brosimum</i>	3	0.3	1	0.2
<i>Buchenavia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Buchnera</i>	1	0.1	1	0.2

<i>Bunchosia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Byrsonima</i>	36	3.7	14	2.8
<i>Calliandra</i>	6	0.6	4	0.8
<i>Callisthene</i>	2	0.2	2	0.4
<i>Calolisianthus</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Calophyllum</i>	3	0.3	1	0.2
<i>Campomanesia</i>	4	0.4	3	0.6
<i>Cantinoa</i>	2	0.2	2	0.4
<i>Capsicum</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Caryocar</i>	10	1.0	1	0.2
<i>Casearia</i>	5	0.5	2	0.4
<i>Cassia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Celtis</i>	8	0.8	2	0.4
<i>Chamaecrista</i>	9	0.9	9	1.8
<i>Cheiloclinium</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Chomelia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Chromolaena</i>	3	0.3	3	0.6
<i>Chrysophyllum</i>	2	0.2	1	0.2
<i>Chusquea</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Cissampelos</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Cissus</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Coccoloba</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Cochlospermum</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Combretum</i>	4	0.4	1	0.2
<i>Connarus</i>	7	0.7	1	0.2
<i>Copaifera</i>	21	2.2	4	0.8
<i>Cordia</i>	4	0.4	2	0.4
<i>Cordia</i>	2	0.2	2	0.4
<i>Couepia</i>	3	0.3	1	0.2
<i>Croton</i>	14	1.4	9	1.8
<i>Cupania</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Cuphea</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Cyanocephalus</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Cyrtocymura</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Dalbergia</i>	5	0.5	1	0.2
<i>Dasyphyllum</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Davilla</i>	9	0.9	3	0.6
<i>Deguelia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Dimorphandra</i>	2	0.2	1	0.2
<i>Diospyros</i>	4	0.4	1	0.2
<i>Diplopterys</i>	5	0.5	1	0.2
<i>Diplusodon</i>	5	0.5	4	0.8
<i>Dipteryx</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Drimys</i>	2	0.2	1	0.2

<i>Duguetia</i>	12	1.2	1	0.2
<i>Epidendrum</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Eremanthus</i>	10	1.0	3	0.6
<i>Eriope</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Eriotheca</i>	8	0.8	3	0.6
<i>Erythroxylum</i>	30	3.1	10	2.0
<i>Eugenia</i>	29	3.0	11	2.2
<i>Eumachia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Fridericia</i>	2	0.2	2	0.4
<i>Galipea</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Gaylussacia</i>	2	0.2	2	0.4
<i>Gochnatia</i>	4	0.4	2	0.4
<i>Grazielia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Guapira</i>	6	0.6	3	0.6
<i>Guarea</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Guatteria</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Guazuma</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Guettarda</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Handroanthus</i>	11	1.1	4	0.8
<i>Heterocondylus</i>	2	0.2	1	0.2
<i>Heteropterys</i>	6	0.6	2	0.4
<i>Himatanthus</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Hirtella</i>	4	0.4	3	0.6
<i>Hololepis</i>	2	0.2	1	0.2
<i>Hymenaea</i>	10	1.0	3	0.6
<i>Hyptidendron</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Hyptis</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Ilex</i>	3	0.3	2	0.4
<i>Inga</i>	6	0.6	5	1.0
<i>Ipomoea</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Jacaranda</i>	2	0.2	1	0.2
<i>Kielmeyera</i>	8	0.8	4	0.8
<i>Lantana</i>	4	0.4	1	0.2
<i>Lavoisiera</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Leandra</i>	4	0.4	1	0.2
<i>Leonotis</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Lepidaploa</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Leptolobium</i>	6	0.6	1	0.2
<i>Lessingianthus</i>	9	0.9	7	1.4
<i>Licania</i>	5	0.5	3	0.6
<i>Lippia</i>	6	0.6	5	1.0
<i>Lithraea</i>	2	0.2	1	0.2
<i>Lonchocarpus</i>	2	0.2	1	0.2
<i>Lourteigia</i>	1	0.1	1	0.2

<i>Luehea</i>	4	0.4	1	0.2
<i>Lychnophora</i>	5	0.5	5	1.0
<i>Lychnophoriopsis</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Mabea</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Macairea</i>	4	0.4	1	0.2
<i>Machaerium</i>	7	0.7	4	0.8
<i>Magonia</i>	2	0.2	1	0.2
<i>Manihot</i>	3	0.3	2	0.4
<i>Maprounea</i>	5	0.5	1	0.2
<i>Marcetia</i>	3	0.3	1	0.2
<i>Mascagnia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Matayba</i>	3	0.3	2	0.4
<i>Medusantha</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Merremia</i>	2	0.2	1	0.2
<i>Mesosphaerum</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Metrodorea</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Miconia</i>	11	1.1	5	1.0
<i>Microlicia</i>	8	0.8	7	1.4
<i>Microstachys</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Mikania</i>	9	0.9	8	1.6
<i>Mimosa</i>	6	0.6	2	0.4
<i>Minaria</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Moquiniastrum</i>	2	0.2	2	0.4
<i>Myracrodruon</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Myrcia</i>	25	2.6	12	2.4
<i>Myrciaria</i>	2	0.2	2	0.4
<i>Myrsine</i>	4	0.4	3	0.6
<i>Nectandra</i>	3	0.3	1	0.2
<i>Neea</i>	2	0.2	1	0.2
<i>Ocotea</i>	6	0.6	5	1.0
<i>Oocephalus</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Ouratea</i>	16	1.7	7	1.4
<i>Oxalis</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Palicourea</i>	8	0.8	1	0.2
<i>Peixotoa</i>	2	0.2	2	0.4
<i>Peltogyne</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Periandra</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Phoradendron</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Piper</i>	5	0.5	1	0.2
<i>Piptadenia</i>	3	0.3	1	0.2
<i>Piptocarpha</i>	4	0.4	1	0.2
<i>Piptolepis</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Piriqueta</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Platymiscium</i>	1	0.1	1	0.2

<i>Plenckia</i>	2	0.2	1	0.2
<i>Pleroma</i>	5	0.5	4	0.8
<i>Plinia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Porophyllum</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Pouteria</i>	10	1.0	2	0.4
<i>Prestonia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Prockia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Protium</i>	9	0.9	1	0.2
<i>Pseudobombax</i>	2	0.2	1	0.2
<i>Pseudobrickellia</i>	3	0.3	2	0.4
<i>Pseudopiptadenia</i>	2	0.2	1	0.2
<i>Psidium</i>	5	0.5	5	1.0
<i>Psychotria</i>	4	0.4	4	0.8
<i>Pterandra</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Pyrostegia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Qualea</i>	30	3.1	5	1.0
<i>Randia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Remijia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Rhamnidium</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Rollinia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Roupala</i>	11	1.1	1	0.2
<i>Rourea</i>	2	0.2	1	0.2
<i>Ruellia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Sabicea</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Salacia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Sapium</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Schefflera</i>	6	0.6	3	0.6
<i>Schinus</i>	2	0.2	1	0.2
<i>Senegalia</i>	4	0.4	2	0.4
<i>Senna</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Serjania</i>	7	0.7	5	1.0
<i>Sida</i>	3	0.3	3	0.6
<i>Sidastrum</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Siparuna</i>	5	0.5	1	0.2
<i>Smilax</i>	6	0.6	5	1.0
<i>Solanum</i>	2	0.2	1	0.2
<i>Stachytarpheta</i>	3	0.3	3	0.6
<i>Stigmaphyllon</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Strychnos</i>	5	0.5	3	0.6
<i>Stryphnodendron</i>	4	0.4	3	0.6
<i>Styrax</i>	9	0.9	3	0.6
<i>Symphyopappus</i>	4	0.4	3	0.6
<i>Tabebuia</i>	2	0.2	1	0.2
<i>Tachigali</i>	5	0.5	2	0.4

<i>Talisia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Tanaecium</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Tapirira</i>	3	0.3	1	0.2
<i>Terminalia</i>	10	1.0	2	0.4
<i>Ternstroemia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Tibouchina</i>	4	0.4	3	0.6
<i>Toulicia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Trema</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Trembleya</i>	2	0.2	2	0.4
<i>Trichilia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Trichogonia</i>	2	0.2	2	0.4
<i>Trigonia</i>	3	0.3	1	0.2
<i>Vachellia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Varronia</i>	3	0.3	1	0.2
<i>Verbesina</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Vernonia</i>	1	0.1	1	0.2
<i>Vernonanthura</i>	5	0.5	1	0.2
<i>Virola</i>	2	0.2	1	0.2
<i>Vochysia</i>	3	0.3	2	0.4
<i>Xylopia</i>	6	0.6	2	0.4
All genera	968 records	100	505 species	100

The plant families with the most records are: Fabaceae (N=155, 16%), Asteraceae (N=145, 15%), Myrtaceae (N=67, 6.9%), Malpighiaceae (N=60, 6.2%) and Melastomataceae (N=42, 4.3%) (Figure 2A). These five families account for ca. 48.5% of the recorded plant species. The plant families with the most recorded species are: Asteraceae (N=104 spp., 21%), Fabaceae (N=70 spp., 14%), Myrtaceae (N=35 spp., 7%), Malpighiaceae (N=30 spp., 6%) and Melastomataceae (N=25 spp., 5%) (Figure 2B), which together account for ca. 52% of the species found. These results indicate that, as host plant families, Fabaceae is well represented and that Asteraceae is well diversified.

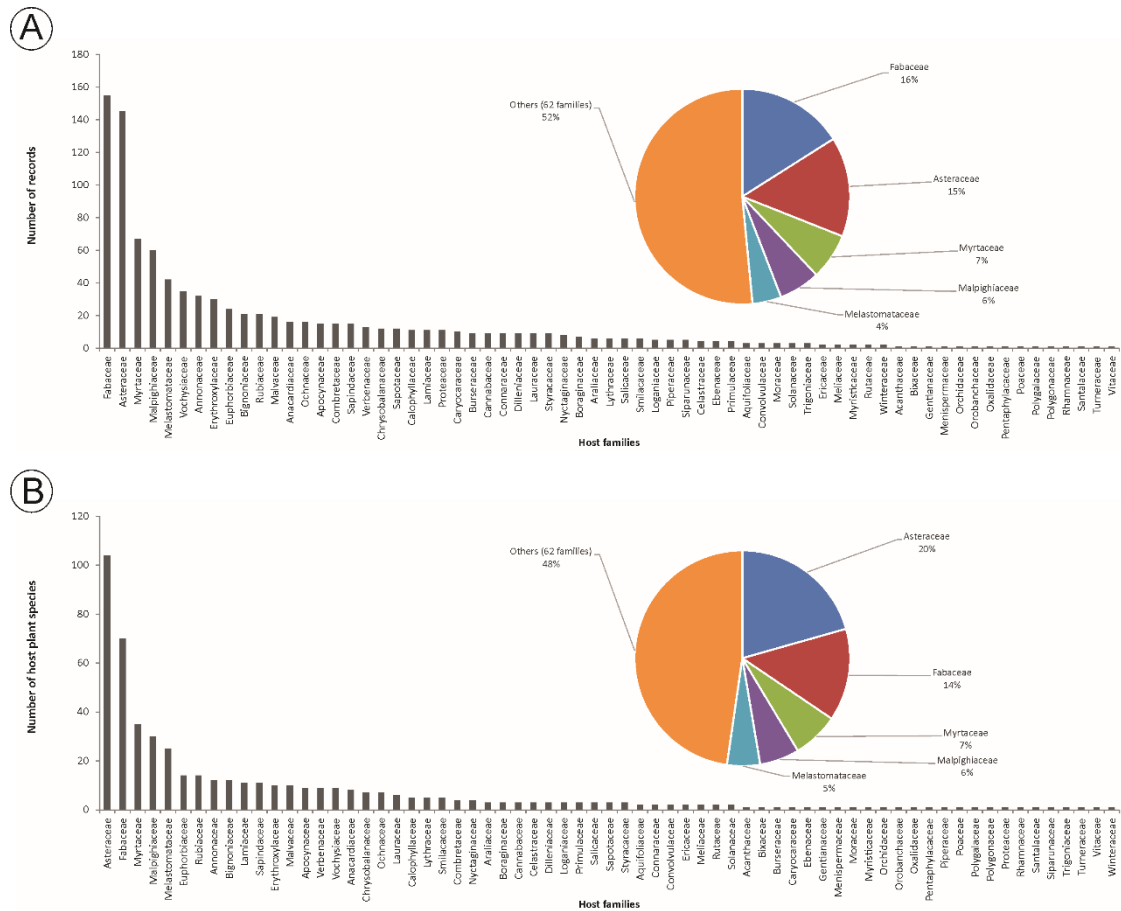


Figure 2. Rank plots of the number of records (A) and number of host plant species (B). In the right corner, we show the five families with the highest number of records (%), highest number of host plant species (%) and the greatest proportion of 62 other families.

Only gall-inducing insect species of the families Cecidomyiidae and Tephritidae were recorded (Table 2). Cecidomyiidae is the most predominant family with 48 species of 26 genera, while Tephritidae is represented by a single species: *Tomoplagia rudolphi* (Lutz and Lima 1918). The most speciose cecidomyiid genera are *Lopesia* (N=11 spp., 22.9%), *Asphondylia* (N=6 spp., 12.5%) and *Bruggmanniella* (N=3 spp., 6.3%), which together account for ca. 41% of species recorded. The genera *Clinodiplosis*, *Myrciariamyia*, *Schizomyia* and *Youngomyia* are represented by two species each while the remaining 19 cecidomyiid genera are represented by a single species.

This study is unprecedented since it provides the first data set of host plants and their gall-inducing insects for the Cerrado, a global biodiversity hotspot. Highlights of the data set

include: (a) there are at least 505 species of host plants in the Cerrado, and given the enormous diversity of plants in the Cerrado (about 12,400 spp.) the number of host plants must be much greater; (b) the number of gall-inducing insect species (Diptera) is relatively low (49 spp.) compared to the number of host plants recorded in this study – if there are, on average, two species of galling insects per host plant species, then, just for the 505 species of host plants in the present data-set, there would be at least 1,010 spp. of gall-inducing insect species in the Cerrado, 95% of which are unknown; (c) more inventories of galling insects and their host plants are needed in the Cerrado; (d) galling insects represent a hidden diversity and should be further investigated; and (e) threatened plants can host several specialized species of galling insects, which raises concerns about the impact of modern extinctions on co-dependents of host plants. We hope that the compiled data set of host plants and gall-inducing insects encourages researchers to explore new ecological processes and patterns involving plant-insect interactions.

Class II. Research origin descriptors

A. Overall project description

1. Identity: A compilation of host plants for communities of gall-inducing insects and species of Cecidomyiidae of the Cerrado biome.

2. Originators: The project *Plant-galling insect interactions for the Cerrado* is part of the doctoral thesis of Fernanda Cintra at USP. Host plant inventories were coordinated by Dr. Jean Carlos Santos and Dr. Wanessa Rejane de Almeida from Universidade Federal de Sergipe (UFS). Taxonomic revision of cecidomyiids was coordinated by Dr. Valeria Cid Maia (Museu Nacional) and Dr. Maria V. Urso-Guimarães (UFSCar). All databases were assembled with help from all the other authors. This is part of the *Insect Galls-Host Plants in Biomes Series*, led by Dr. Jean Carlos Santos (UFS).

3. Period of Study: Data sampling occurred from 1949 to 2019.

4. Objectives: The aims of this data paper were to: (i) compile information available in the literature (Portuguese and English) about sites sampled for insect galls and their host plant communities in the Cerrado, focusing on cecidomyiid and tephritid taxa and taxonomic revision of host plants; (ii) communicate the current state of knowledge of plant-galling insect communities of the Cerrado biome; (iii) provide data for future sampling efforts of insect galls and their host plants; and (iv) promote future testing of hypotheses at a variety of local, regional, and landscape ecological scales.

5. Abstract: Same as above.

6. Sources of funding: The compilation of this data set was supported by Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) [CNPq grants 312752/2018-0 (JC Santos) and fellowships 140128/2019-0 (FCF Cintra) and 140158/2018-9 (H Venâncio)].

B. Specific subproject description

1. Site description: We adopted a broad delimitation of the Cerrado biome because it is an important biodiversity hotspot (Myers et al. 2000). The Cerrado is in an area highly anthropized by deforestation and land-use change and more than 50% of its area has been transformed to pasture (cattle ranching), monoculture crops, hydroelectric reservoirs and urban areas (Ratter et al. 1997, Cavalcanti and Joly 2002). In addition, ~20 million people live in the Cerrado. This anthropic pressure has contributed to the drastic deterioration of this ecosystem (Klink and Machado 2005). Conservation of the Cerrado is critical now, with protected areas accounting for only 8.3% of the original biome, and only 6.5% if only native vegetation is considered (Françoso et al. 2015). As a consequence, 645 plant species of the Cerrado (~30% of all endangered plants in Brazil) now figure in the Brazilian list of threatened species (Martinelli and Moraes 2013).

The Cerrado is considered to have the greatest floral richness among the world's savannas (Klink and Machado 2005). It supports at least 12,420 species, 1,662 genera and 187 families of angiosperms (FLORA 2020). The Cerrado has one of the highest rates of endemism (~44% in vascular plants) in the world (Silva and Bates 2002, Mendonça et al. 2008). The biome possesses remarkable physiognomic variation comprising a mosaic of savannas, grasslands and forests with highly heterogeneous environmental conditions (Oliveira-Filho and Ratter 2002).

2. Data set source: Data for host plants were obtained only from published literature (32 papers). We searched for potential studies using online academic databases: ISI Web of Knowledge, Google Scholar, Scielo, Scopus and JStor. The search terms used were: “insect gall”, “inventories”, “richness”, “Brazilian Savanah” and “Cerrado”, which were combined in different ways. Searches were conducted in English and Portuguese since, to our knowledge, no relevant article has been published in any other language (e.g., Spanish).

There are two families of Diptera for which galls have been registered: Cecidomyiidae and Tephritidae. The data for cecidomyiids described until 2016 was extracted from the fourth edition of A Catalogue of the Cecidomyiidae of the World (Gagné and Jaschhof 2017). Species described from 2017 to 2019 were checked in MNRJ (Museu Nacional of Universidade Federal do Rio de Janeiro) and MZUSP (Museu de Zoologia of Universidade de São Paulo).

3. Compilation methods: The data set is the result of compiling records of galling insects and their host plant communities in different localities in the Cerrado. For host plants we only recorded their identity. Morphotypes of insect galls were not included in the compilations since galls are used as a phenotypic trait representing insect species, which are already represented in Table 2. We selected all available publications about inventories and/or communities of galling insects and their host plants. We discarded articles that contained only case studies (e.g.,

studies involving ecology, zoology and botany). We also recorded basic information for each study (author, title, year, journal, volume, publisher and the link or DOI to the document), the geographical location when provided (latitude, longitude, locality, municipality and state), conservation status of each area based on Brazilian conservation units, and type of phytophysiology. The FLORA 2020 data set also provided us with the following information for each plant: national threat status, life form, vegetation type, occurrence, establishment and domain. Missing information was indicated as “NA”.

Data for Diptera were extracted from Gagné and Jaschhof (2017), original papers (Table 2) and museum specimens. We recorded basic information for each species: family and species of host plants; family and species of gall-inducing insects; author of host plant and gall-inducing insect species; state, municipality, and specific sites of sampling; vegetation and phytophysiology types; and year of publication of the gall-inducing insect species description or mention of the species.

Host plants communities were compiled from the following literature: Fernandes et al. (1988), Fernandes et al. (1996), Fernandes et al. (1997), Gonçalves-Alvim and Fernandes (2001), Urso-Guimarães (2003), Maia and Fernandes (2004), Urso-Guimarães and Scareli-Santos (2006), Araújo et al. (2007a), Araújo et al. (2007b), Coelho et al. (2009), Carneiro et al. (2009), Araújo et al. (2011), Saito and Urso-Guimarães (2012), Santos et al. (2012), Luz et al. (2012), Malves and Frieiro-Costa (2012), Coelho et al. (2013a), Coelho et al. (2013b), Costa et al. (2014a), Costa et al. (2014b), Araújo et al. (2014), Maia et al. (2014), Araújo et al. (2015), Silva et al. (2015), Nogueira et al. (2016), Urso-Guimarães et al. (2017), Bergamini et al. (2017), Silva et al. (2018a), Silva et al. (2018b), Vieira et al. (2018), Santos et al. (2018), and Lima and Calado (2018).

Diptera species were compiled from the following literature: Felt (1907), Tavares (1917), Lutz and Lima (1918), Tavares (1918), Tavares (1920), Gagné (1984), Maia (2001),

Madeira et al. (2002), Urso-Guimarães and Amorim (2002), Urso-Guimarães et al. (2003), Maia (2004), Maia and Fernandes (2005), Urso-Guimarães and Amorim (2005), Scarelli-Santos and Urso-Guimarães (2006), Maia and Fernandes (2007), Maia and Santos (2007), Maia et al. (2008), Maia et al. (2009), Maia and Carneiro (2012), Saito and Urso-Guimarães (2012), Pereira-Colavite and Urso-Guimarães (2013), Urso-Guimarães et al. (2014), Urso-Guimarães and Carmo-Neto (2015), Maia and Araújo (2016), Garcia et al. (2017), Urso-Guimarães et al. (2017), Garcia and Urso-Guimarães (2018), Maia and Flor (2018), Maia and Oliveira (2018), Proença and Maia (2018), Urso-Guimarães (2018a,b,c), Proença and Maia (2019), Ribeiro et al. (2019), Savaris et al. (2019), and Urso-Guimarães (2019a,b).

4. Taxonomic data: All species records (host plants and cecidomyiids) had their taxonomic classification revised and updated. For taxonomic information on host plant species we used FLORA 2020, and for dipteran species we used Gagné and Jaschhof (2017). We discarded taxonomically-uncertain records in species lists for the following situations: (a) cases where plants had a record of galling insects, but were not identified to species and family levels; (b) cases of host plant species where the family was identified, but the species was not (contained only sp.); (c) cases where host plant genus was identified followed by “sp.” or “cf.” species; (d) a single case where the plant genus *Landia* was distributed in *Krameria*, *Mussaenda* and *Bremeria*; (e) a single case where the host plant was attacked by nematode galls [*Miconia albicans* (Sw.) Triana and *Miconia corallina* Spring] and was included as a host for galling insects; (f) a single case where host plant species names (*Koanophyllon hebecladum* and *Sapium lenheirensis*) were not found in any database; and (g) a single case where a host plant species, *Miconia theizans* (Bonpl.) Cogn., had the name misspelled and undefined status.

We discarded taxonomically uncertain records of dipterans in species lists when the gall-inducing insects were not identified to species. We also provide host plant species

information for each cecidomyiid species. In these cases, we kept unidentified plant species (e.g., genus followed by “sp.”) because galler identity was more important in this circumstance. We also checked plant taxonomy according to the FLORA 2020.

5. Statistical analysis: We provide some preliminary, descriptive statistical analyses for an overview of the data.

C. Data limitations and potential enhancements:

We recognize that documenting all host plants and galling insect interactions in a megadiverse ecosystem such as the Cerrado is a challenging task. The present data set is, therefore, only a subset of possible interactions. Therefore, caution is needed when drawing conclusions from this data set. The first limitation of our data is its representativeness. Our data set is arguably biased toward community studies only; we excluded case studies. Galling insects have been reported on numerous plant species, and there are several case studies in which these interactions are described. Another limitation is that some interactions are missing due to the lack of taxonomic identification of host plants. For example, many studies failed to identify the host plant to the species level. For this reason, many families and genera were not represented, which significantly reduced the representativeness of these host plant families and genera and thus limiting the data potentiality.

We designed the data set to (i) encourage new galling insect-host plant inventories in different locations; (ii) provide original information on the species richness of host plants of galling insects and on cecidomyiid species; and (iii) encourage the investigation of ecological and biogeographical patterns.

Class III. Data set status and accessibility

A. Status

Latest update: September 2019

Latest archive date: September 2019

Metadata status: Last update September 2019, version submitted

Data verification: We checked all the information such as species records and localization.

Taxonomic information was homogenized. Any transcription errors were corrected.

B. Accessibility

Contact person: Jean Carlos Santos. Departamento de Ecologia. Universidade Federal de Sergipe. Campus São Cristóvão. Cidade Universitária Prof. José Aloísio de Campos. Av. Marechal Rondon, s/n, Bairro Jardim Rosa Elze. São Cristóvão. Sergipe. CEP: 49100-000, Brazil. E-mail: jcsantosbio@gmail.com

Storage location and supporting information: The original PLANT-GALLING INSECT INTERACTIONS data set can be accessed in the ECOLOGY repository. Updated versions of this data set can be accessed at: https://github.com/LEBIO-UFS/Brazil_galls_series

Copyright restrictions: None.

Proprietary restrictions: Please cite this data paper when using the current data in publications and let us know how the data are used in the publications.

Costs: None.

Class IV. Data structural descriptors

We divided the data set into three complementary files. The first file (plant-galling_insect_diptera.csv) contains the description of the fields related with the Diptera species (Table 2). The second file (plant-galling_insect_host_plants_information.csv) contains data on the study area and host plant species information for each plant reported (states, municipality,

study location, coordinates, conservation unit, phytophysiognomy type, plant species names, taxonomic information, threat status, life form, vegetation type, plant distribution and biogeographical domain) (Table 3). The third file (plant-galling_insect_host_plants_references.csv) describes the reference information for host plants (Table 4).

A. Data set file

Identity: plant-galling_insect_diptera.csv

Size: 13 columns and 49 records, including header row, 90 KB.

Format and storage mode: comma-separated values (.csv)

Header information: See column descriptions in section B.

Alphanumeric attributes: Mixed.

Data anomalies: Missing information was classified as “NA” in each cell.

Identity: plant-galling_insect_host_plants_information.csv

Size: 17 columns and 969 records, including header row, 117 KB.

Format and storage mode: comma-separated values (.csv)

Header information: See column descriptions in section B.

Alphanumeric attributes: Mixed.

Data anomalies: Missing information was classified as “NA” in each cell.

Identity: plant-galling_insect_host_plants_references.csv

Size: 04 columns and 33 records, including header row, 76 KB.

Format and storage mode: comma-separated values (.csv)

Header information: See column descriptions in section B.

Alphanumeric attributes: Mixed.

Data anomalies: Missing information was classified as “NA” in each cell.

B. Variable information

Table 2. Reference information in the plant-galling insect data set. Description of the fields related to the Diptera information found in the file plant-galling_insect_diptera.csv.

Type of information	Field	Description	Levels	Examples
Diptera information	Diptera_family	Family taxonomic classification for Diptera	2	Cecidomyiidae
	Diptera_species	Current and specific taxonomic classification	Several	<i>Asteromyia modesta</i> (Felt, 1907)
	Species_authors_ Diptera	Species authors	Several	Maia, 2012
	Species_authors_ galls	Studies related to galls	Several	Maia and Carneiro, 2012
	Sampling_year	Specimen collection year	1917-2019	2012
Host plants information	Genus/Species_ host_plant_adjusted	Current and specific taxonomic classification	Several	<i>Eremanthus erythropappus</i> (DC.) MacLeish
	Genus/Species_ host_plant_original_paper	taxonomic classification reported originally by the authors	Several	<i>Vanilosmopsis erythropappa</i> DC.
	Host_plant_ family	Family taxonomic classification for host plants	Several	Asteraceae

Site information	Site_states	Brazilian states in which the insects were found	Several	Minas Gerais
	Site_municipality	Brazilian municipalities in which the insects were found	Several	Luz
	Study_location	Name of each study site	Several	Serra de São José
	Vegetation_type	Cerrado phytophysiognomy type reported by the authors	Several	Transição caatinga-cerrado
Reference information	Complete_references	Complete references of the authors who described the Diptera species (author names, title, year, journal, DOI)	Several	Gagné, R.J. 1984. Five new species of Neotropical Cecidomyiidae (Diptera) associated with cacao flowers, killing the buds of Clusiaceae, or preying on mites. Brenesia 22: 123-138.

Table 3. Reference information in the plant-galling insect data set. Description of the fields related to the host plant species information found in the file plant-galling_insect_host_plants_information.csv.

Type of information	Field	Description	Levels	Examples
Reference information	Ref_number	Number for each reference	Ref_01 - Ref_32	Ref_01
Site information	States	Brazilian states in which the plants were found	5	MS

	Municipality	Brazilian municipalities in which the plants were found	Several	Aquidauana
	Study_location	Name of each study site	Several	Ecological Station of Jataí
	Coordinates	Coordinates of study site	Several	15°48'S, 48°52'W
	Conservation_unit	Whether the authors reported whether the study was carried out inside or outside a conservation unit	Yes, No and 'NA'	Yes
	Status_conservation_unit	Type of protected area reported in the study	Federal, State, RPPN and 'NA'	Federal
	Phytophysiology_type	Cerrado phytophysiology type reported by the authors	Several	Cerradão, cerrado
Host plant information	Plant_species_original	taxonomic classification reported originally by the authors	Several	<i>Arrabidaea brachypoda</i>
	Plant_species_adjusted	Current and specific taxonomic classification	Several	<i>Fridericia platyphylla</i> (Cham.) L.G. Lohmann
	Plant_family	Family taxonomic classification	Several	Bignoniaceae
	Plant_genus	Genus taxonomic classification	Several	<i>Fridericia</i>
	Threat_status	IUCN classification for	EN: Endangered	VU

		threatened plants according to the red list of flora in Brazil	VU: Vulnerable LC: Least concern DD: Data deficient NE: Not evaluated	
	Life_form	Type of life form <i>sensu</i> FLORA 2020	Several	
	Vegetation_type	Type of vegetation <i>sensu</i> FLORA 2020	Several	
	Plant_distribution	Brazilian states in which the plants have been reported in the FLORA 2020	Several	GO MG MS MT SP
	Biogeographical_domain	Type of biogeographical regions <i>sensu</i> FLORA 2020	Several	Cerrado Mata Atlântica

Table 4. Reference information in the plant-galling insect data set. Description of the fields related to the reference information found in the file `plant-galling_insect_host_plant_references.csv`.

Type of information	Field	Description	Levels	Examples
Reference information	Ref_number	Number for each reference	Ref_01 - Ref_32	Ref_01
	Publication_years	Year of publication of the article	1988 - 2018	1988
	Authors	Name of the authors	22	Fernandes et al.

	References	Complete references (author names, title, year, journal, DOI)	32	Araújo, Walter Santos de, Santos, Benedito Baptista dos, & Gomes-Klein, Vera Lúcia. (2011). Insect galls from Serra dos Pireneus, GO, Brazil. <i>Biota Neotropica</i> , 11(2), 357-365. https://dx.doi.org/10.1590/S1676-06032011000200034
--	------------	---	----	---

CLASS V. Supplemental descriptors

A. Data acquisition

1. **Data request history:** None

2. **Data set updates history:** None

3. **Data entry/verification procedures:** The authors reviewed the data jointly, twice.

G. **History of data set usage:** None.

Acknowledgments

The authors thank CNPq (grant processes #140128/2019-0 for FCF Cintra, #140158/2018-9 for H Venâncio and #312752/2018-0 for JC Santos)

Literature cited in metadata

Araújo, W. S., B. B. Santos, and V. L. Gomes-Klein. 2011. Insect galls from Serra dos Pireneus, GO, Brazil. *Biota Neotropica* 11: 357-365.

Araújo, W. S., B. B. Santos, B. B., H. D. Ferreira, and D. C. Lousa. 2007. Ocorrência de galhas entomógenas na vegetação do campus da UFG em Goiânia, Goiás. *Revista Brasileira de Biociências* 5: 57-59.

Araújo, W. S., B. B. Santos., F. A. G. Guilherme, and C. Scareli-Santos. 2014. Gallling insects in the Brazilian Cerrado: ecological patterns and perspectives. Pages 257-272 *in* G. W.

