



Universidade de Brasília - UnB  
Instituto de Ciências Biológicas - IB  
Programa de Pós-Graduação em Ecologia

**Dinâmica espacial e temporal de populações de moscas-brancas  
(Hemiptera: Aleyrodidae) na paisagem revelada pelos isótopos estáveis**

Érika Cristina de Sousa Castro

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Brum Togni

Brasília, DF  
Março de 2023



Universidade de Brasília - UnB  
Instituto de Ciências Biológicas - IB  
Programa de Pós-Graduação em Ecologia

## **Dinâmica espacial e temporal de populações de moscas-brancas (Hemiptera: Aleyrodidae) na paisagem revelada pelos isótopos estáveis**

Érika Cristina de Sousa Castro

Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós- Graduação em Ecologia da  
Universidade de Brasília, como  
requisito parcial para obtenção do  
título de Mestre em Ecologia

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Brum Togni

Brasília, DF  
Março de 2023

Dinâmica espacial e temporal de populações de moscas-brancas (Hemiptera: Aleyrodidae)  
na paisagem revelada pelos isótopos estáveis

Érika Cristina de Sousa Castro

Dissertação apresentada ao Programa  
de Pós- Graduação em Ecologia da  
Universidade de Brasília, como  
requisito parcial para obtenção do  
título de Mestre em Ecologia

Data da defesa: 24/03/2023

**Banca Examinadora**

---

Prof. Dr. Pedro Henrique Brum Togni (Presidente/Orientador)  
Departamento de Ecologia/UnB

---

Prof. Dra. Rosana Tidon (Titular)  
Departamento de Genética e Morfologia/UnB

---

Dra. Carmen Silvia Soares Pires (Titular)  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária,  
Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia (CENARGEN)

---

Prof. Dr. Felipe Malheiros Gawryszewski (Suplente)  
Departamento de Zoologia/UnB

Brasília, DF  
Março de 2023

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Universidade de Brasília que vem sendo minha casa desde a graduação e me engrandeceu quanto profissional e quanto pessoa, me proporcionando vivências de que tenho tanto orgulho. Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) por ter me concedido a bolsa de mestrado, à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF) (Processo 00193-00000934/2019-11) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Processo 2018/18274-3) pelo financiamento do projeto. Este trabalho também teve apoio financeiro da CAPES – Código de Financiamento 001, através do Programa PROEX/CAPES.

Muita admiração e gratidão ao meu orientador Pedro Togni que foi paciente, presente e ainda conseguiu trocar boas risadas ao longo desta jornada enquanto me dizia que tudo iria dar certo. Junto a ele há uma equipe grande e participativa no Laboratório de Ecologia de Insetos (LECOI) que tornou esse trabalho possível. Em especial agradeço aos meus colegas de Pós-Graduação, Amanda Machado, Ana Cláudia, Danyelle Rocha, Gabriel Marins, Luan Souza, Natália Diesel, Patrícia Sujii e Rafaela Assunção que me apoiaram e prestaram suporte do começo ao fim. Se ciência não se faz sozinha, sei que fiz com as melhores pessoas possíveis. Agradeço também às minhas companheiras de campo e triagens incansáveis Karen Mendes, Luíza Cintra, Beatrice Gaspar, Celine Flores, Marina Pereira e Maria de Moura. Juntas seguimos até o final o nosso lema #vamosgaleramulherespesquisadoras.

Agradeço aos produtores Ademar, Severino, Jonivan, José Hilton, João Paulo, Tonho, Tota, Célio e Lucas que me receberam tão bem em suas propriedades, sempre trocando boas conversas, vivências do campo, dos alimentos e das mudanças do Cerrado. Vocês me ensinaram muito!

Parceiros incríveis e atenciosos surgiram nessa caminhada, sou grata à Prof<sup>ra</sup>. Dr<sup>a</sup>. Gabriela Nardoto e toda a sua equipe de laboratório que me recebeu muito bem nos momentos em que o utilizei. Obrigada a Roberta, a Fernanda e ao Vinícius pelos auxílios e tantas dicas com o processo de preparação das amostras para a análise de isótopos estáveis. Agradeço também ao Nicholas Camargo

pelos momentos de quebrar a cabeça com análises.

Sou grata aos colegas da Biologia Júlia de Góis (desde a matrícula), Vinicius Trindade (meu companheiro de partilhas), Vitor Sena (meu incentivador desde 2015), Laís Ribeiro (a quem tenho tamanha admiração), Krissy Norrana (abelhuda e sempre potente), Melissa Panhol (coisa linda e atenciosa), Helena Schuch (minha neuro preferida), Sarah Barreto (minha passagem de volta à órbita), Cibelle Borges (minha irmã de alma), Lucas Souza (poeta), cada um(a) na sua área me sanaram dúvidas, me motivaram, dividiram experiências e torceram por mim, por nós. Junto a eles a biologia me deu minha maior aliada em tempo integral ao longo desses dois anos: Ingrid Galiza. Indi, você foi um pilar nessa jornada, me salvou em situações de saúde mental, se abrigou na minha casa e na minha cabeça me lembrando quem sou. Sem você eu não teria conseguido. Amo e admiro você. Todos vocês.

Aos meus amigos de vida, obrigada por embarcarem no meu mundo com compreensão e empolgação, além das doses perfeitas entre motivação e descanso. Bruna Fonseca (leveei a engenheira mecatrônica para o campo), Nathália Lima, Bruna Letícia, William Jorge, Doralice Graciano, José Landim, Weberson Landim e Yassury Saira, vocês foram um respiro nessa caminhada. Às minhas irmãs e maior rede de apoio, Kimberly Oliveira, Jéssica Rodrigues, Keila Karina, Virgília Sousa, Linda Helen e Nayara Landim, nossa força me nutre e me ensina a potência de ser mulher para além de qualquer palavra. Nossas vidas estão conectadas pelo destino e pelas nossas lutas. Maninhas, vocês são a minha família.

Em especial agradeço com todo meu coração à minha companheira Nayara Landim que se fez presente 24h por durante essa jornada, mergulhando no mundo acadêmico para me compreender, me ajudar e me alertar quando eu precisava. Naynha, dividir a vida com você nesses 16 anos é de muita bênção. Nunca vou me esquecer das caronas e dos lanches na época em que ingressar em uma universidade pública ainda era um sonho para mim, com uma condição social tão precária como a daquela época, para que hoje eu me veja em uma pós-graduação. Como se não bastasse, a vida me agraciou com mais de você e hoje nossa união tem novas versões admiráveis e leves, como apoiar os

sonhos. Você é a melhor companheira que alguém pode ter. Te amo além.

Mais que agradecer eu quero dedicar cada detalhe deste trabalho ao meu irmão Guilherme, minha mãe e meu pai. Pai, você dividiu o dom da risada e carisma comigo, isso me levou a me comunicar tão bem entre produtores, funcionários da universidade e pesquisadores com humor e sagacidade. Mãe, sua força não é deste mundo. A senhora é um ser de luz e luta. Obrigada por dividir comigo a alegria e a garra de enfrentar o mundo, por interceder incansavelmente em cada etapa, por me inspirar sendo a maior referência que tenho de vencer o sistema ao qual somos submetidas diariamente como mulheres, pretas e estudantes de classe baixa. Gui, minha maior meta pessoal e profissional é refletir com você o quanto é árduo, mas valioso os caminhos do estudo e dos sonhos. Absolutamente tudo que faço penso em você. Meu maior tesouro nesse mundo. Você me deu amor desde o dia em que nasceu. Faça sempre melhor, sempre vá atrás como uma pantera negra! Amo vocês demais!

Agradeço à minha psicóloga Geórgia que me auxiliou tão bem a organizar as ideias, emoções e exaustão de trabalho com a minha essência e meus objetivos. Admiro imensamente essa profissão e não me canso de levantar a bandeira da saúde mental, principalmente no cenário acadêmico. Que possamos dar cada vez mais atenção ao nosso cansaço mental e sensorial. À minha avó Raimunda, agradeço pelas trocas de amor e conforto ao espírito com tanta fé e choradeira. Vozinha, você me lembra o amor de Deus. Logo, agradeço a Deus por ser meu melhor amigo me concedendo forças além da matéria ou dos olhos, por cuidar de mim, da minha família e amigos enquanto busquei forças na sua presença misteriosa e deliciosa, para devolver ao mundo as graças que recebo todo dia. Combati o bom combate.

Agradeço as diversas versões de mim mesma que encontrei nessa jornada. Agradeço por persistir e resistir, recomendo sermos mais pacientes e carinhosas com nós mesmas. A Érika de hoje tem imenso orgulho da Érika do início. Deixo meus agradecimentos finais em memória de Marcelo Merfort Ferreira, meu amigo de infância e de suspiro a cada vez que penso no valor da vida.

**UBUNTU!**  
*“Eu sou porque nós somos”*

## RESUMO

A fragmentação da paisagem ocasionada pela expansão agrícola influencia diretamente a distribuição espacial dos habitats e dos recursos favorecendo populações de insetos-praga como a mosca-branca *Bemisia tabaci*. Isso contribui para que as populações dispersem constantemente entre grandes e pequenos cultivos devido a efemeridade e variação da qualidade das manchas de recursos na paisagem. O objetivo deste estudo foi compreender como ocorre o uso do habitat e o movimento de dispersão de populações de moscas-brancas entre cultivos de larga e pequena escala. Nós realizamos experimentos em campo em áreas produtoras de soja e áreas produtoras de tomateiro na região leste do Distrito Federal, Brasil, entre fevereiro e maio de 2021 e de 2022. Coletamos amostras de plantas e indivíduos na soja e nos tomateiros em momentos diferentes do ciclo fenológico dos cultivos, para obter a razão dos isótopos de Carbono ( $^{13}\text{C}$ ) e Nitrogênio ( $^{15}\text{N}$ ) das plantas, e a composição isotópica dos insetos coletados nessas plantas. Também avaliamos a abundância e o crescimento populacional do inseto instalando armadilhas adesivas amarelas ao longo do ciclo de cada cultura. Observamos que as populações de moscas-brancas se comportam como metapopulações conectadas pela dispersão na paisagem. A composição isotópica de moscas-brancas revelou que cultivos em larga escala, como a soja, são habitats fonte de indivíduos que após a colheita dispersam e se redistribuem entre cultivos em pequena escala, como os tomateiros. Isto sugere a ocorrência de um efeito cascata em relação à migração e o crescimento populacional de moscas-brancas, que saem dos cultivos de soja em direção aos tomateiros. Portanto, entender a dinâmica espacial e o manejo de pragas como a mosca-branca demanda estratégias regionais, que incluem os cultivos em larga escala e cultivos menores adjacentes. Aqui propomos um modelo para o rastreamento de insetos polívoros, utilizando isótopos estáveis, que se mostraram uma boa ferramenta para traçar estratégias que tenham como finalidade o manejo de pragas que vai além de uma única propriedade (Area-wide Pest Management).

**Palavras-chave:** *Bemisia tabaci*; insetos polívoros; metapopulações; dispersão; agroecossistemas

## ABSTRACT

The landscape fragmentation caused by agricultural expansion directly influences the spatial distribution of habitats and resources that favor insect pests such as the whitefly *Bemisia tabaci*. This causes individuals to constantly disperse between large and small crops due to the ephemerality and variation in the resource quality inside patches in the landscape. The objective of this study was to understand how the habitat use and dispersal movement of whiteflies occurs between large and small crops. We carried out a field experiment in soybean growing areas and tomato growing areas in the eastern region of the Federal District, Brazil, between February and May 2021 and 2022. We collected samples of plants and adult whiteflies on soybean and tomato plants at different periods of the crop cycles, in order to obtain the ratio of carbon ( $^{13}\text{C}$ ) and nitrogen ( $^{15}\text{N}$ ) isotopes of the samples. We also installed yellow sticky traps throughout each crop cycle to assess insect abundance and population growth. We observed that whiteflies behave as metapopulations connected by dispersion in the landscape. An isotopic composition of whiteflies revealed that large-scale crops such as soybeans are source habitats for insects that will disperse after harvest and colonize small-scale crops such as tomatoes. This suggests the occurrence of a cascade effect in relation to the migration and population growth of whiteflies, which arise from soybean crops towards tomato plants. Therefore, understanding the spatial dynamics and management of pests such as whiteflies requires regional strategies, which include large-scale and adjacent smaller crops. Here we propose a model for tracking polyphagous insects, using stable isotopes, which has been found to be a good tool for devising strategies aimed at pest management that goes beyond a single property (Area-wide Pest Management).

