



Universidade de São Paulo  
Instituto de Biociências  
Programa de Pós-Graduação em Ecologia

Camila Celestino Hohlenwerger

Efeito da estrutura da paisagem sobre a provisão dos  
serviços de polinização e controle de pragas



(Foto de Latin American Lifestyle and Art - LALA, Roatán: "Coffee Plantation" by the artist Angelina Quic<sup>1</sup>)

São Paulo  
2022

---

<sup>1</sup> \*Imagem disponível em:  
[https://www.tripadvisor.co/LocationPhotoDirectLink-g944573-d4471264-i70823377-Latin\\_American\\_Lifestyle\\_and\\_Art\\_LALA-West\\_Bay\\_Roatan\\_Bay\\_Islands.htm](https://www.tripadvisor.co/LocationPhotoDirectLink-g944573-d4471264-i70823377-Latin_American_Lifestyle_and_Art_LALA-West_Bay_Roatan_Bay_Islands.htm)

Camila Celestino Hohlenwerger

Efeito da estrutura da paisagem sobre a provisão dos  
serviços de polinização e controle de pragas

*Landscape structural effects on the provision of  
pollination and natural pest control services*

Tese apresentada ao Instituto de  
Biotecnologia da Universidade de São  
Paulo, para obtenção do Título de  
Doutor em Ciências, na Área de  
Ecologia

Orientador: Jean Paul Walter Metzger  
Co-orientador: Leandro Reverberi Tambosi

São Paulo  
2022

# Ficha Catalográfica

---

Ficha catalográfica elaborada pelo Serviço de Biblioteca do Instituto de Biociências da USP, □  
com os dados fornecidos pelo (a) autor (a) no formulário:  
'<https://biblioteca.ib.usp.br/ficha-catalografica/src/ficha.php>'

Celestino Hohlenwerger, Camila  
Efeito da estrutura da paisagem sobre a provisão  
dos serviços de polinização e controle de pragas /  
Camila Celestino Hohlenwerger ; orientador Jean  
Paul Walter Metzger ; coorientador Leandro  
Reverberi Tambosi -- São Paulo, 2022.  
139 p.

Tese (Doutorado) -- Instituto de Biociências da  
Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação  
em Ecologia.

1. Estrutura da Paisagem. 2. Serviços  
Ecosistêmicos. 3. Mata Atlântica. 4. Controle de  
pragas. 5. Polinização. I. Walter Metzger, Jean Paul  
, orient. II. Reverberi Tambosi, Leandro, coorient.  
III. Título.

Bibliotecária responsável pela catalogação:  
Elisabete da Cruz Neves - CRB - 8/6228

## Comissão Julgadora:

---

Prof(a). Dr(a).

---

Prof(a). Dr(a).

---

Prof(a). Dr(a).

---

Prof. Dr. Jean Paul Walter Metzger (Orientador)

---

Prof. Dr. Leandro R. Tambosi (Co-orientador)

# Dedication

---

Para minha avó e minha mãe,  
Sônia Silva e Kátia Quadros,  
duas fontes infinitas e eternas de  
amor, dedicação e bondade.

# Epigraph

---

“Toda as vossas coisas sejam feitas  
com amor“

1 Coríntios 16:14

# Agradecimentos

---

Esse momento chegou! E que jornada que foi esse doutorado! Quem me conhece sabe o quanto eu vim ansiando por esse momento, por concluir essa etapa, por dar continuidade na caminhada. Mas não se engane, esse ansiar pelo “movimento” não tem nada haver com não ter aproveitado e adorado os caminhos que trilhei nessa jornada, pelo contrário, tem haver com ter passado um tempo lindo e intenso cultivando as “asas”, e eu posso provar! rs

Começo agradecendo ao Programa de Pós Graduação em Ecologia-USP não só por ter sido minha casa ao longo desses 9 anos entre mestrado e doutorado, mas principalmente por ter feito eu me sentir em casa. Eu estou para conhecer ambiente de trabalho e ensino mais acolhedor que esse PPG, me sinto privilegiada de ter podido crescer tanto dentro desse ambiente. Queria então agradecer a todas as Comissões de Pós Graduação (CCP) por fazerem desse ambiente de trabalho tão acolhedor e pró-alune. Agradeço em especial a CCP de 2019 que fez eu e Duda nos sentirmos pertencentes e aptos a contribuir. Aqui, queria agradecer muito ao Paulo Inácio Prado, ao Glauco Machado e ao Alexandre Adalardo por tamanho aprendizado, paciência e dedicação com e por nós alunes. É impressionante o carinho e dedicação que vocês nos dedicaram, muito obrigada. É óbvio que dentro desse time eu não poderia deixar de reservar um lugar mais que especial para a querida Vera Lima. Vera que é absurdamente competente, Vera que é altamente atenciosa, Vera que é a “chefia”, e como se tudo isso não fosse bastante, Vera que é como se fosse mãe das(os) alunas(os) de tão carinhosa, amável e dedicada que é. Vera, não existem palavras para definir a sua importância nessa jornada. Sempre que penso nesse percurso, sua atenção e cuidado sempre aparecem ali no top 10, gratidão viu?! Agradeço também à Erika e Shirlene que sempre estão prontas para nos ajudar!