- Fernandes, and J. C. Santos, editors. Neotropical insect Galls. Springer, New York, USA.
- Araújo, W. S., E. D. Porfírio-Júnior, B. A. Ribeiro, T. M. Silva, E. C. Silva, F. A. Guilherme, C. Scareli-Santos, and B. B. Santos. 2015. Checklist of host plants of insect galls in the state of Goiás in the Midwest Region of Brazil. *Biodiversity Data Journal* 13: e6835.
- Araújo, W. S., F. L. Sobral, and L. Maracahipes. 2014. Insect galls of the Parque Nacional das Emas (Mineiros, GO, Brazil). *Check List* 10: 1445-1451.
- Araújo, W. S., G. W. Fernandes, and J. C. Santos. 2019. An overview of inventories of gall-inducing insects in Brazil: looking for patterns and identifying knowledge gaps. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 91: e20180162.
- Araújo, W. S., L. T. Moreira, L. A. D. Falcão, M. A. Z. Borges, M. Fagundes, M. L. D. Faria, and F. A. G. Guilherme. 2019. Superhost plants alter the structure of plant-galling insect networks in neotropical savannas. *Plants* 8: 369.
- Araújo, W. S., V. L. Gomes-Klein, and B. B. Santos. 2007. Galhas entomógenas associadas à vegetação do Parque Estadual da Serra dos Pireneus, Pirenópolis, Goiás, Brasil. *Revista Brasileira de Biociências* 5: 45-47.
- Bergamini, B. A. R., L. L. Bergamin, B. B. Santos, and W. S. Araújo. 2017. Occurrence and characterization of insect galls in the Floresta Nacional de Silvânia, Brazil. *Papéis Avulsos de Zoologia* 57: 413-431.
- Carneiro, M. A. A., R. A. X. Borges, A. P. A. Araújo, and G. W. Fernandes. 2009. Insetos indutores de galhas da porção sul da Cadeia do Espinhaço, Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Entomologia* 53: 570-592.
- Carneiro, R. G. S., P. Pacheco, and R. M. S. Isaias. 2015. Could the extended phenotype extend to the cellular and subcellular levels in insect-induced galls? *PLoS ONE* 10: e0129331.
- Cavalcanti, R., and C. Joly. 2002. Biodiversity and Conservation Priorities in the Cerrado Region. Pages 351-367 in P. S. Oliveira, and R. J. Marquis, editors. *The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a Neotropical Savanna*. Columbia University Press, Columbia. USA.
- CNCFlora. 2020. Lista Vermelha da flora brasileira versão 2012.2 Centro Nacional de Conservação da Flora. Available in <<http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/>>. Access in 9 março 2020.
- Coelho, M. S., E. D. Almada, G. W. Fernandes, M. A. A. Carneiro, R. M. Santos, A. V. Quintino, and A. Sanchez-Azofeifa. 2009. Gall inducing arthropods from a seasonally

- dry tropical forest in Serra do Cipó, Brazil. *Revista Brasileira de Entomologia*, 53: 404-414.
- Coelho, M. S., M. A. A. Carneiro, C. A. Branco, and G. W. Fernandes. 2013a. Gall-inducing insects from Serra do Cabral, Minas Gerais, Brazil. *Biota Neotropica* 13: 102-109.
- Coelho, M. S., M. A. A. Carneiro, C. Branco, R. A. X. Borges, and G. W. Fernandes. 2013b. Gall-inducing insects from Campos de Altitude, Brazil. *Biota Neotropica* 13: 139-151.
- Costa, E. C., S. P. Carvalho-Fernandes, and J. Santos-Silva. 2014a. Galhas entomógenas associadas à Leguminosae do entorno do riacho Jatobá, Caetité, Bahia. *Brazilian Journal of Biosciences* 12: 115-120.
- Costa, E. C., S. P. Carvalho-Fernandes, and J. Santos-Silva. 2014b. Galhas de insetos em uma área de transição caatinga-cerrado no Nordeste do Brasil. *Sitientibus série Ciências Biológicas* 14: 1-9.
- Felt, E. P. 1907. Appendix: New species of Cecidomyiidae. 22^d report of the State entomologist on injurious and other insects of the State of New York 1906. *New York State Museum Bulletin* 110: 39-186.
- Fernandes, G. W. A., E. Tameirão-Neto, and R. P. Martins. 1988. Ocorrência e caracterização de galhas entomógenas na vegetação do campus pampulha da Universidade Federal de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Zoologia* 5: 11-29.
- Fernandes, G. W., and J. C. Santos. 2014. *Neotropical insect galls*. Springer, New York, USA.
- Fernandes, G. W., and P. W. Price. 1992. The adaptive significance of insect gall distribution: Survivorship of species in xeric and mesic habitats. *Oecologia* 90: 14-20.
- Fernandes, G. W., and S. J. Gonçalves-Alvim. 2006. Biodiversidade de insetos galhadores no Cerrado. Pages 284-293 *in* A. Scariot, J. M. Felfili, and J. C. Sousa-Silva, editors. *Biodiversidade, Ecologia e Conservação do Cerrado*. Embrapa, Brasília, BR.
- Fernandes, G. W., M. A. A. Carneiro, A. C. F. Lara, L. R. Allain, G. I. Andrade, G. R. Julião, T. R. Reis, and I. M. Silva. 1996. Gallings insects on neotropical species of *Baccharis* (Asteraceae). *Tropical Zoology* 9: 315-332.
- Fernandes, G. W., R. C. Araújo, S. C. Araújo, J. A. Lombardi, A. S. Paula, R. Loyola-Júnior, and T. G. Cornelissen. 1997. Insect-galls from savanna and rocky fields of the Jequitinhonha valley, Minas Gerais, Brazil. *Naturalia* 22: 221-244.
- Fernandes, W. G., M. A. A. Carneiro, and R. M. S. Isaias. 2011. Gall-inducing insects: from anatomy to biodiversity. Pages 369-395 *in* A. R. Panizzi, and J. R. P. Parra, editors.

- Insect bioecology and nutrition for integrated pest management. CRC Press, Boca Raton.
- Flora do Brasil 2020 (Jardim Botânico do Rio de Janeiro). Available in <http://floradobrasil.jbrj.gov.br>. Access in: 20 Jan. 2020.
- Françoso, R. D., R. Brandão, C. C. Nogueira, Y. B. Salmona, R. B. Machado, and G. R. Colli. 2015. Habitat loss and the effectiveness of protected areas in the Cerrado Biodiversity Hotspot. *Natureza & Conservação* 13: 35-40.
- Gagné, R. J. 1984. Five new species of Neotropical Cecidomyiidae (Diptera) associated with cacao flowers, killing the buds of Clusiaceae, or preying on mites. *Brenesia* 22: 123-138.
- Gagné, R. J. 1994. The gall midges of the Neotropical region. Cornell University Press, Ithaca, USA.
- Gagné, R. J., and M. Jaschhof. 2017. A Catalog of Cecidomyiidae (Diptera) of the World. Fourth Edition. Digital.
- Garcia, C. A., and M. V. Urso-Guimarães. 2018. Three New Species of *Lopesia* Rübsaamen (Diptera: Cecidomyiidae) from Brazil. *Florida Entomologist* 101: 203-211.
- Garcia, C. A., V. P. Lima, D. C. Calado, and M. V. Urso-Guimarães. 2017. New species of *Lopesia* Rübsaamen (Diptera: Cecidomyiidae) associated with *Andira humilis* Mart. ex Benth. (Fabaceae). *Revista Brasileira de Entomologia* 61: 239-242.
- Giron, D., E. Huguet, G. N. Stone, and M. Body. 2016. Insect-induced effects on plants and possible effectors used by galling and leaf-mining insects to manipulate their host-plant. *Journal of Insect Physiology* 84: 70-89.
- Gonçalves-Alvim, S. J., and G. W. Fernandes. 2001. Comunidades de insetos galhadores (Insecta) em diferentes fisionomias do cerrado em Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Zoologia* 18: 289-305.
- Grandez-Rios J. M., A. R. García-Vill, P. Cuevas-Reyes, and W. S. Araújo. 2015. Insectos inductores de agallas en América Latina: ecología, importancia y nuevas perspectivas. *Revista de Biología Neotropical* 12: 92-103.
- Hartley, S. E. 1998. The chemical composition of plant galls: are levels of nutrients and secondary compounds controlled by the gall-former? *Oecologia* 113:492-501.
- Klink, C. A., and R. B. Machado. 2005. Conservation of the Brazilian Cerrado. *Conservation Biology*, 19: 707-713.

- Lara, A. C. F. & G. W. Fernandes. 1996. The highest diversity of galling insects: Serra do Cipó, Brazil. *Biodiversity Letters* 3: 111-114
- Lima, V. P., and D. Calado. 2018. Morphological characterization of insect galls and new records of associated invertebrates in a Cerrado area in Bahia State, Brazil. *Brazilian Journal of Biology* 78: 636-643.
- Lutz, A., and A. M. C. Lima. 1918. Contribuição para o estudo das Tripaneidas (moscas de frutas) brasileiras. *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, 10: 5-15.
- Luz, G. R., G. W. Fernandes, J. O. Silva, F. S. Neves, and M. Fagundes. 2012. Insect galls in xeric and mesic habitats in a Cerrado-Caatinga transition in northern Minas Gerais, Brazil. *Neotropical Biology and Conservation* 7: 171-187.
- Madeira, J. A., V. C. Maia, and R. F. Monteiro. 2003. Gall makers (Cecidomyiidae, Diptera) on *Calophyllum brasiliense* Camb. (Clusiaceae): descriptions and biology. *Arquivos do Museu Nacional* 61: 31-48.
- Maia, V. C. 2001. The gall midges (Diptera, Cecidomyiidae) from three restingas of Rio de Janeiro State, Brazil. *Revista Brasileira de Zoologia* 18: 583-629
- Maia, V. C. 2004. A new genus and six new species of gall midges (Diptera, Cecidomyiidae) from Serra de São José (Minas Gerais State), Brazil. *Arquivos do Museu Nacional* 62: 69-82.
- Maia, V. C., A. R. Rodrigues, S. H. S. Ascendino, and M. Boggi. 2014. The insect gall collection of the Museu Nacional/Universidade Federal do Rio de Janeiro: biome cerrado, rupestrian fields. *Brazilian Journal of Biology*, 74: S207-S217.
- Maia, V. C., and B. O. Santos. 2007. Um novo gênero e espécie de *Schizomyia* (Diptera, Cecidomyiidae) associados com Piperaceae no Brasil. *Iheringia, Série. Zoologica* 97: 137-142.
- Maia, V. C., and G. W. Fernandes. 2004. Insect galls from Serra de São José (Tiradentes, MG, Brazil). *Brazilian Journal of Biology* 64: 423-445.
- Maia, V. C., and G. W. Fernandes. 2005a. A new genus and species of gall midge (Diptera: Cecidomyiidae) associated with *Waltheria indica* L. (Sterculiaceae). *Zootaxa* 1060: 27-36.
- Maia, V. C., and G. W. Fernandes. 2005b. Two new species of Asphondyliini (Diptera: Cecidomyiidae) associated with *Bauhinia brevipes* (Fabaceae). *Zootaxa* 1091: 27-40.

- Maia, V. C., and G. W. Fernandes. 2007. *Myrciariamyia admirabilis*, a new species of gall midge (Diptera, Cecidomyiidae) associated with *Erythroxylum suberosum* (Erythroxylaceae). *Zootaxa* 1554: 41-48.
- Maia, V. C., and L. A. Oliveira. 2018. *Lopesia indaiensis* (Diptera, Cecidomyiidae), a new species of gall midge feeding on *Andira fraxinifolia* Benth (Fabaceae), an endemic plant in Brazil. *Revista Brasileira de Entomologia* 62: 125-130.
- Maia, V. C., and L. Araújo. 2016. *Clinodiplosis agerati* (Diptera, Cecidomyiidae), a new galling species associated with *Ageratum conyzoides* (Asteraceae) from Brazil. *Brazilian Journal of Biology* 76: 782-786.
- Maia, V. C., and M. A. A. Carneiro. 2012. A new species of *Baccharomyia* (Diptera, Cecidomyiidae) from *Baccharis pseudomirycephala* (Asteraceae) in Brazil. *Vestnik Zoologii* 46: 23-28.
- Maia, V. C., F. A. O. Silveira, L. A. Oliveira, and M. F. Xavier. 2008. *Asphondylia gochnatiae*, a new species of gall midge (Diptera, Cecidomyiidae) associated with *Gochnatia polymorpha* (Asteraceae). *Zootaxa* 1740: 53-58.
- Maia, V. C., G. W. Fernandes, and D. Negreiros. 2009. A new genus and species of gall midge (Diptera, Cecidomyiidae) associated with *Myrcia retorta* (Myrtaceae) *Revista Brasileira de Entomologia* 53: 38–40.
- Maia, V. C., G. W. Fernandes, and L. A. Oliveira. 2010. A new species of *Bruggmanniella* (Diptera, Cecidomyiidae, Asphondyliini) associated with *Doliocarpus dentatus* (Dilleniaceae). *Revista Brasileira de Entomologia* 54: 225-228.
- Maia, V. C., I. C. Flor, and L. A. Oliveira. 2018. *Myrciamyia pterandrae* (Diptera, Cecidomyiidae, Lopesiini), a new species of gall midge associated with *Pterandra pyroidea* A. Juss. (Malpighiaceae), an endemic plant in Brazilian Cerrado. *Revista Brasileira de Entomologia* 62: 220-224.
- Malves, K., and A. Frieiro-Costa. 2012. List of plants with galls induced by insects from the UNILAVRAS/Boqueirão Biological Reserve, Ingaí, state of Minas Gerais, Brazil. *Check List* 8: 426-431.
- Martinelli, G., and M. A. Moraes. 2013. Livro vermelho da flora do Brasil (Jardim Botânico do Rio de Janeiro). Available from <http://cncflora.jbrj.gov.br> (accessed 11/05/2019).
- Mendonça, R. C., J. M. Felfili, B. M. T. Walter, M. C. Silva-Júnior, A. V. Rezende, T. S. Filgueiras, P. E. Nogueira, and C. W. Fagg. 2008. Flora vascular do Bioma Cerrado:

- checklist com 12.356 espécies. Pages 421-1279 in S. M. Sano, S. P. Almeida, and J. F. Ribeiro, editors. Cerrado: ecologia e flora. Embrapa, Brasília, BR.
- Moura, M. Z. D., G. L. G. Soares, and R. M. I. Santos. 2008. Species-specific changes in tissue morphogenesis induced by two arthropod leaf galls in *Lantana camara* L. (Verbenaceae). *Australian Journal of Botany* 56: 153-160.
- Myers, N., R. A. Mittermeier, C. G. Mittermeier, G. A. Fonseca, and J. Kent. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403: 853.
- Nogueira, R. M., E. C. Costa, S. P. Carvalho-Fernandes, and J. Santos-Silva. 2016. Insect galls from Serra Geral, Caetité, BA, Brazil. *Biota Neotropica* 16: e20150035.
- Oates C. N., K. J. Denby, A. A. Myburg, B. Slippers, and S. Naidoo. 2016. Insect galls and their plant hosts: from omics data to systems biology. *International Journal of Molecular Sciences* 17: 1891.
- Oliveira-Filho, A. T., and J. A. Ratter. 2002. Vegetation physiognomies and wood flora of the bioma Cerrado. Pages 91-120 in P. S. Oliveira, and R. J. Marquis, editors. *The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a Neotropical Savanna*. Columbia University Press, Columbia, USA.
- Pereira-Colavite, A., and M. V. Urso-Guimarães. 2013. Nova espécie de *Dasineura* Rondani, 1840 (Diptera, Cecidomyiidae) em capítulos de *Hypochoeris chillensis* (Kunth) Britton (Asteraceae) para o Brasil. *Papéis Avulsos de Zoologia* 53: 59-66.
- Price, P. W. 2005. Adaptive radiation of gall-inducing insects. *Basic and Applied Ecology* 6: 413-421.
- Price, P. W., W. G. Abrahamson, M. D. Hunter, and G. Melika. 2004. Using gall wasps on oaks to test broad ecological concepts. *Conservation Biology* 18: 1406-1416.
- Proença, B., and V. C. Maia. 2018. *Bruggmannia chapadensis* sp. nov. (Diptera: Cecidomyiidae), a new midge inducing galls on *Guapira pernambucensis* (Nyctaginaceae) from the Parque Nacional da Chapada dos Guimarães, Mato Grosso State, Brazil. *Zoologia* 35: 1-6.
- Proença, B., and V. C. Maia. 2019. A new species of *Youngomyia* Felt from Brazil and new morphological data on *Youngomyia pouteriae* Maia (Insecta, Diptera, Cecidomyiidae). *Revista Brasileira de Entomologia* 63: 130-135.
- Ratter, J. A., J. F. Ribeiro, and S. Bridgewater. 1997. The Brazilian cerrado vegetation and threats to its biodiversity. *Annals of Botany* 80: 223-230.

- Ribeiro, A. N., M. I. P. A. Balbi, and M. V. Urso-Guimarães. 2019. Characterization of insect galls from natural vegetation area in Altinópolis, São Paulo State, Brazil. *Papéis Avulsos de Zoologia* 59: e20195904.
- Ribeiro, J. F., and B. M. T. Walter. 2008. As principais fitofisionomias do Bioma Cerrado. Pages 151-212 in S. M. Sano, S. P. Almeida, and J. F. Ribeiro, editors. *Cerrado: ecologia e flora*. Embrapa, Brasília, BR.
- Saito, V. S., and M. V. Urso-Guimarães. 2012. Characterization of galls, insect galls and associated fauna of Ecological Station of Jataí (Luiz Antônio, SP). *Biota Neotropica* 12: 99-107.
- Santos, B. B., B. A. Ribeiro, T. M. Silva, and W. S. Araújo. 2012. Galhas de insetos em uma área de cerrado sentido restrito na região semi-urbana de Caldas Novas (Goiás, Brasil). *Revista Brasileira de Biociências* 10: 439-445.
- Santos, I. M., V. P. Lima, E. K. S. Soares, M. Paula, and D. C. Calado. 2018. Insect galls in three species of *Copaifera* L. (Leguminosae, Caesalpinioideae) occurring sympatrically in a Cerrado area (Bahia, Brazil). *Biota Neotropica* 18: e20170356.
- Savaris, M., F. Luz, L. M. Lorini, and S. Lampert. 2019. New distribution record, host plant and notes on natural history of *Tomoplagia rudolphi* (Lutz & Lima, 1918) (Diptera: Tephritidae). *Papéis Avulsos de Zoologia* 59: e20195943.
- Stone, G. N. and K. Schönrogge. 2003. The adaptive significance of insect gall morphology. *Trends in Ecology & Evolution* 18: 512-522.
- Shorthouse, J. D., D. Wool, and A. Raman. 2005. Gall-inducing insects - nature's most sophisticated herbivores. *Basic and Applied Ecology* 6:407-411.
- Silva, A. R. F., R. M. Nogueira, E. C. Costa, S. P. Carvalho-Fernandes, and J. Santos-Silva. 2018b. Occurrence and characterization of entomogenic galls in an area of Cerrado *sensu stricto* and gallery forest of the state of Bahia, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 90: 2903-2919.
- Silva, E. C., B. B. Santos, and W. S. Araújo. 2018a. Insect gall occurrence in savanna and forest remnant sites of Hidrolândia, GO, Brazil Central. *Papéis Avulsos de Zoologia* 58: e20185804.
- Silva, J. M. C., and J. M. Bates. 2002. Biogeographic patterns and conservation in the South American Cerrado: a tropical savanna hotspot. *BioScience* 52: 225-234.

- Silva, T. M., Araújo, W. S., and B. B. Santos. 2015. Ocorrência e caracterização de galhas de insetos em um fragmento de mata semicaducifólia do Câmpus Samambaia, Goiânia, GO, Brasil. *Revista de Biologia Neotropical* 12: 26-38.
- Tavares, J. S. 1917. Cecídias brasileiras que se criam em plantas das famílias das Compositae, Rubiaceae, Tiliaceae, Lythraceae e Artocarpaceae. *Brotéria, Série Zoológica* 15: 113-181.
- Tavares, J. S. 1918. Cecidomyias novas do Brazil, segunda série. *Broteria, Série Zoológica* 16: 68-84.
- Tavares, J. S. 1920. O género *Bruggmanniella* Tav. com a descrição de uma espécie nova e a clave dichotômica des géneros das Asphondyliariae. *Brotéria, Série Zoológica* 18: 33-42.
- Tooker, J. F., and A. M. Helms. 2014. Phytohormone dynamics associated with gall insects, and their potential role in the evolution of the gall-inducing habit. *Journal of Chemical Ecology* 40: 742-753.
- Urso-Guimarães, M. V. 2018a. A new species of *Asphondylia* (Diptera: Cecidomyiidae) and a key to separate species of the genus associated with Asteraceae from Neotropical region. *Papéis Avulsos de Zoologia* 58: e20185853.
- Urso-Guimarães, M. V. 2018b. New record of *Machaerobia machaerii* (Kieffer, 1913) (Diptera, Cecidomyiidae) in Brazil and association with host-plant species. *Revista Brasileira de Entomologia* 62: 87-89.
- Urso-Guimarães, M. V. 2018c. Two new species of the tribe Alycaulini (Diptera: Cecidomyiidae) from Brazil. *Florida Entomologist* 101: 603-611.
- Urso-Guimarães, M. V. 2019a. Description of the larva of *Lopesia spinosa* Maia (Diptera, Cecidomyiidae) and new occurrences of the species. *Revista Brasileira de Entomologia* 63: 232-233.
- Urso-Guimarães, M. V. 2019b. Description of the male and larva of *Schizomyia tuiuiu* Urso-Guimarães & Amorim (Diptera, Cecidomyiidae), new records and a key to Neotropical species of *Schizomyia* Kieffer. *Iheringia. Série Zoologia* 109: e2019017.
- Urso-Guimarães, M. V., A. C. D. Castello, E. Y. Kataoka, and I. Koch. 2017. Characterization of entomogen galls from Mato Grosso do Sul, Brazil. *Revista Brasileira de Entomologia* 61: 25-42.

- Urso-Guimarães, M. V., and A. M. Carmo-Neto. 2015. A new species of gall midge associated with *Diplopterys pubipetala* (A. Juss.) Anderson and Davis (Malpighiaceae) from Altinópolis, São Paulo, Brazil. *Brazilian Journal of Biology* 75: 173-179.
- Urso-Guimarães, M. V., and C. Scareli-Santos. 2006. Galls and gall makers in plants from the Pé-de-Gigante Cerrado Reserve, Santa Rita do Passa Quatro, SP, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 66: 357-369.
- Urso-Guimarães, M. V., and D. S. Amorim. 2002. New Brazilian species of Asphondyliini (Diptera, Cecidomyiidae). *Revista Brasileira de Entomologia* 46: 561-570.
- Urso-Guimarães, M. V., and D. S. Amorim. 2005. Two new species of *Bruggmanniella* Tavares, 1909 (Diptera: Cecidomyiidae) from Brazil. *Studia Dipterologica* 11: 429-436.
- Urso-Guimarães, M. V., C. Scareli-Santos, and A. C. Bonifácio-Silva. 2003. Occurrence and characterization of entomogen galls in plants from natural vegetation areas in Delfinópolis, MG, Brazil. *Brazilian Journal of Biology* 63: 705-715.
- Urso-Guimarães, M. V., M. Palaez-Rodriguez, and S. Trivinho-Strixino. 2014. New species of *Lopesia* (Diptera, Cecidomyiidae) associated with *Eichhornia azurea* (Pontederiaceae) from Brazil. *Iheringia, Serie Zoologia* 104: 478-483.
- Urso-Guimarães, M.V., C. Scareli-Santos, and A. C. Bonifácio-Silva. 2003. Occurrence and characterization of entomogen galls in plants from natural vegetation areas in Delfinópolis, MG, Brazil. *Brazilian Journal of Biology* 63: 705-715.
- Vieira, L. G., R. M. Nogueira, E. C. Costa, S. P. Carvalho-Fernandes, and J. S. Silva. 2018. Insect galls in Rupestrian field and Cerrado *stricto sensu* vegetation in Caetité, Bahia, Brazil. *Biota Neotropica* 18: e20170402.

CAPÍTULO II

DIVERSITY PATTERNS OF HOST PLANTS AND THEIR GALL-INDUCING INSECTS IN THE BRAZILIAN CERRADO: TESTING ECOLOGICAL AND HISTORICAL HYPOTHESES

Fernanda C. F. Cintra¹, Valéria C. Maia², Maria V. Urso-Guimarães³, Walter S. de Araújo⁴, Marco A. A. Carneiro⁵, Henrique Venâncio¹, Wanessa R. de Almeida⁶, Janete F. Andrade⁷, Yurixhi Maldonado-López⁸, Pablo Cuevas-Reyes⁹ & Jean C. Santos^{10*}

¹Programa de Pós-Graduação em Entomologia, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, São Paulo, Brazil.

²Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil.

³Departamento de Biologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, Brazil.

⁴Departamento de Biologia Geral, Universidade Estadual de Montes Claros, Montes Claros, Minas Gerais, Brazil.

⁵Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil.

⁶Programa de Pós-graduação em Ecologia e Conservação, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brazil.

⁷Programa de Pós-graduação em Biologia Vegetal, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brazil.

⁸Cátedras CONACYT-Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Avenida San Juanito Itzúcuaro SN, Nueva Esperanza, 58330 Michoacán, México.

⁹Laboratorio de Ecología de Interacciones Bióticas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Ciudad Universitaria, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.

¹⁰Departamento de Ecologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brazil.

Paper published in *Arthropod-Plant Interactions*

Cintra, F. C. F., Araújo, W. S., Maia, V. C., Urso-Guimarães, M. V., Venâncio, H., Carneiro, M. A. A., Almeida, W. R., Andrade, J. F., Yurixhi Maldonado-López, Y., Cuevas-Reyes, P. & Santos, J. C. (2023). Diversity patterns of host plants and their gall-inducing insects in the Brazilian Cerrado: testing ecological and historical hypotheses. *Arthropod-Plant Interactions* 17, 741–752. <https://doi.org/10.1007/s11829-023-09998-1>

**Diversity patterns of host plants and their gall-inducing insects in the Brazilian
Cerrado: testing ecological and historical hypotheses**

Fernanda C. F. Cintra¹, Valéria C. Maia², Maria V. Urso-Guimarães³, Walter S. de Araújo⁴,
Marco A. A. Carneiro⁵, Henrique Venâncio¹, Wanessa R. de Almeida⁶, Janete F. Andrade⁷,
Yurixhi Maldonado-López⁸, Pablo Cuevas-Reyes⁹ & Jean C. Santos¹⁰

Abstract

Cerrado is one of the most diverse savannahs on the planet in terms of plant species and insect herbivores, as well as in hotspot in the diversity of plant-galling insect interactions. The aims of the study were: characterize the diversity of host plants (HP) and their associated gall-inducing insects (GII) in the Brazilian Cerrado; estimate the species richness of GII for the Cerrado vegetation; determine if GII species richness is shaping the plant species richness, taxa size, and the taxon age; to analyze the number of species per HP communities, and estimate the number of GII (co-threatened) in endangered plants. We used a comprehensive database compiling information available in 32 inventories on GII and their HP from several areas of the Cerrado. We find 994 morphospecies associated with 505 HP. Additionally, we estimated a total of 11,745 GII for the Cerrado, of which 8,574 were cecidomyiid species. More than 58% of the HP harbored a single GII, while 42 % had more than two GII, corroborating the high specialization of the GII on their HP. Finally, we detected nine threatened HP hosting 27 species of GII, which are considered super hosts. Our study is the first to analyze the assemblages of HP and their GII in the Cerrado vegetation at a regional scale. Our findings indicate a high regional diversity of both HP and GII, and we highlight the importance of plant species richness, taxa size, and the taxon age as factors shaping the diversity of GII in the Cerrado.

Keywords: galls; insect herbivores; plant species richness; taxa size; taxon age

Introduction

The Brazilian Cerrado is the second largest dominant biome of Brazil, considering that represents 23 % of the national territory, covering states in all regions of the country (Oliveira-Filho and Ratter 2002). This biome includes several types of vegetation, which has favored the establishment of a large number of species, being an important hotspot in the neotropics (Klink and Machado 2005), since it includes the most diverse tropical savanna of the planet (Eiten 1994), and harbors a rich and endemic biota (Colli et al. 2020). For these reasons, Cerrado is considered a priority area (i.e., hotspot) for conservation on the planet (Myers et al. 2000; Klink and Machado 2005). However, due to human activities such as deforestation, and change in land use to agrosystems and livestock, this biome has been highly fragmented, which has led to the extinction of many species, threatening the global diversity of this biome (Klink and Machado 2005).

A large number of herbivorous insects use plants as hosts in the Cerrado, not only for their feeding but also for their development (Araújo et al. 2019). For example, endophagous insects such as gall-inducing insects (GII), represent a guild of herbivores that spend a large part of their life cycle inside of the plant tissues (Cornell 1989; Cuevas-Reyes et al. 2004). Because GII has induce tumors in their host plants, which provide food, shelter, and protection against natural enemies (Pascual-Alvarado et al. 2008; Pérez-López et al. 2016), this insect guild is considered one of the most sophisticated insect herbivores of the nature (Shorthouse et al. 2005). Usually, Cecidomyiidae (Diptera) is the most representative family in the inventories of GII that have been carried in the Brazilian Cerrado (Araújo et al. 2014). The high richness and dominance of this family in the Cerrado indicate the evolutionary success that the group has attained the Neotropics (Gonçalves-Alvim and Fernandes 2001a).

One of the main factors influencing the diversity and distribution of herbivorous insects in tropical environments is the host plant diversity (Strong et al. 1984; Mittelbach et al. 2007).

For example, insect herbivores diversity increases from communities with few plant species to more diverse communities (Cuevas-Reyes et al. 2004; Meyer et al. 2017) due to the fact that a more diverse plant community represents a higher number of resources and niches to be used and colonized by herbivorous insect species (Cuevas-Reyes et al. 2004). Some hypotheses have been proposed to explain the variation in GII diversity at different spatial and temporal scales (e.g., plant species richness, plant age, plant structural complexity, plant density, and resource synchronisation) (Price et al. 1998; Gonçalves-Alvim and Fernandes 2001b; Mendonça 2001; Cuevas-Reyes et al. 2004; Miller and Raman 2019). One of the main hypotheses proposes that the most diverse host plant taxa harbor the greatest GII species richness, due to each host species representing a potential niche for insect colonization (Mendonça 2007, Strong et al. 1984). This fact has been confirmed in some studies that showed a positive relationship between plant family size and GII species richness (Fernandes 1992; Gonçalves-Alvim and Fernandes 2001b; Araújo et al. 2012). The taxon age hypothesis proposes that historically older environments are richer in plant species, because they had more time for radiation events (see Pianka 1974; Mittelbach et al. 2007). In the present study, we determine the diversity patterns of host plants and their fauna associated with GII in the Brazilian Cerrado using an overview of previous studies with this focus. We investigated the possible mechanisms that generate the high GII diversity in the Cerrado biome and discuss the main ecological hypotheses associated with these mechanisms. To this, we used information from the data-paper of Cintra et al. (2020) and we also compile evidence about the number of GII species from a series of inventories of several studies of GII species carried in Brazilian Cerrado in the last 30 years (see Araújo 2018). To our knowledge, some case studies have sought to understand the pattern of GII richness in neotropical savannas (e.g., Gonçalves-Alvim and Fernandes 2001b; Araújo et al. 2012).

However, our study innovates by understanding this pattern and testing ecological and historical hypotheses on a broader scale through a broad literature review. In this context, the objectives of this work were the following: (a) analyze quantitatively and qualitatively the host plant assemblage and their respective GII species richness; (b) estimate the number of GII species and Cecidomyiidae species for the Cerrado; (c) investigate whether host plant richness or GII richness is positively related to the number of plant species of each plant family and the number of genera according to the prediction of the plant taxon size hypothesis; (d) determine whether older plant families have more host plant richness or GII richness than more recent plant taxa, as predict by the taxon age hypothesis; (e) identify the number of GII species per each host plant (single-, multi- and super hosts) across HP communities. In this study, we adopted the following definitions for single-, multi- and super-hosts as, respectively, hosts with single GII species per plant species, hosts with two or more GII species per plant species, and those hosts that have a greater number of GII species compared to the average GII species richness per plant occurring within the host plant community (*sensu* Grandez-Rios et al. 2020); and (f) estimate the magnitude of the co-extinction threat to insect herbivores by compiling a list of GII that are restricted to threatened plants of this global hotspot.

Material and methods

Data collection for host plants and GII morphotypes

We used the database published by Cintra et al. (2020). This information was compiled from a comprehensive literature search for data about host plants of GII in the Brazilian Cerrado (N=32 studies). These authors focused on community studies such as checklists and inventories of host plants and GII recorded in different localities in the Brazilian Cerrado. Additionally, data sets discarded from Cintra et al. (2020) were used later only to detect the possible additive effects of the number of genera and families in the diversity of host plants (see details in the

support material). To obtain the number of GII per host plant, we check all cited studies by Cintra et al. (2020), and then, we recorded each GII species associated with each host plant species for the 32 studies evaluated. Most of these studies do not provide the taxonomic identification of the GII, but they used gall morphospecies (i.e., gall phenotypic traits) as a proxy for GII species (Stone and Schönrogge 2003). The use of morphospecies is a reliable approach to estimating the diversity and structure of GII communities since usually, each species of insect induces a gall with a unique morphology (Cuevas-Reyes et al. 2004; Araújo et al. 2013; Isaías et al. 2013; Pérez-López et al. 2016). Therefore, we reduced the morphological redundancy of GII (when many authors record GII for the same host plant). For this, 58% of the host plant species (N=291 spp.) had only one record for GII, and only a single author described the morphotypes. Because there is only one gall morphotype per plant, we had no problems in the association of them, due to each morphotype belongs to a single species of the host plant. In the cases, where different studies recorded different GII numbers (from 2 to 17) on the same host plant (42%, 214 spp.), we include the following criteria: a) when different authors reported identical numbers of gall morphotypes for same host plant species, we select arbitrarily one record to represent the number of GII for this host plant; and b) when different authors reported a different number of gall morphotypes for the same host plant species, then, we selected the record with more gall morphotypes to represent the number of GII for this host plant. Despite the limitations of this method, we consider it the best method to estimate the number of GII by host plant species.