**Keywords:** *Bemisia tabaci*; polyphagous insects; metapopulations; dispersal; agroecosystem

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	10
MATERIAL E MÉTODOS .....	13
<i>Área de Estudo</i> .....	13
<i>Sistema de estudo</i> .....	14
<i>Experimento em casa de vegetação</i> .....	16
<i>Uso de habitat na paisagem usando isótopos estáveis</i> .....	17
<i>Amostragem populacional de moscas-brancas</i> .....	18
<i>Análise de isótopos estáveis</i> .....	19
<i>Análises estatísticas</i> .....	21
RESULTADOS.....	23
<i>Experimento em casa de vegetação</i> .....	23
<i>Uso do habitat por populações de moscas-brancas na paisagem</i> .....	24
<i>Dinâmica espaço-temporal de populações de moscas-brancas entre e dentre habitats</i> .....	28
DISCUSSÃO.....	33
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	38

## INTRODUÇÃO

A fragmentação de habitats naturais intensificada pela expansão da matriz agrícola favorece espécies-praga ao alterar como suas populações dispersam entre habitats apropriados e inapropriados na paisagem e usam os recursos locais (Hendrickx et al. 2007; Fahrig et al. 2011; Dainese et al. 2019). Em matrizes agrícolas os recursos podem ser abundantes, concentrados e previsíveis para insetos fitófagos que podem alcançar altas taxas de crescimento populacional e causar danos às culturas agrícolas (Root 1973; Hambäck e Englund 2005; Larsen e Noack 2021). Entretanto, os habitats agrícolas sofrem distúrbios constantes (e.g., práticas culturais, uso de inseticidas e colheita) que forçam as populações a estarem em contínua dinâmica de troca de indivíduos entre as manchas de recursos na paisagem, caracterizando populações locais instáveis conectadas pela dispersão (Hanski 1998, 1999; Mazzi e Dorn 2012). A dinâmica local da população e o crescimento populacional nessas manchas podem ser influenciados pela alta qualidade do habitat (i.e., habitats com hospedeiros preferenciais para insetos fitófagos) ou pelo tamanho que a mancha ocupa na paisagem (Bergamin Filho et al. 2020). Cultivos em larga escala podem então atuar como receptores ou fontes de indivíduos para outros cultivos na paisagem e agravar regionalmente os problemas com pragas (Hanski e Singer 2001; Hendrickx et al. 2007; Martin et al. 2016).

Uma das pragas que têm se beneficiado da expansão agrícola em todo o mundo é a mosca-branca *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Hemiptera: Aleyrodidae), sendo inclusive considerada a praga do século (Gilbertson et al. 2015). Existem outras espécies e biótipos do gênero *Bemisia*. Estima-se que existam mais de 20 biótipos no mundo, cada um com características e comportamentos distintos entre si (Brown et al. 1995). A espécie *Bemisia tabaci* MEAM-1 (antigo biótipo B) é a mais presente em todo o Brasil sendo completamente disseminada e associada a diversas plantas hospedeiras (Villas Bôas 2000). Além disso, é um inseto super vetor de mais de 110 espécies de vírus que causam danos significativos a diversos cultivos de interesse comercial no mundo (Byrne e Bellows 1991; Gilbertson et al. 2015). Alguns estudos mostram que, apenas no Brasil, seus impactos econômicos já foram

estimados em US\$714 milhões/ano, afetando pequenos e grandes produtores (Oliveira et al. 2013) ao longo de todo o desenvolvimento das culturas hospedeiras.

A mosca-branca possui um ciclo de vida com fases de ovo, ninfa (quatro ínstaes) e adulto, no qual seu desenvolvimento pode variar em relação ao hospedeiro e às condições do clima (Toscano et al. 2016). Em cultivos de tomate, por exemplo, o tempo desde a deposição dos ovos até a fase adulta pode variar entre 20 - 27 dias a 27°C (Villas Bôas et al. 2002). Outros fatores relevantes são que há altas taxas de oviposição, altas taxas de eclosão e baixa mortalidade entre as ninfas (Fancelli e Vendramim 2002; Toscano et al. 2016), favorecendo surtos populacionais. Além disso, a mosca-branca é um inseto polífago e cosmopolita, que pode se dispersar continuamente a distâncias entre 2-8 km por dia, por uma ampla diversidade de habitats cultivados na paisagem (Ludwig et al. 2019). Essas características biológicas e ecológicas reunidas demonstram que a sua dinâmica populacional vai além de uma área de cultivo, pois as populações parecem atuar como metapopulações ligadas pela dispersão, especialmente em paisagens com áreas agrícolas contínuas (Togni et al. 2021).

Em paisagens dominadas pelo uso agrícola geralmente se encontram culturas em larga escala e cultivos realizados por pequenos agricultores. Em regiões tropicais como o Brasil, cultivos de soja (*Glycine max* L.) ocupam grandes áreas homogêneas na paisagem (Garrett et al. 2012), que podem potencialmente sustentar populações abundantes de insetos-praga, como as moscas-brancas (Morales 2010). Contudo, a extinção local dos recursos (e.g., senescência ou colheita) força a dispersão dos indivíduos para novos habitats (Togni et al. 2021). Esses indivíduos dispersando podem se redistribuir entre habitats que variam em tamanho e qualidade (Ludwig et al. 2019), como por exemplo os tomateiros (*Solanum lycopersicum* L.) (Solanaceae) ou feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) (Fabaceae) que são mais atrativos e favorecem a performance dos indivíduos (Villas Bôas et al. 2002; Togni et al. 2018). Apesar da importância econômica das grandes culturas, os pequenos e médios produtores são maioria no mundo, ainda que ocupem menores áreas (Herforth et al. 2020), e podem ser prejudicados com essas infestações vindas dos grandes cultivos. Portanto, é importante compreender como as pragas vindas dessas grandes culturas podem afetar a colonização de pequenos e médios cultivos para

traçar estratégias de manejo regionais que considerem os papéis distintos dos diferentes cultivos na paisagem e no tempo de forma a integrar processos locais e da paisagem. Isso pode ser especialmente importante para regiões em desenvolvimento onde pequenas propriedades possuem a mão de obra familiar como principal força de trabalho (MAPA 2022).

Uma ferramenta que pode ser utilizada para determinar a dinâmica espacial de insetos e seus habitats de origem é a análises de isótopos estáveis de Carbono ( $^{13}\text{C}$ ) e Nitrogênio ( $^{15}\text{N}$ ) (Hood-Nowotny e Knols 2007; IAEA 2009). A razão entre esses isótopos permite avaliar o fluxo da matéria entre os organismos baseando-se na premissa de ciclagem dos elementos. Deste modo, cada recurso possui uma determinada assinatura isotópica que ao ser ingerido e assimilado, é depositado no tecido animal, assim os consumidores passam a apresentar uma composição isotópica mais próxima à do recurso (Hyodo, 2015; Quinby et al., 2020). Nesse sistema bidimensional, o  $\delta^{15}\text{N}$  e o  $\delta^{13}\text{C}$  são importantes para o crescimento vegetal e possuem ciclos mais complexos no sistema agrícola (e.g. ciclagem de carbono no solo, a decomposição da matéria orgânica e os processos de adubagem) (Lincoln et al. 2002; Sisti et al. 2004). Para insetos polívoros como a mosca-branca, o movimento dentro da paisagem agrícola é influenciado por corredores onde habitats adequados que sustentam populações temporárias estão disponíveis (Abdelkrim et al. 2017). Nesse sentido, os isótopos estáveis podem ser uma boa ferramenta para rastrear a origem e a dinâmica espacial de moscas-brancas na paisagem, como demonstrado recentemente para *Cacosceles newmannii* (Thomson) (Coleoptera: Cerambycidae) (Smit et al. 2021).

Possivelmente, cultivos em larga escala geram grandes populações de insetos-praga polívoros, atuando como reservatórios de indivíduos. Na medida em que ocorre a colheita (i.e., extinção local dos recursos), esses indivíduos devem dispersar e se redistribuir entre diferentes locais. Se isso for verdade, a composição isotópica dos insetos dispersores e colonizadores devem apresentar uma similaridade com a assinatura isotópica das plantas de sua origem. A assinatura isotópica do habitat de origem deve reduzir na medida em que as populações colonizam e se estabelecem em novos cultivos na paisagem e a assinatura isotópica dos hospedeiros do novo habitat devem prevalecer. O

uso de hospedeiros nas manchas de recursos no espaço deve também afetar a flutuação, a dinâmica e o crescimento populacional entre habitats ao longo do tempo. Como consequência, as populações devem estar conectadas pela constante dispersão entre habitats que sustentam populações temporárias na paisagem ao longo do tempo.

Para testar essas hipóteses, nós utilizamos moscas-brancas como modelo, para compreender como ocorre o uso do habitat, o movimento de dispersão e os efeitos subsequentes de moscas-brancas entre cultivos em larga escala e cultivos de pequenos produtores. Para isso, buscamos responder às seguintes perguntas: (i) Grandes culturas podem ser fontes amplificadoras de populações de moscas-brancas na paisagem para pequenas áreas de cultivo?; (ii) Se sim, como elas vão influenciar a abundância de indivíduos nesses cultivos menores ao longo do tempo?; (iii) O tamanho populacional das pragas nas grandes culturas influencia o crescimento populacional nas culturas de pequena escala devido a efeitos densidade-dependentes? Para responder essas questões, nós estudamos a dinâmica espacial e local de populações de moscas-brancas em cultivos de soja e de tomateiros no Distrito Federal, região central do Brasil. A região Centro-Oeste é uma das maiores produtoras de soja do mundo (CONAB 2022) e o tomateiro é uma hortaliça em que a mosca-branca se desenvolve bem, ao mesmo tempo que possui uma relevância socioeconômica muito grande para pequenos produtores da região pelo seu alto valor agregado (CONAB 2021).

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### *Área de Estudo*

O estudo foi realizado em 2021 e 2022 em regiões produtoras de soja e tomateiro no Distrito Federal, Brasil (15° 47' S, 47° 55' 45' W, 1100m de altitude). Em 2021 nós amostramos três propriedades produtoras de soja e nove propriedades produtoras de tomate, e em 2022 três propriedades produtoras de soja e sete propriedades produtoras de tomate. A área de estudo está

situada no bioma Cerrado, que é o segundo maior bioma brasileiro (~2 milhões km<sup>2</sup>) (IBGE 2004). O clima da região é tipo Aw, com um clima sazonal apresentando invernos secos (abril a setembro) e verões chuvosos (outubro a março), segundo a classificação Köppen-Geiger (Cardoso et al. 2014). A temperatura média anual varia de 22°C a 27°C e a precipitação média anual é de 1500 mm concentrada (> 90%) na estação chuvosa (Cardoso et al. 2014).

O Cerrado é a savana tropical brasileira e é considerado a última fronteira agrícola do país (Spera et al. 2016; Sano et al. 2019;), apesar de ser um dos hotspots mundiais prioritários para conservação da biodiversidade (Myers et al. 2000). A principal causa de fragmentação dos habitats naturais é a mudança no uso do solo para cultivos agrícolas em larga escala, que até 2021 foi responsável por mais de 45% da remoção da cobertura nativa do bioma (MapBiomas 2021), especialmente a soja (Sano et al. 2019; Song et al. 2021). Na área de estudo (região central do bioma), a paisagem é composta por fragmentos de vegetação nativa próximos a vastas áreas de produção agrícola ocupadas por grandes fazendas intercaladas por pequenas fazendas (Togni et al. 2019, 2021). As áreas agrícolas em larga escala são dominadas por cultivos de soja, feijão, milho, algodão e pastagem, enquanto os pequenos e médios produtores produzem principalmente hortaliças próximas a esses cultivos (Togni et al. 2021). As áreas de vegetação nativa são compostas por fragmentos no interior das propriedades que são compulsoriamente mantidos para a preservação do bioma pela legislação local (Sano et al. 2019; Togni et al. 2019).

### *Sistema de estudo*

Nós realizamos os experimentos no período que ocorre o final da safra da soja (novembro – abril) e a intensificação dos plantios de tomate para consumo *in natura* na região (Inoue-Nagata et al. 2016). É nesse período que ocorre o maior crescimento populacional de moscas-brancas no ano e que os agricultores da região relatam problemas com o inseto nos cultivos de tomate (Togni et al. 2021). Os cultivos de soja são plantios mecanizados em larga escala, e correspondem a 80% da produção de grãos da região (81.651,84 ha) (EMATER 2021). A cultivar mais usada é a BRS 573 com média de

300 mil plantas/ha (EMBRAPA 2021). Durante o enchimento dos grãos (Reprodutivo 5 - Reprodutivo 6), o principal problema fitossanitário da soja está relacionado ao complexo de percevejos (Hemiptera: Pentatomidae) da soja (Corrêa-Ferreira 2005; Souza et al 2016), o que demanda a aplicação intensiva de pesticidas químicos a base de neonicotinóides, piretróides, organofosforados e carbonatos (Ribeiro et al. 2016). Após o enchimento e maturação dos grãos (Reprodutivo 6 - Reprodutivo 8) os produtores cessam as aplicações, o que favorece a ocorrência de pragas menos importantes como as moscas-brancas (Inoue-Nagata et al. 2016). Apesar de não ser um bom hospedeiro para as geminiviruses (Inoue-Nagata et al. 2016), a área ocupada na paisagem pelos cultivos de soja pode suportar grandes populações aptas a colonizar cultivos adjacentes (Togni et al. 2021).

Os cultivos de tomateiro para consumo *in natura* são produzidos principalmente por pequenos e médios produtores (2 – 20 ha) (EMBRAPA 2021), sendo socialmente e economicamente relevantes para a região. Os tomateiros geralmente são tutorados com até 16 mil plantas/ha. A fenologia do tomateiro consiste em desenvolvimento vegetativo (5-35 dias após o transplante das mudas para o campo), floração/frutificação (35-65 dias) e maturação/colheita (65-100 dias). As variedades mais utilizadas são de crescimento indeterminado e podem ser colhidas até seis a sete vezes. As propriedades amostradas possuem irrigação por gotejo e área de 3-5 ha. Além do tomateiro, são cultivadas outras culturas como brássicas, abóbora, pepino e berinjela nas propriedades. Diferentemente da soja, os tomateiros são bons hospedeiros de mosca-branca e suas viroses (Geminiviridae) e são consideradas pragas-chave da cultura (Togni et al. 2018) de modo que os agricultores aplicam semanalmente pesticidas sintéticos de amplo espectro a base de Piretróide, Neonicotinóide e Piridil éter (EMBRAPA 2006). A fase vegetativa é a mais atrativa para o inseto (Giordano et al. 2005; Togni et al. 2010, 2018). É então possível que os cultivos de tomate sejam habitats atrativos para as populações dispersoras de moscas-brancas após o final do ciclo da soja.