Eu tenho muita sorte com orientação, você vai ver quando eu começar a agradecer ao Jean e ao Le, rs. Mas eu tenho tanta sorte que ela se expande para além da orientação formal e chega no que as pessoas chamam formalmente de “mentores”. E olha que até nisso eu tenho sorte, porque dessa formalidade, não precisei. Começo então agradecendo a ela, “Rainha” como sempre muito orgulhoso diz Peu Rocha: Renata Pardini. Rê, eu não tenho como agradecer pelo tanto que aprendi ao seu lado. Entre a incrível experiência da monitoria em VertSul (que disciplina, que privilégio!), a paciência e o crescimento gigantesco no IB Mulheres, e claro, entre uma pizza e outra na sua casa, eu te digo com todas as letras que você foi parte importantíssima dessa jornada. Serei sempre muito grata por ter tido o mega privilégio de conviver tanto com você e ter aprendido e ensinado do seu lado (que ousadia, não? Tenho sorte! Já disse isso? rs). Agradeço muito também ao Paulo Roberto

Guimarães, ou melhor, Miúdo, pessoa tão querida que mais vezes do que posso contar me tratou como se fosse sua aluna, dedicando não só tempo mas também uma atenção sem tamanho. Miúdo, eu serei sempre muito grata a você pelos cafés e conversas que me foram (e são) tão importantes. Cafés que me deram instrução mas também perspectiva e ânimo, e que fizeram de mim uma pesquisadora mais atenta, capaz e confiante. Obrigada demais! Nesse tópico, eu ainda queria agradecer ao meu comitê de acompanhamento, a Maria Uriarte e a Elizabeth Nichols, por terem me ajudado a pensar na melhor composição e configuração (ecóloga de paisagem, já viu né?! rs) das pedrinhas de ouro que formaram esse caminho do doutorado. Agradeço em especial à Liz, que esteve sempre disposta a refletir, discutir e ajudar com a construção da tese, e que tem uma importância sem tamanho para toda geração que fez parte do Interface. Thank you so much, Liz! Por fim, como mentoria independe de hierarquia, agradeço demais ao Danilo Muniz, Melina Leite e Bruno Travassos por toda ajuda com o “estatuês”. Ajuda essa que me fez muito mais capaz e competente, mas também que me ensinou a lidar com os anseios do “estatuês”, e que fez eu me sentir acolhida e pronta pros desafios. Eu agradeço muito também à Daniela Coelho (amada Danizoo!) e ao Leandro G. Cosmo por tantas conversas e scripts sobre análise de redes de interação, por tamanha paciência, disposição e vontade genuína de ensinar e ajudar. Obrigada demais, queridos! Eu agradeço ao Lepac que foi (e é) minha casa aqui na Ecologia. O Lepac é uma grande família e é parte fundamental da minha formação e tenho muito orgulho de estar aqui tempo suficiente para ter visto gerações maravilhosas chegarem e ganharem o mundo! Ah, isso sem falar na criançada né? Jesus, que delícia ver o tempo passar assim! Obrigada Jean e Vânia por transformarem essa equipe em família! Obrigada também ao Welington por ser sempre tão prestativo e atencioso com as nossas necessidades no lab, um privilégio contar com vc! Agradeço ao LeLab por todas discussões frutíferas e divertidas, vocês enriqueceram minhas tardes de sexta e é uma delícia conviver com vocês! Por fim, agradeço também à LAGE, que embora eu não faça parte, sempre me recebeu super bem, fez dos meus cafezinhos pós almoço mais divertidos, e me deu amigos tão queridos! Obrigada Paulo Inácio, Glauco, Edu e Miúdo por criarem um espaço tão receptivo e enriquecedor!

I am so thankful to Felix Eigenbrod, Rebecca (Becks) Spake and Laura Graham for being so welcome and for always being willing and interested in helping me. Thank you so much for hosting me, Felix! I have learned and I continue to learn a lot with you, what a privilege! Thank you so much Becks for being not only exceptional in what you do, but also so kind and so fun to be around and work with! I will never be able to thank you enough for all your kindness, and all your help for me and Bruno! Thank you so much for our discussions and meetings, Laura! I love that we always have something to talk about through our academic meetings, be it dogs or knitting, it is always great to have a chat with you. I

also would like to thank Jonathan Rhodes for always being so welcome and generous with opportunities, and for being a lovely person to be around, be it through meetings and conferences, or be it through nice happy hours in Brazil and Germany. I would also like to thank my lovely B (Bethan) for being the most amazing roommate a foreign girl could ask for. I miss you loads and I am so grateful for your friendship, kindness and help throughout all my visits to Southampton! I also thank Nathan Fox for being so nice with me and Bruno, and for all the fun we had together at Soton Uni and at Northern Ireland.