Data analysis

We provide some descriptive statistical analyses for an overview of the data. We test if GII species richness or host plants richness (number of plant species or genera by family

considering only host plant for insect galls) are positively related to the plant richness (number of plant species or genera by family, considering the whole plant community in Cerrado) (see size taxon plant, sensu Fernandes 1992). Similarly, we determine if GII and host plant richness is positively related to the plant age (taxon age), also all data organized by plant family of Cerrado. The number of total plant species and genera by plant families of the Cerrado were obtained from sensu Brazil Flora (2022). The plant age (taxon age) for each botanical family was obtained from a focal search of the main specialized literature on the subject: Wikström et al. (2001), Hedges and Kumar (2009) and Tank et al. (2015). In these studies, we sought information on age (in millions of years) from the timetree (a phylogenetic tree scaled to time) for each botanical taxon. For this, we use the non-parametric Spearman correlation test to determine these relationships because the data did not follow parametric distribution (Sprent and Smeeton 2007). Statistical analyses were conducted using `cor.test` function and Stats Package (version 3.6.2) in the R3.6.2 statistical software (R Development Core Team, 2019).

Results

Host plants and their GII

We used a database compiled from 32 studies that exclusively analyzed the relation between GII and host plant richness. Overall, we found 505 currently valid species of host plants grouped in 222 genera and 67 families. For the Cerrado, 12,420 valid species, 1,662 genera and 187 plant families of plants are described (sensu Brazil Flora 2022). We registered only 4% species, 13% of the genera and 36% of the families of all plants of the Cerrado are hosts of GII.

We detected that five plant families (Asteraceae, Fabaceae, Myrtaceae, Malpighiaceae and Melastomataceae) represented more than half of the host plant species evaluated (Figure 01a), and that hosted more than 58% of the total of GII species richness (Figure 01b) (Online Resource). In addition, only 10 genera of plants (*Baccharis*, *Byrsonima*, *Myrcia*, *Eugenia*,

Bauhinia, *Erythroxylum*, *Chamaecrista*, *Croton*, *Mikania*, and *Lessingianthus*) represented to around 27 % of the total of plant richness (N= 134 spp., Table 01), being *Baccharis* the most diverse genus with 44 species of host plants (8.7%).

The other 212 genera had about 73% (371 genera). In addition, another 10 genera (*Baccharis*, *Byrsonima*, *Bauhinia*, *Copaifera*, *Myrcia*, *Eugenia*, *Erythroxylum*, *Lessingianthus*, *Croton* and *Qualea*) together had around 36% of the total number of registered gall species and 212 other genera, about 64% (637 galls spp.) (Table 02, Online Resource). Again, *Baccharis* stood out, with an extraordinary ~14% (141 galls spp.) of all the galls.

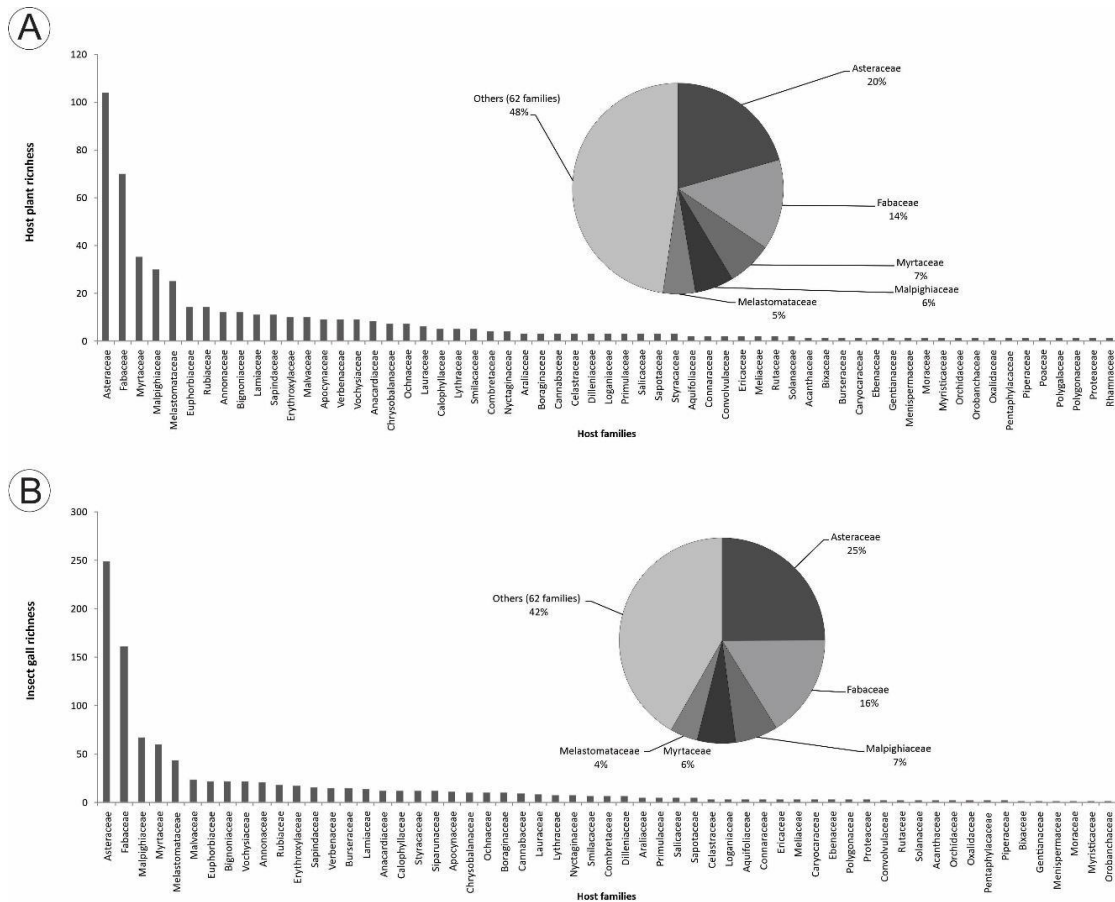


Figure 01. Rank plots of the number of host plant species (A) and galling insect richness (B) for 67 host plant families. In the right corner of each figure, we show the top-five families with the highest numbers of records for host plant species and insect galls.

Table 01. Top ten genera with more host plant species in the Cerrado and also the proportion of the number of gall species by host plants. The complete list of all 222 genera was placed as a Supplementary Information (Online Resource).

Host genera	Host plant richness	Host plant richness (%)	Number of galls/host plants
<i>Baccharis</i>	44	8.7	3.2
<i>Byrsonima</i>	14	2.8	2.8
<i>Myrcia</i>	12	2.4	2.2
<i>Eugenia</i>	11	2.2	1.6
<i>Bauhinia</i>	10	2.0	3.7
<i>Erythroxylum</i>	10	2.0	1.7
<i>Chamaecrista</i>	9	1.8	1.2
<i>Croton</i>	9	1.8	1.7
<i>Mikania</i>	8	1.6	1.5
<i>Lessingianthus</i>	7	1.4	2.3
Subtotal	134	26.5	
Others (212)	371	73.5	
Total	505	100	

Table 02. Top ten genera with more galling insect species in the Cerrado and also the proportion of the number of gall species by host plants. The complete list of all 222 genera was placed as a Supplementary Information (Online Resource).

Host genera	Insect gall richness	Insect gall richness (%)	Number of galls/host plants
<i>Baccharis</i>	141	14.2	3.2
<i>Byrsonima</i>	39	3.9	2.8
<i>Bauhinia</i>	37	3.7	3.7
<i>Copaifera</i>	33	3.3	8.3
<i>Myrcia</i>	26	2.6	2.2
<i>Eugenia</i>	18	1.8	1.6
<i>Erythroxylum</i>	17	1.7	1.7
<i>Lessingianthus</i>	16	1.6	2.3
<i>Croton</i>	15	1.5	1.7
<i>Qualea</i>	15	1.5	3.0
Subtotal	357	35.9	
Others (212)	637	64.1	
Total	994	100	

Estimating the number of GII species

Considering that most of the GII species are monophagous insects (Carneiro et al. 2009b; Miller and Raman 2019), we found a total of 994 GII morphospecies associated with 505 host plants in the Brazilian Cerrado (i.e., a mean of, approximately, two GII species for each host plant).

Then, considering that the average percentage of host plants with GII is 48% in the Cerrado vegetation (*sensu* Araújo et al. 2013), as well as the total number of plant species described to Cerrado (12,420 spp. *sensu* Brazil Flora 2022), our estimations indicated that there should be approximately 5,962 spp. of host plants. With this number of host plants multiplied by the ratio of galls/host plants (1.97), we obtain an estimated number of 11,745 GII species for the Cerrado. Maia et al. (2014), estimated that 73% of GII species in the collection of the Museum Nacional/Universidade Federal do Rio de Janeiro correspond to the Cecidomyiidae family (Diptera). According to this information, the number of GII species corresponding to Cecidomyiidae family of Cerrado would be about 8,574 species.

Relationship between GII and host plants with the taxa size and taxon age

We found that the number of GII species was positively correlated with the following parameters: (i) the number of host plants ($r_s = 0.88$; $p < 0.001$), (ii) number of host plant genera ($r_s = 0.73$; $p < 0.001$), (iii) plant species richness ($r_s = 0.40$; $p < 0.001$) and (iv) total plant genera of the Cerrado vegetation ($r_s = 0.34$; $p = 0.003$) (Figure 02). Additionally, the number of host plants was also positively correlated with plant species ($r_s = 0.53$; $p < 0.001$) (Figure 02). We detected that the number of host plant genera was positively correlated with the number of plant genera of the Cerrado ($r_s = 0.64$; $p < 0.001$) (Figure 02). Finally, we did not find a relationship between taxon age with the host plant richness and the number of GII species ($p > 0.4$ in both cases).

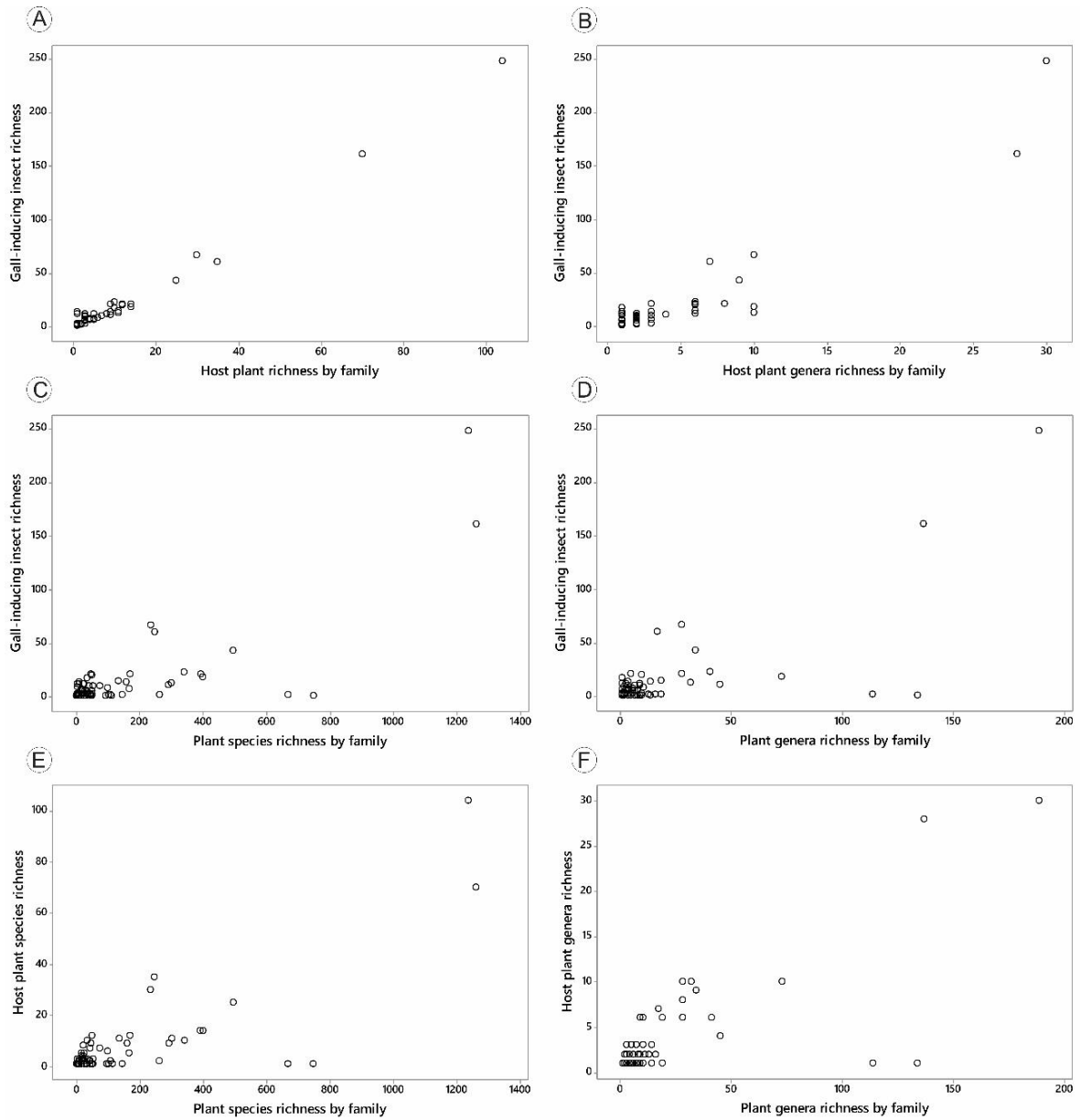


Figure 02. Correlations between the number of gall-inducing species and: (A) the number of host plant species¹, (B) the number of host plant genera², (C) the number of plant species³, and (D) the number of plant genera⁴. Correlations between (E) the number of host plant species¹ and the number of plant species³, and between (F) the number of host plant genera² and the number of plant genera⁴. All data were organized by the plant family of the Cerrado. Legends: ¹only host plant species for insect galls, ²only host plant genera for insect galls, ³all plant species known for the Cerrado, and ⁴all plant genera known for the Cerrado.

Single-, multi- and super-hosts

Our results indicated that most of the host plants harbored only one GII species (N= 291 spp.) and represent ~58% of the total species analyzed. The multi-hosts were those plants that harbored 2 or more GII species and represented about 42% (i.e., 214 spp.) of all plant hosts (Figure 03a). Finally, the plant species that harbored numerous GII species are called super hosts (*sensu* adapted of Grandez-Rios et al. 2020), which we consider in this study those plants that harbored more than eight GII species (see legend of Figure 03 for further clarification). For example, eight host plant species had more than eight GII species and represented the 1.6% of the total of plant species [*Baccharis dracunculifolia* (17 GII spp.), *B. concinna* (14 GII spp.), *Protium heptaphyllum* (14 GII spp.), *B. salicifolia* (13 GII spp.), *Siparuna guianensis* (12 GII spp.), *B. pseudomyriocephala* (10 GII spp.), *Copaifera langsdorffii* (10 GII spp.) and *Copaifera sabulicola* (9 GII spp.)]. These aforementioned plant species had a large number of galls species, with about 10% of all species (99 spp.) (Figure 03b). Among the super hosts, three

species were of the genus *Baccharis*.

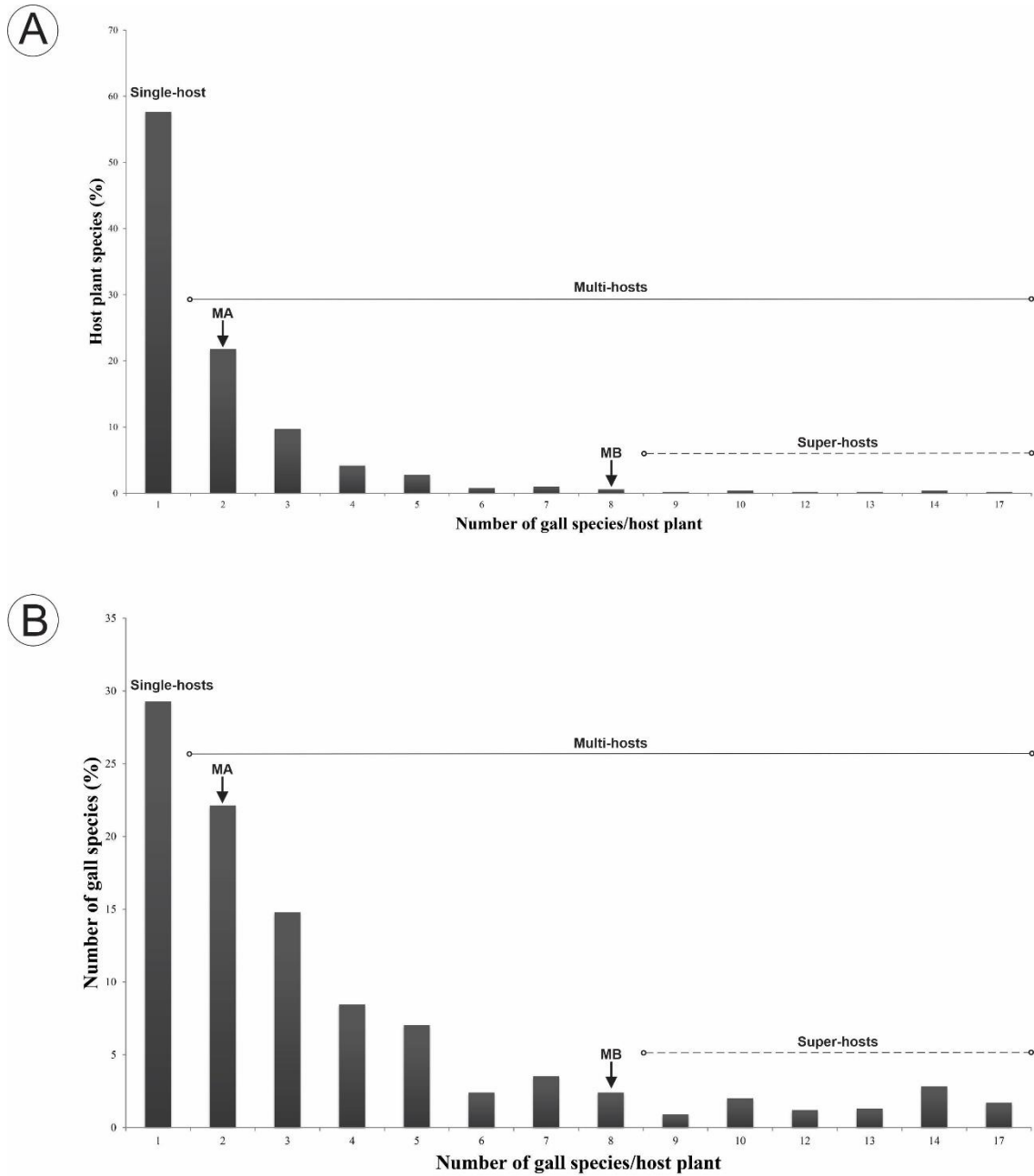


Figure 03. Distribution of the number of galling insect species by host plant species (number galling insect species/host plant ratio) in relation to percentage of host plant species (A) and galling insect species (B). We highlight in this figure the plant species with only one insect species (single-hosts), the species with two or more gall species (multi-hosts) and plant species that are above the mean of the number of galls in the community, with nine or more galls (super-hosts). In this section, we highlight two approaches. Mean A (MA) represents the total species

richness of galling insects (N=994 spp.) divided by the total species richness of host plants (N=505 spp.), totaling to 1.97. Mean B (MB) represents the sum of the number of possible galling insect species for each category (ranging from 1 to 17, N=111) divided by the number of observed categories (N=14), totaling 7.93. When MA is used to separate multi- and super-host plants, there is an overlap between the two groups. Therefore, we chose to use MB to distinguish the super-host plants because it highlights the few host plant species that have a high concentration of galling insects. The implications for single-, multi- and super-hosts were put into the results and discussed posteriorly.

GII species associated with threatened plants

Of the total number of host plants analyzed, we detected nine host plant species threatened with extinction according to the Red List of Brazilian Flora (*sensu* Brazil Flora 2022). Three species are vulnerable (VU): *Baccharis concinna* G.M.Barroso (Asteraceae), *Lychnophora ramosissima* Gardner (Asteraceae), and *Lychnophora tomentosa* (Mart. ex DC.) Sch.Bip. (Asteraceae) and six species are endangered (EN): *Anemopaegma arvense* (Bignoniaceae), *Lychnophoriopsis candelabrum* (Sch.Bip.) H.Rob. (Asteraceae), *Baccharis elliptica* Gardner (Asteraceae), *Mikania glabra* (Asteraceae), *Mikania glauca* Mart. ex Baker (Asteraceae), and *Peixotoa cipoana* C.E.Anderson (Malpighiaceae). We corroborate in the literature the exact number of GII species associated with these host plant species. We found 27 GII species on endangered plant species, a property of three galls per plant (Table 03). The GII are specific herbivores of these plants, and they can also be considered co-threatened. Among the species of gall-inducing species of Cerrado, none of the co-threatened species found here are described, indicating a huge taxonomic gap for GII co-threatened species (Table 03). These plants may be included in the future as threatened species. Interestingly, in these plants,

we found 26 species of gall-inducing species, which shows a certain concern in relation to plants almost threatened with large galler hosts.

Table 03. Plant threatened species (EN and VU) according to the Red List of Brazilian Flora. We also added to the table the taxon of the host plant family, its life form and the number of galling insect species (co-threatened species) associated with these plants. Legends: endangered (EN), vulnerable (VU) and near threatened (NT).

Conservation status	Host plant species	Host plant families	Plant life form	Nº gall-inducing species	References
EN	<i>Anemopaegma arvense</i> (Vell.) Stellfeld ex de Souza	Bignoniaceae	Shrub	1	Golçalves-Alvim and Fernandes 2001
	<i>Baccharis elliptica</i> Gardner	Asteraceae	Shrub/Subshrub	2	Carneiro et al. 2009a
	<i>Lychnophoriopsis candelabrum</i> (Sch.Bip.) H.Rob.	Asteraceae	Tree	1	Coelho et al 2013
	<i>Mikania glabra</i> D.J.N.Hind	Asteraceae	Subshrub	2	Carneiro et al 2009a
	<i>Mikania glauca</i> Mart. ex Baker	Asteraceae	Subshrub	1	Carneiro et al 2009a
	<i>Peixotoa cipoana</i> C.E.Anderson	Malpighiaceae	Shrub/liana/climber	1	Carneiro et al 2009a
VU	<i>Baccharis concinna</i> G.M.Barroso	Asteraceae	Shrub/Subshrub	15	Fernandes et al 1996*
	<i>Lychnophora ramosissima</i> Gardner	Asteraceae	Shrub	2	Carneiro et al 2009a
	<i>Lychnophora tomentosa</i> (Mart. ex DC.) Sch.Bip.	Asteraceae	Tree	2	Carneiro et al 2009a

Discussion

Patterns for host plants and GII species

The Brazilian Cerrado includes the most extensive and diverse savanna of the planet (Oliveira and Marquis 2002; Klink and Machado 2005; Mendonça et al. 2008). For example, the most recent *sensu* showed that Cerrado harbors more than 12,097 angiosperm species, being endemic 4,252 species that represent 35.1% of the total of the plant species (Zappi et al. 2015). Many studies suggest that the Fabaceae is the most important host plant family of the GII species in the Cerrado (e.g., Fernandes et al. 1997; Gonçalves-Alvim and Fernandes 2001a,b; Maia and Fernandes 2004; Urso-Guimarães and Scareli-Santos 2006; Araújo et al. 2011; Santos et al. 2012; Zappi et al. 2015). This idea may be true since locally the Fabaceae family has a great number of species. However, our results showed that Asteraceae was the main family with the largest number of plant species and GII species, followed by Fabaceae. In fact, Fabaceae stands out in many communities with the most diverse family and with many abundant species. This fact can be explained due our study considering data at the regional scale, and in this condition, the Asteraceae family was predominated. This can be supported by the high diversity of Asteraceae in some types of vegetation of the Cerrado, for example, in the rupestrian fields (see Zappi et al. 2015). Therefore, our results are in accordance with the reported by Zappi et al. (2015) that showed that the Asteraceae family (1,216 ssp.) is more diverse than the Fabaceae family (1,207 ssp.) in some types of vegetation of the Cerrado, such as rupestrian fields. Other host plant families such as Myrtaceae, Malpighiaceae, and Melastomataceae, often have been considered highly diverse families in Cerrado (Maia and Fernandes 2004; Urso-Guimarães and Scareli-Santos 2006; Mendonça et al. 2008; Malves and Frieiro-Costa 2012).

The remarkable diversity of GII species in the Cerrado

Espírito-Santo and Fernandes (2007) estimated that the global richness of GII ranged from 21,000 to 211,000 species, with an average of 132,930 species. In our study, we found at least 994 GII morphotypes, and we estimated 11,745 GII species for the Cerrado. Considering our estimate and compared to Espírito-Santo and Fernandes (2007), our data represent 8.8% of the estimated global GII species richness. This fact can be explained since the Cerrado is a mosaic of many types of vegetation, soils, topography (Oliveira and Marquis 2002), and many areas of endemism (Echternacht et al. 2011), which possibly led to a great diversification and radiation of host plants and GII species. In addition, many studies suggest that the Cecidomyiidae family is the most diverse group of the GII in the tropics (Gagné 1994; Fernandes et al. 1997; Price et al. 1998; Wright and Samways 1998; Gonçalves-Alvim and Fernandes 2001; Cuevas-Reyes et al. 2004). *A priori*, the suggestion of 12,000 GII species seems a bit overestimated. In this way, Brown (2009) suggested that each species of flowering plant in Costa Rica supports two species of cecidomyiids. If we take this idea to our data for the Cerrado, we would have an estimate of 24,840 cecidomyiid species associated with 12,420 host plant species. Our data is consistent with a recent study that used DNA barcoding to show that the Cecidomyiidae family is a taxon with 1.8 million of species (Hebert et al. 2016). Despite, all this information, according to Colli et al. (2020), the biodiversity of the Cerrado is poorly known, with a deep gap in the knowledge of the species, which indicates that a significant amount of biodiversity remains to be discovered and described. If our estimate is correct, the Cerrado would have 8,574 cecidomyiid species, among them, only 48 described species (0.6%) have been described (see Cintra et al. 2020).

Effects of plant family size and plant taxon age on GII richness

Several studies in the Cerrado have shown a positive relationship between GII species richness and plant family size (Fernandes 1992; Gonçalves-Alvim and Fernandes 2001b; Araújo et al. 2012). These studies were conducted at a local scale and/or with a reduced database. Our results on a regional scale corroborate this pattern, as predicted by Fernandes (1992). Because GII are usually host-specific, the generation and maintenance of GII species richness have been related to plant family size (Fernandes and Price 1991; Fernandes and Lara 1993; Lara and Fernandes 1996; Ribeiro et al. 1998; Cuevas-Reyes et al. 2003, 2004; Oyama et al. 2003). Therefore, a greater specificity of GII is apparently associated with a greater diversity of host species in the tropics in comparison with temperate regions. These associations may have occurred due to processes of radiation and high rates of speciation in both groups in tropical regions (Gagné 1994; Fernandes et al. 1997; Price et al. 1998; Wright and Samways 1998). Thus, it is possible to expect that host plants more diverse in the number of species and genera harbor a greater richness of GII (Fernandes 1992; Cuevas-Reyes et al. 2004; Araújo 2011). In contrast, our data were not explained by the plant taxon age hypothesis (Fernandes 1992) that predicts that older plant lineages tend to harbor more GII over time since longer evolutionary time leads to an increase in the number of speciation events. This result agrees with the reported by Araujo (2011), who found that the age of the taxon was not a good predictor of the Cecidomyiid diversity in Cerrado vegetation. Due to the ability of the Cecidomyiidae family to switch host plants between different families and genera, it is possible to expect that this group of GII have a wide range of host plants, as well as multiple adaptive radiation events within some families and genera, regardless of the age of the host taxon (Price 2005; Araujo 2011). This fact suggests that some genera and families of plants may harbor GII species regardless of their species richness (Fernandes et al. 1996; Oyama et al. 2006).

Multi- and superhosts of GII species

Some host plant taxa (e.g., species, and family) have been recorded as hosting of many GII species in the Cerrado (see Araújo et al. 2014), being commonly called as super hosts (*sensu* Veldtman and McGeoch 2003). Several studies have shown the presence of super hosts in temperate and tropical ecosystems (Araújo et al. 2012; Pérez-López et al 2016; Grandez-Rios et al. 2020). One hypothesis that could explain the presence of super hosts is the plant diversity within the genus and family (i.e., taxon size hypothesis) that assumes that a more diverse plant community represents a higher number of resources and niches to be used and colonized by insect herbivorous (Fernandes and Price 1988). Under this scenario, some host plant species would represent key resources for many GII species, being crucial to the maintenance of GII diversity (Cuevas-Reyes et al. 2004), producing differences in local and regional patterns of GII diversity (Veldtman and McGeoch 2003; Mendonça 2007; Araújo et al. 2013). Differences in host plant physiology, chemistry, nutritional quality, development, and phenology have been suggested as possible mechanisms that cause these differences in GII host preference (Abrahamson et al. 1998; Cuevas-Reyes et al. 2004; Maldonado-López et al 2016).

The silence of the co-threatened

Anthropogenic impacts increase current extinction rates causing a global biological diversity crisis (Dirzo et al. 2014). The extinction of one species frequently results in the co-extinction of some dependent species that are highly specific to their hosts (i.e., extinction of host-specific species, such as parasites, mutualists, and herbivores) (Stork and Lyal 1993, Brodie et al. 2014). As one of the 25 biodiversity hotspots identified by Myers et al. (2000), the Brazilian Cerrado is particularly susceptible to the loss of many plant species. The Brazilian Cerrado is home to an estimated 12,420 plant species (*sensu* Brazil Flora 2022), of which 2,113 ssp. are listed by

the Brazilian State Government as threatened (Portaria MMA N° 443, de 17 de Dezembro de 2014). Our results showed that threatened HP can host many species of GII. Thus, the concern with species extinction should be extended to other trophic levels associated with HP. Especially for groups of organisms specialized in their plants, such as GII. In addition, trophic levels above GII may have other specialized insect taxa, for example, parasitoids. We hope that these data can influence species conservation policies in Brazil. One idea is that in the future, codependent species of HP are included in the list of threatened species.

Conclusion

In our study, we analyzed data at a regional scale, and we detected that Asteraceae was the family with the largest number of host plants and GII species associated with them. We found at least 994 gall morphotypes for the Cerrado, but we estimated there are 11,745 GII species, among them we estimated would have 8,574 cecidomyiid species. However, only a few cecidomyiid species were described for Brazilian Cerrado, and for this reason, we found that there is a significant gap in the knowledge of these species. Also, we observed at the regional scale the same pattern already observed at the local scale in other studies, where host plant taxa more diverse harbor a great richness of GII. For plant taxon age, we did not find relationship between host plant family age and gall-midges diversity. It's worrying that our results showed that threatened HP can host many species of GII, including species from the Asteraceae family, the taxon with the largest number of HP, and GII. Once the extinction of one species will result in the co-extinction of some dependent species that are highly specific to their hosts. We highlight the importance to conserve the Brazilian Cerrado to maintain the diversity of interactions between host plants and its unique and diverse community of GII species, one of the main centers of richness, diversification, and endemism in the southern hemisphere.

Acknowledgments

The authors thank the University of São Paulo (USP) for support, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) and Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) for financial support [CNPq grants 316489/2021-2 (J.C.S) and fellowships: 140128/2019-0 (F.C.F.C.) and 140158/2018-9 (H.V.)].