### *Experimento em casa de vegetação*

Nós realizamos um experimento em casa de vegetação para verificar se os isótopos estáveis poderiam ser bons marcadores populacionais de moscas-brancas. Cultivamos plantas de tomate cv. Santa Clara (*Solanum lycopersicum* L.) (Solanaceae), soja BRS 573 (*Glycine max* L. Merr.) (Fabaceae) e algodão Delta Pine 404 BG (Bollgard) (*Gossypium hirsutum* L.) (Malvaceae) em potes plásticos (5 L) contendo solo estéril e substrato comercial (Bioplant®) (proporção 3:1). Mantivemos as plantas de cada cultura separadas em casas de vegetação ( $27 \pm 4^\circ\text{C}$ ,  $70 \pm 30\%$  u.r.) (1,95 x 2,70 x 2,70 m) e recobertas por tela anti afídeo. Cada casa de vegetação continha entre 30 – 40 vasos com uma planta para a mesma cultura. Deste modo, tivemos uma casa de vegetação para o cultivo de soja, uma casa de vegetação para os tomateiros e uma casa de vegetação para o cultivo de algodão. Essas culturas foram escolhidas devido ao interesse econômico e sua produção em larga escala na região do estudo (CONAB, 2021).

As plantas foram semeadas diretamente nos vasos e 45 dias após a germinação, cada casa de vegetação foi infestada com aproximadamente mil moscas-brancas adultas coletadas de uma criação massal mantida em plantas de repolho que também ficavam isoladas em casa de vegetação. As moscas-brancas foram mantidas por pelo menos quatro gerações consecutivas (i.e., aproximadamente cinco meses) se alimentando e reproduzindo exclusivamente nas mesmas plantas hospedeiras (i.e. soja, tomate e algodão). Quando as plantas começavam a senescer, ou estavam danificadas pela ação do inseto, eram trocadas por novas. Após este período, 15 amostras de plantas e três amostras de insetos adultos foram coletadas em cada cultura para análise e comparação das assinaturas isotópicas das amostras (n total de plantas = 45, n total de amostras de insetos = 9). Cada amostra de planta correspondia a amostras foliares de indivíduos separados de cada cultura e cada amostra de insetos correspondia a ~350 moscas-brancas adultas coletadas com aspirador entomológico. As amostras das plantas e dos insetos foram enviadas para análise da assinatura isotópica no Laboratório de Ecologia

Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ, Universidade de São Paulo - USP, Piracicaba, Brasil.

### *Uso de habitat na paisagem usando isótopos estáveis*

Para avaliar o uso de habitat por populações de mosca-branca entre cultivos na paisagem, nós realizamos um experimento em campo nos meses de fevereiro a maio de 2021 e 2022, compreendendo duas safras consecutivas de soja. Em ambos os anos cada cultivo de soja estava a no mínimo 20 km de distância um do outro e os tomateiros estavam distantes 0.06 km–16 km dos cultivos de soja e no mínimo 2 km distante umas das outras. As variedades de soja mais utilizadas na região do DF pelos agricultores são BRS 573, enquanto para tomate as cultivares mais utilizadas são Santa Clara e Italiano.

No primeiro ano, nós avaliamos se os cultivos de soja poderiam servir como fontes de populações de moscas-brancas para os tomateiros. Nós amostramos três cultivos de soja. Próximo a cada cultivo de soja havia três cultivos de tomateiro próximos ( $n = 9$  cultivos de tomateiro) em distâncias variáveis em relação a cada área de soja. Nós coletamos cinco amostras foliares de plantas de soja em cada propriedade ( $n = 15$  amostras) no final do ciclo da cultura (Reprodutivo 6 - Reprodutivo 8) para obter a assinatura isotópica dos cultivos. Na semana seguinte à colheita da soja, nós coletamos cinco amostras de plantas dos tomateiros que estavam no estágio vegetativo (5-35 dias após o transplante das mudas) em cada propriedade ( $n = 45$  amostras) para obter a assinatura isotópica da cultura. Neste mesmo período, nós também coletamos amostras de moscas-brancas adultas sobre os tomateiros para identificar a composição isotópica dos insetos e compará-los com a assinatura isotópica de ambas as culturas.

No segundo ano, nós realizamos um experimento similar em outras áreas de soja e tomateiro para avaliar se as moscas-brancas colonizadoras dos tomateiros vindas de cultivos de soja se tornaram residentes dos cultivos de tomate. Diferente do ano anterior, nós separamos as amostragens em três ciclos de coleta de plantas e insetos. O primeiro ciclo de coleta ocorreu ao final do ciclo da soja

(Reprodutivo 6 - Reprodutivo 8) para verificar se as moscas-brancas estavam utilizando a soja como recurso alimentar. O segundo ciclo de coleta ocorreu durante o estágio vegetativo e floração (5 - 65 dias após o transplante das mudas) dos tomateiros para avaliar se as populações colonizadoras dos tomateiros eram provenientes majoritariamente dos cultivos de soja. O terceiro ciclo de coleta ocorreu no período de frutificação e colheita (65 -100 dias após o transplante das mudas) para determinar se as populações eram residentes dos cultivos (e provavelmente nascidas) nos cultivos de tomate. Assim como no primeiro ano, nós coletamos cinco amostras de plantas de soja por propriedade (n = 15 amostras), e cinco amostras de tomateiro em cada propriedade e em cada ciclo de amostragem (n = 70 amostras) para obter a assinatura isotópica das culturas. Nesses mesmos períodos, nós coletamos moscas-brancas adultas sobre as plantas em cada uma das culturas em cada ciclo de coleta para obter a composição isotópica dos insetos ao longo do tempo. Após as coletas, enviamos as amostras de plantas e insetos para o Centro de Pesquisa e Análise de Isótopos Estáveis, em Göttingen, Alemanha, para determinação das assinaturas isotópicas.

#### *Amostragem populacional de moscas-brancas*

Para avaliar a flutuação e crescimento populacional de moscas-brancas em cultivos de soja e cultivos de tomate, nós amostramos as populações de moscas-brancas nos cultivos utilizando armadilhas adesivas amarelas 20x15 cm com duas faces adesivas no ano de 2022. Essas amostragens foram realizadas em conjunto com as análises de isótopos estáveis. Nós instalamos 10 armadilhas, espaçadas 10 m uma da outra no centro de cada cultivo e sempre na altura do terço superior das plantas. As coletas com as armadilhas ocorreram em um ciclo de três semanas consecutivas nos cultivos de soja (Reprodutivo 6 - Reprodutivo 8) e quatro semanas consecutivas em cada ciclo de coleta dos tomateiros (vegetativo-floração e frutificação-colheita). Semanalmente, as armadilhas eram trocadas por outras e enviadas para o laboratório para triagem e contagem do número de indivíduos de mosca-branca em um microscópio estereoscópico. Como as amostras foram semanais, nós subdividimos os períodos de coleta na soja para análise em R6, R7 e R8 que correspondem entre

20-30 dias antes da colheita dos grãos. Em R6 ocorre o fim da maturação e enchimento dos grãos, entre R7 e R8 a planta senesce ou seca devido ao uso de desseccantes para realização da colheita (EMBRAPA, 2021).

Nos tomateiros os estágios fenológicos foram subdivididos para dois ciclos de coleta com armadilhas adesivas amarelas. O primeiro ciclo nos tomateiros incluiu o estágio vegetativo-floração que foi subdividido em estágio vegetativo 1 e 2 (5-35 dias após o transplante das mudas), floração 1 e 2 (35-50 dias após o transplante). Nos estágios vegetativos os tomateiros possuem apenas folhas enquanto durante o período de floração 1 e 2 ocorre a abertura das flores. Já o segundo ciclo nos tomateiros incluiu o estágio de frutificação-colheita. O estágio de frutificação foi subdividido em fruto 1, fruto 2, fruto 3 (50-71 dias) e colheita (65 - 100 dias após o transplante). No estágio fruto 1 há mais frutos verdes em amadurecimento em comparação ao estágio fruto 2, onde há alguns frutos maduros aptos a serem colhidos. No estágio fruto 3 todos os frutos estão maduros e o período de colheita corresponde ao final das colheitas quando a planta senesce e o cultivo encerra. Essa abordagem nos permitiu amostrar as populações residentes e dispersoras dos cultivos ao longo do tempo em cada cultura e associar com os dados dos isótopos estáveis. Também coletamos pelo menos 10 amostras de moscas-brancas por fazenda e enviamos para identificação de espécies crípticas com base na Reação em Cadeia da Polimerase do Polimorfismo do Comprimento do Fragmento de Restrição (RFLP-PCR) (Bosco et al. 2006). Todas as amostras foram identificadas como espécies de *Bemisia tabaci* MEAM-1 (antigo biótipo B).

#### *Análise de isótopos estáveis*

Nós secamos todas as amostras em estufa de esterilização e secagem (Marconi) a 60°C por 48h. As plantas foram moídas em um moedor com malha fina (Marconi), pesadas em balança analítica (RADWAG®, 0.00001) e acondicionadas em cápsulas de estanho. As amostras vegetais foram pesadas entre 2,0 – 2,5 mg para serem enviadas para o Laboratório de Ecologia Isotópica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA, Universidade de São Paulo, Piracicaba, Brasil. As razões

isotópicas de carbono e nitrogênio foram obtidas por combustão utilizando um analisador elementar (Carlo Erba, CHN-1100) acoplado a um espectrômetro de massas Thermo Finnigan Delta Plus.

Em campo, nós obtivemos 142 amostras de plantas (n = 60 em 2021 e n = 85 em 2022) e 94 amostras de insetos (n= 13 em 2021 e n = 81 em 2022). Essas amostras também foram secas e armazenadas em cápsulas de estanho a um peso de até 0,1 mg (~350 insetos por amostra) para serem enviadas para o Centro de Pesquisa e Análise de Isótopos Estáveis, em Göttingen, Alemanha. Devido ao tamanho da mosca-branca são necessários muitos insetos (~1000 indivíduos) para alcançar um peso mínimo para compor uma amostra analisada no CENA/USP. Contudo, as populações de moscas-brancas eram muito variáveis ao longo das coletas, não sendo possível, em muitos casos, obter muitas amostras por localidade nos períodos de menor densidade populacional do inseto. Para aumentar o número de amostras em diferentes áreas, os insetos foram enviados para o Centro de Pesquisa e Análise de Isótopos Estáveis em Göttingen, Alemanha, que é capaz de processar amostras de menor peso (0,1 mg) (~350 insetos por amostra). As razões isotópicas de carbono e nitrogênio foram obtidas com analisador elementar (Flash EA 1112) com interface Conflo IV acoplado a um espectrômetro de massas Thermo Electron Delta XP. Já as amostras de plantas foram enviadas para o CENA-USP, conforme descrito anteriormente.

Em ambas as instituições, a assinatura isotópica das amostras foi determinada pela equação:

$$\delta^{15}\text{N} \text{ ou } \delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = (\text{RSample} - \text{RStandard}) / \text{RStandard} \times 1.000$$

onde RSample e RStandard representam respectivamente a razão molar dos isótopos altos/baixos da amostra e do padrão. Os resultados foram referidos pela notação delta ( $\delta$ ) em partes por mil (‰), em relação às referências internacionais Vienna Pee Dee Belemnite ( $^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$ ) para Carbono e ar atmosférico ( $^{15}\text{N}:^{14}\text{N}$ ) para Nitrogênio. O erro analítico pela análise do padrão interno no CENA é de 0,2‰ para carbono e 0,3‰ para nitrogênio, enquanto no laboratório em Göttingen é <0,1‰ para  $\delta^{13}\text{C}$  e 0,15‰ para  $\delta^{15}\text{N}$ .

## *Análises estatísticas*

Todas as análises foram realizadas no software R v. 4.0.5 (R Development Core Team, 2021). Para determinar a composição isotópica dos insetos utilizando diferentes tipos de recursos no experimento em casa de vegetação e em campo, nós consideramos os valores de fracionamento isotópico para a família Aleyrodidae de  $0,66 \pm 0,97$  (EP) para  $\delta^{15}\text{N}$  (‰) e  $-28,0 \pm 0,14$  para  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) (Spence, 2007). No primeiro ano, nós calculamos a Área de Elipse Padrão corrigida para amostras de tamanho pequeno ( $< 20$ ) ( $\text{SEA}_c$ ) com intervalos de confiança de 95% das plantas de soja, plantas de tomate e das moscas-brancas coletadas nos tomateiros, para determinar a composição isotópica das amostras utilizando o pacote *SIBER* (Jackson et al. 2011). Em seguida, especificamos os valores  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{15}\text{N}$  das moscas brancas e sua probabilidade de distribuição em relação a cada recurso (i.e.,  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{15}\text{N}$  para soja e tomate, considerando o fator de fracionamento isotópico). Para isso, utilizamos simulações de Markov Chain Monte Carlo (MCMC) com 500.000 iterações para expressar as contribuições de cada recurso para as moscas-brancas adultas em proporções de 0,0 a 1,0 no pacote *SIAR* (Parnell et al. 2010). Geramos intervalos de confiança Bayesianos dos valores proporcionais de contribuição estimados de 50, 70 e 95% (Stewart et al. 2017).