Eu sei que eu já agradei ao PPG-Eco, mas não poderia deixar de dedicar um espaço especial para as comissões discentes deste Programa. Eu tenho muito orgulho de ter feito parte de quase todas estas comissões. Eu aprendi tanto e cresci tanto mais! Agradeço muito a todas as comissões: foram 3 EcoEscolas, um ano de Representação Discente, um ano e meio de Comissão Proex, um ano de EcoEncontros, trezentos anos de Café Existencial (rs) e alguns meses (que valeram como anos) de IB Mulheres. Eu agradeço demais a cada um e uma de vocês que compartilharam essas comissões comigo! Eu queria agradecer em especial à Duda, ao Natcho e à Joice (Rainha Proex) por terem sido essenciais nesse percurso. Sem vocês eu não só não teria começado a me envolver, como não teria me divertido e aprendido tanto, obrigada demais! Agradeço também por ter tido a chance de ter sido monitora em disciplinas tão incríveis: Introdução ao Ensino de Biologia; Conservação da Biodiversidade e VertSul! Que sorte!!! Eu queria também agradecer às comissões que não participei mas que apesar de terem surgido no final dessa jornada do doutorado, ainda assim me ensinaram horrores: CoPaf, Cursinho Preparatório e o GT de trabalho sobre a implementação das cotas na pós. Obrigada por serem tão engajados(as), tão pacientes e por estarem sempre tão dispostos(as) ao diálogo! Aproveito para reforçar quanto o Simpósio “Por que a pós da USP ainda não tem cotas?” promovido pelo Coletivo Bitita foi importante para mim. Agradeço muito ao Coletivo por tamanho aprendizado e pelo “diálogo de milhões” durante todo o Simpósio e todo o processo de implementação de cotas no PPGEco. Ter tido a oportunidade de participar e aprender com vocês durante esse processo foi uma das coisas que me ajudou a resignificar esse período de “atraso” do doutorado. Por isso e por tudo que vocês representam, gratidão! Ainda no tópico das comissões e grupos, agradeço muito aos queridos do “Corredores do Matão” e do Grupo Funcional com Verinha. Vocês foram a endorfina e motivação dos almoços e dos fins de tarde! Agradecimento especial à Pam Santana e Cata que estavam sempre dispostas (mesmo no inverno!) a pegar uma corridinha no happy hour. Obrigada à Rede de Mulheres na Ciência Kunhã Asé, sem palavras para o quanto aprendo ao lado dessas mulheres!

Os agradecimentos estão acabando, calma, aguenta firme ai! rs Eu queria agradecer muito aos amigos que SP me deu, vocês são parte essencial dessa jornada. Começo agradecendo a duas das pessoas mais queridas nesse mundo, Solimary Garcia (Soly) e



John Uribe (Hola amor!!!). Vocês são raio de sol em dias de chuva, são a minha Bahia em São Paulo, são a certeza de um encontro gostoso e de uma amizade pra vida. Los quiero mucho! Agradeço muito à Dudurududa por ter sido a melhor parceira que eu podia ter durante a representação discente, por ter vivido comigo uma das melhores viagens que eu já fiz, e por ser uma fonte de boas vibrações, de bons desejos, de amizade e carinho. Obrigada demais, Dudurududa! Agradeço tb à turma dos “coroas” da Eco: Dri maravilhosa, poço de bondade e fofura; Li Carneiro e Will Sabino, meninos de ouro, garantia de boa comida e diversão; Ari, tão querido e prestativo! Só vem coisa boa da convivência com esse menino, incrível!; Di Bertuol, Morma, Natcho, Rodolfex (meu primeiro “orientando”) e Lu Caires, obrigada por serem tão carinhosos e fazerem da Eco (literalmente, essa gente construiu partes lindas desse PPG!) um ambiente tão gostoso. Aos meus queridos da Costa Rica, Rosinha, Andresito, e Dieguito: Obrigada por ampliar meus horizontes e por serem tão, mais tão queridos! Andresito, tenho um carinho enorme por você, obrigada por todas brejas, por cuidar com carinho do meu campo (Obrigada tb Bru!!), e por ter feito dos dias dessa jornada mais cheios de vida e de happy hours hahaha. Dieguito, você é pura alegria, impossível olhar pra você e não sorrir, obrigada pelo carinho, guapo lindo! Agradeço à Pam Santana por ser sempre tão fofa e querida, obrigada por todo estímulo e amizade! Erika e Paulo Marques, vocês são incríveis, uma explosão de energia boa e diversão, obrigada por serem tão lindos e queridos! Julia Assis (Ju), obrigada por ser tão divertida e por estar sempre me impulsionando! Ao povo maravilhoso do Interface e do Lepac (e aqui vou listar pq, ainda bem, somos muitos: Lu Teixeira, Carito, Doug, Artur, Karla, Naty, Mari Eiko, MaFê, Ju, Clari, Rafa, Chico, Adrian (e Maria maravilhosa), Bolinho, Pa Prist: vocês são incríveis e tornam o nosso lab, o trabalho e a vivência muito mais especiais! Bolinho, um agradecimento especial à você pelos trezentos churrascos, feijucas, macarronadas, pizzadas e tudo mais que nós do lab e da Eco vivemos graças em muito à Andrés e a você, com seu jeito leve e agregador! Agradeço em especial também a Isa, que foi muito importante em momentos de alegria e de tristeza, e que sem dúvidas tornou muitos dos dias dessa jornada mais carinhosos e gostosos. Agradeço demais à Lari, com quem eu aprendi (e aprendo) muito! Obrigada por ser essa potência, amar tanto o que faz e nos ensinar tanto! Por fim, agradeço imensamente à Paty, ô mulher querida, Jesus! Paty, você é uma força e uma inspiração, obrigada por ser tão amiga, tão atenciosa e cuidadosa. Nossa, quanto que eu aprendo com você! Tenho um carinho sem tamanho por você! Ao povo da Eco, vocês são tão sensacionais! Agradeço em especial JP, Bru França, Luís Felipe: obrigada por serem lindos, pela amizade gostosa e por terem feito o possível e impossível em só um ano de representação discente.