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

References

- Abrahamson W, Melika G, Scrafford R, Csoka G (1998) Gall-inducing insects provide insights into plant systematic relationships. *Am J Bot* 85:1159
- Araújo WS (2011) Size, age and composition: characteristics of plant taxa as diversity predictors of gall-midges (Diptera: Cecidomyiidae). *Rev Biol Trop* 59:1599–1607. <https://doi.org/10.15517/RBT.V59I4.3423>
- Araújo WS (2018) 30 years of research on insect galls in Brazil: a scientometric review. *Pap Avulsos Zool* 58: <https://doi.org/10.11606/1807-0205/2018.58.34>
- Araújo WS, Fernandes GW, Santos JC (2019) An overview of inventories of gall-inducing insects in Brazil: looking for patterns and identifying knowledge gaps. *An Acad Bras Cienc* 91: <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920180162>
- Araújo WS, Santos BB, Gomes-Klein VL (2012) Relationship between host plant diversity and gall-inducing insect's richness in the Brazilian Cerrado. *Neotrop Biol Conserv* 7:41–47
- Araújo WS, Santos BB, Guilherme FAG, Scareli-Santos C (2014) Gall-ing insects in the Brazilian Cerrado: ecological patterns and perspectives. In: Fernandes GW, Santos JC (eds) *Neotropical Insect Galls*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp 257–272
- Araújo WS, Scareli-Santos C, Guilherme FAG, Cuevas-Reyes P (2013) Comparing galling insect richness among Neotropical savannas: effects of plant richness, vegetation structure and super-host presence. *Biodivers Conserv* 22:4 22:1083–1094. <https://doi.org/10.1007/S10531-013-0474-8>
- Brodie JF, Aslan CE, Rogers HS, et al (2014) Secondary extinctions of biodiversity. *Trends Ecol Evol* 29:664–672. <https://doi.org/10.1016/J.TREE.2014.09.012>
- Brown B (2009) Introduction. In: Brown B, Borkent A, Cumming J, et al. (eds) *Manual of Central American Diptera*. NRC Research Press, Ottawa, pp 1–8
- Carneiro MAA, Borges RAX, Araújo APA, Fernandes GW (2009a) Insetos indutores de galhas da porção sul da Cadeia do Espinhaço, Minas Gerais, Brasil. *Rev Bras Entomol* 53:570–592. <https://doi.org/10.1590/S0085-56262009000400007>
- Carneiro MAA, Branco CSA, Braga CED, et al (2009b) Are gall midge species (Diptera, Cecidomyiidae) host-plant specialists? *Rev Bras Entomol* 53:365–378. <https://doi.org/10.1590/S0085-56262009000300010>

- Cintra FCF, Araújo WS, Maia VC, et al (2020) Plant-galling insect interactions: a data set of host plants and their gall-inducing insects for the Cerrado. *Ecology* 101: <https://doi.org/10.1002/ECY.3149>
- Coelho MS, Carneiro MAA, Branco CA, Fernandes GW (2013) Gall-inducing insects from Serra do Cabral, Minas Gerais, Brazil. *Biota Neotrop* 13:102–109. <https://doi.org/10.1590/S1676-06032013000300013>
- Colli GR, Vieira CR, Dianese JC (2020) Biodiversity and conservation of the Cerrado: recent advances and old challenges. *Biodivers Conserv* 29:1465–1475. <https://doi.org/10.1007/S10531-020-01967-X/FIGURES/3>
- Cornell H v. (1989) Endophage-ectophage ratios and plant defense. *Evol Ecol* 3:1 3:64–76. <https://doi.org/10.1007/BF02147932>
- Cuevas-Reyes P, Quesada M, Hanson P, et al (2004) Diversity of gall-inducing insects in a Mexican tropical dry forest: the importance of plant species richness, life-forms, host plant age and plant density. *J Ecol* 92:707–716. <https://doi.org/10.1111/J.0022-0477.2004.00896.X>
- Cuevas-Reyes P, Siebe C, Martínez-Ramos M, Oyama K (2003) Species richness of gall-forming insects in a tropical rain forest: correlations with plant diversity and soil fertility. *Biodivers Conserv* 12:3 12:411–422. <https://doi.org/10.1023/A:1022415907109>
- Dirzo R, Young HS, Galetti M, et al (2014) Defaunation in the Anthropocene. *Science* 345:401–406. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1251817>
- Echternacht L, Trovó M, Oliveira CT, Pirani JR (2011) Areas of endemism in the Espinhaço Range in Minas Gerais, Brazil. *Flora: Morphol Distrib Funct Ecol Plants* 206:782–791. <https://doi.org/10.1016/J.FLORA.2011.04.003>
- Eiten G (1994) Vegetação do cerrado. In: Pinto MN (ed) *Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas*, 2nd edn. Editora Universidade de Brasília, Brasília, pp 17–73
- Espírito-Santo M, Fernandes G (2007) How Many Species of Gall-Inducing Insects Are There on Earth, and Where Are They? *Ann Entomol Soc Am* 100:95–99
- Fernandes G, Araujo R, Araújo SC, et al (1997) Insect galls from savanna and rocky fields of the Jequitinhonha valley, Minas Gerais, Brazil. *Naturalia* 24:221–244
- Fernandes GW (1992) Plant family size and age effects on insular gall-forming species richness. *Glob Ecol Biogeogr Lett* 2:71–74. <https://doi.org/10.2307/2997508>

- Fernandes GW, Carneiro MA, Lara AC, et al (2012) Gallling insects on neotropical species of *Baccharis* (Asteraceae). <http://dx.doi.org/10.1080/03946975.1996.10539315> 9:315–332. <https://doi.org/10.1080/03946975.1996.10539315>
- Fernandes GW, Fagundes M, Woodman RL, Price PW (1999a) Ant effects on three-trophic level interactions: plant, galls, and parasitoids. *Ecol Entomol* 24:411–415. <https://doi.org/10.1046/J.1365-2311.1999.00218.X>
- Fernandes GW, Lara ACF (1993) Diversity of Indonesian gall-forming herbivores along altitudinal gradients. *Biodivers Lett* 1:186–192. <https://doi.org/10.2307/2999743>
- Fernandes GW, Price PW (1988) Biogeographical gradients in galling species richness: Tests of hypotheses. *Oecologia* 76:161–167. <https://doi.org/10.1007/BF00379948>
- Fernandes GW, Price PW (1991) Comparison of tropical and temperate galling species richness: the roles of environmental harshness and plant nutrient status. In: Price PW, Lewinsohn TM, Fernandes GW, Benson WW (eds) *Plant-animal interactions: evolutionary ecology in tropical and temperate regions*. John Wiley, New York, pp 91–115
- Brazil Flora G (2022). Brazilian Flora 2020 Project - Projeto Flora do Brasil 2020. Version 393.344. Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Checklist dataset <https://doi.org/10.15468/1mtkaw>. <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/>. Accessed 26 May 2020
- Gagné RJ (1994) *The gall midges of the Neotropical region*. Cornell University Press
- Gonçalves-Alvim SJ, Fernandes GW (2001a) Comunidades de insetos galhadores (Insecta) em diferentes fisionomias do cerrado em Minas Gerais, Brasil. *Rev Bras Zool* 18:289–305. <https://doi.org/10.1590/S0101-81752001000500025>
- Gonçalves-Alvim SJ, Fernandes GW (2001b) Biodiversity of galling insects: historical, community and habitat effects in four neotropical savannas. *Biodivers Conserv* 10:1 10:79–98. <https://doi.org/10.1023/A:1016602213305>
- Grandez-Rios JM, Pizango CGH, Araújo WS (2020) Insights into super-host plant species of galling insects in the Neotropical region. *Open Biol J* 8:66–7. <https://doi.org/10.2174/1874196702008010066>
- Hebert PDN, Ratnasingham S, Zakharov E v., et al (2016) Counting animal species with DNA barcodes: Canadian insects. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci* 371: <https://doi.org/10.1098/RSTB.2015.0333>
- Hedges SB, Kumar S (2009) *The Time Tree of Life*. Oxford University Press, New York

- Isaias RMS, Carneiro RGS, Oliveira DC, Santos JC (2013) Illustrated and annotated checklist of Brazilian gall morphotypes. *Neotrop Entomol* 42:230–239. <https://doi.org/10.1007/S13744-013-0115-7>
- Klink CA, Machado RB (2005) Conservation of the Brazilian Cerrado. *Conserv Biol* 19:707–713. <https://doi.org/10.1111/J.1523-1739.2005.00702.X>
- Lara ACF, Fernandes GW (1996) The highest diversity of galling insects: Serra do Cipó, Brazil. *Biodivers Lett* 3:111–114. <https://doi.org/10.2307/2999724>
- Maia VC, Fernandes GW (2004) Insect galls from Serra de São José (Tiradentes, MG, Brazil). *Braz J Biol* 64:423–445. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842004000300007>
- Maia VC, Rodrigues AR, Ascendino SHS, Boggi M (2014) The insect gall collection of the Museu Nacional/Universidade Federal do Rio de Janeiro: biome cerrado, rupestrian fields. *Braz J Biol* 74:207–217. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.28012>
- Maldonado-López Y, Cuevas-Reyes P, Oyama K (2015) Diversity of gall wasps (Hymenoptera: Cynipidae) associated with oak trees (Fagaceae: *Quercus*) in a fragmented landscape in Mexico. *Arthropod Plant Interact* 10:1 10:29–39. <https://doi.org/10.1007/S11829-015-9404-X>
- Malves K, Friero-Costa FA (2012) List of plants with galls induced by insects from the UNILAVRAS/Boqueirão Biological Reserve, Ingaí, state of Minas Gerais, Brazil. *Check List* 8:426–431. <https://doi.org/10.15560/8.3.426>
- Mendonça Jr MS (2001) Galling insect diversity patterns: the resource synchronisation hypothesis. *Oikos*, 95:171–176. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2001.950120.x>
- Mendonça Jr MS (2007) Plant diversity and galling arthropod diversity searching for taxonomic patterns in an animal-plant interaction in the Neotropics. *Bol Soc Argent Bot* 42:347–357
- Mendonça RC, Felfili JM, Walter BMT, et al (2008) Flora vascular do bioma Cerrado: Checklist com 12.356 espécies. In: Sano SM., Almeida SP, Ribeiro JF (eds) *Cerrado: ecologia e flora*. Embrapa, Brasília, pp 421–1279
- Meyer ST, Scheithe L, Hertzog L, et al (2017) Consistent increase in herbivory along two experimental plant diversity gradients over multiple years. *Ecosphere* 8:e01876. <https://doi.org/10.1002/ECS2.1876>
- Miller DG, Raman A (2019) Host–plant relations of gall-inducing insects. *Ann Entomol Soc Am* 112:1–19. <https://doi.org/10.1093/AESA/SAY034>

- Mittelbach GG, Schemske DW, Cornell HV, Allen, et al (2007) Evolution and the latitudinal diversity gradient: speciation, extinction and biogeography. *Ecol Lett* 10:315–331. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2007.01020.x>
- Myers N, Mittermeyer RA, Mittermeyer CG, et al (2000) Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403:853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Oliveira PS, Marquis RJ (2002) The Cerrados of Brazil: ecology and natural history of a neotropical savanna. Columbia University Press, New York
- Oliveira-Filho AT, Ratter JA (2002) Vegetation Physiognomies and Woody Flora of the Cerrado Biome. In: Oliveira PS, Marquis RJ (eds) The Cerrados of Brazil. Columbia University Press, pp 91–120
- Oyama K, Pérez-Pérez MA, Cuevas-Reyes P, Luna-Reyes R (2003) Regional and local species richness of gall-inducing insects in two tropical rain forests in Mexico. *J Trop Ecol* 19:595–598. <https://doi.org/10.1017/S0266467403003651>
- Oyama K, Scareli-Santos C, Mondragón-Sánchez ML, et al (2006) Morphological Variations of Gall-Forming Insects on Different Species of Oaks (*Quercus*) in Mexico. In: Kappelle M (ed) Ecology and Conservation of Neotropical Montane Oak Forests. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 259–269
- Pascual-Alvarado E, Cuevas-Reyes P, Quesada M, Oyama K (2008) Interactions between galling insects and leaf-feeding insects: the role of plant phenolic compounds and their possible interference with herbivores. *J Trop Ecol* 24:329–336. <https://doi.org/10.1017/S0266467408005038>
- Pérez-López G, González-Rodríguez A, Oyama K, Cuevas-Reyes P (2016) Effects of plant hybridization on the structure and composition of a highly rich community of cynipid gall wasps: the case of the oak hybrid complex *Quercus magnoliifolia* x *Quercus resinosa* in Mexico. *Biodivers Conserv* 25:4 25:633–651. <https://doi.org/10.1007/S10531-016-1074-1>
- Pianka E (1974) Evolutionary ecology. Harper and Row, New York
- Price PW (2005) Adaptive radiation of gall-inducing insects. *Basic Appl Ecol* 6:413–421. <https://doi.org/10.1016/J.BAAE.2005.07.002>
- Price PW, Wilson Fernandes G, Lara ACF, et al (1998) Global patterns in local number of insect galling species. *J Biogeogr* 25:581–591. <https://doi.org/10.1046/J.1365-2699.1998.2530581.X>

- R Core Team. 2019. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Ribeiro KT, Madeira JA, Monteiro RF (1998) Does flooding favour galling insects? *Ecol Entomol* 23:491–494. <https://doi.org/10.1046/J.1365-2311.1998.00162.X>
- Shorthouse JD, Wool D, Raman A (2005) Gall-inducing insects – Nature’s most sophisticated herbivores. *Basic Appl Ecol* 6:407–411. <https://doi.org/10.1016/J.BAAE.2005.07.001>
- Sprent P, Smeeton NC (2007) Applied nonparametric statistical methods, 4th edn. Chapman & Hall/CRC
- Stork NE, Lyal CHC (1993) Extinction or “co-extinction” rates? *Nature* 1993 366:6453 366:307–307. <https://doi.org/10.1038/366307a0>
- Strong DR, Lawton JH, Southwood TRE (1984) Insect on plants: community patterns and mechanisms. Backwell Science, London
- Urso-Guimarães M v., Scareli-Santos C (2006) Galls and gall makers in plants from the Pé-de-Gigante Cerrado Reserve, Santa Rita do Passa Quatro, SP, Brazil. *Braz J Biol* 66:357–369. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842006000200018>
- Veldtman R, McGeoch MA (2003) Gall-forming insect species richness along a non-scleromorphic vegetation rainfall gradient in South Africa: The importance of plant community composition. *Austral Ecol* 28:1–13. <https://doi.org/10.1046/J.1442-9993.2003.01234.X>
- Wikström N, Savolainen V, Chase MW (2001) Evolution of the angiosperms: calibrating the family tree. *Proc Biol Sci* 268:2211–2220. <https://doi.org/10.1098/RSPB.2001.1782>
- Wright MG, Samways MJ (1998) Insect species richness tracking plant species richness in a diverse flora: gall-insects in the Cape Floristic Region, South Africa. *Oecologia* 115:427–433. <https://doi.org/10.1007/S004420050537>
- Zappi DC, Ranzato Filardi FL, Leitman P, et al. (2015) Growing knowledge: An overview of Seed Plant diversity in Brazil. *Rodriguésia* 66:1085–1113. <https://doi.org/10.1590/2175-7860201566411>

Supplementary Information

Beyond: an analysis by genus and families of unidentified host plant species

The data paper (see data-paper Cintra et al. 2020) has limited sampled data, because it registered only valid plant species. Obviously, many unidentified species were not included. However, despite these problems, some additional information was obtained. We were able to sample data on plant species with only genus and/or family identified. Thus, we were able to further expand the knowledge of host plants at the level of gender and families. Therefore, we found three more families (Loranthaceae, Monimiaceae and Schoepfiaceae) and another 35 genera (*Aeschynomene*, *Camptosema*, *Cardiopetalum*, *Clidemia*, *Clusia*, *Coussarea*, *Cybianthus*, *Diodia*, *Dolichandra*, *Doliocarpus*, *Emmotum*, *Enterolobium*, *Eriosema*, *Eryngium*, *Euphorbia*, *Galium*, *Gochnatia*, *Jacquemontia*, *Krameria*, *Maytenus*, *Micropholis*, *Paullinia*, *Sebastiania*, *Sloanea*, *Struthanthus*, *Stylosanthes*, *Styrax*, *Swartzia*, *Symplocos*, *Tapura*, *Tetrapteryx*, *Thryallis*, *Tococa*, *Viguiera* and *Zanthoxylum*), which belong to the 56 families, being eight (Apiaceae, Clusiaceae, Dichapetalaceae, Elaeocarpaceae, Krameriaceae, Loranthaceae, Metteniusaceae and Symplocaceae) families not registered among the species with valid names. Finally, 28 morphospecies from 15 families (none other than lists for valid species) and 20 genera (*Ascomium*, *Borreria* and *Paullinia*) were identified as *conferatum* (cf.), and therefore, their species were not confirmed at specific level. This represents an increase of 13% in the total number of families and 14% in the total number of genera in relation to the data from Cintra et al. (2020). Many galls were associated with these plants, about 5 galls in plant identified up to families, 52 in plants identified up to genus and 40 in plants identified as *conferatum*. Obviously, due to the lack of knowledge at a specific level, we cannot determine the number of gall species per plant.

Table 01

Families	HP richness	HP richness (%)	NG	NG (%)	NG/HP
Acanthaceae	1	0.2	2	0.2	2.0
Anacardiaceae	8	1.6	12	1.2	1.5
Annonaceae	12	2.4	20	2.0	1.7
Apocynaceae	9	1.8	11	1.1	1.2
Aquifoliaceae	2	0.4	3	0.3	1.5
Araliaceae	3	0.6	5	0.5	1.7
Asteraceae	104	20.6	248	24.9	2.4
Bignoniaceae	12	2.4	21	2.1	1.8
Bixaceae	1	0.2	1	0.1	1.0
Boraginaceae	3	0.6	10	1.0	3.3
Burseraceae	1	0.2	14	1.4	14.0
Calophyllaceae	5	1.0	12	1.2	2.4
Cannabaceae	3	0.6	9	0.9	3.0
Caryocaraceae	1	0.2	3	0.3	3.0
Celastraceae	3	0.6	3	0.3	1.0
Chrysobalanaceae	7	1.4	10	1.0	1.4
Combretaceae	4	0.8	6	0.6	1.5
Connaraceae	2	0.4	3	0.3	1.5
Convolvulaceae	2	0.4	2	0.2	1.0
Dilleniaceae	3	0.6	6	0.6	2.0
Ebenaceae	1	0.2	3	0.3	3.0
Ericaceae	2	0.4	3	0.3	1.5
Erythroxylaceae	10	2.0	17	1.7	1.7
Euphorbiaceae	15	3.0	22	2.2	1.5
Fabaceae	69	13.7	160	16.1	2.3
Gentianaceae	1	0.2	1	0.1	1.0
Lamiaceae	11	2.2	13	1.3	1.2
Lauraceae	6	1.2	8	0.8	1.3
Loganiaceae	3	0.6	3	0.3	1.0
Lythraceae	5	1.0	7	0.7	1.4
Malpighiaceae	30	5.9	67	6.7	2.2
Malvaceae	10	2.0	23	2.3	2.3
Melastomataceae	25	5.0	43	4.3	1.7
Meliaceae	2	0.4	3	0.3	1.5
Menispermaceae	1	0.2	1	0.1	1.0
Moraceae	1	0.2	1	0.1	1.0
Myristicaceae	1	0.2	1	0.1	1.0
Myrtaceae	35	6.9	60	6.0	1.7
Nyctaginaceae	4	0.8	7	0.7	1.8
Ochnaceae	7	1.4	10	1.0	1.4

Orchidaceae	1	0.2	2	0.2	2.0
Orobanchaceae	1	0.2	1	0.1	1.0
Oxalidaceae	1	0.2	2	0.2	2.0
Pentaphragmaceae	1	0.2	2	0.2	2.0
Piperaceae	1	0.2	2	0.2	2.0
Poaceae	1	0.2	1	0.1	1.0
Polygalaceae	1	0.2	1	0.1	1.0
Polygonaceae	1	0.2	3	0.3	3.0
Primulaceae	3	0.6	5	0.5	1.7
Proteaceae	1	0.2	3	0.3	3.0
Rhamnaceae	1	0.2	1	0.1	1.0
Rubiaceae	14	2.8	18	1.8	1.3
Rutaceae	2	0.4	2	0.2	1.0
Salicaceae	3	0.6	5	0.5	1.7
Santalaceae	1	0.2	1	0.1	1.0
Sapindaceae	11	2.2	15	1.5	1.4
Sapotaceae	3	0.6	5	0.5	1.7
Siparunaceae	1	0.2	12	1.2	12.0
Smilacaceae	5	1.0	6	0.6	1.2
Solanaceae	2	0.4	2	0.2	1.0
Styracaceae	3	0.6	12	1.2	4.0
Trigonaceae	1	0.2	1	0.1	1.0
Turneraceae	1	0.2	1	0.1	1.0
Verbenaceae	9	1.8	14	1.4	1.6
Vitaceae	1	0.2	1	0.1	1.0
Vochysiaceae	9	1.8	21	2.1	2.3
Winteraceae	1	0.2	1	0.1	1.0
Total	505	100	994	100	2

Table 02

Host genera	HP richness	HP richness (%)	NG	NG (%)	NG/HP
<i>Baccharis</i>	44	8.71	141	14.19	3.2
<i>Byrsonima</i>	14	2.77	39	3.92	2.8
<i>Myrcia</i>	12	2.38	26	2.62	2.2
<i>Eugenia</i>	11	2.18	18	1.81	1.6
<i>Bauhinia</i>	10	1.98	37	3.72	3.7
<i>Erythroxylum</i>	10	1.98	17	1.71	1.7
<i>Croton</i>	9	1.78	15	1.51	1.7
<i>Chamaecrista</i>	9	1.78	11	1.11	1.2
<i>Mikania</i>	8	1.58	12	1.21	1.5
<i>Lessingianthus</i>	7	1.39	16	1.61	2.3
<i>Ouratea</i>	7	1.39	10	1.01	1.4
<i>Microlicia</i>	7	1.39	8	0.80	1.1
<i>Banisteriopsis</i>	6	1.19	10	1.01	1.7
<i>Aspidosperma</i>	6	1.19	8	0.80	1.3
<i>Annona</i>	6	1.19	7	0.70	1.2
<i>Qualea</i>	5	0.99	15	1.51	3.0
<i>Miconia</i>	5	0.99	11	1.11	2.2
<i>Lychnophora</i>	5	0.99	9	0.91	1.8
<i>Serjania</i>	5	0.99	9	0.91	1.8
<i>Inga</i>	5	0.99	8	0.80	1.6
<i>Psidium</i>	5	0.99	8	0.80	1.6
<i>Lippia</i>	5	0.99	7	0.70	1.4
<i>Smilax</i>	5	0.99	6	0.60	1.2
<i>Ocotea</i>	5	0.99	5	0.50	1.0
<i>Copaifera</i>	4	0.79	33	3.32	8.3
<i>Andira</i>	4	0.79	10	1.01	2.5
<i>Pleroma</i>	4	0.79	9	0.91	2.3
<i>Aspilia</i>	4	0.79	7	0.70	1.8
<i>Handroanthus</i>	4	0.79	7	0.70	1.8
<i>Kielmeyera</i>	4	0.79	7	0.70	1.8
<i>Diplusodon</i>	4	0.79	6	0.60	1.5
<i>Calliandra</i>	4	0.79	5	0.50	1.3
<i>Machaerium</i>	4	0.79	5	0.50	1.3
<i>Psychotria</i>	4	0.79	5	0.50	1.3
<i>Styrax</i>	3	0.59	12	1.21	4.0
<i>Eriotheca</i>	3	0.59	9	0.91	3.0
<i>Chromolaena</i>	3	0.59	8	0.80	2.7
<i>Eremanthus</i>	3	0.59	8	0.80	2.7
<i>Sida</i>	3	0.59	8	0.80	2.7
<i>Hymenaea</i>	3	0.59	7	0.70	2.3

<i>Davilla</i>	3	0.59	6	0.60	2.0
<i>Guapira</i>	3	0.59	6	0.60	2.0
<i>Symphyopappus</i>	3	0.59	6	0.60	2.0
<i>Myrsine</i>	3	0.59	5	0.50	1.7
<i>Schefflera</i>	3	0.59	5	0.50	1.7
<i>Tibouchina</i>	3	0.59	5	0.50	1.7
<i>Hirtella</i>	3	0.59	4	0.40	1.3
<i>Licania</i>	3	0.59	4	0.40	1.3
<i>Stachytarpheta</i>	3	0.59	4	0.40	1.3
<i>Stryphnodendron</i>	3	0.59	4	0.40	1.3
<i>Campomanesia</i>	3	0.59	3	0.30	1.0
<i>Strychnos</i>	3	0.59	3	0.30	1.0
<i>Cordia</i>	2	0.40	9	0.91	4.5
<i>Celtis</i>	2	0.40	8	0.80	4.0
<i>Gochnatia</i>	2	0.40	6	0.60	3.0
<i>Anadenanthera</i>	2	0.40	5	0.50	2.5
<i>Fridericia</i>	2	0.40	5	0.50	2.5
<i>Mimosa</i>	2	0.40	5	0.50	2.5
<i>Xylopia</i>	2	0.40	5	0.50	2.5
<i>Anacardium</i>	2	0.40	4	0.40	2.0
<i>Casearia</i>	2	0.40	4	0.40	2.0
<i>Peixotoa</i>	2	0.40	4	0.40	2.0
<i>Pouteria</i>	2	0.40	4	0.40	2.0
<i>Terminalia</i>	2	0.40	4	0.40	2.0
<i>Trichogonia</i>	2	0.40	4	0.40	2.0
<i>Vochysia</i>	2	0.40	4	0.40	2.0
<i>Astronium</i>	2	0.40	3	0.30	1.5
<i>Gaylussacia</i>	2	0.40	3	0.30	1.5
<i>Heteropterys</i>	2	0.40	3	0.30	1.5
<i>Ilex</i>	2	0.40	3	0.30	1.5
<i>Senegalia</i>	2	0.40	3	0.30	1.5
<i>Achyrocline</i>	2	0.40	2	0.20	1.0
<i>Callisthene</i>	2	0.40	2	0.20	1.0
<i>Cantinoa</i>	2	0.40	2	0.20	1.0
<i>Cordia</i>	2	0.40	2	0.20	1.0
<i>Manihot</i>	2	0.40	2	0.20	1.0
<i>Matayba</i>	2	0.40	2	0.20	1.0
<i>Moquiniastrum</i>	2	0.40	2	0.20	1.0
<i>Myrciaria</i>	2	0.40	2	0.20	1.0
<i>Pseudobrickellia</i>	2	0.40	2	0.20	1.0
<i>Tachigali</i>	2	0.40	2	0.20	1.0
<i>Trembleya</i>	2	0.40	2	0.20	1.0
<i>Protium</i>	1	0.20	14	1.41	14.0

<i>Siparuna</i>	1	0.20	12	1.21	12.0
<i>Calophyllum</i>	1	0.20	5	0.50	5.0
<i>Duguetia</i>	1	0.20	5	0.50	5.0
<i>Diplopterys</i>	1	0.20	4	0.40	4.0
<i>Amorimia</i>	1	0.20	3	0.30	3.0
<i>Bowdichia</i>	1	0.20	3	0.30	3.0
<i>Caryocar</i>	1	0.20	3	0.30	3.0
<i>Coccoloba</i>	1	0.20	3	0.30	3.0
<i>Cyrtocymura</i>	1	0.20	3	0.30	3.0
<i>Diospyros</i>	1	0.20	3	0.30	3.0
<i>Hololepis</i>	1	0.20	3	0.30	3.0
<i>Hyptidendron</i>	1	0.20	3	0.30	3.0
<i>Lantana</i>	1	0.20	3	0.30	3.0
<i>Luehea</i>	1	0.20	3	0.30	3.0
<i>Marcetia</i>	1	0.20	3	0.30	3.0
<i>Nectandra</i>	1	0.20	3	0.30	3.0
<i>Piptadenia</i>	1	0.20	3	0.30	3.0
<i>Piptocarpha</i>	1	0.20	3	0.30	3.0
<i>Roupala</i>	1	0.20	3	0.30	3.0
<i>Blepharocalyx</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Chomelia</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Connarus</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Couepia</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Dalbergia</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Dipteryx</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Epidendrum</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Guettarda</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Jacaranda</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Leandra</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Lepidaploa</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Leptolobium</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Lithraea</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Macairea</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Maprounea</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Oxalis</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Palicourea</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Peltogyne</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Periandra</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Piper</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Platymiscium</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Pyrostegia</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Ruellia</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Tabebuia</i>	1	0.20	2	0.20	2.0

<i>Ternstroemia</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Trichilia</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Vernonanthura</i>	1	0.20	2	0.20	2.0
<i>Acritopappus</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Aegiphila</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Ageratum</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Agrianthus</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Alibertia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Amphilophium</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Anemopaegma</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Bocageopsis</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Bredemeyera</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Brosimum</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Buchenavia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Buchnera</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Bunchosia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Calolisianthus</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Capsicum</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Cassia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Cheiloclinium</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Chrysophyllum</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Chusquea</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Cissampelos</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Cissus</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Cochlospermum</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Combretum</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Cupania</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Cuphea</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Cyanocephalus</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Dasyphyllum</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Deguelia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Dimorphandra</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Drimys</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Eriope</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Eumachia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Galipea</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Grazielia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Guarea</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Gutteria</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Guazuma</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Heterocondylus</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Himatanthus</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Hyptis</i>	1	0.20	1	0.10	1.0

<i>Ipomoea</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Lavoisiera</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Leonotis</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Lonchocarpus</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Lourteigia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Lychnophoriopsis</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Mabea</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Magonia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Mascagnia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Medusantha</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Merremia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Mesosphaerum</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Metrodorea</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Microstachys</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Minaria</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Myracrodruon</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Neea</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Oocephalus</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Phoradendron</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Piptolepis</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Piriqueta</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Plenckia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Plinia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Porophyllum</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Prestonia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Prockia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Pseudobombax</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Pseudopiptadenia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Pterandra</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Randia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Remijia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Rhamnidium</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Rollinia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Rourea</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Sabicea</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Salacia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Sapium</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Schinus</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Senna</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Sidastrum</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Solanum</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Stigmaphyllon</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Talisia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0

<i>Tanaecium</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Tapirira</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Toulicia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Trema</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Trigonia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Vachellia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Varronia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Verbesina</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Vernomia</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
<i>Virola</i>	1	0.20	1	0.10	1.0
Total	505	100	994	100	

CAPÍTULO III

O QUE EXPLICA A COLONIZAÇÃO DAS GALHAS POR OCUPANTES SECUNDÁRIOS?

Fernanda Cristina Franco Cintra¹ & Jean Carlos Santos²

¹ Programa de Pós-Graduação em Entomologia, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil.

² Departamento de Ecologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

O que explica a colonização das galhas por ocupantes secundários?

Fernanda Cristina Franco Cintra¹ & Jean Carlos Santos²

Resumo

Os insetos galhadores podem ser encontrados em várias partes da planta, alterando a morfologia do órgão atacado. São capazes de controlar a morfologia da planta produzindo uma enorme variedade de estruturas com características próprias, como formato, tamanho, cor e pilosidade, conhecidas como galhas. Essas características, aliadas à promoção de um sítio seguro para proteção contra condições ambientais adversas, proporcionam micro-habitats atrativos para uma diversidade de organismos quando a galha é abandonada pelo indutor. Neste sentido, os insetos galhadores desempenham um importante papel como engenheiros de ecossistemas. Estudos no Cerrado brasileiro mostraram uma relação positiva entre o volume das galhas e a sua ocupação por formigas, demonstrando a importância dessas estruturas como facilitadoras para organismos secundários. Diante disso, este estudo teve como objetivo compreender quais são os fatores que levam a ocupação das galhas induzidas por insetos em plantas hospedeiras do bioma Cerrado respondendo às seguintes perguntas: (1) ao selecionar as galhas para ocupação, os artrópodes exibem preferência em relação a alguma característica morfológica da galha? e (2) existe algum efeito sazonal ou ambiental relacionado a ocupação das galhas? As plantas hospedeiras foram amostradas mensalmente em três áreas de cerrado entre junho de 2019 e fevereiro de 2020. Em cada planta amostrada, foram selecionadas cinco galhas aleatoriamente para contabilizar a ocupação e caracterizar quanto às características morfológicas. Foram amostrados ocupantes secundários em 7,4% (n=94) das 1.273 galhas inspecionadas. Além disso, foram encontrados 543 ocupantes secundários, distribuídos em 80 morfoespécies, sendo Formicidae o grupo mais abundante, correspondendo cerca de 69% de todos os artrópodes encontrados. Em relação às características morfológicas das galhas, houve uma relação positiva entre o volume das galhas e a presença de ocupantes secundários. Os artrópodes também preferiram, galhas com tricomas, caulinares e com os formatos globoide, cilíndrico e fusiforme. A sazonalidade não influenciou na ocupação das galhas por artrópodes, e o local de coleta mais conservado apresentou um maior número de galhas colonizadas. Os resultados destacam a importância dos insetos galhadores como engenheiros de ecossistemas no Cerrado, proporcionando micro-habitats para artrópodes, especialmente formigas.

Palavras-chave: Galhas de insetos, galhadores, engenheiros de ecossistemas, ocupantes secundários, Cerrado.

Introdução

As espécies interagem de diversas formas nos ecossistemas e o hábito de indução de galhas é reconhecido como uma das interações mais complexas (Shorthouse et al. 2005). A indução é caracterizada pelo aumento no volume celular (hipertrofia celular), e/ou no número de células (hiperplasia celular), em tecidos dos órgãos das plantas hospedeiras (Price et al. 1987). As galhas podem ser induzidas principalmente por insetos (Santos et al. 2012), mas também por outros organismos, como, vírus, bactérias, fungos (Harris & Pitzschke, 2020), nematoides (Pereira et al. 2021), e ácaros (Novais et al. 2020). Nos insetos essa habilidade evoluiu de forma independente em táxons diferentes dentro de seis ordens, são elas: Diptera, Hemiptera, Hymenoptera, Coleoptera, Thysanoptera e Lepidoptera (Price, 2005; Shorthouse et al. 2005).