No segundo ano, utilizamos a mesma abordagem para avaliar quando ocorre uma mudança no uso e assimilação dos recursos ao longo do tempo em diferentes habitats. Para isso, consideramos a composição de  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{15}\text{N}$  de *B. tabaci* e das plantas de soja e tomateiro em 2022. Nós calculamos a Área de Elipse Padrão corrigida para amostras de tamanho pequeno ( $\text{SEA}_c$ ) das plantas de soja, plantas de tomateiro e das moscas-brancas coletadas em seu devido ciclo de amostragem das culturas, com intervalos de confiança de 95% (Jackson et al. 2011). No primeiro ciclo de amostragem da coleta de mosca-brancas na soja, nós consideramos as amostras das plantas dos tomateiros coletadas durante o período vegetativo para comparação com as elipses da soja e do inseto. Quando analisamos as contribuições dos recursos para a composição isotópica das moscas-brancas, também consideramos os perfis isotópicos dos tomateiros nos dois ciclos de coleta separadamente. Novamente utilizamos

modelos Bayesianos MCMC para verificar a contribuição da soja (estágio R6-R8) e dos tomateiros (estágios vegetativo-floração e frutificação-colheita) para a composição isotópica das moscas-brancas coletadas em cada um desses estágios fenológicos separadamente (Parnell et al. 2010).

Para as análises populacionais, nós ajustamos Modelos Lineares Generalizados de Efeito Misto (GLMM) utilizando o pacote *lme4* (Bates et al. 2014). Inicialmente, avaliamos se a abundância média ( $\pm$ SE) de moscas-brancas (variável resposta) era afetada pelo tipo de cultivo e pela fenologia das plantas (tempo) (variáveis preditoras), ou pela interação entre essas variáveis. Utilizamos uma distribuição do tipo binomial negativa e a área de coleta como variável aleatória no modelo. Quando uma variável não apresentava efeito significativo ela era retirada do modelo e um novo modelo mais simples era ajustado e comparado ao anterior com uma Análise de Deviance (ANODEV) usando um teste F, até encontrar o modelo mais simples (Crawley 2012). Quando havia diferença significativa entre o modelo final e um modelo nulo, nós acessávamos a significância das variáveis a partir de uma nova ANODEV usando um teste F. Para comparar as diferenças entre os níveis das variáveis, nós ajustamos uma análise de contraste de modelos baseada em um teste Tukey usando o pacote *multcomp* (Hartig, 2021). Uma análise de resíduo foi ajustada para avaliar o ajuste do modelo final utilizando o pacote *Dharma* (Hartig 2021).

Nós também ajustamos um GLMM para testar se havia diferenças no crescimento populacional de moscas-brancas dentre e entre cultivos em intervalos de uma semana de crescimento populacional. Nós inicialmente calculamos a taxa de crescimento populacional per capita por semana, pois queríamos avaliar ao longo do desenvolvimento fenológico. Esse cálculo foi realizado utilizando a taxa instantânea de aumento populacional ( $r_i$ ), usando a fórmula  $r_i = \ln(N_f / N_i)/t$ , onde  $N_f$  = número final de moscas-brancas,  $N_i$  = número inicial de moscas-brancas e  $t$  = tempo (sete dias) (Walthall e Stark, 1997; Agrawal et al. 2004). Os valores de  $r_i$  são diretamente correlacionados com a taxa intrínseca de crescimento populacional ( $r_m$ ) a partir de um modelo logístico de crescimento populacional e é amplamente utilizado em estudos com insetos em que as taxas de reprodução em cada cultura são conhecidas (e.g., Woiwod e Hanski 1992; Walthall e Stark 1997; Togni et al. 2021).

Após estes cálculos para cada período de uma semana, nós ajustamos um GLMM com distribuição de Poisson onde verificamos se o crescimento populacional ( $r_i$ ) das moscas-brancas (variável resposta) era afetado pelo tipo de cultivo e pela fenologia das plantas (tempo) (variáveis preditoras), usando a área como variável aleatória no modelo. Demais procedimentos seguiram o mesmo descrito anteriormente para as análises de abundância populacional.

Para investigar se a população do final do cultivo da soja contribuiu para o crescimento populacional de *B. tabaci* nos tomateiros (i.e., densidade dependência *sensu* Hassel 1984) e se a população inicial dos tomateiros influenciava o crescimento populacional no final do ciclo da cultura, nós ajustamos uma série de regressões parciais entre a população inicial de moscas-brancas e os valores de crescimento populacional ( $r_i$ ) calculados para cada intervalo semanal de coleta nos tomateiros. Nós consideramos como população inicial o número total de indivíduos coletados em cada propriedade em cada semana de amostragem na soja e durante o período vegetativo-floração dos tomateiros. Nós relacionamos esses dados com o crescimento populacional do inseto em cada semana nos estágios vegetativo-floração e frutificação-colheita dos tomateiros, tendo pelo menos uma semana de intervalo entre a população inicial e o período de crescimento populacional avaliado.

## RESULTADOS

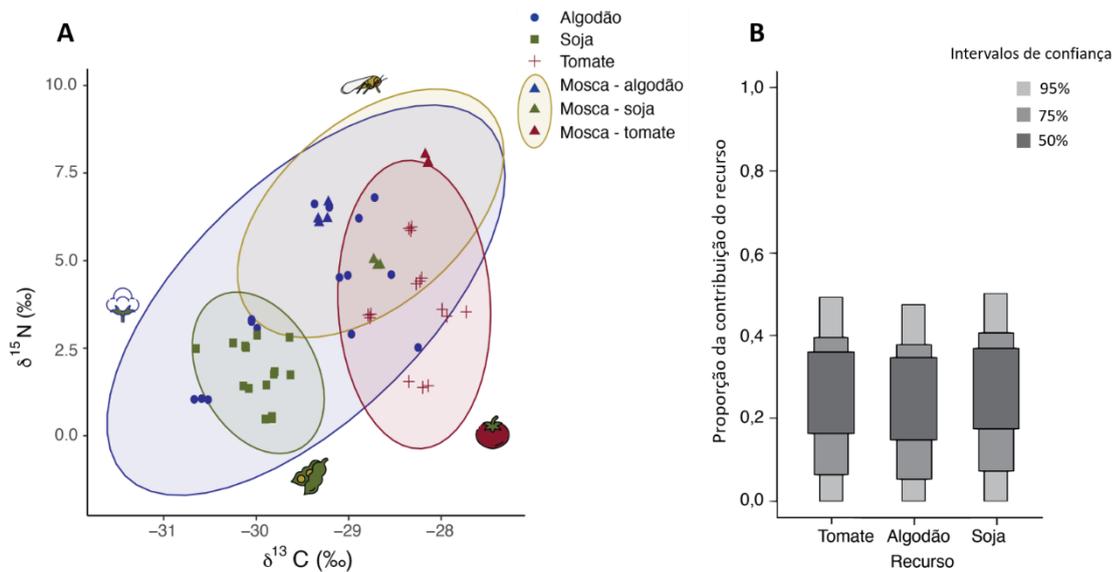
### *Experimento em casa de vegetação*

Em casa de vegetação, nós verificamos a partir das elipses que as moscas-brancas assimilaram e apresentaram um enriquecimento nos valores de  $\delta^{15}\text{N}$  em relação às amostras das plantas hospedeiras onde os indivíduos se alimentaram ao longo de pelo menos quatro gerações (Figura 1a). As análises de contribuição do recurso mostraram que a assinatura isotópica das plantas hospedeiras contribuiu, de maneira similar, para a composição isotópica das moscas-brancas que se alimentaram isoladamente nas plantas de soja, tomate e algodão (Figura 1b).

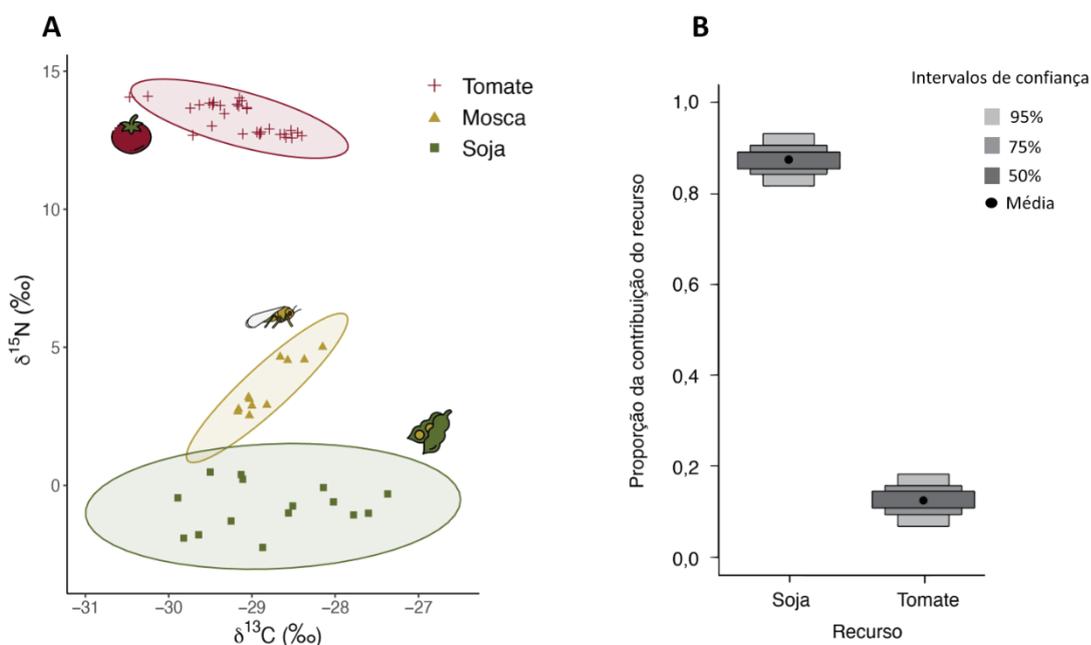
### *Uso do habitat por populações de moscas-brancas na paisagem*

No primeiro ano em campo, o alcance das amostras das plantas de soja variou  $\delta^{13}\text{C} = -29,20$  a  $-29,96$  ‰ e  $\delta^{15}\text{N} = 1,19$  a  $1,79$ ‰, enquanto o das amostras de plantas de tomate variou  $\delta^{13}\text{C} = -30,47$  a  $-27,91$ ‰ e  $\delta^{15}\text{N} = 12,58$  a  $14,18$ ‰, havendo então uma alta separação das assinaturas isotópicas entre plantas. Notadamente, os tomateiros apresentam valores de  $\delta^{15}\text{N}$  14 vezes maiores que o da soja (Figura 2a). As populações de moscas-brancas coletadas no início do ciclo de cultivo dos tomateiros, após a colheita da soja, apresentaram uma assinatura mais próxima à soja do que aos tomateiros, considerando o fracionamento de  $0,66$  para  $\delta^{15}\text{N}$  (‰) e  $-28,0$  para  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) em *Aleyrodidae*. De fato, as análises de contribuição demonstraram que a soja contribuiu mais para a dieta dos insetos ( $0,80 \pm 2,74$ , assinatura isotópica da soja/inseto, média  $\pm$  EP) que o tomateiro ( $0,18 \pm 4,35$ , assinatura isotópica do tomateiro/inseto) (Figura 2b).