Agradeço aos amigos de sempre, aqueles que podem morar em outro planeta sem que nada mude. Já adianto, amo vocês demais! Agradeço demais à Danizoo, minha

parceira de vida maravilhosa e com quem sei que posso contar para todas, eu disse todas, todas as horas! Obrigada por ser incrível, divertida, por estar sempre presente, e por aturar todas as minhas milhões de perguntas sobre redes hahahaha! Agradeço à Davis por ser a pessoa mais chata (rs) e amável desse planeta! Obrigada por ser um amigo tão presente, véi. Eu não tenho como agradecer pela sua amizade constante e carinhosa. Lou, obrigada por aturar essa criatura (rs), por ser tão doce e amiga, e por sempre acolher essa mãe de pet com muito amor e paciência. Cat, Deco e Mila, obrigada por serem tão divertidos e por terem me acolhido nesse grupo de amigos tão queridos. Rafa, sua “pequena gafanhoto” nunca vai poder lhe agradecer pelo tanto que aprendi (e aprendo) com você. Se meu caminho acadêmico me trouxe até aqui, devo muito ao seu estímulo. Você foi quem me deu o primeiro paper da Fahrig para ler (o de 2003, óbvio), você tem consciência disso??? kkkk Isso sem nem falar no quanto sou feliz pela sua amizade cuidadosa, motivadora e que atravessa o tempo! Tiko e Lina, obrigada por terem sido a nossa família na gringa e por serem sempre tão amigos e tão carinhosos. Mal posso esperar para babar muito essa preciosidade que está vindo! Ju, Caren e Keka, se o nosso grupo de zap se formou para que eu ajudasse vocês, saibam que a ajuda aconteceu, mas foi de vocês para mim! Obrigada por terem me acolhido, me amado, me ajudado tanto! Eu não sei o que seria de mim nesse último ano de doc sem o suporte doce e divertido de vocês! Keka, queria conseguir expressar a gratidão que eu sinto por ter você em minha vida. Você é a irmã que a vida me deu, a criatura que pode tá em qualquer canto, que posso passar séculos sem conversar, mas que sempre está presente de alguma forma. Obrigada por ser fonte de alegria, de carinho, de amor e de parceria! Breno, eu te amo por tabela! kkk Brincadeira! Obrigada por ter me ensinado tanto, por ser tão carinhoso e por cuidar dessa preciosidade! Terminando essa parte agradecendo tantos mais lindos que Salvador me deu: Bibilio, Lukinhas, Nanda, Montinha e tantos mais que não vou poder listar. Que sorte a minha, ual!

Agradeço ao meu porto seguro: Deus, minhas três mães (Kátia, Sônia e Liu), meu pai (Lio), e meu marido (Bruno). Eu agradeço ao divino, que no meu caso chamo de “Deus”, pela força, pelas bênçãos, pela certeza, pela proteção e pelo equilíbrio. Mãe, você é fonte infinita de bondade, de amor e de força! Obrigada por me dar tudo, por formar quem sou, por dar SEMPRE o seu melhor, por ser a certeza na incerteza, e por me mostrar que o divino é sempre bom, diverso e fundamental! Gratidão pra eternidade, mãe! Vó, obrigada por ser a razão de estarmos aqui, por ter dado (e dar) a sua vida pela nossa, por ser eternamente bondade e doação, e por se dedicar e fazer por nós o que não faz nem por você! Nós somos todos muito gratos à você, meu guizo! Liu, obrigada por ser tão generosa, carinhosa, amorosa e atenciosa! Você é miúda em tamanho mas gigante em amor e eu sou muito grata por tudo que você é e faz por nós! Lio, você é o meu pai, aquele que está sempre presente, atento e cheio de amor pra dar. Seu amor é muito mais que as coisas