Os insetos galhadores podem ser encontrados em várias partes da planta, em partes vegetativas, como folhas, caules e raízes (Stone & Schönrogge, 2003; Carneiro et al. 2009) e partes reprodutivas, tais como flores e frutos (Raman et al. 2005). Ao se desenvolverem dentro de uma câmara da galha, os indutores são beneficiados com a manipulação do metabolismo da planta, resultando em uma melhoria na qualidade nutricional do tecido (Fernandes et al. 2014). Além disso, as galhas proporcionam um ambiente seguro para a alimentação, proteção contra os inimigos naturais e condições ambientais adversas (Shorthouse et al. 2005; Raman et al. 2005). O processo de formação das galhas induzidas por insetos, promove mudanças morfológicas e fisiológicas nas plantas, que ocorrem logo após a fêmea do inseto indutor depositar seus ovos no tecido da planta hospedeira (Höglund, 2014). Dessa forma a galha pode ser considerada uma entidade fenotípica, resultado da interação entre o genótipo do inseto, o genótipo da planta e o ambiente (Weis et al. 1988; Abrahamson & Weis, 1997). Os insetos galhadores apresentam alta especificidade em relação à planta hospedeira e ao órgão da planta (Price et al. 1987; Araújo et al. 2017). Há evidências de que uma espécie de inseto galhador, em geral, induz galhas em apenas uma espécie

de planta ou em grupos de espécies muito próximas filogeneticamente (Floate et al. 1996; Carneiro et al. 2009). Ainda, indutores de galhas são capazes de controlar a morfologia da galha produzindo uma enorme variedade de estruturas com características próprias (como forma, tamanho, cor e pilosidade) (Stone & Schönrogge, 2003; Isaias et al. 2013), alterando a arquitetura do órgão atacado e até da planta inteira (Gonçalves-Alvim et al. 1999; Crutsinger et al. 2008).

Nos ecossistemas, as espécies que são capazes de modificar a estrutura do ambiente são definidas como engenheiras de ecossistemas (Jones et al. 1994, 1997). De modo que podem controlar direta ou indiretamente a disponibilidade de recursos utilizados por outras espécies por meio da manutenção ou criação de novos habitats (Jones et al. 1997). Neste contexto, a engenharia de ecossistemas pode ser considerada como um tipo de interação positiva facilitadora, que envolve relações não tróficas entre espécies (Jones & Gutiérrez 2007). Nesses casos pelo menos um dos organismos se beneficia das interações e não causa prejuízo aos outros envolvidos (Stachowicz 2001). Neste sentido, os insetos galhadores desempenham o papel de engenheiros de micro-habitats (Sanver & Hawkins, 2000). As galhas podem ser um recurso atraente para uma diversidade de organismos, como por exemplo, predadores, parasitóides, inquilinos, cecidófagos e cleptoparasitas, os quais podem interagir com o indutor (Maia & Fernandes, 2004; Sugiura & Yamazaki, 2009; Luz & Mendonça-Júnior, 2019) além disso, após o abandono do indutor, as galhas podem fornecer um novo habitat a ser explorado por herbívoros, onívoros e predadores (Sanver & Hawkins, 2000; Sugiura & Yamazaki, 2009; Cornelissen et al. 2016).

Vários organismos podem interagir diretamente com o inseto indutor da galha, dentre eles, os predadores e parasitóides, sendo o último, um dos maiores responsáveis pela mortalidade do indutor (Luz & Mendonça-Júnior, 2019). Insetos e aves podem ser predadores do indutor de galhas (Craig et al. 2007), enquanto os parasitóides, especialmente vespas parasitóides (Espírito-Santo et

al. 2004), são conhecidas por atacar os indutores imaturos de galhas (Stone et al. 2002). Já os inquilinos e os cecidófagos, são organismos herbívoros que se alimentam do tecido das galhas. A diferença entre eles está na proximidade filogenética que existe entre galhadores e inquilinos (Mani, 1964), e na habilidade que alguns inquilinos possuem em modificar os tecidos da galha e estimular a produção de novos tecidos (Luz & Mendonça-Júnior, 2019; Maia, 2022), e que não é compartilhada por cecidófagos (Sugiura & Yamazaki, 2009). Os cleptoparasitas também interagem diretamente com o indutor, mas diferentemente dos cecidófagos e inquilinos, quando não afugentam os indutores, podem matá-los demonstrando hábitos onívoros (Mound & Morris 2000; Luz et al. 2015; Luz & Mendonça-Júnior, 2019).

Estudos anteriores mostraram uma relação positiva entre a ocupação de galhas por formigas em relação ao volume e o formato das galhas no Cerrado, por exemplo, Almeida et al. (2014) e Santos et al. (2017), que avaliaram a ocupação de galhas fusiformes induzidas por dípteros (Tephritidae), e de galhas globoides induzidas por dípteros (Cecidomyiidae) em plantas de *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish (Asteraceae). O Cerrado brasileiro é o ambiente modelo adequado para testar a hipótese de que insetos galhadores atuam como engenheiros de ecossistemas devido à sua grande diversidade de galhas. De acordo com Cintra et al. (2020), no Cerrado existem cerca de 968 morfotipos de galhas distribuídos em 505 espécies de plantas hospedeiras. Até o momento, estudos que avaliaram a presença de ocupantes secundários foram conduzidos especificamente abordando um único sistema (planta hospedeira e inseto galhador), o que impedia compreender quais são as características comuns às galhas engenheiras de ecossistemas em vários sistemas. Neste sentido, este estudo teve como objetivo compreender quais são os fatores que levam a ocupação das galhas induzidas por insetos em plantas hospedeiras do bioma Cerrado, respondendo as seguintes perguntas: O que caracteriza as galhas como engenheiras

de ecossistemas? Ou seja, ao selecionar as galhas para ocupação, os artrópodes exibem preferência em relação a alguma característica morfológica da galha? Para responder essa pergunta foi hipotetizado que: 1) As características morfológicas das galhas determinam que elas possam ser engenheiras de ecossistemas. Para testar a hipótese, foram elaboradas as seguintes previsões: i) quanto maior o volume da galha maior a taxa de ocupação por artrópodes; ii) a presença/ausência de tricomas, o formato das galhas, e o órgão de ocorrência (folha ou caule), afetam a taxa de ocupação por artrópodes; iii) a presença ou ausência do indutor influencia a ocupação por artrópodes das galhas; e iv) quanto maior o número de câmaras internas, maior será a taxa de ocupação por artrópodes; e 2) existe efeito sazonal e ambiental na ocupação das galhas por artrópodes. Para testar a hipótese, foram elaboradas as seguintes previsões: i) no período chuvoso haverá uma maior ocupação das galhas por artrópodes, em detrimento do período seco; e ii) O tipo de habitat influenciará a taxa de ocupação das galhas por artrópodes.

Material e métodos

Área de estudo

As coletas foram realizadas mensalmente em três áreas localizadas sob o domínio do Cerrado, no estado de Minas Gerais, Brasil. As plantas hospedeiras e suas respectivas galhas foram amostradas em três áreas de cerrado: i) Clube Caça e Pesca Itororó de Uberlândia (CCPIU), na cidade de Uberlândia (18°59'S, 48°18'W), que possui vegetação caracterizada como cerrado strictu sensu, predominantemente arbustiva, com algumas espécies arbóreas em uma área de 230 ha (Figura 1a); ii) na Fazenda Experimental do Campus Glória (FECG), que pertence a Universidade Federal de Uberlândia, na cidade de Uberlândia (18°57'26"S, 48°12'31"W) que abriga um fragmento de floresta estacional semidecidual de 30 ha (Lopes *et al.* 2011) (Figura 1b); e iii) Fazenda Particular (FP), em Prata (18°56'22"S, 49°11'53"W), que abriga um fragmento de vegetação de 35 ha com predominância de espécies arbóreas, com a formação de dossel contínuo (cerradão), e que faz transição para estratos arbóreos e arbustivo-herbáceos (cerrado strictu sensu)(Figura 1c). O clima na região é do tipo Aw segundo a classificação climática de Köppen, visto que é caracterizado por apresentar duas estações bem definidas, uma chuvosa de outubro a março, e uma seca de abril a setembro, com precipitação anual de 1.500 mm e a temperatura média de 22°C (Alvares *et al.* 2013).

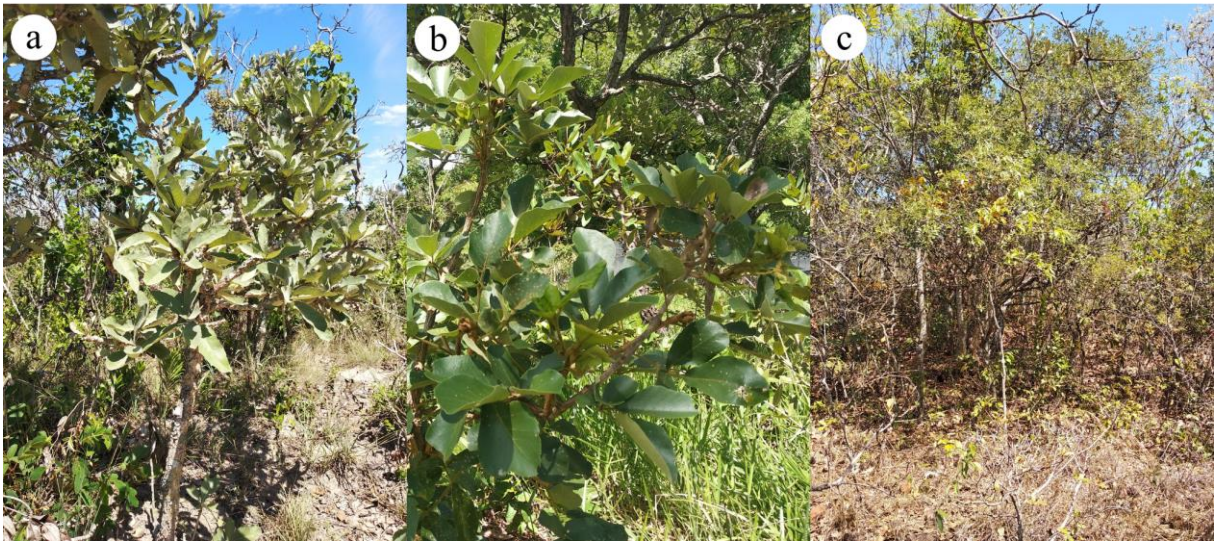


Figura 1. Áreas onde foram realizadas as coletas. a) Clube Caça e Pesca Itororó de Uberlândia (CCPIU); b) Fazenda Experimental do Campus Glória (FECG); c) Fazenda Particular (FP). As três áreas estão localizadas sob o domínio do bioma Cerrado, no estado de Minas Gerais, Brasil.

Coleta de dados

Para entender quais são os fatores que influenciam a ocupação das galhas por outros artrópodes, foi realizado entre os meses de junho de 2019 e fevereiro de 2020 um levantamento da diversidade de galhas (induzidas por insetos) para cada área do estudo. Para a amostragem das galhas foi adotada a mesma metodologia para as três áreas, com caminhadas aleatórias de quatro horas cada, por área durante oito meses (Price et al. 1998), sendo, sete amostragens no CCPIU, cinco amostragens na FECG, e seis amostragens na FP, totalizando 72 horas de esforço amostral. Foram selecionadas as plantas que apresentavam galhas, e para cada planta hospedeira amostrada, selecionamos cinco galhas aleatoriamente que foram coletadas e imediatamente acondicionadas em sacos plásticos. No laboratório as galhas foram caracterizadas pela presença ou ausência de tricomas (glabras ou pubescentes), tipo de ocorrência (isolada ou agrupada), forma, cor, planta hospedeira e órgão vegetal atacado seguindo a metodologia descrita por Fernandes & Price (1988) e Price et al. (1998). Posteriormente as galhas foram medidas com o auxílio de um paquímetro

digital (MTX) (erro: $\pm 0,01\text{mm}$). Para determinar o volume das galhas tomamos as medidas do maior diâmetro, menor diâmetro e altura, para calcular o volume esférico das galhas globoides e discoides ($V = 4/3\pi r^3$), o volume cilíndrico das galhas fusiformes e cilíndricas ($V = r^2h\pi$), e o volume cônico para as galhas cônicas ($V=1/3h\pi r^2$), esta metodologia é uma adaptação do trabalho de Almeida et al. (2014). Além disso, as galhas foram dissecadas em laboratório para obtenção dos indutores (quando presentes) e ocupantes secundários, que foram morfoespeciados a nível de ordem e quando possível família. Os ocupantes secundários das galhas foram quantificados e morfoespeciados para cada galha. Adicionalmente, durante o período de amostragem, todas as plantas hospedeiras com galhas tiveram os ramos fotografados e coletados, assim como ramos não atacados foram coletados para identificação da planta hospedeira.

Análises estatísticas

Para avaliar quais características, morfológicas e ambientais, das galhas amostradas influenciam na presença e ausência de ocupantes secundários em galhas, utilizamos os Modelos Lineares Generalizados Mistos (GLMMs, Bates et al. 2015) com distribuição de erro binomial, onde a variável resposta para todas as análises foi binária (presença ou ausência de ocupantes secundários nas galhas de insetos). As amostragens mensais foram ajustadas como efeito aleatório para controlar a dependência temporal e espacial dos dados. Como variáveis explicativas consideramos as características morfológicas das galhas (volume, formato, número de câmaras internas, e presença de tricomas), órgão de ocorrência (folha ou caule), presença ou ausência do indutor, e as características ambientais, estação do ano (seca ou chuvosa) e o local de coleta (CCPIU, FECG ou FP). Para obter o modelo mais adequado, realizamos simplificações dos modelos por meio da remoção dos efeitos fixos não significativos. A significância foi estimada

entre o modelo completo (H1) e o modelo nulo (H0). Sempre que necessário foi realizada a análise de Tukey para comparar as médias par-a-par (pacote emmeans; Lenth R 2023). Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software RStudio versão 4.3.0 (RStudio Team, 2020). Os modelos GLMMs foram construídos utilizando o pacote "lme4" e a função "glmer" (Bates et al. 2015).

Resultados

No estudo, ao total foram inspecionadas 1.273 galhas, que estavam presentes em 230 plantas hospedeiras, distribuídas em 128 espécies de plantas, e 189 morfotipos de galhas. Foram encontrados ocupantes secundários em 7,4% das galhas amostradas (n=94), distribuídos em 43 morfotipos, em 34 espécies de plantas hospedeiras (Figura 2). Em relação aos ocupantes secundários, foram encontrados 543 artrópodes, divididos em 80 morfoespécies. Os artrópodes mais encontrados nas galhas foram, Hymenoptera (76,79%; 31 spp.), que dentro dessa ordem foram majoritariamente representados por Formicidae (68,69%; 11 spp.), seguido de Hemiptera (5,34%; 10 spp.), Polyxenida (4,42%; 4 spp.), Thysanoptera (3,50%; 6 spp.), Lepidoptera (1,84%; 5 spp.), Acari (1,47%; 6 spp.), Collembola (1,29%; 4 spp.), e as outras ordens [Orthoptera (2 spp.), Coleoptera (4 spp.), Blattodea (3 spp.), Psocoptera (1 spp.), Diptera (2 spp.) e Araneae (2 spp.)] e outros insetos que não puderam ser morfoespeciados (8 indivíduos), que juntas somaram 5,34%. Quanto às plantas hospedeiras, as três espécies em que encontramos o maior número de galhas com ocupantes secundários foram: *Diospyros hispida* A.DC. (Ebenaceae) (n=16; 17,02%), seguida de *Bauhinia brevipes* Vogel (Fabaceae) (n=10; 10,64%), e *Byrsonima sericea* DC. (Malpighiaceae) (n=8; 8,51%).



Figura 2. Esquema representando a colonização por artrópodes das galhas abandonadas do Cerrado, Minas Gerais, Brasil.

As análises mostraram uma relação positiva entre o volume das galhas e a presença de ocupantes secundários nas galhas ($\chi^2=51,773$; $p<0,001$; Tabela 1; Figura 3a-b). Quanto às características morfológicas, as galhas com tricomas foram mais ocupadas (54,26%; $n= 51$), que as galhas glabras (45,74%; $n=43$) ($\chi^2=5,389$; $p=0,020$; Tabela 1; Figura 4a), apesar das galhas glabras representarem 57,74% da amostragem total, enquanto as galhas com tricomas representaram 42,26%. Em relação ao órgão de ocorrência, a porcentagem de galhas foliares amostradas foi de 75,57%, enquanto das galhas caulinares foi de 24,43%, em contrapartida, os artrópodes ocuparam preferencialmente as galhas caulinares (68%; $n= 64$), em segundo lugar as galhas foliares (32%; $n=30$) ($\chi^2= 48,631$; $p<0,001$; Tabela 1; Figura 4b). Quanto ao formato das

galhas, as mais presentes na amostragem foram as globoides (45,95%) e discoides (29,38%), seguido das fusiformes (12,57%), cilíndricas (6,76%) e cônicas (5,34%). Em relação ao formato, os artrópodes ocuparam preferencialmente as galhas globoides (68,09%; n= 64), seguido das galhas fusiformes (11,70%; n=11), e cilíndricas (8,51%; n=8), e os demais formatos (cônica e discoide) somaram juntos (11,70%; n= 11) ($\chi^2=30,078$; $p<0,001$; Tabela 1; Figura 4c).

Outras características morfológicas das galhas não apresentaram influência na presença ou ausência de ocupantes secundários são elas: a forma de ocorrência da galha (isolada ou agrupada) ($\chi^2=0,023$; $p=0,879$; Tabela 1), e o número de câmaras internas (unilocular, bilocular ou multilocular) ($\chi^2=2,141$; $p=0,543$; Tabela 1). Apesar de 80% das galhas ocupadas não contarem com a presença do indutor, a presença/ausência deste não influenciou na ocupação das galhas por outros artrópodes ($\chi^2= 0,758$; $p=0,383$; Tabela 1), e nem o período em que as galhas foram coletadas (estação seca ou chuvosa) ($\chi^2=0,953$; $p=0,328$; Tabela 1). Por fim, em relação ao local em que as galhas foram amostradas, as galhas coletadas no CCPIU correspondem a 38,65% do total de galhas amostradas, as coletadas na FP correspondem a 36,92%, e as coletadas na FECCG correspondem 24,46%. De forma oposta ao amostrado, encontramos um maior número de galhas ocupadas na FP (65%; n= 61), seguido do CCPIU (22%; n=21), e da FECCG (13%; n=12) ($\chi^2= 7,449$; $p=0,024$; Tabela 1, Figura 4d).

Tabela 1: Resultados dos Modelos Lineares Generalizados Mistos (GLMMs) testando o efeito das características das galhas sobre a presença/ausência de ocupantes secundários em galhas de insetos no Cerrado.

Variável resposta	Variável explicativa	Distribuição	GL	Deviance	Qui-Quadrado	AIC	p-Value
Presença/ausência de ocupantes secundários	Presença/ausência do indutor	Binomial	34	523,58	0,758	557,58	0,383
	Local de coleta	Binomial	32	524,34	7,449	556,34	0,024*
	Período (seco/chuvoso)	Binomial	28	531,79	0,953	559,79	0,328
	Ocorrência (isolada/agrupada)	Binomial	26	532,74	0,023	558,74	0,879
	Presença/ausência de tricomas	Binomial	24	532,77	5,389	556,77	0,020*
	Órgão de ocorrência (folha/caule)	Binomial	22	538,15	48,631	560,15	> 0,001*
	Quantidade de câmaras internas	Binomial	20	586,79	2,141	606,79	0,543
	Formato da galha	Binomial	14	588,93	30,078	602,93	> 0,001*
	Volume (cm ³)	Binomial	6	619,01	51,773	625,01	> 0,001*

Legenda: * valores estatisticamente significativos ($p < 0,05$);

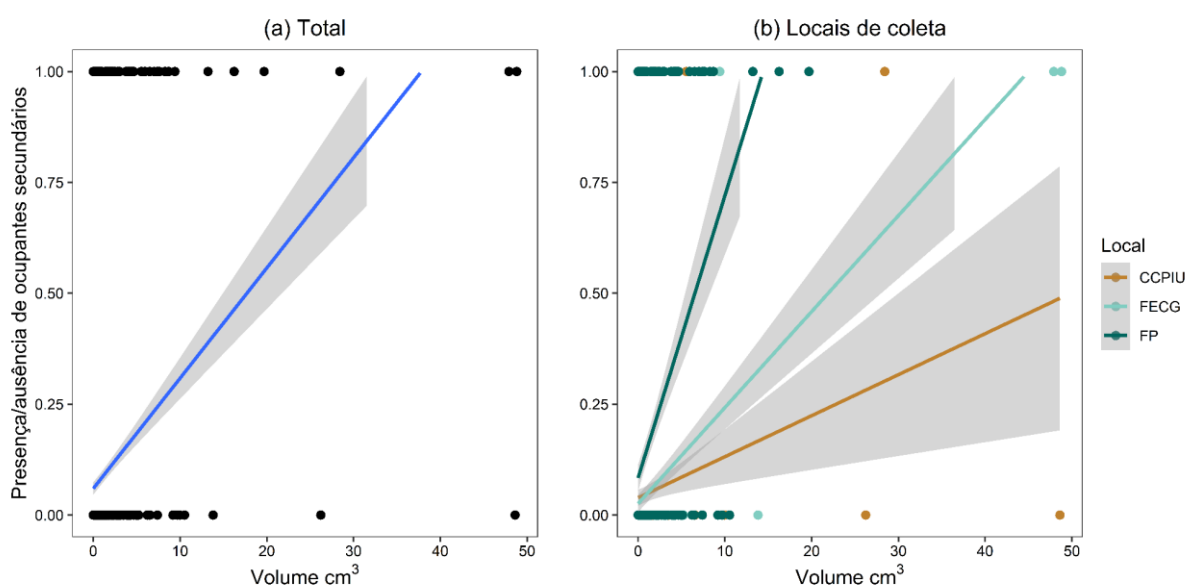


Figura 3. Presença/ausência de ocupantes secundários em relação ao volume (cm³) em galhas do Cerrado, Minas Gerais, Brasil. (a) Representa a relação para as galhas amostradas em todos os locais, e (b) separado por local de coleta (CCPIU, FECG e FP). No eixo Y, o número zero (0) indica a ausência, e o número um (1) indica a presença. Foi considerado estatisticamente significativo $p < 0,05$.

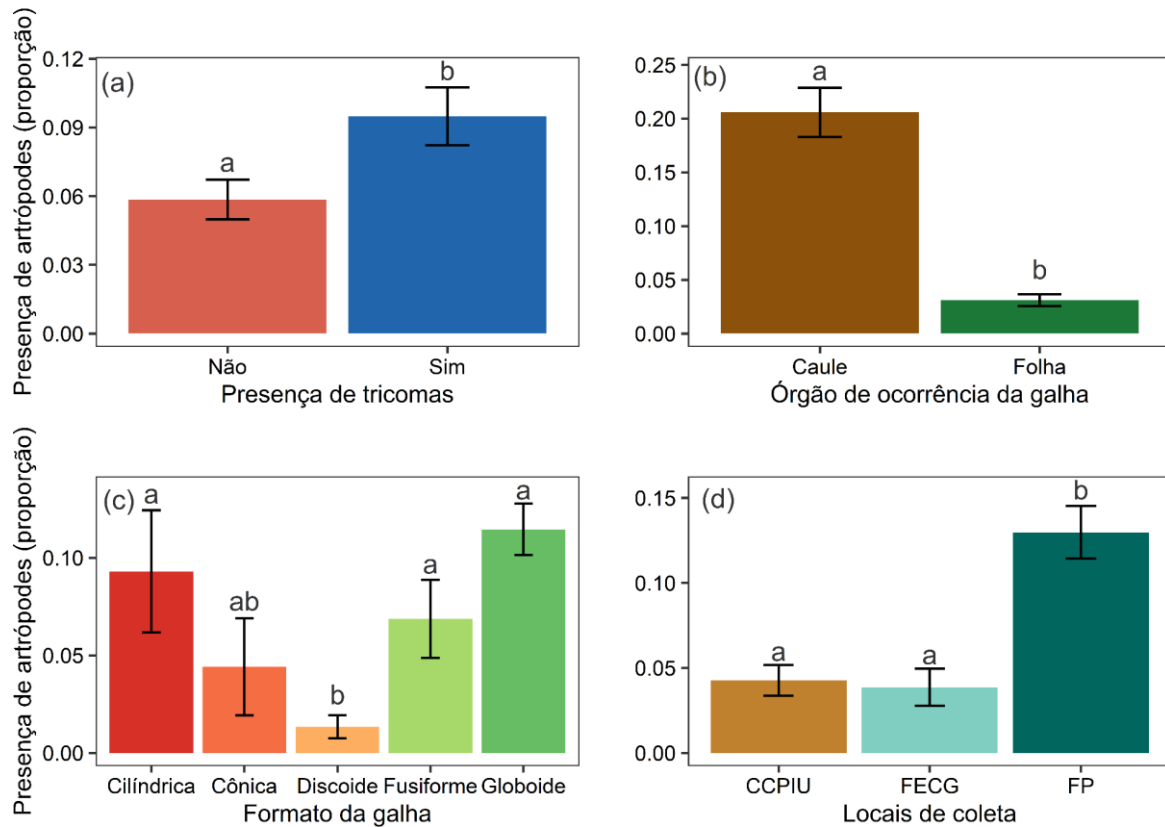


Figura 4. Presença de artrópodes (ocupantes secundários) em relação: (a) ausência e presença de tricomas em galhas; (b) em relação ao órgão de ocorrência da galha na planta (caule ou folha); (c) em relação ao formato da galha (cilíndrica, cônica, discoide, fusiforme ou globoide); (d) em relação ao local de coleta das galhas, (CCPIU, FECG e FP) no Cerrado, Minas Gerais, Brasil. O eixo Y, representa a proporção da presença de ocupantes secundários nas galhas. As barras representam a média e o desvio padrão, e as letras diferentes indicam diferença estatística. Foi considerado estatisticamente significativo $p < 0,05$.

Discussão

Nossos resultados demonstram que as galhas de insetos podem ser um recurso precioso para artrópodes no Cerrado. As formigas, por exemplo, representam o grupo mais presente em nosso estudo e em outros trabalhos conduzidos anteriormente no Cerrado. Estes estudos encontraram uma taxa de ocupação por formigas de 45,6% para galhas em *Xylopia aromatica*

(Lam.) Mart. (Annonaceae) (Fernandes et al. 1988), de 48,6% para galhas em *Xylopia* (Craig et al. 1991), e de 30,5% para galhas em *Diospyros hispida* A.DC. (Ebenaceae) (Araújo et al. 1995). Mais recentemente, para a planta hospedeira *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish (Asteraceae) Almeida et al. 2014, Santos et al. 2017, e Santos et al. 2021, encontraram respectivamente uma taxa de ocupação por formigas de 14%, 5,5% e 9,5% do total de galhas disponíveis. Enquanto, em nosso estudo, foram amostradas galhas induzidas por diferentes espécies de insetos, em diferentes plantas hospedeiras, encontramos uma taxa de ocupação de 7,4% das galhas, representados por 13 ordens de artrópodes e 80 morfoespécies. Para fins comparativos, em um estudo com galhas senescentes de carvalho induzidas pela vespa *Disholcaspis cinerosa* (Bassett, 1881), Wheeler e Longino (1988) encontraram 8 espécies de formigas e outras 16 espécies de artrópodes (Araneae, Coleoptera, Hymenoptera, Lepidoptera, Neuroptera e Diplopoda) habitando essas galhas. Neste sentido, os resultados do nosso estudo reforçam que uso secundário de galhas pode ter um efeito positivo na diversidade de artrópodes e ter um papel chave para as espécies de formigas no Cerrado, através da disponibilização de sítios de nidificação sobre as plantas.

Ao analisarmos as características das galhas, identificamos que o volume da galha foi um fator determinante para a ocupação das galhas por artrópodes; e de fato o tamanho da galha parece ser a principal característica a facilitar a ocupação dessas estruturas. Assim como já foi mencionado em estudos anteriores (e.g., Almeida et al. 2014; Santos et al. 2017), foi observado que as formigas apresentaram uma preferência acentuada por galhas de *E. erythropappus* como maior volume. Além disso, quando o formato da galha foi analisado separadamente, as formigas ocuparam preferencialmente as galhas de *E. erythropappus* com maior volume dentro de cada formato (Almeida et al. 2014; Santos et al. 2017). Em contrapartida, em uma revisão de Sanver & Hawkins, (2000) que avaliou características das galhas como o tamanho e o órgão da planta em que elas ocorrem, em galhas induzidas por Diptera e Hymenoptera, não encontrou evidências de uma

associação significativa das características morfológicas com a riqueza de espécies de inquilinos. Em relação aos tricomas, a presença maior de ocupantes secundários nestas galhas pode ser explicada pelo fato destas estruturas garantirem uma proteção aos ocupantes secundários. Tricomas, geralmente, estão presentes em grande densidade sobre as galhas, formando uma barreira mecânica que dificulta a ação de parasitóides e de herbívoros (Mani 1964). Além disso, podem evitar a perda excessiva de umidade na câmara da galha, e, portanto, ajudar a manter a temperatura interna que protege o galhador (Stone & Schönrogge, 2003; Oliveira & Isaias, 2010; Oliveira et al. 2014), e posteriormente, após a desocupação das galhas pelos indutores, os tricomas que permanecem nas galhas poderiam servir como uma proteção contra as variáveis ambientais (e.g., incidência solar), garantindo um micro-habitat mais favorável para os ocupantes secundários. Por fim, os resultados mostraram que as demais traços das galhas [ocorrência da galha (isolada ou agrupada), número de câmaras internas (unilocular, bilocular ou multilocular) e presença/ausência do indutor], aparentemente, não exerceram influência sobre as comunidades de ocupantes secundários.

Recentemente, Maia & Silva, (2021), que em uma revisão buscaram compreender quem são os ocupantes secundários para as galhas do cerrado, encontraram que a maior parte das galhas ocupadas eram foliares, o que corrobora com o de fato de que em inventários realizados na região neotropical, as folhas correspondem ao órgão maior registro de indução de galhas (Gonçalves-Alvim & Fernandes, 2001; Maia & Fernandes, 2004; Isaias et al. 2013). Em nosso estudo, apesar das galhas foliares terem apresentado uma presença três vezes maior que as galhas caulinares durante a amostragem, os ocupantes secundários ocuparam preferencialmente as galhas caulinares. Isso pode ter acontecido pelo fato das galhas caulinares poderem apresentar um volume maior quando comparadas às galhas foliares. Outro fator que poderia explicar este resultado seria a permanência das galhas caulinares na planta por um maior período de tempo, a despeito das galhas

foliares que podem: a) cair da planta hospedeiras em função da sazonalidade marcante que ocorre no Cerrado (Camargo et al. 2018; Silva et al. 2008); e/ou b) eliminadas por mecanismos de abscisão foliar (controle base-topo) (Faeth et al. 1981; Fernandes et al. 2008; Constantino et al. 2009), no entanto, este fenômeno ainda foi pouco estudado para sistemas planta-hospedeiro em regiões neotropicais (Toma & Mendonça, 2014).

Geralmente, a sazonalidade exerce uma forte pressão seletiva sobre as comunidades de artrópodes nos ecossistemas (Wolda, 1988; Pinheiro et al. 2002; Newell et al. 2023). Era esperado neste estudo uma maior ocorrência de ocupantes secundários nos meses de amostragem durante o período chuvoso, período de maior ocorrência e abundância de artrópodes no Cerrado em função da alta disponibilidade de recursos e de maior precipitação/umidade (Silva et al. 2008), no entanto, a sazonalidade não afetou a presença de artrópodes nas galhas. Os insetos indutores de galhas são altamente específicos em relação ao hospedeiro (Carneiro et al. 2009), e por isso espera-se que sua dinâmica populacional esteja fortemente ligada à fenologia das plantas hospedeiras (Yukawa, 2000; Toma & Mendonça, 2014), e a sazonalidade dos ambientes (Silva et al. 2008). Neste sentido, no período chuvoso, as plantas do Cerrado exibem a formação de novos ramos e folhas, proporcionando aos galhadores novos sítios para oviposição e formação de novas galhas (Araújo & Santos, 2009). Portanto, a maioria das galhas surgem na estação chuvosa, e após desocupação do indutor, as galhas são colonizadas por ocupantes secundários. No entanto, como mostrado anteriormente, as galhas foliares provavelmente são recursos efêmeros e sazonais em relação às galhas caulinares, as quais permanecem nas plantas hospedeiras por ao longo das estações. Acreditamos que, diante disso, no período seco, esses micro-habitats proporcionados pelas galhas são recursos essenciais para muitos artrópodes que buscam por abrigos estáveis contra as intempéries climáticas e ambientais. Portanto, as galhas poderiam servir de refúgio para muitas espécies de artrópodes na estação seca e garantindo a manutenção da biodiversidade em níveis

semelhantes aos da estação chuvosa. Tal fato, só reforça ainda mais o papel fundamental que as galhas engenheiras de ecossistemas podem ter na manutenção da biodiversidade do Cerrado (ver Capítulo 4).

Finalmente, em relação aos locais de coleta, a FP (Fazenda Prata) foi o local em que encontramos o maior número de galhas com ocupantes secundários. Aparentemente, o que pode explicar tal resultado é o grau de conservação desta área de estudo. Diferentemente das outras áreas (CCPIU e FECG), a FP encontra-se imersa em uma matriz de paisagem rural, relativamente mais conservado em função dos remanescentes de Cerrado, enquanto as duas outras áreas estão localizadas às margens de um grande centro urbano e sofrem com forte pressão da urbanização e da agricultura intensiva, assim como outras áreas do Cerrado brasileiro (Klink & Machado, 2005; Sano et al. 2019). Estudos mostram que as interações ecológicas podem ser afetadas pela urbanização, por exemplo, em Meyer et al. (2020), a taxa de incidência de galhas em folhas de *Acer pseudoplatanus* L., e a porcentagem de folhas de *Fagus sylvatica* L. infestadas por *Mikiola fagi* (Hartig, 1839) (Diptera), foi maior em florestas em áreas com baixo grau de urbanização, em comparação com as florestas de médio e alto graus de urbanização.