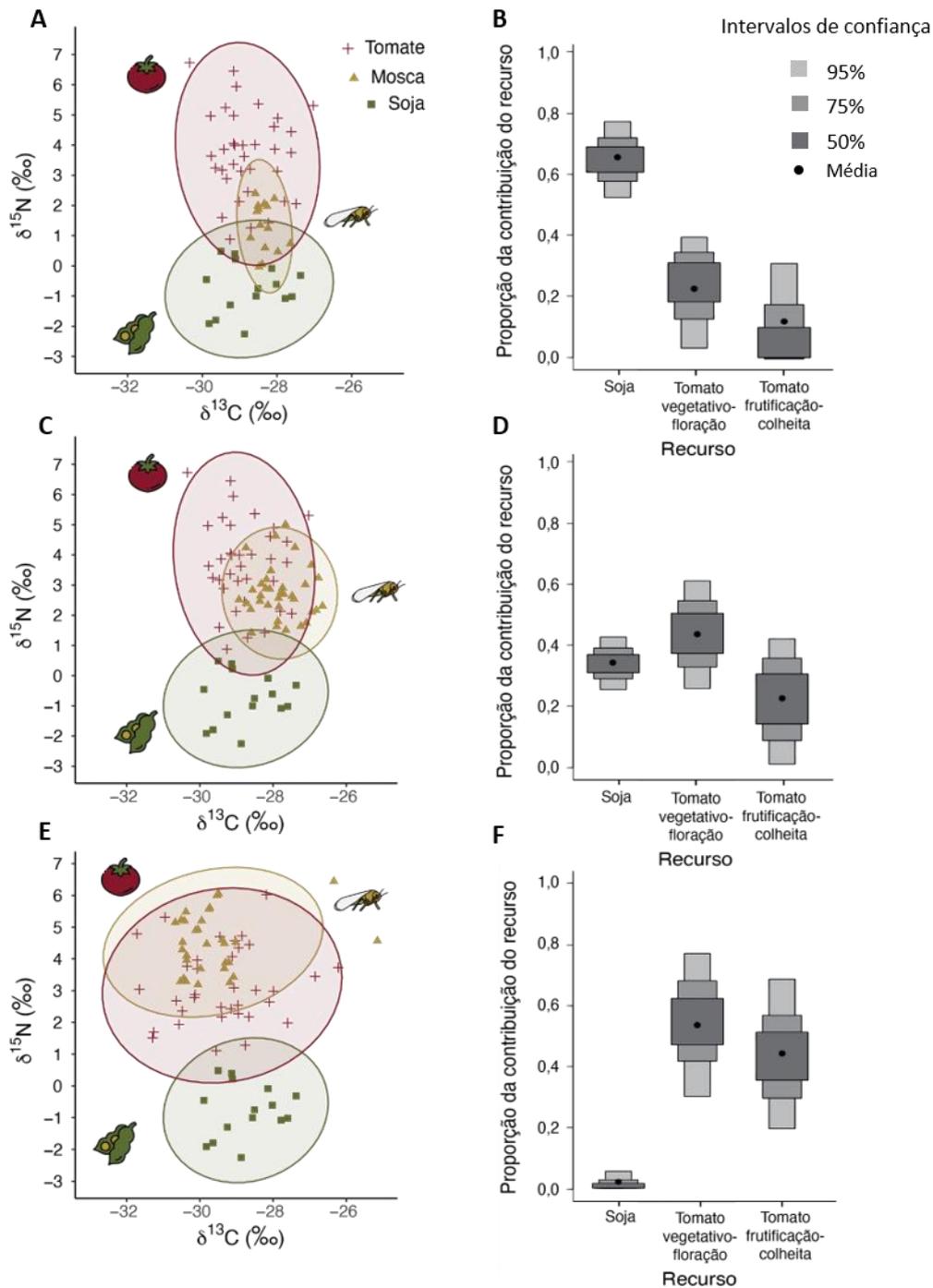
No segundo ano, o  $\delta^{15}\text{N}$  do tomate foi seis vezes maior que o da soja havendo, novamente, uma distinção na assinatura isotópica das plantas. As moscas-brancas coletadas na soja (Reprodutivo 6 - Reprodutivo 8) apresentaram uma composição isotópica similar à assinatura das plantas de soja (Figura 3a), as moscas-brancas coletadas nos tomateiros no início do desenvolvimento (estágio vegetativo-floração) também apresentaram uma composição isotópica mais similar à assinatura da planta de soja do que à do tomateiro (Figura 3c). Após esse período, a composição isotópica das moscas-brancas coletadas no período de frutificação-colheita dos tomateiros foi mais similar à dos tomateiros que à da soja (Figura 3e). O modelo bayesiano mostrou que a contribuição da soja para a dieta das moscas-brancas foi muito maior do que a do tomateiro para as coletas realizadas na soja e nos tomateiros no estágio vegetativo-floração (Figura 3b e 3d). No estágio de frutificação-floração dos tomateiros foi observada uma proporção da contribuição maior dos tomateiros do que das plantas de soja (Figura 3f). Há então uma evidente inversão na assimilação e na contribuição dos recursos para a dieta dos insetos ao longo da fenologia das culturas.



**Figura 1.**  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{15}\text{N}$  de plantas de algodão, soja e tomateiro e a composição isotópica de indivíduos de *Bemisia tabaci* alimentados com essas plantas em casa de vegetação em 2021. As áreas das elipses correspondem a um intervalo de confiança de 95% (A), juntamente à análise de contribuição proporcional das razões isotópicas de plantas de algodão, soja e tomateiro (recursos) para a composição isotópica de *B. tabaci* alimentados com essas plantas em casa de vegetação (B). Os intervalos de confiança da análise de contribuição foram calculados usando o modelo Markov Chain Monte Carlo com 500.000 iterações.



**Figura 2.**  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{15}\text{N}$  em plantas de soja e de tomateiro em estágio vegetativo e a composição isotópica em populações de *Bemisia tabaci* coletadas nos cultivos de tomate após a colheita da soja na região do Distrito Federal, Brasil em 2021 (A), juntamente à análise de proporção da contribuição da assinatura isotópica das plantas de soja e de tomateiro (recursos) para a composição isotópica de *B. tabaci* (B). As áreas das elipses correspondem a um intervalo de confiança de 95%. Os intervalos de confiança da análise de contribuição foram calculados usando o modelo Monte Carlo da Cadeia de Markov com 500.000 iterações.



**Figura 3.**  $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{15}\text{N}$  em plantas de soja, de tomateiro e a composição isotópica em populações de *Bemisia tabaci* coletadas nos cultivos de soja (A) e tomateiro no estágio vegetativo-floração (C) e no estágio de frutificação-colheita (E) na região do Distrito Federal, Brasil em 2022, juntamente à análise de proporção da contribuição da assinatura isotópica das plantas de soja e de tomate (recursos) para a composição isotópica de *B. tabaci* (B, D, F). As áreas das elipses correspondem a um intervalo de

confiança de 95%. Os intervalos de confiança da análise de contribuição foram calculados usando o modelo Monte Carlo da Cadeia de Markov com 500,000 iterações e os pontos representam o valor da média.

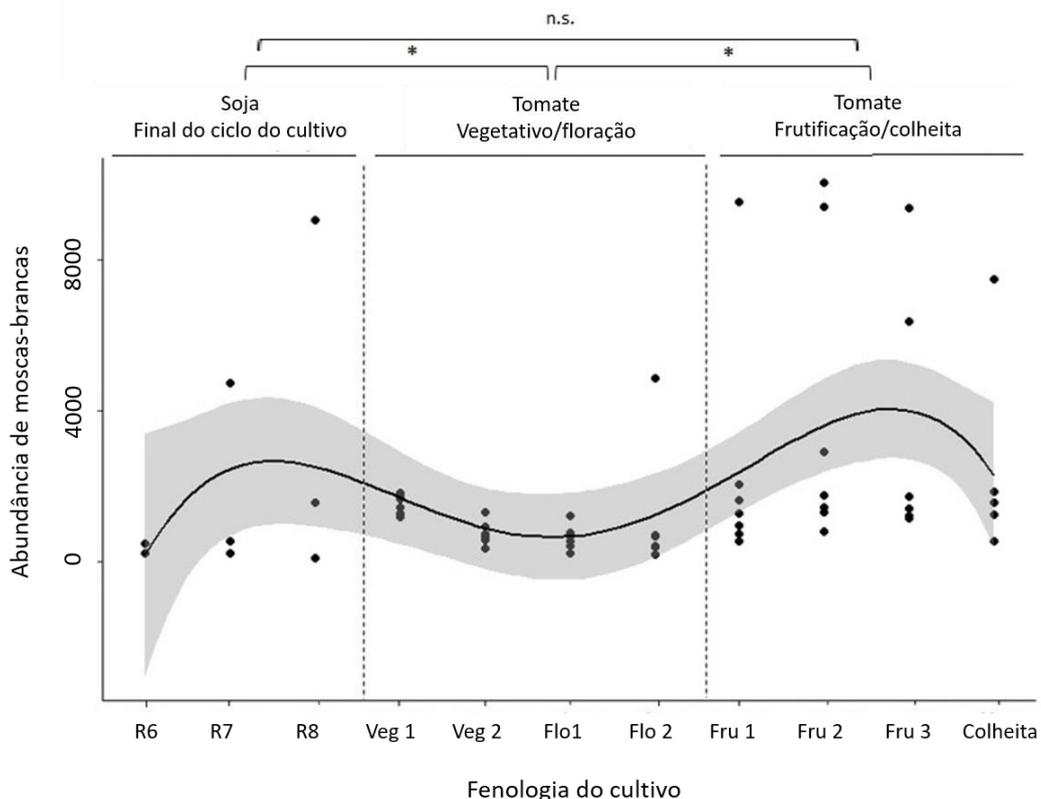
#### *Dinâmica espaço-temporal de populações de moscas-brancas entre e dentre habitats*

O GLMM revelou que a abundância populacional de moscas-brancas foi semelhante entre as áreas de soja e tomateiro ( $F = 0,64$ , d.f. = 1,  $P = 0,3885$ ) (Figura 4). Entretanto, a abundância populacional do inseto variou em relação à fenologia das culturas ( $F = 6,87$ , d.f. = 9,  $P < 0,0001$ ) e detectamos uma interação entre o tipo de cultura e fenologia ( $F = 5,83$ , d.f. = 10,  $P < 0,0001$ ) (Figura 4). A abundância de moscas-brancas nas propriedades de soja no final do ciclo da cultura ( $1894,88 \pm 670,05$ , insetos/propriedade/semana, média  $\pm$  EP) foi maior que a abundância nas propriedades com tomateiros no estágio vegetativo 1 - floração 2 ( $1727,42 \pm 556,1$  insetos/propriedade/semana), mas ambas foram menores que a abundância nos tomateiros no estágio frutificação 1 - colheita ( $5252,46 \pm 1614,87$ , insetos/propriedade/semana). Entre os períodos R6 e R7 da soja há um aumento na abundância populacional de insetos seguido de uma diminuição em R8 (Figura 4). A abundância de moscas-brancas permanece baixa durante todo o período vegetativo dos tomateiros e início da floração. No final da floração dos tomateiros há um aumento consistente de insetos na cultura até o final da frutificação. No final do ciclo reprodutivo do tomateiro (durante a colheita) ocorre uma diminuição na abundância, semelhante ao observado em R8 na soja (Figura 4).

O crescimento populacional ( $r_i$ ) das moscas-brancas também não diferiu entre as culturas ( $F = 0,69$ , d.f. = 2,  $P = 0,9022$ ), porém foi afetado pela fenologia das plantas ( $F = 8,96$ , d.f. = 6,  $P < 0,0001$ ) e pela interação entre cultura e fenologia ( $F = 7,78$ , d.f. = 7,  $P < 0,0001$ ) (Figura 5). Contudo, no final do ciclo da soja (R6/R7) o crescimento populacional de moscas-brancas diminui até R7/R8 quando apresenta valores semelhantes ao observado no início do ciclo dos tomateiros. O período vegetativo possui o menor crescimento populacional observado, com valores de  $r_i$  negativos, indicando decréscimo populacional (Figura 5). No início da floração dos tomateiros o crescimento

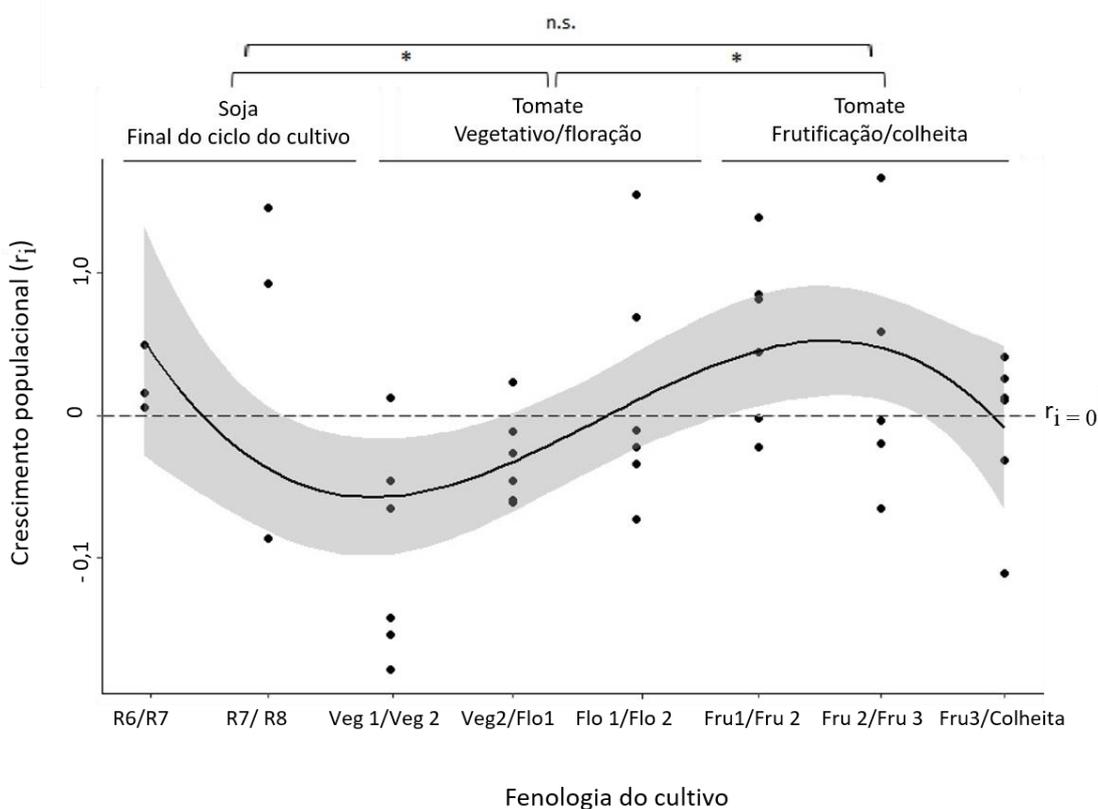
populacional passa a ser positivo aumentando consistentemente até o final da frutificação (Frutificação2/Frutificação3). No final do ciclo fenológico dos tomateiros (colheita), o crescimento populacional volta a diminuir devido a menor abundância de indivíduos (Figura 5).

Os efeitos densidade-dependentes entre população inicial e crescimento populacional dos insetos ocorrem em estágios fenológicos específicos, de acordo com nossas análises de regressão parcial (Tabela 1). O crescimento populacional no estágio de floração do tomateiro é inversamente dependente da densidade (i.e., slope negativo) da população inicial na soja em R7 (14 dias antes da colheita), mas dependente (i.e., slope positivo) da população inicial em R8 (7 dias antes da colheita) (Tabela 1). Após o estabelecimento das populações de mosca-branca nos cultivos de tomate, há também um efeito densidade dependente durante a população inicial observada no estágio vegetativo 2 (05-35 dias após o transplante das mudas) e no período de Floração 2 (35-50 dias após o transplante) e crescimento populacional de moscas-brancas durante a frutificação 2 e 3 (50-71 dias após o transplante das mudas), respectivamente (Tabela 1).