materiais, mas deixo aqui uma evidência do seu amor cuidadoso: sabia que essa tese foi escrita no notebook que você me deu ?! Agradeço muito também à Juça, cuja generosidade e bondade não tem tamanho. Obrigada por ser tão bom comigo e por sempre estar vibrando por mim! Boboca, não existem palavras para descrever a felicidade que eu sinto por dividir a vida com você. Você me faz alguém melhor, me dá segurança, força, e faz da minha vida mais feliz do que eu jamais achei que podia ser. Obrigada por seu amor, carinho e atenção doces. Obrigada por sempre cuidar de mim e ter sido parte fundamental desse doutorado. Da comida na mesa às análises estatísticas, é sempre você ali comigo, sempre. Obrigada por me mostrar que a vida pode ser mais leve, que os desafios podem ser menores do que parecem e por me mostrar que para ser completamente feliz basta você e a Twobinha (linda da mãe, obrigada por todas lambidas e alegria!). Obrigada por serem tudo em minha vida, o amor que eu tenho por vocês não tem tamanho!

Finalmente, agradeço ao Jean Paul Metzger (Jean) e ao Leandro Tambosi (Le) por serem os melhores orientadores, professores e mentores que alguém pode ter. Le, obrigada por me ensinar tanto, por ser sempre tão positivo, por me estimular tanto, e por sempre, sempre, acreditar em mim. Sua co-orientação foi essencial nessa jornada e eu serei para sempre grata à você pelo seu cuidado, pela atenção e pela presença mesmo em meio ao caos das demandas. Obrigada não só por me ensinar bastante, mas pela relação leve e boa que criamos! Jean, eu não sei nem por onde começar rs. Você é a razão de muito do que sou hoje e do que conquistei. Sua orientação atenta, cuidadosa, parceira, dedicada e absurdamente competente me transformaram em alguém mais capaz e segura das minhas habilidades. Sua generosidade sem tamanho e confiança permitiram que eu tivesse oportunidades únicas e que vivesse experiências ímpares durante essa jornada. Eu nunca vou conseguir lhe agradecer por tudo que você me permitiu experimentar durante este doutorado, todas as colaborações, os congressos, os workshops, os brainstorms, os debates, tanta coisa... Claro, não existem palavras que descrevam o quanto que eu aprendi e aprendo com você, mas eu acho que você foi além disso, você me deu os ensinamentos e as ferramentas para acreditar em mim e no meu potencial, e isso é tudo! Isso é tudo pois é mais do que o ensinamento do aqui e agora, é o que é preciso para seguir aprendendo e explorando. Eu serei para sempre grata pela sua orientação, por tudo que aprendi com você e por tudo que conquistei e me tornei ao longo desses anos sob sua orientação. Por fim, eu queria dizer que tenho muito orgulho da relação que construímos, de como dialogamos bem, de como nossa conversa é sempre honesta, leve e confortável. Muito obrigada mesmo, Jean!!

Essa tese foi realizada com apoio da Capes (Código de financiamento 001 - bolsas: 88882.327885/2019-01 e 88887.309513/2018-00), Fapesp (2013/23457-6), e do Programa de bolsas Miriam Rothschild da Universidade de Cambridge.