Nossos resultados demonstram, que as galhas induzidas por insetos desempenham um importante papel ecológico como engenheiras de ecossistemas através da criação de micro-habitats para artrópodes, principalmente para as formigas, que foi o grupo mais abundante. Além disso, as características morfológicas dessas estruturas, como a presença de tricomas, o órgão de ocorrência, e o formato, podem influenciar no processo de colonização por artrópodes, no entanto, o volume das galhas foi uma característica determinante. Surpreendentemente, a sazonalidade não afetou a presença de artrópodes nas galhas, mas durante a estação seca, as galhas caulinares se configuraram como recursos essenciais que podem ter oferecido refúgio contra as adversidades climáticas e ambientais. Além disso, o grau de conservação do local, e as pressões da urbanização e agricultura

podem afetar a presença dos galhadores, bem como a colonização por ocupantes secundários. Neste sentido, esses resultados destacam a importância dos insetos galhadores que, por meio da indução de galhas podem contribuir para o aumento da diversidade de artrópodes nas plantas hospedeiras, mostrando que as galhas possuem um efeito direto e positivo na regulação e manutenção da biodiversidade e interações ecológicas no Cerrado.

Referências

- Abrahamson, W. G., & Weis, A. E. (Arthur E. (1997). *Evolutionary ecology across three trophic levels: goldenrods, gallmakers, and natural enemies*. 456.
- Almeida, M. F. B., Santos, L. R., & Carneiro, M. A. A. (2014). Senescent stem-galls in trees of *Eremanthus erythropappus* as a resource for arboreal ants. *Revista Brasileira de Entomologia*, 58(3), 265–272. <https://doi.org/10.1590/S0085-56262014000300007>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., De Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Araújo, L. M., Lara, A. C. F., & Fernandes, G. W. (1995). Utilization of apion sp. (Coleoptera apionidae) galls by an ant community in southeastern Brazil. *Tropical Zoology*, 8(2), 319–324. <https://doi.org/10.1080/03946975.1995.10539288>
- Araújo, W. S., Grandez-Rios, J. M., Bergamini, L. L., & Kollár, J. (2017). Exotic species and the structure of a plant-galling network Ecology and structure of trophic networks. *Network Biology*, 7(2), 21–32. www.iaees.org/Article
- Araújo, W., & Santos, B. (2009). Efeitos da sazonalidade e do tamanho da planta hospedeira na abundância de galhas de Cecidomyiidae (Diptera) em *Piper arboreum* (Piperaceae). *Revista Brasileira de Entomologia*, 53(2), 300–303.
- Askew, R. R. (1961). On the biology of the inhabitants of oak galls of Cynipidae (Hymenoptera) in Britain. In *Transactions of the Society for British Entomology* (Vol. 14, pp. 237–268). <https://www.researchgate.net/publication/325766622>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. M., & Walker, S. C. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>

- Camargo, M. G. G., Carvalho, G. H., Alberton, B. de C., Reys, P., & Morellato, L. P. C. (2018). Leafing patterns and leaf exchange strategies of a cerrado woody community. *Biotropica*, 50(3), 442–454. <https://doi.org/10.1111/btp.12552>
- Carneiro, M. A. A., Borges, R. A. X., Araújo, A. P. A., & Fernandes, G. W. (2009). Insetos indutores de galhas da porção sul da Cadeia do Espinhaço, Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Entomologia*, 53(4), 570–592. <https://doi.org/10.1590/S0085-56262009000400007>
- Cintra, F. C. F., Araújo, W. S., Maia, V. C., Urso-Guimarães, M. V., Venâncio, H., Andrade, J. F., Carneiro, M. A. A., Almeida, W. R., & Santos, J. C. (2020). Plant-galling insect interactions: a data set of host plants and their gall-inducing insects for the Cerrado. *Ecology*, 101(11). <https://doi.org/10.1002/ECY.3149>
- Constantino, P. de A. L., Monteiro, R. F., & Wilson, M. D. (2009). Gall midge attack intensity and host-plant response in a Neotropical coastal ecosystem. *Revista Brasileira de Entomologia*, 53(3), 391–397. <https://doi.org/10.1590/S0085-56262009000300013>
- Cornelissen, T., Cintra, F., & Santos, J. C. (2016). Shelter-Building Insects and Their Role as Ecosystem Engineers. *Neotropical Entomology*, 45 (1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s13744-015-0348-8>
- Craig, T., Araújo, L., Itami, J., & Fernandes, G. (1991). Development of the insect community centered on a leaf bud gall formed by a weevil (Coleoptera: Curculionidae) on *Xylopia* (Annonaceae). *Revista Brasileira de Entomologia*, 35, 311–317.
- Craig, T. P., Itami, J. K., & Horner, J. D. (2007). Geographic variation in the evolution and coevolution of a tritrophic interaction. *Evolution*, 61(5), 1137–1152. <https://doi.org/10.1111/J.1558-5646.2007.00099.X>
- Crutsinger, G. M., Habenicht, M. N., Classen, A. T., Schweitzer, J. A., & Sanders, N. J. (2008). Galling by *Rhopalomyia solidaginis* alters *Solidago altissima* architecture and litter nutrient dynamics in an old-field ecosystem. *Plant and Soil*, 303(1–2), 95–103. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9490-3>
- Espírito-Santo, M. M., Faria, M. L., & Fernandes, G. W. (2004). Parasitoid attack and its consequences to the development of the galling psyllid *Baccharopelma dracunculifoliae*. *Basic and Applied Ecology*, 5(5), 475–484. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2004.04.010>

- Faeth, S. H., Connor, E. F., & Simberloff, D. (1981). Early Leaf Abscission: A Neglected Source of Mortality for Folivores. *Https://Doi.Org/10.1086/283724*, 117(3), 409–415. <https://doi.org/10.1086/283724>
- Fernandes, G. W., Coelho, M. S., & Santos, J. C. (2014). Neotropical insect galls: Status of knowledge and perspectives. In *Neotropical Insect Galls* (pp. 1–14). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8783-3_1
- Fernandes, G. W., & Price, P. W. (1988). Biogeographical gradients in galling species richness : Tests of hypotheses. *Oecologia*, 76(2), 161–167. <https://doi.org/10.1007/BF00379948>
- Fernandes, W. G., De Marco Júnior, P., & Schönrogge, K. (2008). Plant organ abscission and the green island effect caused by gallmidges (Cecidomyiidae) on tropical trees. *Arthropod-Plant Interactions*, 2(2), 93–99. <https://doi.org/10.1007/S11829-008-9031-X>
- Floate, K. D., Fernandes, G. W., & Nilsson, J. A. (1996). Distinguishing intrapopulational categories of plants by their insect faunas: Galls on rabbitbrush. *Oecologia*, 105(2), 221–229. <https://doi.org/10.1007/BF00328550>
- Gonçalves-Alvim, S. J., & Fernandes, G. W. (2001). Biodiversity of galling insects: historical, community and habitat effects in four neotropical savannas. *Biodiversity & Conservation* 2001 10:1, 10(1), 79–98. <https://doi.org/10.1023/A:1016602213305>
- Gonçalves-Alvim, S., Landau, E. C., Fagundes, M., Silva, V., Nunes, Y. R. F., & Fernandes, G. W. (1999). Abundance and impact of a Lepidopteran gall on *Macairea radula* (Melastomataceae) in the Neotropics. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 25(2), 115–125. <https://www.researchgate.net/publication/286666187>
- Harris, M. O., & Pitzschke, A. (2020). Plants make galls to accommodate foreigners: some are friends, most are foes. In *New Phytologist* (Vol. 225, Issue 5, pp. 1852–1872). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/nph.16340>
- Höglund, S. (2014). Timing of growth determines fitness and performance of a galling insect on willow. *Ecological Entomology*, 39(2), 159–167. <https://doi.org/10.1111/een.12078>
- Isaias, R. M. S., Carneiro, R. G. S., Oliveira, D. C., & Santos, J. C. (2013). Illustrated and Annotated Checklist of Brazilian Gall Morphotypes. *Neotropical Entomology*, 42(3), 230–239. <https://doi.org/10.1007/s13744-013-0115-7>

- Jones, C. G., & Gutiérrez, J. L. (2007). On the Purpose, Meaning, and Usage of the Physical Ecosystem Engineering Concept. *Theoretical Ecology Series*, 4(C), 3–24. [https://doi.org/10.1016/S1875-306X\(07\)80003-7](https://doi.org/10.1016/S1875-306X(07)80003-7)
- Jones, C. G., Lawton, J. H., & Shachak, M. (1994). Organisms as Ecosystem Engineers. *Oikos*, 69(3), 373. <https://doi.org/10.2307/3545850>
- Jones, C. G., Lawton, J. H., & Shachak, M. (1997). Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers. In *SPECIAL FEATURE Ecology* (Vol. 78, Issue 7). [https://doi.org/https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1997\)078\[1946:PANEOO\]2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1890/0012-9658(1997)078[1946:PANEOO]2.0.CO;2)
- Klink, C., & Machado, R. B. (2005). A conservação do Cerrado brasileiro. In *Megadiversidade* (Vol. 1, pp. 147–155).
- Luz, F. A., Gonçalves, G. L., Moreira, G. R. P., & Becker, V. O. (2015). Description, molecular phylogeny, and natural history of a new kleptoparasitic species of gelechiid moth (Lepidoptera) associated with Melastomataceae galls in Brazil. *Journal of Natural History*, 49(31–32), 1849–1875. <https://doi.org/10.1080/00222933.2015.1006284>
- Luz, F. A., & Mendonça-Júnior, M. de S. (2019). Guilds in Insect Galls: Who is Who. *Florida Entomologist*, 102(1), 207–210. <https://doi.org/10.1653/024.102.0133>
- Maia, V. C. (2022). Review of the inquiline fauna associated with insect galls in Brazilian restingas. *Brazilian Journal of Biology*, 82. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.235395>
- Maia, V. C., & Fernandes, G. W. (2004). Insect galls from Serra de São José (Tiradentes, MG, Brazil). *Brazilian Journal of Biology*, 64(3a), 423–445. <https://doi.org/https://doi.org/10.1590/S1519-69842004000300007>
- Maia, V. C., & Silva, B. G. (2021). Insect galls of the Brazilian cerrado: Associated fauna. *Biota Neotropica*, 21(3). <https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2021-1202>
- Mani, M. (1964). *Ecology of Plant Galls*. Springer Dordrecht. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-94-017-6230-4>
- Meyer, S., Rusterholz, H. P., & Baur, B. (2020). Urbanisation and forest size affect the infestation rates of plant-galling arthropods and damage by herbivorous insects. <http://www.Eje.Cz/Doi/10.14411/Eje.2020.004.Html>, 117(1), 34–48. <https://doi.org/10.14411/EJE.2020.004>
- Miller, D. G., & Raman, A. (2019). Host–Plant Relations of Gall-Inducing Insects. *Annals of the Entomological Society of America*, 112(1), 1–19. <https://doi.org/10.1093/AESA/SAY034>

- Mound, L. A., & Morris, D. C. (2000). Inquilines or kleptoparasites? New phlaeothripine Thysanoptera associated with domicile-building thrips on Acacia trees. *Australian Journal of Entomology*, 39(3), 130–137. <https://doi.org/10.1046/J.1440-6055.2000.00165.X>
- Novais, S., Aguirre-Jaimes, A., Quesada, M., & Hernández-Ortiz, V. (2020). Ecosystem engineering by leaf-rolling mites enhances arthropod diversity. *Science of Nature*, 107(5). <https://doi.org/10.1007/s00114-020-01702-0>
- Newell, F. L., Ausprey, I. J., & Robinson, S. K. (2023). Wet and dry extremes reduce arthropod biomass independently of leaf phenology in the wet tropics. *Global Change Biology*, 29(2), 308–323. <https://doi.org/10.1111/gcb.16379>
- Oliveira, D. C., & Isaias, R. M. S. (2010). Redifferentiation of leaflet tissues during midrib gall development in *Copaifera langsdorffii* (Fabaceae). *South African Journal of Botany*, 76(2), 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2009.10.011>
- Oliveira, D. C., Moreira, A. S. F. P., & Isaias, R. M. D. S. (2014). Functional gradients in insect gall tissues: Studies on neotropical host plants. In *Neotropical Insect Galls* (pp. 35–49). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8783-3_3
- Pereira, C. C., Sperandei, V. da F., Henriques, N. R., Silva, Á. A. N., Fernandes, G. W., & Cornelissen, T. (2021). Gallers as leaf rollers: ecosystem engineering in a tropical system and its effects on arthropod biodiversity. *Ecological Entomology*, 46(2), 470–481. <https://doi.org/10.1111/een.12993>
- Pinheiro, F., Diniz, I., Coelho, D., & Bandeira, M. (2002). Seasonal pattern of insect abundance in the Brazilian cerrado. *Austral Ecology*, 27(2), 132–136. <https://doi.org/doi:10.1046/j.1442-9993.2002.01165.x>
- Price, P. W. (2005). Adaptive radiation of gall-inducing insects. *Basic and Applied Ecology*, 6(5), 413–421. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2005.07.002>
- Price, P. W., Fernandes, G., & Waring, G. (1987). Adaptive Nature of Insect Galls. *Environmental Entomology*, 16(1), 15–24.
- Price, P. W., Wilson Fernandes, G., Lara, A. C. F., Brawn, J., Barrios, H., Wright, M. G., Ribeiro, S. P., & Rothcliff, N. (1998). Global patterns in local number of insect galling species. *Journal of Biogeography*, 25(3), 581–591. <https://doi.org/10.1046/J.1365-2699.1998.2530581.X>

- RStudio Team (2020). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/> (accessed on 31 de maio 2023).
- Raman, A., Schaefer, C., & Withers, T. (2005). Biology, ecology, and evolution of gall-inducing arthropods (A. Raman, C. Schaefer, & T. Withers, Eds.; Vol. 2). Science Publishers.
- Sano, E. E., Rodrigues, A. A., Martins, E. S., Bettiol, G. M., Bustamante, M. M. C., Bezerra, A. S., Couto, A. F., Vasconcelos, V., Schüller, J., & Bolfe, E. L. (2019). Cerrado ecoregions: A spatial framework to assess and prioritize Brazilian savanna environmental diversity for conservation. *Journal of Environmental Management*, 232, 818–828. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.108>
- Santos, J. C., Maruyama, P. K., & Fernandes, G. W. (2021). Vacant rooms? The secondary use of stem-galls by ants in *Eremanthus erythropappus* (Asteraceae). *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 6(2), 108–112. <https://doi.org/10.24221/jeap.6.2.2021.3276.108-112>
- Santos, J., Carneiro, M., & Fernandes, G. (2012). Insetos galhadores neotropicais: diversidade e ecologia evolutiva dos herbívoros mais sofisticados da natureza. In K. Del-Claro & H. Torezan-Silingardi (Eds.), *Ecologia das interações plantas-animais: uma abordagem ecológico-evolutiva* (pp. 183–199). Technical Books.
- Santos, L. R., Feitosa, R. M., & Carneiro, M. A. A. (2017). The role of senescent stem-galls over arboreal ant communities structure in *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish (Asteraceae) trees. *Sociobiology*, 64(1), 7–13. <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v64i1.1174>
- Sanver, D., & Hawkins, B. A. (2000). Galls as habitats: the inquiline communities of insect galls. *Basic and Applied Ecology Materials and Methods*. In *Basic Appl. Ecol* (Vol. 1). <http://www.urbanfischer.de/journals/baecol>
- Shorthouse, J. D., Wool, D., & Raman, A. (2005). Gall-inducing insects - Nature's most sophisticated herbivores. *Basic and Applied Ecology*, 6(5), 407–411. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2005.07.001>
- Silva, F., Assad, E., & Evangelista, B. (2008). Caracterização climática do bioma Cerrado. In S. Sano, S. Almeida, & J. Ribeiro (Eds.), *Cerrado: ecologia e flora* (pp. 69–87). Embrapa Cerrados.

- Stachowicz, J. J. (2001). Mutualism, facilitation, and the structure of ecological communities. *BioScience*, 51(3), 235–246. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2001\)051\[0235:MFATSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0235:MFATSO]2.0.CO;2)
- Stone, G. N., & Schönrogge, K. (2003). The adaptive significance of insect gall morphology. In *Trends in Ecology and Evolution* (Vol. 18, Issue 10, pp. 512–522). Elsevier Ltd. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00247-7](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00247-7)
- Stone, G. N., Schönrogge, K., Atkinson, R. J., Bellido, D., & Pujade-Villar, J. (2002). The population biology of oak gall wasps (Hymenoptera: Cynipidae). *Annual Review of Entomology*, 47, 633–668. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.ENTO.47.091201.145247>
- Sugiura, S., & Yamazaki, K. (2009). Gall-attacking behavior in phytophagous insects, with emphasis on Coleoptera and Lepidoptera. *Terrestrial Arthropod Reviews*, 2(1), 41–61. <https://doi.org/10.1163/187498309x435658>
- Toma, T. S. P., & Mendonça, M. de S. (2014). Population ecology of galling arthropods in the neotropics. In *Neotropical Insect Galls* (pp. 69–98). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-8783-3_5
- Weis, A. E., Walton, R., & Crego, C. L. (1988). Reactive plant tissue sites and the population biology of gall makers. *Annual Review of Entomology*. Vol. 33, 467–486. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.EN.33.010188.002343>
- Wheeler, J., & Longino, J. (1988). Arthropods in live oak galls in Texas. *Entomological News*, 99(1), 25–29.
- Wolda, H. (1988). Insect seasonality: why? *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 19, 1–18.
- Yukawa, J. (2000). Synchronization of gallers with host plant phenology. *Population Ecology*, 42(2), 105–113. <https://doi.org/10.1007/PL00011989>

CAPÍTULO IV

TESTANDO OS EFEITOS DA REMOÇÃO E ADIÇÃO DE GALHAS DE INSETOS SOBRE A DIVERSIDADE DA ARTROPODOFAUNA EM PLANTAS NO CERRADO

Fernanda Cristina Franco Cintra¹ & Jean Carlos Santos²

¹ Programa de Pós-Graduação em Entomologia, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil.

² Departamento de Ecologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

Testando os efeitos da remoção e adição de galhas de insetos sobre a diversidade da artropodofauna em plantas no Cerrado

Fernanda Cristina Franco Cintra¹ & Jean Carlos Santos²

Resumo

Os insetos galhadores são capazes de induzir uma estrutura através da manipulação do tecido da planta hospedeira, garantindo condições ótimas para seu desenvolvimento, e proteção contra variações de microclima e inimigos naturais. A presença das galhas cria uma micro-heterogeneidade ambiental sobre a planta hospedeira, o que permite a exploração por outras espécies não indutoras de galhas após a saída do indutor, e, por isso, os insetos galhadores podem ser considerados engenheiros de micro-habitats. As galhas engenheiras podem desempenhar efeitos positivos sobre a abundância e diversidade de artrópodes nas plantas hospedeiras. Neste sentido, o presente estudo teve como objetivo avaliar, por meio de dois experimentos, os efeitos das galhas caulinares induzidas por um microlepidóptero na planta hospedeira *Bauhinia brevipes* (Fabaceae) sobre a comunidade de artrópodes no Cerrado, respondendo a seguinte pergunta: como a presença das galhas influencia a diversidade e composição de artrópodes na planta hospedeira? Os experimentos foram realizados em uma área de cerrado durante o período chuvoso em dois anos diferentes, utilizando conjuntos de plantas distintas. No primeiro experimento foi testado o efeito da remoção das galhas naturais, sobre a abundância e riqueza de artrópodes, e no segundo o efeito da adição de galhas artificiais para os mesmos parâmetros. Os resultados revelaram que em plantas com galhas naturais, a abundância de artrópodes foi quase duas vezes maior em comparação ao tratamento em que as galhas foram experimentalmente removidas. Além disso, os herbívoros foram mais abundantes em plantas com galhas, enquanto os onívoros foram mais abundantes em plantas sem galhas, e não houve diferença na abundância de predadores e detritívoros entre os tratamentos. Ao analisar o ambiente degradado e conservado, verificou-se que a riqueza e a abundância de artrópodes foram maiores nas plantas do ambiente degradado, assim como a abundância de onívoros e predadores. Já em plantas com galhas artificiais, observou-se que a riqueza e a abundância de artrópodes, bem como a abundância de onívoros, foram significativamente maiores em plantas com galhas artificiais em comparação com as plantas sem galhas. Porém, não houve diferença na abundância de herbívoros e predadores entre os tratamentos. Nossos resultados demonstraram que os insetos indutores de galhas podem desempenhar um papel essencial como engenheiros de ecossistemas. Tanto as galhas naturais, quanto as artificiais atuaram como abrigos

nas plantas hospedeiras, resultando em um aumento na riqueza e abundância de artrópodes, além de promover mudanças na composição de espécies nas plantas.

Palavras-chave: Lepidoptera, insetos galhadores, engenheiros de ecossistemas, ocupantes secundários, diversidade

Introdução

Engenheiros de ecossistemas são organismos com a capacidade de promover modificações estruturais no ambiente, que direta ou indiretamente, as quais podem alterar a disponibilidade de recursos para outros indivíduos, seja pela manutenção e/ou criação de novos habitats (Jones et al. 1994, 1997). Vários grupos de artrópodes como aranhas, besouros, formigas e lagartas de lepidópteros apresentam a capacidade de manipular folhas de plantas para criar abrigos (Marquis & Lill, 2007). Estes abrigos são utilizados em algum estágio do desenvolvimento do construtor. Quanto abandonadas, essas estruturas podem persistir nas plantas, e, posteriormente, serem utilizadas como abrigo por outros organismos, incluindo herbívoros e predadores (Cornelissen et al. 2016).

Os lepidópteros são capazes de construir uma infinidade de estruturas em suas plantas hospedeiras que podem ser colonizadas por outros organismos (Cornelissen et al. 2016; Marquis et al. 2022). Estes abrigos desempenham papéis diversos e podem ser construídos para alimentação externa nas plantas, como é o caso dos lepidópteros enroladores de folhas (Lill & Marquis, 2003; Nakamura & Ohgushi, 2003; Vieira & Romero, 2013; Henriques et al. 2019), e lepidópteros construtores de amarras foliares (Wang et al. 2012; Velasque & Del-Claro, 2016). Adicionalmente, estes abrigos podem ser construídos por lepidópteros endofíticos (que se alimentam dos tecidos internos das plantas), como os minadores de folhas (Kagata & Ohgushi, 2004) e galhadores (Santos et al. 2019). As galhas, em particular, diferem muito de outros abrigos construídos por insetos, pois existe uma maior manipulação da planta hospedeira (Cornelissen et al. 2016), garantindo o desenvolvimento do indutor, melhor nutrição, melhoria no microclima, e proteção contra inimigos naturais (Price et al. 1987; Stone & Schönrogge, 2003). O processo de indução da galha é caracterizado pelo aumento no volume celular (hipertrofia celular), e/ou no número de células (hiperplasia celular), em tecidos dos órgãos das plantas hospedeiras (Price et al. 1987). A sua

formação pode alterar não somente a arquitetura do órgão atacado, como até da planta inteira (Gonçalves-Alvim et al. 1999; Crutsinger et al. 2008). Neste sentido, os insetos galhadores podem ser considerados engenheiros de micro-habitats (Sanver & Hawkins 2000; Cornelissen et al. 2016), pois, através de manipulações do tecido da planta hospedeira podem criar uma estrutura para o seu desenvolvimento, criando uma heterogeneidade ambiental que permite a exploração por outras espécies após a saída do indutor (Jones et al. 1994, Sugiura & Yamazaki 2009).

Para testar os efeitos dos insetos engenheiros de ecossistemas em artrópodes associados, experimentos que envolvem manipulação experimental podem ser realizados, tanto pela inclusão de abrigos artificiais (que simulam a arquitetura do abrigo natural), quanto pela manipulação da abundância dos abrigos naturalmente construídos pelo próprio inseto engenheiro (Marquis et al. 2022). Alguns estudos observacionais já documentaram a utilização secundária de galhas senescentes por outros artrópodes em regiões tropicais (Fernandes et al. 1988; Craig et al. 1991; Araújo et al. 1995; Almeida et al. 2014; Santos et al. 2017). Em regiões de clima temperado, alguns estudos experimentais foram realizados para avaliar os efeitos das galhas induzidas por insetos na fauna associada à planta hospedeira (consulte Waltz & Whitham, 1997; Crawford et al. 2007; Wetzel et al. 2016; Giannetti et al. 2019). Por outro lado, em regiões tropicais apenas dois estudos de manipulação experimental foram conduzidos com galhas induzidas por um inseto psílideo, *Baccharopelma dracunculifoliae* (Burckhardt, Espírito-Santo, Fernandes & Malenovský, 2004) em plantas de *Baccharis dracunculifolia* DC. (Asteraceae) (Barbosa et al. 2019, 2023), e um com galhas induzidas por nematóides em plantas de *Miconia ligustroides* (DC.) Naudin (Pereira et al. 2021).

Os efeitos das galhas engenheiras sobre a abundância e diversidade de artrópodes nas plantas hospedeiras pode variar, a depender da guilda dos ocupantes secundários. Em um estudo de Wetzel et al. (2016), a remoção das galhas induzidas por *Andricus quercuscalifornicus* (Bassett,

1881) (Hymenoptera), resultou em um aumento de 59% na abundância de herbívoros, de 26% da riqueza de herbívoros, e um aumento de 27% na diversidade de artrópodes. De acordo com os autores, as galhas forneciam habitats para a hibernação de aranhas, e que posteriormente no período de rebrota das plantas predavam os herbívoros. Em Giannetti et al. (2019), a colonização de galhas induzidas por *Andricus quercustozae* (Hymenoptera) em carvalhos, mostrou que a ocupação dessas estruturas por formigas para nidificação foi benéfica para planta por reduzir os níveis de herbivoria na planta em virtude da presença das formigas.

Diante da relevância e evidências que galhadores podem ter sobre artropodofauna nos ecossistemas, o presente estudo teve como objetivo avaliar os efeitos das galhas caulinares induzidas por um microlepidóptero na planta hospedeira *Bauhinia brevipes* Vogel (Fabaceae) sobre a comunidade de artrópodes no cerrado, respondendo a seguinte pergunta: como a presença das galhas influencia a diversidade e composição de artrópodes na planta hospedeira *B. brevipes*? Para responder a pergunta foi hipotetizado que: a presença de galhas aumenta a diversidade de artrópodes nas diferentes guildas alimentares na planta hospedeira *B. brevipes*. Para testar a hipótese foram feitas as seguintes previsões: i) a presença de galhas aumenta a riqueza e abundância de artrópodes; ii) a presença de galhas aumenta a abundância de artrópodes herbívoros, onívoros, predadores e detritívoros; iii) a presença de galhas afeta a riqueza e abundância de artrópodes em função do estado de conservação dos habitats (conservado *versus* degradado); iv) a presença de galhas afeta a composição de artrópodes sobre as plantas; e v) a presença das galhas nas plantas afetam os níveis de herbivoria experienciados pelas plantas hospedeiras.

Material e métodos

Área de estudo

Os experimentos foram realizados em uma Fazenda Particular, localizada no município do Prata, estado de Minas Gerais, Brasil (18°56'22" S, 49°11'53"W). A área está localizada no bioma Cerrado, e abriga áreas de pastagem (pastagem com presença poucas espécies de plantas arbóreas e arbustivas de cerrado, esparsamente distribuídas no espaço, tais como *Bauhinia brevipes*, e espécies de solanáceas) e um remanescente de vegetação cerrado (*sensu stricto*) e cerradão com predominância de espécies arbóreas com a formação de dossel contínuo e que faz transição para estratos arbóreos e arbustivo-herbáceos (35ha). O clima na região é do tipo Aw segundo a classificação climática de Köppen, caracterizado por apresentar duas estações bem definidas, uma chuvosa de outubro a março, e uma seca de abril a setembro, com precipitação anual de 1.500 mm e a temperatura média de 22 °C (Alvares et al. 2013).

Sistema de estudo

O sistema escolhido para o estudo foi a planta hospedeira *Bauhinia brevipes* Vogel (Fabaceae) e seu microlepidóptero galhador, uma espécie ainda não identificada, que induz uma galha caulinar na planta (Figura 1a). *Bauhinia brevipes* é um arbusto lenhoso característico da vegetação do Cerrado brasileiro, podendo atingir até 3 metros de altura, sendo encontrado em diferentes formações, como cerradão, campo cerrado e floresta de galeria, nos estados da Bahia, Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Piauí, Rondônia, São Paulo, Tocantins, e áreas de transição com a caatinga (Vaz & Tozzi, 2003). É uma espécie decídua em que a queda das folhas acontece durante a estação seca, começando em maio e terminando em agosto, enquanto a floração ocorre entre junho e setembro, e a frutificação ocorre entre setembro e outubro. O brotamento e o surgimento das folhas novas ocorrem no início da estação chuvosa em outubro e

dura até o final da estação chuvosa em março (Silveira, 2006). *Bauhinia brevipes* é polinizada por morcegos (Silveira, 2006) e é atacada por uma fauna variada de insetos herbívoros que inclui nove espécies de insetos galhadores, minadores de folha e de vida livre (Cornelissen et al. 1997; Cornelissen & Fernandes, 2001; Fernandes et al. 2000; Fernandes, 1998; Maia & Fernandes, 2005). As galhas caulinares de formato cilíndrico, de coloração esverdeada, pubescentes, e com câmara única ocorrem durante o período chuvoso, e são induzidas nas plantas no final de outubro e nelas permanecem durante toda a estação chuvosa. Quando as galhas são abandonadas pelo lepidóptero indutor, frequentemente são ocupadas por outros artrópodes, principalmente por formigas (F. Cintra, observações pessoais).



Figura 1. Galha caulinar cilíndrica induzida por lepidóptera na planta *Bauhinia brevipes* Vogel (Fabaceae) (a). Galha isolada com *voil* para evitar a colonização de artrópodes durante o experimento 1 (b). Galha isolada com fita e cola entomológica para evitar a colonização de artrópodes durante o experimento 1 (c). Galha artificial confeccionada com canudo de bambu e cortiça, simulando uma galha natural durante o experimento 2, adicionada à planta e em detalhe (d).

Coleta de dados

Experimento 1: anulando os efeitos das galhas sobre a planta hospedeira

Após o levantamento de vários sistemas de galhadores e plantas hospedeiras (realizado durante as amostragens para o terceiro capítulo), foi definido qual sistema permitiria o melhor estudo sobre efeito da engenharia de ecossistemas na comunidade de artrópodes associados a uma das plantas hospedeiras mais abundantes e múltipla hospedeira de galhas. O experimento ocorreu de dezembro de 2021 a fevereiro de 2022, durante a estação chuvosa, período de maior abundância de insetos no cerrado. Foram selecionadas as plantas (n=45), com pelo menos cinco metros distantes umas das outras, ao longo de uma trilha de aproximadamente um quilômetro, com início em área degradada (pastagem) e com o final em uma área de conservada (cerradão). Selecionamos plantas em ambientes diferentes para comparar o efeito da presença das galhas engenheiras de ecossistemas em ambientes de baixa diversidade (pastagem) de artrópodes associados à planta hospedeira. As plantas selecionadas apresentavam características semelhantes, como tamanho (entre 1,5 e 2m), ontogenia (todas adultas), e número de galhas (entre 1 e 5 galhas). Neste experimento foram selecionados três grupos amostrais: i) plantas sem galhas; ii) plantas com galhas; e iii) plantas com galhas removidas (tratamento). Antes de iniciar o experimento, toda a comunidade de artrópodes das plantas foi removida mecanicamente, uma única vez, com auxílio de pinças e pincéis. Após trinta dias iniciamos o experimento com a coleta pré-tratamento, onde todas as galhas do grupo tratamento foram removidas. A princípio, as galhas das plantas do grupo tratamento seriam removidas mecanicamente, mas isso causaria uma injúria na planta, e por isso optou-se por isolar apenas as galhas com uma cola entomológica (ColeAgro®) aplicada sobre uma fita creponada na base da galha (Figura 1c). As plantas foram marcadas em dezembro, ainda com o galhador presente na galha, e para evitar que as galhas fossem colonizadas antes do início do experimento, todas elas foram ensacadas com saco em tecido do tipo *voil* (Figura 1b). Um mês

após marcarmos as plantas, iniciamos o experimento com a remoção do saco de *voil*, e com o isolamento das galhas das plantas do grupo tratamento. Além disso, contabilizamos todos os artrópodes (exceto os ácaros) presentes nas plantas por meio de busca ativa, e em cada amostragem as plantas foram inspecionadas por 10 minutos. Trinta dias após o início do experimento (coleta pré-tratamento), voltamos a campo para amostrar os artrópodes presentes nas plantas e coletar as galhas para contabilizar a ocupação. Em laboratório, as galhas foram dissecadas e os ocupantes secundários foram contabilizados. A metodologia descrita anteriormente é uma adaptação dos trabalhos de Wetzal et al. (2016) e Giannetti et al. (2019). Os artrópodes presentes nas plantas e nas galhas foram morfoespeciados e classificados quanto ao grupo funcional com base no aparelho bucal. Adicionalmente, no início do experimento, foram marcadas folhas totalmente expandidas e sem sinais de herbivoria, e que, ao final do experimento foram removidas e avaliadas para determinar a área total da lâmina foliar, e a área foliar removida por herbívoros, o que permitiu a quantificação da porcentagem média de área foliar removida por planta. As imagens digitais foram calibradas em 0,01 mm e medidas no software ImageJ 1.8.0 (Schneider et al. 2012). Um total de 900 folhas foram amostradas (3 grupos amostrais * 15 indivíduos * 20 folhas por planta).