**Figura 4.** Abundância semanal de *Bemisia tabaci* em cultivos de soja e de tomate ao longo da

fenologia na região do Distrito Federal, Brasil entre os meses de fevereiro e maio de 2022. As linhas tracejadas representam a separação entre os diferentes ciclos de amostragem do inseto nas duas culturas. R6, R7 e R8 = estágios Reprodutivo 6, Reprodutivo 7 e Reprodutivo 8 das sojas. Veg1 e Veg 2 = estágio Vegetativo 1 e Vegetativo 2 dos tomateiros. Flo 1 e Flo 2 = Floração 1 e Floração 2 dos tomateiros. Fru 1, Fru 2 e Fru 3 = Frutificação 1, 2 e 3 dos tomateiros. Colheita = período de colheita dos tomates.\* = diferença significativa entre as fases fenológicas indicadas. n.s. = não houve diferença significativa pela análise de contraste de modelos.



**Figura 5.** Crescimento populacional ( $r_i$ ) de *Bemisia tabaci* ao longo da fenologia dos cultivos de soja e tomate na região do Distrito Federal, Brasil entre os meses de fevereiro e maio de 2022. Os valores de  $r_i$  foram calculados considerando o final do ciclo reprodutivo da soja R6/R7 (14 dias antes da colheita soja) e R7/R8 (7 dias antes da colheita da soja), o primeiro ciclo de amostragem nos tomateiros Veg1/Veg2 (5 - 12 dias após a colheita da soja), Veg2/Flo1 (12 - 19 dias após a colheita da soja), Flo1/Flo2 (19 - 26 dias após a colheita da soja) e o segundo ciclo de amostragem nos tomateiros Fru1/Fru2 (32 - 39 dias após a colheita da soja), Fru2/Fru3 (39 - 46 dias após a colheita

da soja), Fru3/Colheita (46 - 52 dias após a colheita da soja). \* = diferença significativa entre as fases fenológicas indicadas. n.s. = não houve diferença significativa pela análise de contraste de modelos. A linha tracejada indica sem crescimento populacional ( $r_i=0$ ). Flo 1 e Flo 2 = estágio de Floração 1 e Floração 2 dos tomateiros. Fru 1, Fru 2 e Fru 3 = estágio de frutificação 1, 2 e 3 dos tomateiros. Colheita = Colheita dos tomates.

**Tabela 1.** Análises de regressão parcial baseadas nas taxas de crescimento da população com um intervalo de tempo de uma semana, para avaliar efeitos densidade dependentes entre a população inicial de *Bemisia tabaci* e seu crescimento populacional entre habitats de soja e tomateiro ou dentro dos mesmos habitats de tomateiro em fazendas no Distrito Federal, Brasil, em 2022. Os valores de P em negrito indicam quais resultados são significativos ( $< 0.05$ ).

População inicial	Crescimento populacional ( $r_i$ )	Intercept	slope	$r^2$	F	d.f.	P	Densidade dependência
Soja Reprodutivo 6	Vegetativo1/ Vegetativo 2	-0,3424	0,1012	0,11	0,64	5	0,4606	No
	Vegetativo2/ Floração 1	-0,4177	0,1690	0,17	1,01	5	0,3621	No
	Floração 1/ Floração 2	-0,0188	-0,0001	0,17	1,02	5	0,3600	No
Soja Reprodutivo 7	Vegetativo1/ Vegetativo2	-0,0262	-0,0007	0,29	2,04	5	0,2126	No
	Vegetativo2/ Floração1	-0,0458	-0,0005	0,09	0,51	5	0,5059	No
	Floração1 / Floração 2	0,1679	-0,0001	0,55	6,08	5	<b>0,0468</b>	Negative

Soja Reprodutivo 8	Vegetativo 1/ Vegetativo 2	-0,2334	0,0007	0,29	2,08	5	0,2091	No
	Vegetativo 2/ Floração 1	-0,0986	0,0005	0,11	0,62	5	0,4683	No
	Floração1/ Floração 2	-0,2208	0,0014	0,62	8,29	5	<b>0,0346</b>	Positive
Tomateiro Vegetativo1	Frutificação1/ Frutificação 2	0,0644	<0,0001	<0,01	0,01	5	0,9541	No
	Frutificação2/ Frutificação3	-0,0262	0,0005	0,02	0,11	5	0,7536	No
	Frutificação3 / Colheita	-0,2371	0,0001	0,14	0,81	5	0,4084	No
Tomateiro Vegetativo2	Frutificação1 / Frutificação2	-0,1276	0,0006	0,09	0,47	5	0,5245	No
	Frutificação2 / Frutificação3	-0,1267	0,0002	0,73	13,24	5	<b>0,0149</b>	Positive
	Frutificação3 / Colheita	-0,0322	0,0009	0,01	0,01	5	0,9388	No
Tomateiro Floração1	Frutificação1 / Frutificação 2	0,0977	<-0,0001	0,15	0,87	5	0,3935	No
	Frutificação2 / Frutificação3	-0,0019	0,0003	0,48	4,75	5	0,0812	No
	Frutificação3 / Colheita	-0,0617	0,0001	0,09	0,50	5	0,5119	No
Tomateiro Floração2	Frutificação1 / Frutificação2	0,0929	<0,0001	0,15	0,88	5	0,3913	No
	Frutificação2 / Frutificação3	0,0043	0,0002	0,59	7,16	5	<b>0,0440</b>	Positive

Frutificação <sup>3</sup> / Colheita	-0,0586	0,0005	0,11	0,61	5	0,4706	No
---	---------	--------	------	------	---	--------	----

---

## DISCUSSÃO

Em nosso estudo, a composição isotópica de moscas-brancas revelou que os cultivos de soja em larga escala foram habitats fonte de indivíduos que, após a colheita, dispersam e se redistribuem entre cultivos de tomate em pequena escala. Nós demonstramos que os isótopos estáveis são eficientes para rastrear a origem de populações de moscas-brancas e sua dinâmica espacial na paisagem. Isso reforça que as populações do inseto estão conectadas pela dispersão e se comportam como metapopulações persistentes na paisagem (Wiens 1997; Hanski e Singer 2001; Togni et al. 2021). A área ocupada pela soja e a falta de manejo no final do ciclo da cultura geram grandes populações do inseto. Essas populações são aptas a colonizar hospedeiros atrativos que favorecem sua performance, como os tomateiros (Villas Bôas et al. 2002; Watanabe et al. 2019) em uma relação ditada pela dispersão e pela densidade-dependência entre habitats. Os indivíduos adultos da mosca-branca, ao se tornarem residentes e assimilarem os recursos dos tomateiros, influenciam o crescimento populacional na cultura em um efeito cascata iniciado pelas populações vindas da soja.

A capacidade das moscas-brancas explorarem e assimilarem os recursos de hospedeiros que variam em qualidade nutricional (Jiao et al. 2012; Ludwig et al. 2019) no espaço e no tempo é uma característica inerente de insetos polívoros (Silva e Clarke 2020). A assimilação de diferentes recursos na paisagem gera composições isotópicas distintas nos insetos, o que permite identificar os habitats de origem dessas populações (Hyodo 2015; Quinby et al. 2020). Outros estudos já constataram a origem da dieta de insetos polívoros a partir da composição isotópica dos recursos presentes nos seus tecidos, como é o caso da mariposa *Mythimna unipuncta* (Hawort) (Lepidoptera: Noctuidae) (Hobson et al. 2018), da mosca da fruta *Anastrepha fraterculus* (Wiedemann) (Diptera: Tephritidae) (Botteon et al. 2019) e do besouro *Cacosceles newmannii* (Thomson) (Coleoptera: Cerambycidae) (Smit et al.

2021). Deste modo, tanto do ponto de vista ecológico (dispersão entre habitats) quanto do ponto de vista aplicado (rastreamento da cultura de origem), os isótopos são bons marcadores populacionais de moscas-brancas e de outros insetos polívoros na paisagem.

As moscas-brancas, além de pequenas (0,6 – 2,0 mm) (Kanakala e Ghanim 2019), possuem uma alta capacidade de dispersão (Ludwig et al. 2019), sendo capazes de colonizar na paisagem cultivada a até 8 km do hospedeiro de origem (Isaacs e Byrne 1998; Byrne 1999; Riis e Nachman 2006). Apesar da soja não ser uma boa hospedeira para as geminiviruses transmitidas por *B. tabaci* (Inoue-Nagata et al. 2016), os indivíduos se alimentam desse recurso e geram grandes populações. Isso pode estar relacionado a facilidade de encontro da soja na paisagem e aos custos inerentes a dispersão e colonização de novos habitats que aumentam a retenção de indivíduos localmente (Riotte-Lambert e Matthiopoulos 2020; Silva e Clarke 2020). Apesar disso, o decréscimo da qualidade e/ou esgotamento do recurso próximo ou durante a colheita pode ser determinante para a dispersão (Gely et al. 2020; Han et al. 2020). Nesse momento, cultivos com hospedeiros mais atrativos, como os tomateiros, favorecem sua performance (Jiao et al. 2012; Watanabe et al. 2019) e devem atrair os indivíduos que estão dispersando (Togni et al. 2010).

Os indivíduos dispersores devem ser capazes de reconhecer pistas visuais do habitat em comprimentos de onda específicos (500 nm) (Blackmer e Byrne 1993a,b; Byrne et al. 1996; Isaacs et al. 1999; Riis e Nachman 2006) que associados a voláteis de bons hospedeiros, aumentam a probabilidade de encontro e a colonização dos cultivos (Bleeker et al. 2009; Togni et al. 2010). O acúmulo de estímulos positivos como a percepção dos voláteis, picadas de prova da seiva e outros estímulos físicos e químicos da planta devem aumentar a retenção dos indivíduos e estimular a oviposição (Finch e Collier 2000; Bruce et al. 2005; Bleeker et al. 2009). Os indivíduos colonizadores se tornam residentes, começam a se alimentar e assimilar os recursos (Togni et al. 2018; Derstine et al. 2020), o que explica no segundo ciclo de amostragem nos tomateiros uma assinatura isotópica mais similar a das plantas de tomateiro.

Como os tomateiros ocupam menor área, as populações vindas da soja se redistribuem em

subpopulações colonizadoras desses cultivos conectadas pela dispersão (Hanski, 1998; Hanski e Singer 2001; Togni et al. 2021). Isso implica que as grandes populações dos cultivos de soja são induzidas à dispersão durante a colheita e a população se redistribui entre manchas de habitats como os cultivos de tomate devido a atratividade e previsibilidade temporal dos recursos nessas manchas (Döring 2014). A colonização massiva dos tomateiros, explica a semelhança nos padrões de abundância entre as populações na soja e posteriormente no início do ciclo do tomateiro. Na sequência, a oviposição dos indivíduos colonizadores e residentes deve gerar novos adultos na segunda metade do ciclo fenológico dos tomateiros, aumentando ainda mais a abundância de indivíduos no cultivo. Isso ocorre porque as populações colonizadoras são determinantes para o crescimento populacional de *B. tabaci* em cultivos de tomate (Togni et al. 2018)

Consequentemente, as grandes áreas ocupadas pela soja na paisagem (Song et al. 2021; Map Biomas 2021) amplificam o crescimento populacional de *B. tabaci* devido a um efeito numérico (Bergamin Filho et al. 2020). Por outro lado, o tomateiro é um recurso de maior qualidade, favorecendo a performance do inseto e as taxas de crescimento populacional (Villas Bôas et al. 2002; Jiao et al. 2012; Watanabe et al. 2019). O ciclo biológico (ovo - adulto) da mosca-branca em tomateiros pode variar entre 20 - 27 dias a 27°C (Villas Bôas et al. 2002). Desta forma, o menor crescimento populacional que ocorre no início dos tomateiros está relacionado aos indivíduos colonizadores e o início de sua reprodução. Na medida em que os colonizadores ovipositam e morrem, uma nova geração de adultos deve ocorrer após 12 a 29 dias (Salas e Mendoza et al. 1995). Esse período corresponde ao estágio fenológico de floração, quando ocorre o início do crescimento populacional constante e exponencial observado até a frutificação.

Em conjunto, esses resultados indicam a possibilidade de que os efeitos populacionais em um determinado habitat podem influenciar as populações de *B. tabaci* em habitats vizinhos ao longo do tempo (Togni et al. 2021). A interação entre densidade e crescimento populacional pode resultar em um efeito densidade-dependente, como já foi observado para outros Sternorrhyncha, especialmente afídeos (Dixon e Kindlmann 1998; Agrawal et al. 2004). A relação positiva de densidade dependência

que observamos indica que para populações de *B. tabaci* a densidade da população inicial em um habitat, por efeito da natalidade, tem influência no crescimento populacional em outro habitat ao longo do tempo (Pulliam 1988). A natalidade e a mortalidade são importantes para que as populações se mantenham estáveis ou crescendo dentro da mancha de recursos, mas esses efeitos se estendem para outras manchas com hospedeiros quando uma cultura está finalizando o seu ciclo fenológico e a outra está começando (Evans 2018). Há então um efeito cascata das populações da soja sobre o crescimento populacional da mosca-branca nos tomateiros.