# Resumo

---

Compreender os processos que determinam os benefícios ou bens que as pessoas obtêm da natureza (i.e., os *serviços ecossistêmicos*) é essencial para que possamos desenhar paisagens multifuncionais. Como produto da relação entre a *demanda* (e.g., sociedade) e a *oferta* (e.g., natureza), a provisão dos serviços ecossistêmicos depende de *relações socioecológicas* que acontecem no espaço. Tais relações conectam, portanto, a oferta à demanda através do *fluxo* de pessoas, matéria ou organismos, e estão sujeitas aos *efeitos da configuração e composição da paisagem*. Assim, entender como características da paisagem modulam as interações entre estes componentes da *cadeia de provisão* (i.e., *oferta, demanda e fluxo*) é essencial para que possamos criar e adequar estratégias de manejo que garantam uma provisão intensa e duradoura de múltiplos serviços ecossistêmicos. Nesta tese, nós buscamos entender como a paisagem afeta a provisão dos serviços de *polinização e controle de pragas* em *cafezais*, considerando os efeitos sobre a oferta, demanda e fluxos de serviços. O Brasil é o maior produtor de café do mundo, produzindo em torno de 3 milhões de toneladas anualmente. O serviço de polinização é capaz de aumentar a produtividade de café em 30%, enquanto o serviço de controle de pragas pode reduzir as atuais perdas em até 40%, dependendo da configuração e composição da paisagem. Dada tamanha relevância econômica, essa tese buscou entender melhor como se dão esses benefícios no espaço. No primeiro capítulo, nós usamos experimentos de predação para investigar se matrizes com diferentes graus de similaridade estrutural às florestas nativas (i.e., matrizes de pastagem e de cafezal) modulam os efeitos de cobertura florestal e proximidade à floresta sobre as taxas de predação por diferentes inimigos naturais. Nossos resultados mostram que *as duas matrizes estudadas favorecem a provisão do serviço de controle de pragas por diferentes inimigos naturais*. Enquanto artrópodes contribuem para taxas de predação em ambas matrizes e independentemente da distância à borda da floresta, aves tendem a atuar quase que exclusivamente em matrizes de café e mais proximamente à interface matriz-floresta. Já no segundo capítulo, nós avaliamos como se dá o serviço de polinização do café através de uma abordagem de *rede de interações socioecológicas*. Nesta rede, a oferta de organismos polinizadores, providos essencialmente por fragmentos florestais, e a demanda pelos serviços nas áreas dos cafezais são conectadas através dos fluxos de polinizadores entre essas áreas. Nós mostramos que atributos dos nós de demanda associados à quantidade e intensidade das interações com os nós de oferta afetam a produção de café, e que, portanto, *o serviço de polinização responde a características estruturais e funcionais da paisagem*. No terceiro capítulo, nós utilizamos dados sobre os serviços de polinização e controle de pragas por formigas, aves e morcegos para investigar a

existência de sinergias ou demandas conflitantes entre estes serviços. Nós mostramos que atributos espaciais associados a uma *maior heterogeneidade da paisagem aumentam a provisão de ambos os serviços*, mas que *o planejamento da paisagem precisa considerar o efeito de múltiplas escalas espaciais, além de eventuais desserviços* na produção de café. Nossos trabalhos mostram, portanto, que a avaliação da provisão de múltiplos serviços ecossistêmicos precisa *i) considerar atributos da paisagem associados aos três componentes da cadeia de provisão, ii) ter uma detalhada caracterização dos fluxos que conectam a oferta à demanda, iii) considerar o efeitos de diferentes matrizes e da heterogeneidade da paisagem do entorno, e iv) utilizar abordagens multiescalares que considerem a provisão de serviços e desserviços*. Por fim, nossos resultados mostram o *potencial da análise de redes socioecológicas* para avançar no entendimento de como a paisagem modula a provisão de serviços ecossistêmicos. Finalmente, nós utilizamos estes resultados para reforçar a importância do *manejo da paisagem que combine estratégias locais e regionais* e que permita, portanto, considerar os efeitos das diferentes escalas na provisão dos serviços de polinização e controle de pragas em cafezais. Nós sugerimos que *o desenho de paisagens florestais agrícolas que vise as sinergias entre estes serviços* deve considerar *práticas de manejo que garantam níveis médios de cobertura florestal (~30-40%)*, promover uma maior permeabilidade e *heterogeneidade da matriz*, além de aumentar *a proximidade e os contatos entre matriz e floresta*.

**Palavras-chave:** Serviços ecossistêmicos; Estrutura da paisagem; Controle de pragas; Polinização; Mata Atlântica; Cadeia de provisão; Redes socioecológicas.

# Abstract

---

Understanding the processes that determine the benefits that people obtain from nature (i.e., *ecosystem services*) is crucial for us to be able to design multifunctional landscapes. As a product of the relationship between *demand* (e.g., society) and *supply* (e.g., nature), ecosystem service provision relies on *social-ecological relationships* that take place in space. Such relationships connect the supply to demand through the *flow* of people, matter or organisms, and are thus subject to *landscape configuration and composition effects*. Therefore, understanding how landscape features modulate the interactions between the components of the *provision chain* (i.e., supply, demand and flow) is essential to creating and adapting management strategies that guarantee an intense and lasting provision of multiple ecosystem services. In this thesis, we seek to understand how the landscape affects the provision of *pollination and pest control services in coffee plantations*, considering the effects on service supply, demand, and flows. Brazil is the largest coffee producer in the world, producing around 3 million tons annually. The pollination service can increase coffee productivity by 30%, while pest control service can reduce current losses by up to 40%, depending on landscape configuration and composition. Given such economic relevance, this thesis sought to better understand how these benefits occur in space. In the first chapter, we used predation experiments to investigate whether matrices with different degrees of structural similarity to native forests (i.e., pastures and coffee plantations) modulate the effects of forest cover and forest proximity on predation rates by natural enemies. Our results show that *the two studied matrices favor the provision of pest control services by different natural enemies*. While arthropods contribute to predation rates in both matrices and irrespective of the distance from the forest edge, birds tend to act almost exclusively on coffee matrices and closer to the matrix-forest interface. In the second chapter, we evaluate the provision of coffee pollination through a *network approach of social-ecological interactions*. In this network, the supply of pollinating organisms, provided essentially by forest fragments, and the demand for provision in coffee plantation areas are connected through the flow of pollinators between these areas. We show that attributes of demand nodes associated with the amount and intensity of interactions with supply nodes affect coffee production, and that, therefore, *pollination responds to structural and functional features of the landscape*. In the third chapter, we use data already collected on pollination and pest control services by ants, birds and bats to investigate the existence of synergies or conflicting demands between these services. We show that spatial attributes associated with *greater landscape heterogeneity increase the provision of both services*, but that *landscape planning needs to consider the effect of multiple spatial scales, in addition to eventual disservices*, on coffee production. Our work shows, therefore, that the assessment of