Experimento 2: potencializando os efeitos das galhas sobre a planta hospedeira

No segundo experimento testamos o efeito da presença das galhas sobre diversidade e abundância de artrópodes nos indivíduos de *B. brevipes* através da adição de galhas artificiais. O experimento foi realizado com um conjunto diferente de plantas, e ocorreu de dezembro de 2022 a fevereiro de 2023, na estação chuvosa, período de maior abundância de insetos no cerrado. Foram adicionadas experimentalmente galhas artificiais nas extremidades dos ramos das plantas hospedeiras (n=30), simulando a localização em que as galhas são naturalmente induzidas. Neste experimento foram utilizados dois grupos amostrais: i) plantas sem galhas, e ii) plantas com duas

galhas artificiais. Foram utilizadas galhas artificiais confeccionadas com canudos de bambu (ocos por dentro), com volume $\cong 1,55 \text{ cm}^3$ e comprimento $\cong 4,9 \text{ cm}$, vedados em suas extremidades discos de cortiça, de forma a imitar as galhas cilíndricas do lepidóptero indutor em relação ao volume e comprimento. Para efetivar a colonização de ocupantes secundários nestas galhas artificiais, foi feito um orifício de dois milímetros de diâmetro, semelhante ao feito pelo lepidóptero galhador, aproximadamente, a um centímetro da borda da extremidade da galha (Figura 1d). Posteriormente já em campo, duas galhas artificiais foram adicionadas com um barbante de algodão cru com dois milímetros de espessura amarradas em ramos opostos de cada planta do grupo tratamento (uma em cada ramo), sem causar qualquer injúria ao indivíduo. As plantas foram inspecionadas novamente a cada 21 dias, totalizando três amostragens temporais ao longo de 63 dias. Em cada amostragem as plantas foram inspecionadas por 10 minutos e todos os artrópodes (exceto os ácaros) presentes nas plantas foram amostrados e quantificados por meio de busca ativa. As galhas artificiais também foram recolhidas e acondicionadas em sacos plásticos para posterior quantificação de ocupantes secundários, e novas galhas artificiais foram adicionadas exatamente na mesma posição das anteriores. Adicionalmente, no início do experimento, foram marcadas 10 folhas arbitrariamente distribuídas pela planta, totalmente expandidas e sem sinais de qualquer tipo de herbivoria e fungos. Ao final do experimento, as 10 folhas foram removidas e avaliadas para determinar a área total da lâmina foliar, e a área removida por herbívoros, o que permitiu a quantificação da porcentagem média de área foliar removida por planta. As imagens digitais foram calibradas em 0,01 mm e medidas no software ImageJ 1.8.0 (Schneider et al. 2012). Um total de 300 folhas foram amostradas (2 grupos amostrais * 15 indivíduos * 10 folhas por planta).

Análises estatísticas

Análises relacionadas ao experimento 1 (anulando os efeitos das galhas)

Através de Modelos Lineares Generalizados Mistos (GLMMs) (Bates et al. 2015) com distribuição de Poisson, nós testamos o efeito da presença das galhas naturais na riqueza e abundância de todos os artrópodes e seus respectivos grupos funcionais: herbívoros, onívoros, predadores e detritívoros (Schowalter, 2016). As coletas pré-tratamento e pós-tratamento foram ajustadas como efeito aleatório para controlar a dependência temporal e espacial dos dados. Como variáveis explicativas consideramos altura da planta, ambiente tipo de habitat (pastagem *versus* cerrado), número de galhas por planta, e os tratamentos (plantas sem galhas, plantas com galhas isoladas e plantas com galhas). Para obter o modelo mais adequado, realizamos simplificações dos modelos por meio da remoção dos efeitos fixos não significativos. A significância foi estimada entre o modelo completo (H1) e o modelo nulo (H0). Sempre que necessário foi realizada a análise de Tukey para comparar as médias par-a-par (pacote emmeans; Lenth R 2023). Os modelos GLMMs foram construídos utilizando o pacote "lme4" e a função "glmer" (Bates et al. 2015). A composição de espécies de artrópodes presentes nas plantas de *B. brevipes* no experimento com galhas naturais, foi comparada entre as coletas pré-tratamento e pós-tratamento, entre os grupos amostrais, e entre os ambientes de coleta por meio de uma análise de variância multivariada permutacional (PERMANOVA; Anderson 2001, 2006). Para realizar todas as visualizações gráficas da composição de espécies (semelhanças ou diferenças entre os grupos) construímos um gráfico utilizando o "Non-Metric Multidimensional Scaling" (nMDS) com Bray-Curtis dissimilaridade e 1000 permutações (nMDS; Clarke 1993). Para avaliar o efeito da presença das galhas caulinares na herbivoria foliar em plantas de *B. brevipes* foi realizado um Modelo Linear Generalizado (GLM), com distribuição binomial, seguido do teste de q-quadrado. Os ambientes (pasto e interior), o número de galhas por planta, a altura da planta, e os tratamentos (plantas com

galhas, plantas com galhas isoladas, e plantas sem galhas) foram utilizados como variáveis preditoras e a porcentagem média de herbivoria foliar por planta como variável resposta.

Análises relacionadas ao experimento 2 (potencializando os efeitos das galhas)

Nós também testamos o efeito da adição de galhas artificiais na riqueza e abundância de todos os artrópodes e seus respectivos grupos funcionais: herbívoros, onívoros e predadores (Schowalter, 2016), através de Modelos Lineares Generalizados Mistos (GLMMs) (Bates et al. 2015) com distribuição de Poisson. As amostragens pré-tratamento e pós-tratamento foram ajustadas como efeito aleatório para controlar a dependência temporal e espacial dos dados. Como variáveis explicativas consideramos a altura da planta e os tratamentos (plantas sem galhas, plantas com galhas artificiais). Para obter o modelo mais adequado, realizamos simplificações dos modelos por meio da remoção dos efeitos fixos não significativos. A significância foi estimada entre o modelo completo (H1) e o modelo nulo (H0). Sempre que necessário foi realizada a análise de Tukey para comparar as médias par-a-par (pacote emmeans; Lenth R 2023). Os modelos GLMMs foram construídos utilizando o pacote "lme4" e a função "glmer" (Bates et al. 2015). Para comparar a composição de espécies no experimento com galhas artificiais, entre os tratamentos foi realizada uma análise de variância multivariada permutacional (PERMANOVA; Anderson 2001, 2006). Para realizar todas as visualizações gráficas da composição de espécies (semelhanças ou diferenças entre os grupos) realizamos uma análise "Non-Metric Multidimensional Scaling" (nMDS) com Bray-Curtis dissimilaridade e 1000 permutações (nMDS; Clarke 1993). A PERMANOVA e o nMDS foram realizadas utilizando o pacote "vegan" (Oksanen et al. 2022). Adicionalmente, foi realizado um Modelo Linear Generalizado (GLM), com distribuição binomial, seguido do teste de q-quadrado, para avaliar o efeito da presença das galhas artificiais na herbivoria foliar em plantas de *B. brevipes*. A altura da planta, e os tratamentos de plantas com galhas artificiais e plantas sem

galhas foram utilizados como variáveis preditoras e a porcentagem média de herbivoria foliar por planta como variável resposta. Os modelos GLMs foram conduzidos utilizando a função “glm”. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software RStudio versão 4.3.0 (RStudio Team, 2020).

Resultados

Galhas alteram as comunidades de artrópodes? Anulando os efeitos das galhas na planta hospedeira

Ao todo 258 artrópodes foram amostrados nas plantas de *B. brevipes* durante o primeiro experimento, os quais estão distribuídos em 93 morfoespécies, 3 classes e 12 ordens. A ordem mais encontrada nas plantas foi, Hymenoptera, mais precisamente, a família Formicidae (24,04%), seguido de Lepidoptera (18,99%), Hemiptera (17,44%), Diptera (11,63%), Araneae (9,69%), Coleoptera (7,75%). As outras ordens de artrópodes, Orthoptera, Polyxenida, Blattaria, Neuroptera, Pseudoscorpiones, e Thysanoptera somaram juntas (10,46%).

A riqueza de artrópodes não diferiu entre os tratamentos de plantas sem galhas, plantas com galhas isoladas, e plantas com galhas ($\chi^2= 2,496$; $p<0,287$) (Figura 2a; Tabela 1). Por outro lado, para a abundância houve efeito dos tratamentos ($\chi^2= 16,203$; $p<0,001$). O número de artrópodes foi em média maior 1,9 vezes em plantas com galhas ($3,65 \pm 1,01$), quando comparado a plantas com galhas isoladas ($1,90 \pm 0,36$), e 1,2 vezes maior quando comparado a plantas com galhas ausentes ($2,94 \pm 0,72$) (Figura 2b; Tabela 1). Em plantas com galhas os herbívoros apresentaram maior abundância ($\chi^2= 16,388$; $p<0,001$), enquanto os onívoros foram mais abundantes em plantas sem galhas ($\chi^2= 20,171$; $p<0,001$). A abundância dos predadores ($\chi^2= 1,736$; $p=0,419$), e dos detritívoros não diferiu entre os tratamentos ($\chi^2= 0,377$; $p=0,828$) (Figura 2c-e; Tabela 1). Quando comparamos cada tratamento entre as amostragens (pré-tratamento: quando as galhas estavam protegidas com o saco de voil e pós-tratamento: com o isolamento das galhas do grupo amostral - galhas isoladas),

tanto a riqueza, quanto a abundância de artrópodes, e a abundância de herbívoros diferiram entre os tratamentos, sendo maior na coleta pós-tratamento (Figura 2a-c; Tabela S1). Para a abundância de onívoros, não houve diferença entre os tratamentos (Figura 2d; Tabela S1). A abundância de predadores diferiu apenas em plantas sem galhas (Figura 2e; Tabela S1).

Em relação aos dois ambientes amostrados (conservado *versus* degradado), a riqueza de artrópodes foi maior em plantas localizadas no ambiente degradado ($\chi^2=13,943$; $p<0,001$), o mesmo foi encontrado para a abundância de artrópodes ($\chi^2=22,438$; $p<0,001$) (Figura 3a-f, Tabela 1). A abundância de herbívoros não diferiu entre os habitats ($\chi^2=0,638$; $p=0,424$). A abundância de onívoros também foi maior em plantas localizadas no ambiente degradado ($1,15 \pm 0,35$) ($\chi^2=24,863$; $p<0,001$), quando comparado ao conservado ($0,21 \pm 0,06$). Assim como a abundância de predadores foi maior no ambiente degradado ($0,52 \pm 0,15$; $\chi^2=7,748$; $p=0,005$), quando comparado ao conservado ($0,19 \pm 0,05$), e de detritívoros no ambiente degradado ($0,42 \pm 0,11$) ($\chi^2=9,097$; $p=0,002$), comparado ao conservado ($0,11 \pm 0,04$) (Tabela 1). Para os ambientes (conservado *versus* degradado), quando comparamos o efeito das coletas nos grupos amostrais, a riqueza de artrópodes foi maior nas coletas pós-tratamento para ambos os ambientes. Para os tratamentos galhas ausentes e presentes, no ambiente conservado, a riqueza de artrópodes foi maior na coleta pós-tratamento. Para o ambiente degradado, a riqueza de artrópodes foi maior em plantas com galhas na coleta pós-tratamento, quando comparada a coleta pré-tratamento. Para o tratamento de galhas isoladas a riqueza de artrópodes diferiu entre as coletas apenas para o ambiente conservado (Figura 3a-c; Tabela S1). A abundância de artrópodes diferiu entre as amostragens nos três tratamentos, para o ambiente conservado e para o ambiente degradado. Apenas no tratamento das galhas presentes houve diferença entre as coletas pré e pós-tratamento, sendo a abundância de artrópodes maior no tratamento em que as galhas naturais estavam presentes (Figura 3d-f; Tabela S1).

A composição de artrópodes diferiu nas plantas entre as coletas pré-tratamento e pós-tratamento (R global = 0,106; F = 10,439; P = 0,001) (Figura 5a), quando comparamos a composição entre os grupos amostrais, esta não diferiu (R global = 0,028; F = 1,294; P = 0,207) (Figura 5b) Já em relação aos habitats amostrados, a composição de artrópodes diferiu (R global = 0,031; F = 2,888; P = 0,007) (Figura 5c),

Finalmente, a porcentagem média de área foliar removida por planta variou de zero (folhas intactas), a 3,8%, no entanto, não houve diferença significativa entre os três tratamentos, planta com galhas, plantas com galhas isoladas e plantas sem galhas (Tabela 2).

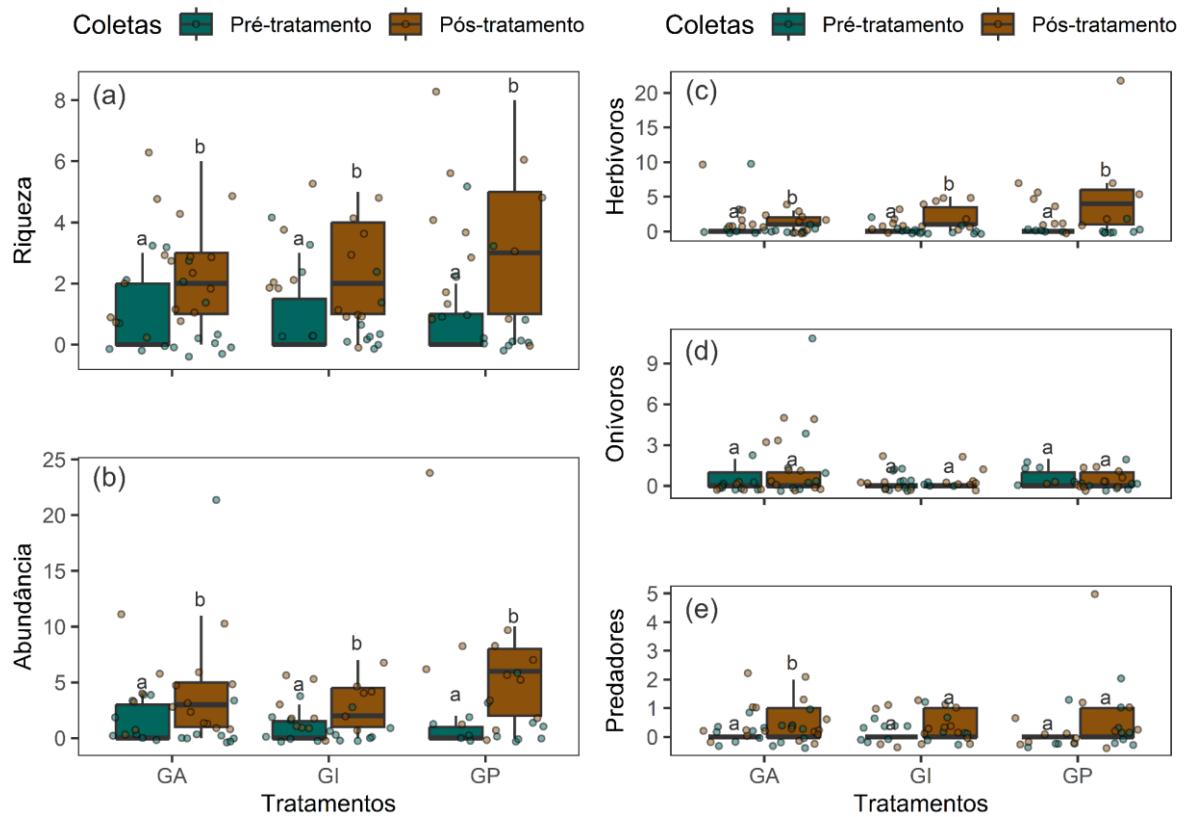


Figura 2. Riqueza de artrópodes (a), abundância de artrópodes (b), abundância de herbívoros (c), abundância de onívoros (d) e abundância de predadores (e), para os três tratamentos (GA=galhas ausentes, GI=galhas isoladas, e GP=galhas presentes) em indivíduos de *Bauhinia brevipes* no Cerrado, Minas Gerais, Brasil. As linhas dentro das caixas do boxplot representam a mediana, e as linhas verticais representam o primeiro e o quarto quartis, e as caixas representam o segundo e terceiro quartis. As letras diferentes sobre as caixas do boxplot indicam que os grupos de coletas

(pré-tratamento e pós-tratamento) diferiram estatisticamente uns dos outros ($p < 0,05$; teste pós-hoc GLMM/Tuckey, $\alpha = 0,05$).

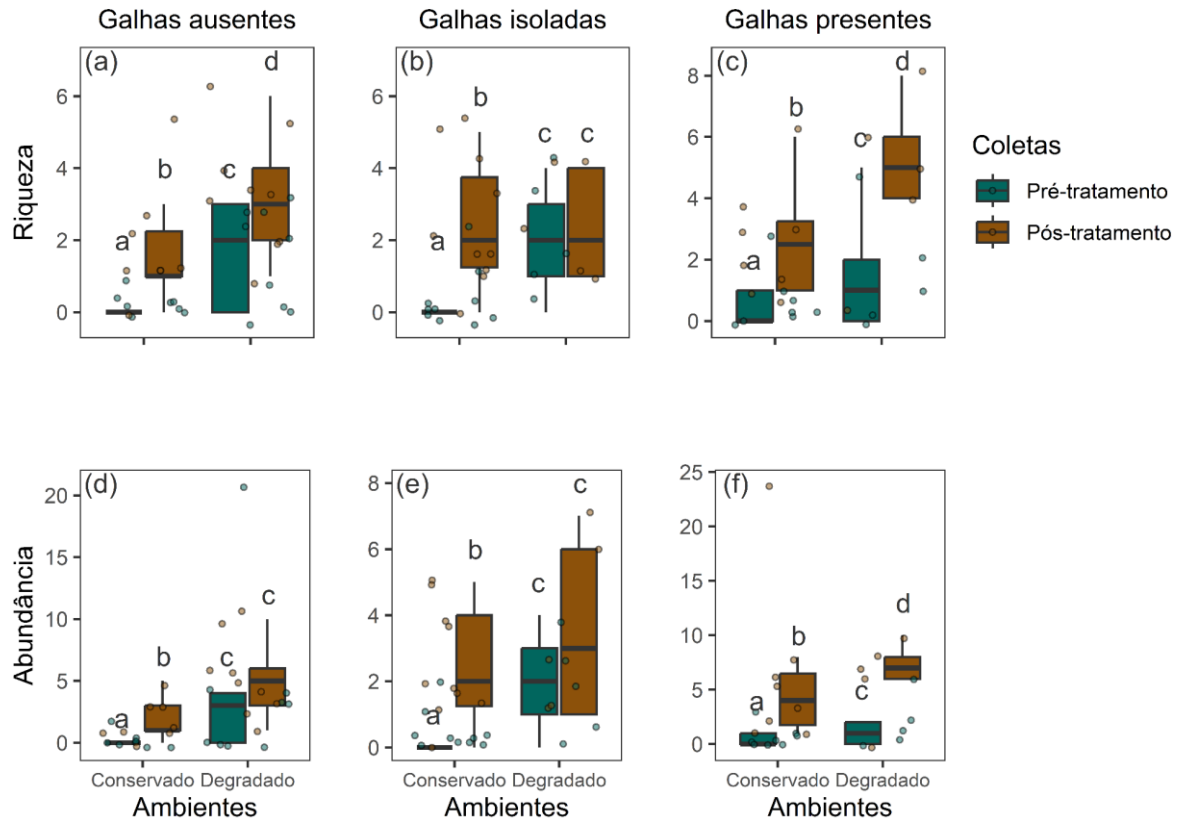


Figura 3. Riqueza de artrópodes para os três grupos amostrais: galhas ausentes (a), galhas isoladas (b), e galhas presentes (c); e abundância de artrópodes para os três grupos amostrais: galhas ausentes (d), galhas isoladas (e), e galhas presentes (f), em indivíduos de *Bauhinia brevipes*, para dois ambientes (conservado e degradado) no Cerrado, Minas Gerais, Brasil. As linhas dentro das caixas do boxplot representam a mediana, e as linhas verticais representam o primeiro e o quarto quartis, e as caixas representam o segundo e terceiro quartis. As letras diferentes sobre as caixas do boxplot indicam que os grupos de coletas (pré-tratamento e pós-tratamento) diferiram estatisticamente uns dos outros ($p < 0,05$; teste pós-hoc GLMM/Tuckey, $\alpha = 0,05$).

Galhas alteram as comunidades de artrópodes? Potencializando os efeitos das galhas na planta hospedeira

Foram amostrados 256 artrópodes nas plantas de *B. brevipes* durante o segundo experimento, os quais foram distribuídos em 62 morfoespécies, 3 classes e 11 ordens. Os artrópodes mais encontrados nas plantas foram, Hymenoptera, mais precisamente, Formicidae (53,91%). Seguido da ordem Lepidoptera (13,28%), Araneae (12,50%), Hemiptera (5,47%), Orthoptera (3,13%). As outras ordens, como Coleoptera, Diptera, Thysanoptera, Mantodea, Collembola, Blattodea e outros insetos não identificados somaram juntos (11,72%).

A riqueza de artrópodes diferiu entre os tratamentos de plantas com galhas artificiais e plantas sem galhas ($\chi^2= 3,823$; $p=0,050$; obs.: o valor de p foi marginal, no limite estatístico estabelecido, portanto, excepcionalmente, ele foi considerado como, como significativo), sendo maior em plantas com galhas artificiais (Figura 4a). Em relação a abundância, o número de artrópodes foi em média maior 2,2 vezes em plantas com galhas ($2,85 \pm 0,43$), quando comparado a plantas sem galhas ($1,41 \pm 0,21$) ($\chi^2= 23,332$; $p<0,001$) (Figura 4b). Quando avaliamos a abundância de herbívoros isoladamente, não houve diferença entre os tratamentos ($\chi^2= 0,111$; $p=0,738$), assim como para predadores ($\chi^2= 0,471$; $p=0,492$). Os onívoros foram em média 3,3 vezes mais abundantes em plantas com galhas artificiais ($1,76 \pm 0,39$) ($\chi^2= 41,843$; $p<0,001$), quando comparadas às plantas sem galhas ($0,53 \pm 0,15$) (Figura 4c-e, Tabela 1). Quando comparamos cada tratamento entre as amostragens, pré-tratamento (quando todas as plantas estavam sem galhas), e pós-tratamento (quando foram adicionadas galhas artificiais), não foi observada diferenças entre as amostragens para a plantas do tratamento galhas artificiais, para a riqueza de artrópodes (Figura 4a), bem como para a abundância de herbívoros (Figura 4c), no entanto, para ambos no tratamento galhas ausentes foi observado uma diferença significativa entre a coleta pré-tratamento e a coleta 2 (Tabela S2). A abundância de artrópodes diferiu entre as coletas três e quatro para o grupo de plantas com galhas artificiais, e para o tratamento galhas ausentes diferiu entre as coletas pré-tratamento e coleta dois (Figura 4b, Tabela S2). A abundância de

onívoros, diferiu entre a coleta três do pós-tratamento para o grupo de plantas com galhas artificiais, e para tratamento de galhas ausentes houve diferença entre as coletas um e três (Figura 4d, Tabela S2). E por último, para a guilda de predadores não foram encontradas diferenças entre as amostragens para os dois tratamentos (Figura 4e, Tabela S2).

A composição de artrópodes diferiu entre os grupos amostrais de plantas com galhas artificiais e plantas sem galhas (R global = 0,048; F = 4,474; P = 0,001) (Figura 5d). Por fim, a porcentagem média de área foliar removida por planta variou de zero (folhas intactas) a 14%, no entanto, não houve diferença entre os tratamentos de planta com galhas artificiais e plantas sem galhas (Tabela 2).

Tabela 1: Resultados dos Modelos Lineares Generalizados Mistos (GLMMs) para os experimentos 1 e 2, testando das variáveis explicativas (altura da planta, ambiente, número de galhas por planta, e tratamentos) sobre a riqueza, abundância de artrópodes e grupos funcionais: herbívoros, onívoros, predadores e detritívoros em indivíduos de *Bauhinia brevipes*, no Cerrado, Minas Gerais, Brasil.

Experimento	Variável resposta	Variável explicativa	Distribuição	χ^2	G L	Deviance	Valor de p
1	Riqueza	Altura	Poisson	5,121	14	281,28	0,023*
		Ambiente		13,943	12	286,40	0,001*
		Número de galhas		15,261	10	300,34	0,001*
		Tratamentos		2,496	8	315,6	0,287
1	Abundância	Altura	Poisson	15,015	14	428,45	0,001*
		Ambiente		22,438	12	443,46	0,001*
		Número de galhas		443,46	10	465,90	0,001*
		Tratamentos		16,203	8	496,02	0,001*
1	Herbívoros	Altura	Poisson	13,654	14	299,13	0,001*
		Ambiente		0,638	12	312,78	0,424
		Número de galhas		38,245	10	313,42	0,001*
		Tratamentos		16,388	8	351,67	0,001*
1	Onívoros	Altura	Poisson	4,881	14	188,35	0,027*
		Ambiente		24,863	12	193,23	0,001*
		Número de galhas		0,520	10	218,09	0,470
		Tratamentos		20,171	8	218,61	0,001*
1	Predadores	Altura	Poisson	0,414	14	128,65	0,519
		Ambiente		7,748	12	129,06	0,005*
		Número de galhas		0,012	10	136,81	0,910
		Tratamentos		1,736	8	136,82	0,419
1	Detritívoros	Altura	Poisson	0,020	14	97,193	0,886
		Ambiente		9,097	12	97,213	0,002*
		Número de galhas		0,469	10	106,31	0,493
		Tratamentos		0,377	8	106,78	0,828
2	Riqueza	Altura	Poisson	0,006	8	320,16	0,935
		Tratamentos		3,823	6	320,17	0,050*
2	Abundância	Altura	Poisson	0,250	8	512,95	0,616
		Tratamentos		23,332	6	513,20	0,001*
2	Herbívoros	Altura	Poisson	3,785	8	271,32	0,051
		Tratamentos		0,111	6	275,11	0,738
2	Onívoros	Altura	Poisson	0,02	8	423,46	0,887
		Tratamentos		41,843	6	423,48	0,001*
2	Predadores	Altura	Poisson	0,134	8	169,28	0,713
		Tratamentos		0,471	6	169,41	0,492

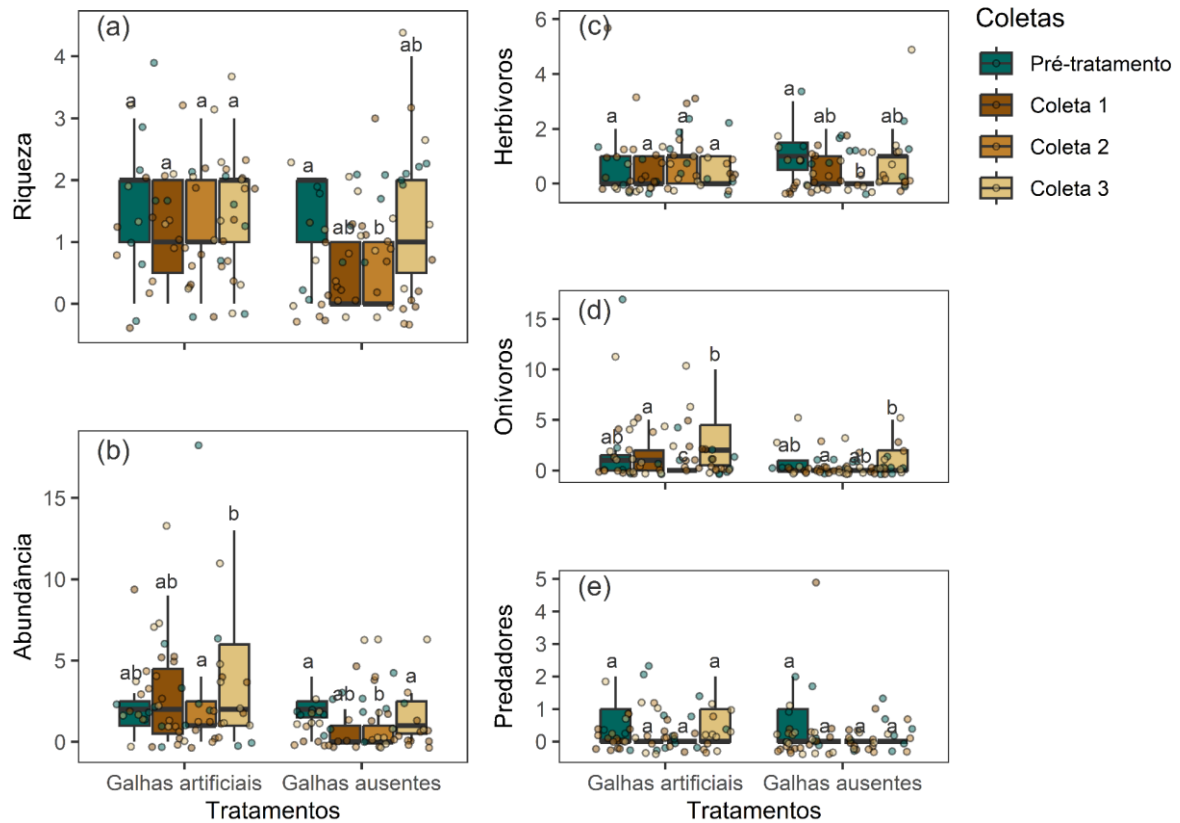


Figura 4. Riqueza de artrópodes (a), abundância de artrópodes (b), abundância de herbívoros (c), abundância de onívoros (d) e abundância de predadores (e), para os dois tratamentos (galhas artificiais e ausentes) em indivíduos de *Bauhinia brevipes* no Cerrado, Minas Gerais, Brasil. As linhas dentro das caixas do boxplot representam a mediana, e as linhas verticais representam o primeiro e o quarto quartis, e as caixas representam o segundo e terceiro quartis. As letras diferentes sobre as caixas do boxplot indicam que os grupos de coletas (pré-tratamento, e pós-tratamentos, 1, 2 e 3) diferiram estatisticamente uns dos outros ($P < 0,05$; teste pós-hoc GLMM/Tuckey, $\alpha = 0,05$).

Tabela 2: Resultados dos Modelos Lineares Generalizados (GLMs) testando das variáveis explicativas (ambientes, número de galhas por planta, altura da planta e tratamentos) sobre a porcentagem média de área foliar removida em plantas de *Bauhinia brevipes*, no Cerrado, Minas Gerais, Brasil.

Experimento	Variável resposta	Variável explicativa	Distribuição	GL	Deviance	p-Value
1	Porcentagem média herbivoria	Ambientes	Binomial	40	0,310	0,847
		Número de galhas	Binomial	41	0,347	0,923
		Altura	Binomial	42	0,357	0,948
		Tratamentos	Binomial	44	0,361	0,987
2	Porcentagem média herbivoria	Altura	Binomial	28	1,029	0,966
		Tratamentos	Binomial	29	1,031	0,782

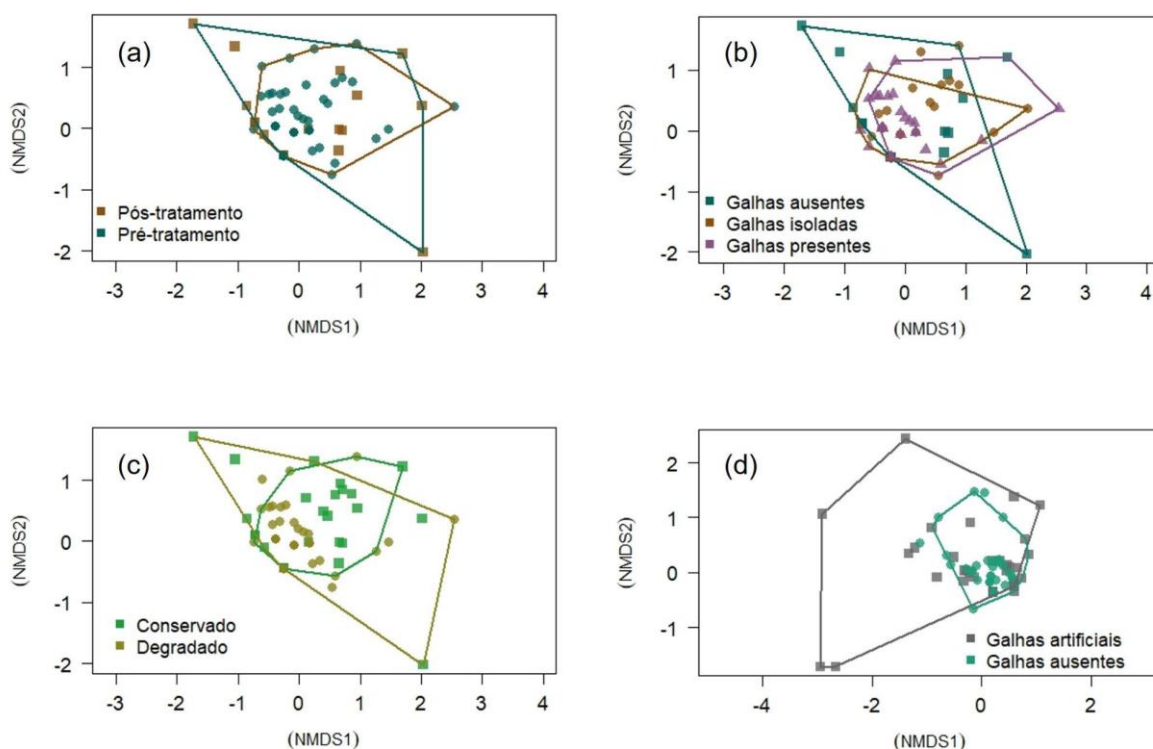


Figura 5. Análise multidimensional não métrica (NMDS) mostrando variação na composição de espécies em indivíduos de *Bauhinia brevipes* entre as coletas pré- e pós-tratamento (a), entre os grupos amostrais (b), e entre os ambientes (c) para o experimento 1, e entre os grupos amostrais (d) para o experimento 2 no Cerrado, Minas Gerais, Brasil. Valor de estresse = 0,184 (a,b e c), e valor de estresse = 0.169 (d).