Apesar disso, os efeitos inversamente dependentes da densidade ou a falta de densidade dependência indicam que a migração também influencia o crescimento populacional de moscas-brancas (Cohen et al. 1988). Isso implica que ocorrem múltiplas colonizações de indivíduos vindos da soja ou outros habitats na paisagem. Essas evidências mostram que as populações de moscas-brancas se comportam como metapopulações persistentes e conectadas pela dispersão na paisagem (Riley e Ciomperlik et al. 1997). Conseqüentemente, a migração pode possuir um efeito aditivo à natalidade local, o que contribui para altas taxas de crescimento populacional após o estabelecimento no habitat (Pulliam 1988; Hanski e Singer 2001; Togni et al. 2018, 2021).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em síntese, culturas em larga escala, como a soja, além de serem a principal fonte de fragmentação dos habitats naturais e perda de biodiversidade (Sano et al. 2019; Betts et al. 2019; Ramírez-Delgado et al. 2022), também podem ser uma das principais fontes de problemas fitossanitários relacionados às pragas para os pequenos produtores. As moscas-brancas em tomateiros são um exemplo dessa situação (Bergamin Filho et al. 2020). Isso porque suas populações se comportam como metapopulações persistentes na paisagem que estão constantemente dispersando entre habitats distintos (Togni et al. 2021). Esses problemas demandam ações coletivas dos agricultores em uma escala regional, onde entender os processos ecológicos que determinam a

estrutura e dinâmica de populações destes insetos, é fundamental para subsidiar práticas de manejo mais eficientes e sustentáveis. Para esse manejo é imprescindível estratégias que incluam um conjunto de ferramentas visando todos os habitats envolvidos, a fim de reduzir as populações que seguirão para os próximos cultivos na paisagem (i.e., Area-wide Pest Management) (Wang et al. 2020; Klassen e Vreysen 2021).

Nesse sentido, nossa abordagem serve como um modelo para rastreamento de insetos polífagos, como a mosca-branca, para subsidiar estratégias de manejo em larga escala. Considerando que a mosca-branca é super vetora de diversos vírus de importância econômica (Gilbertson et al. 2015), sugerimos explorar o papel da dinâmica espacial e temporal considerando um sistema tri trófico (vetor-vírus-planta) na paisagem. Esse passo adiante é fundamental para compreender os padrões de transporte de vírus entre cultivos e suas consequências na dispersão primária e secundária das viroses transmitidas por essa praga de importância global.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ben Abdelkrim, A., Hattab, T., Fakhfakh, H., Belkadhi, M. S., & Gorsane, F. (2017). A landscape genetic analysis of important agricultural pest species in Tunisia: The whitefly *Bemisia tabaci*. *PLoS One*, *12*(10), e0185724. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185724>
- Agrawal, A. A., Underwood, N., & Stinchcombe, J. R. (2004). Intraspecific variation in the strength of density dependence in aphid populations. *Ecological Entomology*, *29*(5), 521-526. <https://doi.org/10.1111/j.0307-6946.2004.00635.x>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2014). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *arXiv preprint arXiv:1406.5823*. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>.
- Bergamin Filho, A., Macedo, M. A., Favara, G. M., Bampi, D., Oliveira, D. F. F., & Rezende, J. A. (2020). Amplifier hosts may play an essential role in tomato begomovirus epidemics in Brazil. *Frontiers in Plant Science*, *11*, 414. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00414>
- Betts, M. G., Wolf, C., Pfeifer, M., Banks-Leite, C., Arroyo-Rodríguez, V., Ribeiro, D. B., ... & Ewers, R. M. (2019). Extinction filters mediate the global effects of habitat fragmentation on animals. *Science*, *366*(6470), 1236-1239. <https://doi.org/10.1126/science.aax9387>
- Blackmer, J. L., & Byrne, D. N. (1993a). Environmental and physiological factors influencing phototactic flight of *Bemisia tabaci*. *Physiological Entomology*, *18*(4), 336-342. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.1993.tb00606.x>
- Blackmer, J. L., & Byrne, D. N. (1993b). Flight behaviour of *Bemisia tabaci* in a vertical flight chamber: effect of time of day, sex, age and host quality. *Physiological Entomology*, *18*(3), 223-232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3032.1993.tb00592.x>
- Bleeker, P. M., Diergaarde, P. J., Ament, K., Guerra, J., Weidner, M., Schutz, S., ... & Schuurink, R. C. (2009). The role of specific tomato volatiles in tomato-whitefly interaction. *Plant Physiology*, *151*(2), 925-935. <https://doi.org/10.1104/pp.109.142661>
- Bosco, D., Loria, A., Sartor, C., & Cenis, J. L. (2006). PCR-RFLP identification of *Bemisia tabaci* biotypes in the Mediterranean basin. *Phytoparasitica*, *34*, 243-251. <https://doi.org/10.1007/BF02980951>
- Botteon, V. W., Costa, M. D. L. Z., Lopes, L. A., Kovaleski, A., Martinelli, L. A., & Mastrangelo, T. (2019). Isotopic discrimination and persistence of the <sup>13</sup>C marker in adults of *Anastrepha fraterculus* (Diptera: Tephritidae) Brazilian-1 morphotype. *Florida Entomologist*, *102*(2), 336-346. <https://doi.org/10.1653/024.102.0208>
- Brown, J. K., Coats, S. A., Bedford, I. D., Markham, P. G., Bird, J., & Frohlich, D. R. (1995). Characterization and distribution of esterase electromorphs in the whitefly, *Bemisia tabaci* (Genn.)(Homoptera: Aleyrodidae). *Biochemical genetics*, *33*, 205-214.
- Bruce, T. J., Wadhams, L. J., & Woodcock, C. M. (2005). Insect host location: a volatile situation. *Trends in plant science*, *10*(6), 269-274. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2005.04.003>

- Byrne, D. N. (1999). Migration and dispersal by the sweet potato whitefly, *Bemisia tabaci*. *Agricultural and forest meteorology*, 97(4), 309-316. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00074-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00074-X)
- Byrne, D. N., & Bellows Jr, T. S. (1991). Whitefly biology. *Annual review of entomology*, 36(1), 431-457. <https://doi.org/10.1146/annurev.en.36.010191.002243>
- Byrne, D. N., Rathman, R. J., Orum, T. V., & Palumbo, J. C. (1996). Localized migration and dispersal by the sweet potato whitefly, *Bemisia tabaci*. *Oecologia*, 105, 320-328. <https://doi.org/10.1007/BF00328734>
- Cardoso, M. R. D., Marcuzzo, F. F. N., & Barros, J. R. (2014). Classificação climática de Köppen-Geiger para o estado de Goiás e o Distrito Federal. <https://doi.org/10.5654/actageo2014.0004.0016>
- Cohen, S., Kern, J., Harpaz, I., & Ben-Joseph, R. (1988). Epidemiological studies of the tomato yellow leaf curl virus (TYLCV) in the Jordan Valley, Israel. *Phytoparasitica*, 16, 259-270. <https://doi.org/10.1007/BF02979527>
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento (2021). Batata, cebola e tomate: caracterização da produção e da comercialização na Região Integrada de Desenvolvimento Econômico do Distrito Federal e Entorno – Ride-DF. Brasília, DF: Conab, 2021. 29 p. (Compêndio de Estudos Conab, v. 28). <https://www.conab.gov.br/institucional/publicacoes/compendio-de-estudos-da-conab>. Acesso em 17 de fevereiro de 2023
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento (2022). Boletim de Monitoramento Agrícola, Brasília, DF, v. 11, n. 11, Nov. 2022. <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/monitoramento-agricola>. Acesso em 17 de fevereiro de 2023
- Corrêa-Ferreira, B. S. (2005). Susceptibility of soybean stink bugs prior to pod development. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40, 1067-1072. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2005001100003>
- Crawley, M. J. (2012). *The R book*. John Wiley & Sons.
- Dainese, M., Martin, E. A., Aizen, M. A., Albrecht, M., Bartomeus, I., Bommarco, R., ... & Steffan-Dewenter, I. (2019). A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science advances*, 5(10), eaax0121. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax0121>
- Derstine, N. T., Meier, L., Canlas, I., Murman, K., Cannon, S., Carrillo, D., ... & Cooperband, M. F. (2020). Plant volatiles help mediate host plant selection and attraction of the spotted lanternfly (Hemiptera: Fulgoridae): a generalist with a preferred host. *Environmental Entomology*, 49(5), 1049-1062. <https://doi.org/10.1093/ee/nvaa080>
- Dixon, A. F. G., Kindlmann, P., Dempster, J. P., & McLean, I. F. G. (1998). Population dynamics of aphids. In *Insect Populations: In Theory and in Practice, 19th Symposium of the Royal Entomological Society, 10–11 September 1997 at the University of Newcastle*. (pp. 207-230). Kluwer, Dordrecht, The Netherlands.
- Döring, T. F. (2014). How aphids find their host plants, and how they don't. *Annals of Applied Biology*, 165(1), 3-26. <https://doi.org/10.1111/aab.12142>

- EMATER - Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal (2021). Relatório de atividades agropecuárias do Distrito Federal 2021. <https://emater.df.gov.br/informacoes-agropecuarias-do-distrito-federal/>. Acesso em 17 de fevereiro de 2023
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2006). Embrapa Hortaliças: Sistemas de Produção, 1 - 2ª Edição [https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Tomate/TomateIndustrial\\_2ed/pragas\\_mosca.htm](https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Tomate/TomateIndustrial_2ed/pragas_mosca.htm). Acesso em 17 de fevereiro de 2023
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2021). Soja. <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja>. Acesso em 17 de fevereiro de 2023
- Evans, E. W. (2018). Dispersal in host–parasitoid interactions: Crop colonization by pests and specialist enemies. *Insects*, 9(4), 134. <https://doi.org/10.3390/insects9040134>
- Fahrig, L., Baudry, J., Brotons, L., Burel, F. G., Crist, T. O., Fuller, R. J., ... & Martin, J. L. (2011). Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes. *Ecology letters*, 14(2), 101-112. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2010.01559.x>
- Fancelli, M., & Vendramim, J. D. (2002). Development of Bemisia tabaci (Gennadius, 1889) biotype B on Lycopersicon spp. genotypes. *Scientia Agricola*, 59, 665-669. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162002000400007>
- Finch, S., & Collier, R. H. (2000). Host-plant selection by insects—a theory based on ‘appropriate/inappropriate landings’ by pest insects of cruciferous plants. *Entomologia experimentalis et applicata*, 96(2), 91-102. <https://doi.org/10.1046/j.1570-7458.2000.00684.x>
- Garrett, R. D., Lambin, E. F., & Naylor, R. L. (2013). Land institutions and supply chain configurations as determinants of soybean planted area and yields in Brazil. *Land use policy*, 31, 385-396. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.08.002>
- Gely, C., Laurance, S. G., & Stork, N. E. (2020). How do herbivorous insects respond to drought stress in trees?. *Biological Reviews*, 95(2), 434-448. <https://doi.org/10.1111/brv.12571>
- Gilbertson, R. L., Batuman, O., Webster, C. G., & Adkins, S. (2015). Role of the insect supervectors *Bemisia tabaci* and *Frankliniella occidentalis* in the emergence and global spread of plant viruses. *Annual review of virology*, 2, 67-93. <https://doi.org/10.1146/annurev-virology-031413-085410>
- Giordano, L. D. B., Fonseca, M. E. D. N., da Silva, J. B., Inoue-Nagata, A. K., & Boiteux, L. S. (2005). Efeito da infecção precoce por Begomovirus com genoma bipartido em características de frutos de tomate industrial. *Horticultura Brasileira*, 23, 815-818. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362005000300025>
- Hambäck, P. A., & Englund, G. (2005). Patch area, population density and the scaling of migration rates: the resource concentration hypothesis revisited. *Ecology letters*, 8(10), 1057-1065. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00811.x>
- Han, P., Becker, C., Le Bot, J., Larbat, R., Lavoit, A. V., & Desneux, N. (2020). Plant nutrient supply alters the magnitude of indirect interactions between insect herbivores: From foliar chemistry