the provision of multiple ecosystem services needs to i) *consider landscape attributes associated with the three components of the provision chain*, ii) *have a detailed characterization of the flows that connect supply to demand*, iii) *consider the effects of different matrices and of the heterogeneity of the surrounding landscape*, and iv) *use multi-scale approaches that consider the provision of services and disservices*. Finally, our results show the *potential of approaches such as the analysis of social-ecological networks* to advance the understanding of how the landscape modulates the provision of ecosystem services. Finally, we use these results to reinforce the importance of *landscape management that combines local and regional strategies* and that allows, therefore, to address the effects of different scales in the provision of pollination and pest control services in coffee plantations. We suggest that *the design of agricultural forest landscapes that aims at synergies between these services* should consider *management practices that guarantee average levels of forest cover (~30-40%), promote landscape heterogeneity and matrix permeability, and increase proximity and contacts between matrix and forest*.

**Keywords:** *Ecosystem services; Landscape structure; Pest control; Pollination; Atlantic Forest; Provision chain; Social-ecological networks.*

# Introdução geral

---

Serviços ecossistêmicos são bens ou benefícios à sociedade que são providos pelos ecossistemas por meio de funções ou processos ecológicos (MEA 2005; IPBES 2019). Como bens ou benefícios que ligam o meio ambiente ao ser humano, sua provisão depende de relações socioecológicas que conectam a *oferta* à *demanda* através de *fluxos* de pessoas, organismos ou matéria (Fisher et al. 2009; Mitchell et al. 2015). Tais relações acontecem no espaço e são, portanto, sujeitas aos efeitos de configuração e composição da paisagem (Metzger et al. 2021a). Embora essencial ao bem-estar humano, a provisão de serviços ecossistêmicos vem globalmente diminuindo devido à conversão de ambientes naturais (Kubiszewski et al. 2020). Esse é o caso da expansão agrícola, que substitui áreas de vegetação nativa, apesar do potencial dessas áreas em prover serviços ecossistêmicos essenciais ao bem-estar humano, como a polinização e o controle de pragas (Tschardt et al. 2005). O serviço de polinização contribui para cerca de 75% da produção agrícola mundial, enquanto o serviço de controle de pragas pode reduzir as atuais perdas agrícolas em até 30-80%, a depender do tipo de cultivo (BPBES/REBIPP 2019; IPBES 2019). Dada a importância destes serviços, entender como características da paisagem afetam as interações entre os componentes da *cadeia de provisão* (i.e., *oferta*, *demanda* e *fluxo*) é essencial para que possamos criar e adequar estratégias de gestão que garantam uma provisão intensa e duradoura de serviços ecossistêmicos (Boesing et al. 2020). Dentro desse contexto teórico e ao longo do desenvolvimento desta tese, nós buscamos contribuir para o entendimento de como integrar os efeitos da paisagem nas avaliações de serviços ecossistêmicos, considerando: i) a oferta, demanda e fluxo dos serviços; ii) as dinâmicas espaço-temporais destes três componentes; e iii) como diferentes tipos de governança afetam a cadeia de provisão através de mudanças na paisagem. Para isso, nós construímos os três capítulos dessa tese buscando avançar, em mais detalhe, no entendimento do item i), e produzimos três artigos onde apresentamos diferentes abordagens que permitem integrar os itens i), ii) e iii) nas avaliações de serviços ecossistêmicos.