Discussão

Nossos resultados demonstraram que os insetos indutores de galhas podem desempenhar um papel essencial como engenheiros de ecossistemas, pois as galhas podem atuar como abrigos nas plantas hospedeiras, promovendo um aumento na riqueza e abundância de artrópodes. As galhas caulinares induzidas pelo lepidóptero galhador em *B. brevipes*, são estruturas que podem permanecer na planta por meses, possuindo a capacidade de afetar a composição da comunidade de artrópodes, tal como ocorrem em outros sistemas de insetos engenheiros que induzem galhas, e.g., vespas (Wheeler & Longino, 1988; Wetzel et al. 2016; Giannetti et al. 2019), psilídeos (Barbosa et al. 2019; 2023) e dípteros (Crawford et al. 2007). Outros insetos considerados engenheiros também afetam a composição, como lepidópteros enroladores de folhas (Lill & Marquis, 2003; Nakamura & Ohgushi, 2003; Vieira & Romero, 2013; Henriques et al. 2019), lepidópteros construtores de amarras foliares (Wang et al. 2012; Velasque & Del-Claro, 2016), lepidópteros minadores de folhas (Kagata & Ohgushi, 2004) e besouros perfuradores de caule (Calderón-Cortés et al. 2016; Novais et al. 2017). Esses estudos contribuem para um melhor entendimento das complexas interações ecológicas da natureza, onde os insetos galhadores desempenham um papel essencial na manutenção da biodiversidade e da estabilidade dos ambientes naturais.

Entendendo os efeitos da presença das galhas sobre a diversidade de artrópodes

A presença das galhas apresentou um efeito diferente entre as guildas alimentares. As plantas com galhas naturais apresentaram maior abundância de artrópodes, do que as plantas com galhas isoladas e plantas sem galhas. O mesmo padrão foi observado para os herbívoros. De maneira oposta, os onívoros foram mais abundantes em plantas sem galhas. A abundância dos predadores e detritívoros não diferiu entre os tratamentos, evidenciando que provavelmente para

esse sistema, a presença das galhas não configura um recurso para esses artrópodes, uma vez que eles estão igualmente presentes nas plantas dos três tratamentos. Quando comparamos cada tratamento entre as amostragens pré-tratamento (quando as galhas estavam protegidas com o saco de *voil*), e pós-tratamento (com o isolamento das galhas do tratamento - galhas isoladas), ficou evidente que a presença das galhas teve um efeito positivo aumentando a riqueza e abundância de artrópodes no tratamento em que as galhas estavam presentes. O mesmo padrão foi observado para os herbívoros. Para os onívoros, não houve diferença na abundância entre as coletas pré e pós-tratamento dentro de cada tratamento, já os predadores foram mais abundantes nas plantas naturalmente sem galhas. Esses resultados são reforçados, pela análise da composição de espécies de artrópodes que diferiu entre as coletas pré-tratamento e pós-tratamento, reforçando que a composição foi alterada quando as galhas se tornaram disponíveis nas plantas. O aumento na abundância de artrópodes em plantas com galhas era esperado, pelo fato dessas estruturas adicionarem as plantas uma maior complexidade estrutural, e heterogeneidade ambiental, propiciando a exploração por outros organismos (Jones et al. 1994; Araújo et al. 1995; Sugiura & Yamazaki, 2009; Wetzal et al. 2016; Pereira et al. 2021).

Nossos resultados evidenciam que a presença da galha na pastagem atua como um ambiente de refúgio para os artrópodes. Uma vez que, quando comparamos os resultados entre as plantas amostradas no ambiente degradado versus o ambiente conservado, os herbívoros foram igualmente presentes nos dois ambientes. No entanto, a riqueza e a abundância de artrópodes das guildas de onívoros, predadores e detritívoros foram maiores em plantas localizadas no ambiente degradado. Além disso, a composição das espécies de artrópodes também difere entre esses dois ambientes. O ambiente de pastagem possui pouca heterogeneidade ambiental, sendo composto principalmente por gramíneas, e outras plantas como a *Solanum lycocarpum* A.St.-Hil. (Solanaceae), *Vernonia polyanthes* (Spreng.) Less. (Asteraceae), *Mimosa pudica* L. (Fabaceae), além da própria *Bauhinia*

brevipes. Neste sentido, é provável que neste ambiente, a presença da planta hospedeira, e principalmente, a presença das galhas engenheiras, tenham atuado como nichos e refúgios essenciais para estes artrópodes. Outro fator que evidencia a relevância das galhas como refúgios para os artrópodes em ambientes pouco diversos, foi o resultado das plantas do tratamento (galhas presentes), no ambiente degradado, apresentarem maior riqueza e abundância de artrópodes quando as galhas foram disponibilizadas para a ocupação. Nossos resultados mostram, o quanto a presença desses abrigos nas plantas pode contribuir para a criação de novos nichos a serem ocupados, bem como proporcionar um aumento da heterogeneidade ambiental em locais com baixa diversidade (Stein et al. 2014). Sendo assim, sugerimos que em projetos de recuperação de áreas degradadas, as plantas que apresentam múltiplas interações ecológicas como as apresentadas por *Bauhinia brevipes* sejam consideradas, pois poderiam contribuir diretamente com o aumento da heterogeneidade ambiental e aumento da diversidade de insetos e artrópodes localmente, por hospedarem organismos engenheiros de ecossistemas.

A presença de galhas nas plantas não interferiu na porcentagem média de herbivoria foliar experimentada pelas plantas de *B. brevipes*, em ambos os experimentos (com galhas naturais e galhas artificiais). Apesar da abundância de herbívoros ter sido maior em plantas com galhas naturais, e maior também na coleta pós-tratamento para os três grupos amostrais, aproximadamente, metade dos herbívoros encontrados nas plantas são sugadores de seiva, representados pelos percevejos, e não mastigadores. Diante disso, como os efeitos de sugadores não foram mensurados, sugerimos que sejam feitos também estudos sobre as interações entre insetos sugadores e formigas, além de análises fisiológicas das plantas para se avaliar os efeitos desta guilda sobre as plantas.

Entendendo os efeitos potencializadores das galhas sobre a diversidade de artrópodes

Nossos resultados demonstram que as plantas com galhas artificiais atraíram mais artrópodes. Visto que, a riqueza e a abundância de artrópodes foram maiores em plantas com galhas artificiais em comparação às plantas sem galhas. Neste sentido, a presença das galhas artificiais contribuiu significativamente para uma maior heterogeneidade do habitat, de forma similar aos efeitos das galhas naturais. Este resultado está de acordo com a nossa hipótese de que a presença de galhas aumenta a diversidade de artrópodes, fato já relatado em estudos da mesma natureza (e.g., Wheeler & Longino, 1988; Cornelissen et al. 2016; Pereira et al. 2021, 2022). No entanto, nosso estudo adicionou uma inovação através da manipulação experimental, selecionando plantas onde as galhas não estavam naturalmente presentes, e com isso, conseguimos avaliar o efeito aditivo das galhas artificiais para artrópodes em um outro conjunto de plantas. Quando avaliamos a abundância de herbívoros isoladamente, não houve diferença entre os tratamentos, assim como não houve para predadores. Os onívoros foram mais abundantes em plantas com galhas artificiais, o que ficou evidenciado pela diferença na composição de espécies entre plantas com galhas artificiais e plantas sem galhas. Neste experimento, as formigas representaram mais de 50% dos artrópodes amostrados, e a sua presença dominante nas plantas pode ter interferido na abundância de outros grupos funcionais (herbívoros e predadores). Em estudos realizados com uma planta típica do cerrado que possui nectários extraflorais, *Qualea multiflora* Mart. (Vochysiaceae), a presença de formigas foi capaz de reduzir a abundância de herbívoros (mastigadores e sugadores) (Del-Claro et al. 1996; Nahas et al. 2012), e a abundância e a riqueza de predadores (aranhas) (Nahas et al. 2012). É provável que as formigas saibam reconhecer as plantas com galhas, e permaneçam mais tempo sobre elas forrageando, ou buscando novos sítios para nidificação. Giannetti et al. (2019), sugeriram inclusive que as formigas que habitam as galhas de carvalho protegem eficientemente suas plantas hospedeiras contra predadores e patógenos, mesmo que as

galhas inicialmente tenham um custo potencial para a planta. Sugerimos no futuro um experimento em que haja a supressão da presença das formigas em parte da planta, a fim de testar o quanto a presença desse grupo interfere nas dinâmicas dos demais grupos funcionais sobre as plantas.

No experimento com galhas artificiais não foi encontrada diferença na abundância de herbívoros entre os grupos amostrais, bem como entre as diferentes amostragens. Esses resultados reforçam a constatação de que não houve diferença na porcentagem média de herbivoria foliar. Em ambos os experimentos a presença de onívoros foi maior em plantas com galhas (naturais ou artificiais), e em nosso estudo os onívoros são representados majoritariamente pelas formigas. As formigas podem ter exercido um papel biótico defensivo nas plantas reduzindo a presença dos herbívoros (Rosumek et al. 2009; Lange & Del-Claro, 2014), como, por exemplo, a presença da larva de um lepidóptero raspador muito frequente em *B. brevipes*. A presença das formigas na planta pode afetar a sobrevivência das larvas de lepidoptera (Sendoya et al. 2016), bem como, as decisões de colonização das fêmeas que depositam ovos nas plantas (Sendoya et al. 2009). Em uma meta-análise, os autores concluíram, que as formigas podem agir como defesas bióticas nas plantas reduzindo a abundância de herbívoros em 50%, e reduzindo conseqüentemente as taxas de herbivoria, enquanto as formigas são beneficiadas com abrigos e locais para nidificação nas plantas (Rosumek et al. 2009). Dessa maneira, as formigas podem desempenhar um papel significativo na interação entre a planta e os insetos galhadores.

Conclusão

Por fim, por meio dos experimentos de manipulação experimental de galhas naturais e artificiais, foi possível mostrar que os efeitos das galhas como engenheiras de ecossistemas. Essa relação vai além de simplesmente fornecer habitat para insetos e artrópodes, visto que, também incluem efeitos nas comunidades de artrópodes que interagem com as plantas hospedeiras. A

dependem dos grupos funcionais que interagem com essas estruturas, e.g., herbívoros, onívoros, ou predadores, a resposta na comunidade pode ser diferente. Por fim, sugerimos ainda uma análise mais apurada das relações entre as galhas e as formigas, pois de acordo com resultados encontrados, as formigas podem ter um papel chave nas interações com outros artrópodes na planta.

Referências

- Almeida, M. F. B., Santos, L. R., & Carneiro, M. A. A. (2014). Senescent stem-galls in trees of *Eremanthus erythropappus* as a resource for arboreal ants. *Revista Brasileira de Entomologia*, 58(3), 265–272. <https://doi.org/10.1590/S0085-56262014000300007>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., De Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Anderson, M. (2001). A new method for non-parametric multivariate analysis of variance. *Austral Ecology*, 26, 32–46. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2001.01070.pp.x>
- Anderson, M. (2006). Distance-based tests for homogeneity of multivariate dispersions. *Biometrics*, 62(1), 245–253. <https://doi.org/10.1111/j.1541-0420.2005.00440.x>
- Araújo, L. M., Lara, A. C. F., & Fernandes, G. W. (1995). Utilization of apion sp. (Coleoptera apionidae) galls by an ant community in southeastern Brazil. *Tropical Zoology*, 8(2), 319–324. <https://doi.org/10.1080/03946975.1995.10539288>
- Barbosa, M., Fernandes, G. W., & Morris, R. J. (2019). Interaction engineering: Non-trophic effects modify interactions in an insect galler community. *Journal of Animal Ecology*, 88(8), 1168–1177. <https://doi.org/10.1111/1365-2656.13025>
- Barbosa, M., Fernandes, G. W., & Morris, R. J. (2023). Experimental evidence for a hidden network of higher-order interactions in a diverse arthropod community. *Current Biology*, 33(2), 381–388.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.11.057>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B. M., & Walker, S. C. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1). <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>
- Calderón-Cortés, N., Uribe-Mú, C. A., Martínez-Méndez, A. K., Escalera-Vázquez, L. H., Cristobal-Pérez, E. J., García-Oliva, F., & Quesada, M. (2016). Ecosystem engineering and

- manipulation of host plant tissues by the insect borer *Oncideres albomarginata* chamela. *Journal of Insect Physiology*, 84, 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2015.10.008>
- Clarke, K. (1993). Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology*, 18(1), 117–143. <https://doi.org/10.1111/J.1442-9993.1993.TB00438.X>
- Cornelissen, T., Cintra, F., & Santos, J. C. (2016). Shelter-Building Insects and Their Role as Ecosystem Engineers. *Neotropical Entomology*, 45(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s13744-015-0348-8>
- Cornelissen, T. G., & Fernandes, G. W. (2001). Patterns of attack by herbivores on the tropical shrub *Bauhinia brevipes* (Leguminosae): Vigour or chance? <Http://Www.Eje.Cz/Doi/10.14411/Eje.2001.006.Html>, 98(1), 37–40. <https://doi.org/10.14411/EJE.2001.006>
- Cornelissen, T., Madeira, B., Allain, L., Lara, A., Araújo, L., & Fernandes, GW. (1997). Multiple responses of insect herbivores to plant vigor. *Ciência & Cultura*, 49, 285–288.
- Craig, T., Araújo, L., Itami, J., & Fernandes, G. (1991). Development of the insect community centered on a leaf bud gall formed by a weevil (Coleoptera: Curculionidae) on *Xylopia* (Annonaceae). *Revista Brasileira de Entomologia*, 35, 311–317.
- Crawford, K. M., Crutsinger, G. M., & Sanders, N. J. (2007). Host-plant genotypic diversity mediates the distribution of an ecosystem engineer. In *Notes Ecology* (Vol. 88, Issue 8).
- Crutsinger, G. M., Habenicht, M. N., Classen, A. T., Schweitzer, J. A., & Sanders, N. J. (2008). Gallings by *Rhopalomyia solidaginis* alters *Solidago altissima* architecture and litter nutrient dynamics in an old-field ecosystem. *Plant and Soil*, 303(1–2), 95–103. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9490-3>
- Del-Claro, K., Berto, V., & Réu, W. (1996). Effect of herbivore deterrence by ants on the fruit set of an extrafloral nectary plant, *Qualea multiflora* (Vochysiaceae). *Journal of Tropical Ecology*, 12(6), 887–892. <https://doi.org/10.1017/S0266467400010142>
- Fernandes, G. (1998). Hypersensitivity as a Phenotypic Basis of Plant Induced Resistance Against a Gallings Insect (Diptera: Cecidomyiidae). *Environmental Entomology*, 27(2), 260–267. <https://doi.org/10.1093/ee/27.2.260>
- Fernandes, G., Cornelissen, T., Lara, T., & Isaias, R. (2000). Plants fight gall formation: hypersensitivity. *Ciência & Cultura*, 52, 49–54.

- Fernandes, G. W., Boecklen, W. J., Martins, R. P., & Castro, A. G. (1988). Ants associated with a coleopterous leaf-bud gall on *Xylopia aromatica* (Annonaceae). *Proceedings of the Entomological Society of Washington*, 91(1), 81–87.
- Giannetti, D., Castracani, C., Spotti, F. A., Mori, A., & Grasso, D. A. (2019). Gall-colonizing ants and their role as plant defenders: From ‘bad job’ to ‘useful service.’ *Insects*, 10(11). <https://doi.org/10.3390/insects10110392>
- Gonçalves-Alvim, S., Landau, E. C., Fagundes, M., Silva, V., Nunes, Y. R. F., & Fernandes, G. W. (1999). Abundance and impact of a Lepidopteran gall on *Macairea radula* (Melastomataceae) in the Neotropics. *International Journal of Ecology and Environmental Sciences*, 25(2), 115–125.
- Henriques, N. R., Cintra, F., Pereira, C. C., & Cornelissen, T. (2019). Indirect effects of ecosystem engineering by insects in a tropical liana. *Arthropod-Plant Interactions*, 13(3), 499–504. <https://doi.org/10.1007/s11829-018-9661-6>
- Jones, C. G., Lawton, J. H., & Shachak, M. (1994). Organisms as Ecosystem Engineers. *Oikos*, 69(3), 373. <https://doi.org/10.2307/3545850>
- Jones, C. G., Lawton, J. H., & Shachak, M. (1997). Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers. In *Special Feature Ecology* (Vol. 78, Issue 7). [https://doi.org/https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1997\)078\[1946:PANEOO\]2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1890/0012-9658(1997)078[1946:PANEOO]2.0.CO;2)
- Kagata, H., & Ohgushi, T. (2004). Leaf Miner as a Physical Ecosystem Engineer: Secondary Use of Vacant Leaf Mines by Other Arthropods. *Annals of the Entomological Society of America*, 97, 923–927. www.tsb.info.nih.gov/nih-
- Lange, D., & Del-Claro, K. (2014). Ant-plant interaction in a tropical Savanna: May the network structure vary over time and influence on the outcomes of associations? *PLoS ONE*, 9(8). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0105574>
- Lill, J. T., & Marquis, R. J. (2003). Ecosystem engineering by caterpillars increases insect herbivore diversity on white oak. *Ecology*, 84(3), 682–690.
- Maia, V. C., & Fernandes, G. W. (2005). Two new species of *Asphondyliini* (Diptera: Cecidomyiidae) associated with *Bauhinia brevipes* (Fabaceae) in Brazil. *Zootaxa*, 1091, 27–40. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.1091.1.2>
- Maia, V. C., & Silva, B. G. (2021). Insect galls of the Brazilian cerrado: Associated fauna. *Biota Neotropica*, 21(3). <https://doi.org/10.1590/1676-0611-BN-2021-1202>

- Marquis, R. J., Baer, C. S., Lill, J. T., & Wang, H. G. (2022). The Impact of Construct Building by Caterpillars on Arthropod Colonists in a World of Climate Change. 509–537. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86688-4_16
- Marquis, R. J., & Lill, J. T. (2007). Effects of arthropods as physical ecosystem engineers on plant-based trophic interaction webs. In *Ecological Communities: Plant Mediation in Indirect Interaction Webs* (pp. 246–274). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511542701.012>
- Nahas, L., Gonzaga, M. O., & Del-Claro, K. (2012). Emergent Impacts of Ant and Spider Interactions: Herbivory Reduction in a Tropical Savanna Tree. *Biotropica*, 44(4), 498–505. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.2011.00850.x>
- Nakamura, M., & Ohgushi, T. (2003). Positive and negative effects of leaf shelters on herbivorous insects: Linking multiple herbivore species on a willow. *Oecologia*, 136(3), 445–449. <https://doi.org/10.1007/s00442-003-1285-5>
- Novais, S. M. A., DaRocha, W. D., Calderón-Cortés, N., & Quesada, M. (2017). Wood-boring beetles promote ant nest cavities: extended effects of a twig-girdler ecosystem engineer. *Basic and Applied Ecology*, 24, 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.baae.2017.09.001>
- Oksanen J, Simpson G, Blanchet F, Kindt R, Legendre P, Minchin P, O’Hara R, Solymos P, Stevens M, Szoecs E, Wagner H, Barbour M, Bedward M, Bolker B, B. D., Carvalho G, Chirico M, De Caceres M, Durand S, Evangelista H, ... Weedon J. (2022). *Vegan: Community Ecology Package* (R package version 2.6-4). <<https://CRAN.R-project.org/package=vegan>>
- Pereira, C. C., Novais, S., Barbosa, M., Negreiros, D., Gonçalves-Souza, T., Roslin, T., Marquis, R., Marino, N., Novotny, V., Orivel, J., Sui, S., Aires, G., Antoniazzi, R., Dáttilo, W., Breviglieri, C., Busse, A., Gibb, H., Izzo, T., Kadlec, T., ... Cornelissen, T. (2022). Subtle structures with not-so-subtle functions: A data set of arthropod constructs and their host plants. *Ecology*, 103(4), e3639. <https://doi.org/10.1002/ECY.3639>
- Pereira, C. C., Sperandei, V. da F., Henriques, N. R., Silva, Á. A. N., Fernandes, G. W., & Cornelissen, T. (2021). Gallers as leaf rollers: ecosystem engineering in a tropical system and its effects on arthropod biodiversity. *Ecological Entomology*, 46(2), 470–481. <https://doi.org/10.1111/een.12993>

- Price, P. W., Fernandes, G., & Waring, G. (1987). Adaptive Nature of Insect Galls. *Environmental Entomology*, *16*(1), 15–24.
- RStudio Team (2020). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>. (accessed on 31 de junho 2023).
- Rosumek, F. B., Silveira, F. A. O., De S. Neves, F., Newton, N. P., Diniz, L., Oki, Y., Pezzini, F., Fernandes, G. W., & Cornelissen, T. (2009). Ants on plants: a meta-analysis of the role of ants as plant biotic defenses. *Oecologia*, *160*(3), 537–549. <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1309-x>
- Santos, L. R., Feitosa, R. M., & Carneiro, M. A. A. (2017). The role of senescent stem-galls over arboreal ant communities structure in *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish (Asteraceae) trees. *Sociobiology*, *64*(1), 7–13. <https://doi.org/10.13102/sociobiology.v64i1.1174>
- Santos, M. G., Porto, G. F., Lancellotti, I. R., & Feitosa, R. M. (2019). Ant fauna associated with *Microgramma squamulosa* (Kaulf.) de la Sota (Polypodiaceae) fern galls. *Revista Brasileira de Entomologia*, *63*(2), 101–103. <https://doi.org/10.1016/j.rbe.2019.02.004>
- Sanver, D., & Hawkins, B. A. (2000). Galls as habitats: the inquiline communities of insect galls. Basic and Applied Ecology. In *Basic Appl. Ecol* (Vol. 1). <http://www.urbanfischer.de/journals/baecol>
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. In *Nature Methods* (Vol. 9, Issue 7, pp. 671–675). <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Schowalter, T. D. (2016). Insect Ecology: An Ecosystem Approach: Fourth Edition. In *Insect Ecology: An Ecosystem Approach: Fourth Edition*. Elsevier Inc.
- Sendoya, S. F., Blüthgen, N., Tamashiro, J. Y., Fernandez, F., & Oliveira, P. S. (2016). Foliage-dwelling ants in a neotropical savanna: effects of plant and insect exudates on ant communities. *Arthropod-Plant Interactions*, *10*(3), 183–195. <https://doi.org/10.1007/s11829-016-9423-2>
- Sendoya, S. F., Freitas, A. V. L., & Oliveira, P. S. (2009). Egg-Laying Butterflies Distinguish Predaceous Ants by Sight. *The American Naturalist*, *174*(1), 134–140. <https://doi.org/10.1086/599302>

- Silveira, F. A. O. (2006). Fenologia e biologia reprodutiva de *Bauhinia brevipes* Vogel (Fabaceae). (Dissertação de Mestrado). Instituto de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- Stein, A., Gerstner, K., & Kreft, H. (2014). Environmental heterogeneity as a universal driver of species richness across taxa, biomes and spatial scales. In *Ecology Letters* (Vol. 17, Issue 7, pp. 866–880). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1111/ele.12277>
- Stone, G. N., & Schönrogge, K. (2003). The adaptive significance of insect gall morphology. In *Trends in Ecology and Evolution* (Vol. 18, Issue 10, pp. 512–522). Elsevier Ltd. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00247-7](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00247-7)
- Sugiura, S., & Yamazaki, K. (2009). Gall-attacking behavior in phytophagous insects, with emphasis on Coleoptera and Lepidoptera. *Terrestrial Arthropod Reviews*, 2(1), 41–61. <https://doi.org/10.1163/187498309x435658>
- Vaz, S. da F., & Tozzi, A. M. A. (2003). *Bauhinia* ser. *Cansenia* (Leguminosae: Caesalpinioideae) no Brasil. *Rodriguésia*, 54, 55–143.
- Velasque, M., & Del-Claro, K. (2016). Host plant phenology may determine the abundance of an ecosystem engineering herbivore in a tropical savanna. *Ecological Entomology*, 41(4), 421–430. <https://doi.org/10.1111/EEN.12317>
- Vieira, C., & Romero, G. Q. (2013). Ecosystem engineers on plants: Indirect facilitation of arthropod communities by leaf-rollers at different scales. *Ecology*, 94(7), 1510–1518. <https://doi.org/10.1890/12-1151.1>
- Waltz, A., & Whitham, T. (1997). Plant development affects arthropod communities: opposing impacts of species removal. *Ecology*, 78(7), 2133–2144. [https://doi.org/https://doi.org/10.1890/0012-9658\(1997\)078\[2133:PDAACO\]2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1890/0012-9658(1997)078[2133:PDAACO]2.0.CO;2)
- Wang, H. G., Marquis, R. J., & Baer, C. S. (2012). Both host plant and ecosystem engineer identity influence leaf-tie impacts on the arthropod community of *Quercus*. *Ecology*, 93(10), 2186–2197. <https://doi.org/10.1890/11-1838.1>
- Wetzel, W. C., Screen, R. M., Li, I., McKenzie, J., Phillips, K. A., Cruz, M., Zhang, W., Greene, A., Lee, E., Singh, N., Tran, C., & Yang, L. H. (2016). Ecosystem engineering by a gall-forming wasp indirectly suppresses diversity and density of herbivores on oak trees. *Ecology*, 97(2), 427–438. <https://doi.org/10.1890/15-1347.1>

Wheeler, J., & Longino, J. (1988). Arthropods in live oak galls in Texas. *Entomological News*, 99(1), 25–29.

Tabela S1: Resultados dos Modelos Lineares Generalizados Mistos (GLMMs) para o experimento 1, com galhas naturais, para os três tratamentos, GA= galhas ausentes, GI= galhas isoladas, e GP= galhas presentes. Testando a variável explicativa coletas (pré e pós-tratamentos), sobre a riqueza, abundância de artrópodes e grupos funcionais: herbívoros, onívoros e predadores em indivíduos de *Bauhinia brevipes*, no Cerrado, Minas Gerais, Brasil.

Tratamentos	Ambiente	Variável resposta	Variável explicativa	Distribuição	χ^2	G	Deviance	Valor de p
GA	-	Riqueza	Coletas	Poisson	14,098	6	107,44	0,001*
GI	-	Riqueza			12,009	6	96,70	0,001*
GP	-	Riqueza			17,808	6	92,59	0,001*
GA	-	Abundância	Coletas	Poisson	6,838	6	153,71	0,008*
GI	-	Abundância			17,808	6	103,73	0,001*
GP	-	Abundância			52,254	6	115,94	0,001*
GA	-	Herbívoros	Coletas	Poisson	8,593	6	115,72	0,003*
GI	-	Herbívoros			25,642	6	73,299	0,001*
GP	-	Herbívoros			80,577	6	70,925	0,001*
GA	-	Onívoros	Coletas	Poisson	0,027	6	91,355	0,869
GI	-	Onívoros			17,515	6	35,030	0,477
GP	-	Onívoros			0,402	6	41,468	0,525
GA	-	Predadores	Coletas	Poisson	3,854	6	42,862	0,049*
GI	-	Predadores			0,505	6	36,643	0,477
GP	-	Predadores			1,359	6	43,938	0,247
GA	Conservado	Riqueza	Coletas	Poisson	13,447	6	32,967	0,001*
GI	Conservado	Riqueza			19,748	6	51,848	0,001*
GP	Conservado	Riqueza			10,587	6	47,818	0,001*
GA	Degradado	Riqueza	Coletas	Poisson	5,344	6	61,849	0,020*
GI	Degradado	Riqueza			0,182	6	34,550	0,669
GP	Degradado	Riqueza			7,57	6	40,720	0,005*
GA	Conservado	Abundância	Coletas	Poisson	11,252	6	38,761	0,001*
GI	Conservado	Abundância			20,912	6	52,741	0,001*
GP	Conservado	Abundância			42,736	6	66,367	0,001*
GA	Degradado	Abundância	Coletas	Poisson	2,044	6	99,072	0,152
GI	Degradado	Abundância			2,317	6	40,786	0,127
GP	Degradado	Abundância			12,198	6	46,025	0,001*

Tabela S2: Resultados dos Modelos Lineares Generalizados Mistos (GLMMs) para o experimento 2, com galhas artificiais, testando a variável explicativa coletas (pré-tratamento, e coletas 1, 2 e 3), sobre a riqueza, abundância de artrópodes e grupos funcionais: herbívoros, onívoros, predadores e detritívoros em indivíduos de *Bauhinia brevipes*, no Cerrado, Minas Gerais, Brasil.

Tratamentos	Variável resposta	Variável explicativa	Distribuição	χ^2	GL	Deviance	Valor de p
Galhas artificiais	Riqueza	Coletas	Poisson	2,234	10	165,92	0,525
Galhas ausentes	Riqueza			12,713	10	141,65	0,005*
Galhas artificiais	Abundância	Coletas	Poisson	15,405	10	274,22	0,001*
Galhas ausentes	Abundância			13,79	10	195,00	0,032*
Galhas artificiais	Herbívoros	Coletas	Poisson	5,212	10	130,06	0,156
Galhas ausentes	Herbívoros			13,082	10	118,57	0,004*
Galhas artificiais	Onívoros	Coletas	Poisson	33,938	10	226,26	0,001*
Galhas ausentes	Onívoros			13,174	10	102,57	0,004*
Galhas artificiais	Predadores	Coletas	Poisson	4,640	10	81,215	0,200
Galhas ausentes	Predadores			9,091	10	71,471	0,028*

Considerações finais

Os resultados obtidos na presente tese demonstram o quanto a flora de plantas hospedeiras e a fauna de insetos galhadores é diversa no bioma Cerrado, e como as interações entre insetos galhadores e plantas podem propiciar um aumento da diversidade de artrópodes no contexto da engenharia de ecossistemas. Diante disso, podemos destacar as seguintes conclusões para esta tese, são elas:

1. Capítulo 1: por meio de um levantamento de dados de inventários sobre insetos galhadores e suas plantas hospedeiras publicados na literatura, conseguimos estabelecer o estado atual do conhecimento sobre as comunidades de insetos galhadores e de plantas hospedeiras no Cerrado. Por meio desses resultados, foi possível apontar lacunas no conhecimento, bem como fornecer dados para testes de hipóteses ecológicas;
2. Capítulo 2: com base nos dados levantados no capítulo anterior, foi possível testar hipóteses ecológicas sobre a diversidade de insetos galhadores e plantas. Foi encontrado em escala regional, o mesmo padrão já verificado em escala local, onde os táxons de plantas hospedeiras mais diversos abrigam uma grande riqueza de insetos indutores de galhas. Além disso, foi encontrado entre as plantas hospedeiras do cerrado, plantas ameaçadas de extinção que podem abrigar muitas espécies de insetos indutores, incluindo espécies da família Asteraceae, o táxon com o maior número de plantas hospedeiras e insetos galhadores;
3. Capítulo 3: buscou-se compreender quais são os fatores que explicam a ocupação das galhas por ocupantes secundários. Foi encontrada uma relação positiva entre o volume das galhas e a presença de ocupantes secundários. Outras características morfológicas também influenciaram na ocupação das galhas, como a presença de tricomas e o órgão de ocorrência

das galhas. Além disso, o ambiente mais conservado apresentou mais galhas colonizadas por artrópodes;

4. Capítulo 4: testou-se, experimentalmente, efeitos das galhas caulinares induzidas por um microlepidóptero na planta hospedeira *Bauhinia brevipes* sobre a comunidade de artrópodes no Cerrado. Os experimentos conduzidos com galhas naturais e artificiais, mostraram que insetos indutores de galhas podem desempenhar um importante papel como engenheiros de ecossistemas. Tanto as galhas naturais, quanto as artificiais proporcionaram micro-habitats nas plantas hospedeiras, resultando em um aumento na riqueza e abundância de artrópodes.

Finalmente, ressaltamos a importância de conservar o Cerrado brasileiro para manter a diversidade de interações entre as plantas hospedeiras, e insetos indutores de galhas, bem como a fauna artrópodes associada a esses sistemas.