- to community dynamics. *Journal of Ecology*, 108(4), 1497-1510. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13342>
- Hanski, I. (1998). Metapopulation dynamics. *Nature*, 396(6706), 41-49. <https://doi.org/10.1038/23876>
- Hanski, I. (1999). Habitat connectivity, habitat continuity, and metapopulations in dynamic landscapes. *Oikos*, 209-219. <https://doi.org/10.2307/3546736>
- Hanski, I., & Singer, M. C. (2001). Extinction-colonization dynamics and host-plant choice in butterfly metapopulations. *The American Naturalist*, 158(4), 341-353. <https://doi.org/10.1086/321985>
- Hartig, F., 2021. DHARMA: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models. R package version (4), 1. <https://CRAN.R-project.org/package=DHARMA>.
- HASSELL, M. P. (1984). Parasitism in patchy environments: inverse density dependence can be stabilizing. *Mathematical Medicine and Biology: A Journal of the IMA*, 1(1), 123-133. <https://doi.org/10.1093/imammb/1.1.123>
- Hendrickx, F., MAELFAIT, J. P., Van Wingerden, W., Schweiger, O., Speelmans, M., Aviron, S., ... & Bugter, R. O. B. (2007). How landscape structure, land-use intensity and habitat diversity affect components of total arthropod diversity in agricultural landscapes. *Journal of Applied Ecology*, 44(2), 340-351. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01270.x>
- Herforth, A., Bai, Y., Venkat, A., Mahrt, K., Ebel, A., & Masters, W. A. (2020). *Cost and affordability of healthy diets across and within countries: Background paper for The State of Food Security and Nutrition in the World 2020. FAO Agricultural Development Economics Technical Study No. 9* (Vol. 9). Food & Agriculture Org. <https://doi.org/10.4060/cb2431en>. Accessed 17 February 2023
- Hobson, K. A., Doward, K., Kardynal, K. J., & McNeil, J. N. (2018). Inferring origins of migrating insects using isoscapes: a case study using the true armyworm, *Mythimna unipuncta*, in North America. *Ecological Entomology*, 43(3), 332-341. <https://doi.org/10.1111/een.12505>
- Hood-Nowotny, R., & Knols, B. G. (2007). Stable isotope methods in biological and ecological studies of arthropods. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 124(1), 3-16. <https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2007.00572.x>
- Hyodo, F. (2015). Use of stable carbon and nitrogen isotopes in insect trophic ecology. *Entomological Science*, 18(3), 295-312. <https://doi.org/10.1111/ens.12128>
- IAEA - International Atomic Energy Agency (2009). Manual for the Use of Stable Isotopes in Entomology. IAEA, Vienna, Austria. <https://www.iaea.org/publications/8108/manual-for-the-use-of-stable-isotopes-in-entomology>. Acesso em 17 de fevereiro de 2023
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2004). Cartas e Mapas: Biomas. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais/15842-biomas.html?edicao=25799&t=acesso-ao-p...>
- Inoue-Nagata, A. K., Lima, M. F., & Gilbertson, R. L. (2016). A review of geminivirus diseases in vegetables and other crops in Brazil: current status and approaches for management. *Horticultura Brasileira*, 34, 8-18. <https://doi.org/10.1590/S0102->

053620160000100002

- Isaacs, R., & Byrne, D. N. (1998). Aerial distribution, flight behaviour and eggload: their inter-relationship during dispersal by the sweetpotato whitefly. *Journal of Animal Ecology*, 67(5), 741-750. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2656.1998.00236.x>
- Isaacs, R., Cahill, M., & Byrne, D. N. (1999). Host plant evaluation behaviour of *Bemisia tabaci* and its modification by external or internal uptake of imidacloprid. *Physiological Entomology*, 24(2), 101-108. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3032.1999.00119.x>
- Jackson, A. L., Inger, R., Parnell, A. C., & Bearhop, S. (2011). Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER—Stable Isotope Bayesian Ellipses in R. *Journal of Animal Ecology*, 80(3), 595-602. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2011.01806.x>
- Jiao, X., Xie, W., Wang, S., Wu, Q., Zhou, L., Pan, H., ... & Zhang, Y. (2012). Host preference and nymph performance of B and Q putative species of *Bemisia tabaci* on three host plants. *Journal of Pest Science*, 85, 423-430. <https://doi.org/10.1007/s10340-012-0441-2>
- Kanakala, S., & Ghanim, M. (2019). Global genetic diversity and geographical distribution of *Bemisia tabaci* and its bacterial endosymbionts. *PloS one*, 14(3), e0213946. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213946>
- Klassen, W., & Vreysen, M. J. B. (2021). Area-wide integrated pest management and the sterile insect technique. *Sterile insect technique*, 75-112.
- Larsen, A. E., & Noack, F. (2021). Impact of local and landscape complexity on the stability of field-level pest control. *Nature Sustainability*, 4(2), 120-128. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-00637-8>
- Lincoln, Z., Eleno, T., Soja, E., Boddey Robert, M., Agrobiologia, E., Segundo, U., ... & Agrobiologia, E. (2002). Role of legumes in the N economy of cereal production in crop rotations under conventional and no-tillage. In *17. World congress of soil science, Bangkok (Thailand), 14-21 Aug 2002*.
- Ludwig, M., Ludwig, H., Conrad, C., Dahms, T., & Meyhöfer, R. (2019). Cabbage whiteflies colonise Brassica vegetables primarily from distant, upwind source habitats. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 167(8), 713-721. <https://doi.org/10.1111/eea.12827>
- MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2022). Agricultura Familiar e Cooperativismo: Agricultura Familiar. <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/agricultura-familiar/agricultura-familiar-1>. Acesso em 17 de fevereiro 2023
- Martin, E. A., Seo, B., Park, C. R., Reineking, B., & Steffan-Dewenter, I. (2016). Scale-dependent effects of landscape composition and configuration on natural enemy diversity, crop herbivory, and yields. *Ecological applications*, 26(2), 448-462. <https://doi.org/10.1890/15-0856>
- Mazzi, D., & Dorn, S. (2012). Movement of insect pests in agricultural landscapes. *Annals of Applied Biology*, 160(2), 97-113. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2012.00533.x>
- Morales, F. J. (2010). Distribution and dissemination of begomoviruses in Latin America and the Caribbean. *Bemisia: bionomics and management of a global pest*, 283-318. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2460-2\\_9](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2460-2_9)

- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, *403*(6772), 853-858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Oliveira, C. M., Auad, A. M., Mendes, S. M., & Frizzas, M. R. (2013). Economic impact of exotic insect pests in Brazilian agriculture. *Journal of Applied Entomology*, *137*(1-2), 1-15. <https://doi.org/10.1111/jen.12018>
- Parnell, A. C., Inger, R., Bearhop, S., & Jackson, A. L. (2010). Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation. *PloS one*, *5*(3), e9672. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0009672>
- Projeto MapBiomias – Coleção [1985-2021] da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. <https://mapbiomas.org/>. Acesso em 17 de fevereiro de 2023
- Pulliam, H. R. (1988). Sources, sinks, and population regulation. *The American Naturalist*, *132*(5), 652-661. <https://doi.org/10.1086/284880>
- Quinby, B. M., Creighton, J. C., & Flaherty, E. A. (2020). Stable isotope ecology in insects: a review. *Ecological Entomology*, *45*(6), 1231-1246. <https://doi.org/10.1111/een.12934>
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Ramírez-Delgado, J. P., Di Marco, M., Watson, J. E., Johnson, C. J., Rondinini, C., Corredor Llano, X., ... & Venter, O. (2022). Matrix condition mediates the effects of habitat fragmentation on species extinction risk. *Nature communications*, *13*(1), 595. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28270-3>
- Ribeiro, F. de C., de Sousa Rocha, F., Erasmo, E. A. L., de Matos, E. P., & da Costa, S. J. (2016). Manejo com inseticidas visando o controle de percevejo marrom na soja intacta. *Revista de Agricultura Neotropical*, *3*(2), 48-53. <https://doi.org/10.32404/rean.v3i2.1132>
- Riis, L., & Nachman, G. (2006). Migration, trapping and local dynamics of whiteflies (Homoptera: Aleyrodidae). *Agricultural and Forest Entomology*, *8*(3), 233-241. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2006.00302.x>
- Riley, D. E., & Ciomperlik, M. A. (1997). Regional population dynamics of whitefly (Homoptera: Aleyrodidae) and associated parasitoids (Hymenoptera: Aphelinidae). *Environmental Entomology*, *26*(5), 1049-1055. <https://doi.org/10.1093/ee/26.5.1049>
- Riotte-Lambert, L., & Matthiopoulos, J. (2020). Environmental predictability as a cause and consequence of animal movement. *Trends in ecology & evolution*, *35*(2), 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.09.009>
- Root, R. B. (1973). Organization of a plant-arthropod association in simple and diverse habitats: the fauna of collards (*Brassica oleracea*). *Ecological monographs*, *43*(1), 95-124. <https://doi.org/10.2307/1942161>

- Salas, J., & Mendoza, O. (1995). Biology of the sweetpotato whitefly (Homoptera: Aleyrodidae) on tomato. *Florida Entomologist*, 154-160. <https://doi.org/10.2307/3495680>
- Sano, E. E., Rodrigues, A. A., Martins, E. S., Bettiol, G. M., Bustamante, M. M., Bezerra, A. S., ... & 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>
- Silva, R., & Clarke, A. R. (2020). The “sequential cues hypothesis”: A conceptual model to explain host location and ranking by polyphagous herbivores. *Insect science*, 27(6), 1136-1147. <https://doi.org/10.1111/1744-7917.12719>
- Sisti, C. P., dos Santos, H. P., Kohhann, R., Alves, B. J., Urquiaga, S., & Boddey, R. M. (2004). Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil and tillage research*, 76(1), 39-58. <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.08.007>
- Smit, C., Javal, M., Conlong, D. E., Hall, G., & Terblanche, J. S. (2021). Host range determination in a novel outbreak pest of sugarcane, *Cacosceles newmannii* (Coleoptera: Cerambycidae, Prioninae), inferred from stable isotopes. *Agricultural and Forest Entomology*, 23(3), 378-387. <https://doi.org/10.1111/afe.12439>
- Song, X. P., Hansen, M. C., Potapov, P., Adusei, B., Pickering, J., Adami, M., ... & Tyukavina, A. (2021). Massive soybean expansion in South America since 2000 and implications for conservation. *Nature sustainability*, 4(9), 784-792. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00729-z>
- Souza, E. S., Silva, J. P. G. F., Baldin, E. L. L., Pierozzi, C. G., Cunha, L. S., Canassa, V. F., ... & Lourenção, A. L. (2016). Response of soybean genotypes challenged by a stink bug complex (Hemiptera: Pentatomidae). *Journal of Economic Entomology*, 109(2), 898-906. <https://doi.org/10.1093/jee/tov341>
- Spence, K. O. (2007). Tri-trophic interactions among inducible plants, herbivores, and true omnivorous predators.
- Spera, S. A., Galford, G. L., Coe, M. T., Macedo, M. N., & Mustard, J. F. (2016). Land-use change affects water recycling in Brazil's last agricultural frontier. *Global change biology*, 22(10), 3405-3413. <https://doi.org/10.1111/gcb.13298>
- Stewart, J. D., Rohner, C. A., Araujo, G., Avila, J., Fernando, D., Forsberg, K., ... & Semmens, B. X. (2017). Trophic overlap in mobulid rays: insights from stable isotope analysis. *Marine Ecology Progress Series*, 580, 131-151. <https://doi.org/10.3354/meps12304>
- Togni, P. H., Harterreiten-Souza, E. S., Novaes, D. R., & Sujii, E. R. (2021). Spatial dynamic and spillover of the polyphagous pest *Bemisia tabaci* is influenced by differences in farmland habitats on tropical organic farms. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 320, 107610. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107610>
- Togni, P. H., Laumann, R. A., Medeiros, M. A., & Sujii, E. R. (2010). Odour masking of tomato volatiles by coriander volatiles in host plant selection of *Bemisia tabaci* biotype

*B. Entomologia Experimentalis et Applicata*, 136(2), 164-173.  
<https://doi.org/10.1111/j.1570-7458.2010.01010.x>

- Togni, P. H. B., Marouelli, W. A., Inoue-Nagata, A. K., Pires, C. S. S., & Sujii, E. R. (2018). Integrated cultural practices for whitefly management in organic tomato. *Journal of Applied Entomology*, 142(10), 998-1007. <https://doi.org/10.1111/jen.12558>
- Togni, P. H., Venzon, M., Souza, L. M., Sousa, A. A., Harterreiten-Souza, É. S., Pires, C. S., & Sujii, E. R. (2019). Dynamics of predatory and herbivorous insects at the farm scale: the role of cropped and noncropped habitats. *Agricultural and Forest Entomology*, 21(4), 351-362. <https://doi.org/10.1111/afe.12337>
- Toscano, L. C., Junior, A. L. B., Martins, G. L. M., & Maruyama, W. I. (2016). Biologia de *Bemisia tabaci* (Genn.) biótipo B (Hemiptera: Aleyrodidae) em genótipos de tomateiro em duas épocas. *Revista de Agricultura Neotropical*, 3(4), 1-6. <https://doi.org/10.32404/rean.v3i4.1124>
- Villas Bôas, G. L. (2000). Caracterização molecular da mosca-branca. *Bemisia argentifolii e determinação do potencial biótico às plantas hospedeiras: abobrinha*.
- Villas Bôas, G. L., França, F. H., & Macedo, N. (2002). Potencial biótico da mosca-branca *Bemisia argentifolii* a diferentes plantas hospedeiras. *Horticultura Brasileira*, 20, 71-79. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362002000100014>
- Walthall, W. K., & Stark, J. D. (1997). Comparison of two population-level ecotoxicological endpoints: The intrinsic (rm) and instantaneous (ri) rates of increase. *Environmental Toxicology and Chemistry: An International Journal*, 16(5), 1068-1073. <https://doi.org/10.1002/etc.5620160529>
- Wang, H. H., Grant, W. E., Koralewski, T. E., Elliott, N. C., Brewer, M. J., & Westbrook, J. K. (2020). Where do all the aphids go? A series of thought experiments within the context of area-wide pest management. *Agricultural Systems*, 185, 102957. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102957>
- Watanabe, L. F. M., Bello, V. H., De Marchi, B. R., da Silva, F. B., Fusco, L. M., Sartori, M. M., ... & Krause-Sakate, R. (2019). Performance and competitive displacement of *Bemisia tabaci* MEAM1 and MED cryptic species on different host plants. *Crop Protection*, 124, 104860. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.104860>
- Wiens, J. A. (1997). Metapopulation dynamics and landscape ecology. In *Metapopulation biology* (pp. 43-62). Academic Press.
- Woiwod, I. P., & Hanski, I. (1992). Patterns of density dependence in moths and aphids. *Journal of animal ecology*, 619-629. <https://doi.org/10.2307>