A paisagem pode afetar a provisão de serviços alterando a quantidade e intensidade das interações entre os componentes da cadeia de provisão (Metzger et al. 2021a). Em um contexto de paisagens agrícolas com remanescentes florestais, a oferta de serviços pode ser representada pelas áreas de vegetação nativa que sustentam a biodiversidade que provém serviços, como os de polinização e controle de pragas. Em contrapartida, a demanda pode ser representada pelas áreas de plantio agrícola que requerem tais serviços. Dado que a efetividade do fluxo de serviços depende de características da oferta e da demanda e da paisagem que existe entre essas áreas (Baró et al. 2017), é esperado que a paisagem também afete a intensidade dos fluxos e, portanto, a provisão de serviços. Por exemplo, é esperado que a proporção e arranjo de vegetação nativa em relação às áreas produtivas na paisagem afetem a provisão dos serviços de controle de pragas através dos seus efeitos positivos na diversidade e *spillover* de espécies de pássaros (Boesing et al. 2018). Ainda, é esperado que o tamanho e proximidade dos fragmentos florestais às áreas de plantio beneficiem a provisão dos serviços de controle de pragas e polinização através do aumento do fluxo de espécies entre a oferta e a demanda (González-Chaves et al. 2020). Por fim, é esperado que essas relações variem com os diferentes tipos de uso da terra. Matrizes agrícolas estruturalmente mais parecidas com o habitat natural das espécies provedoras de serviços ecossistêmicos devem oferecer menos resistência ao movimento destas espécies, aumentando a chance de provisão de serviços ecossistêmicos, como o controle de pragas (Hohlenwerger et al. 2022). Uma maior diversidade de matrizes na paisagem pode também resultar numa maior oferta de serviços devido ao potencial dessas áreas em oferecer recursos e espécies complementares aos oferecidos pelas áreas de vegetação nativa (Prevedello and Vieira, 2010; Blitzer et al., 2012).

Avançar na compreensão de como o espaço modula a interação entre a oferta, demanda e fluxo é essencial para entender como diferentes dinâmicas espaciais e temporais desses componentes afetam a provisão do serviço ao longo do tempo. Apenas quando essas dinâmicas são consideradas, é que conseguimos desenvolver estratégias de manejo desenhadas para aumentar o fluxo entre a oferta e demanda, bem como reduzir o risco de perda da provisão ao longo do tempo (Boesing et al. 2020). Ainda, apenas quando integramos os efeitos da paisagem na cadeia de provisão é que podemos identificar como diferentes tipos de governança

podem agir na oferta, demanda e fluxo de modo a garantir ou intensificar a provisão de serviços ecossistêmicos. Assim, paralelamente à construção desta tese, nós investimos em desenvolver três abordagens que permitissem: i) integrar processos ecológicos no nível da paisagem (e.g., perda de habitat e conectividade) na avaliação da provisão de serviços ecossistêmicos que considerem todos os componentes da cadeia de provisão (Metzger et al 2021a); ii) identificar quais padrões espaciais geram tendências temporais de ameaça à provisão de serviços ecossistêmicos ao longo do tempo (Boesing et al. 2020); e iii) identificar como diferentes governanças podem modificar a estrutura da paisagem e, portanto, afetar a provisão de serviços ecossistêmicos (Metzger et al. 2021b).

Em *Metzger et al. (2021a; Considering landscape-level processes in ecosystem service assessments)*, nós discutimos como a configuração e composição da paisagem afetam a provisão de serviços ecossistêmicos através de diversos processos no nível da paisagem, como a perda de habitat e a conectividade. Estes processos agem, portanto, sobre áreas de oferta e demanda dos serviços ecossistêmicos, bem como no fluxo entre essas áreas. Dessa maneira, nós reforçamos não só a necessidade de se considerar os distintos efeitos da estrutura da paisagem nos diferentes componentes da provisão, como apresentamos como esses processos e efeitos podem ser incorporados nas avaliações da provisão de serviços ecossistêmicos. Em suma, nós mostramos através de simulações espacialmente explícitas que é possível estimar corretamente a provisão de serviços ecossistêmicos quando se incorporam os efeitos da paisagem sobre cada um dos três componentes da cadeia de provisão.

Entendendo a importância de se considerar os processos no nível da paisagem nas avaliações de serviços ecossistêmicos, em *Boesing et al. (2020; Ecosystem services at risk: integrating spatiotemporal dynamics of supply and demand to promote long-term provision)*, nós propomos uma abordagem que integra dinâmicas espaço-temporais das áreas de oferta e de demanda para prever tendências temporais de provisão de serviços ecossistêmicos. Nós mostramos que algumas dinâmicas espaço-temporais da oferta e demanda resultam em riscos para provisão de serviços no longo prazo. Por exemplo, nós mostramos que para dinâmicas espaço-temporais nas quais a oferta é reduzida e a demanda ultrapassa essa oferta, a provisão dos serviços ecossistêmicos assume uma tendência negativa que leva à interrupção da provisão ao longo do tempo. Por fim, nós mostramos que

uma vez que as dinâmicas de oferta e demanda, bem como as tendências de provisão são identificadas, é possível manejar a paisagem de forma a aumentar o fluxo entre a oferta e a demanda e assim reduzir o risco de perda do serviço no futuro.

Por fim, procuramos entender como diferentes tipos de governança, ou seja, de formas de gestão dos serviços ecossistêmicos, podem atuar sobre a oferta, demanda e fluxo destes serviços. Em *Metzger et al. (2021b; Connecting governance interventions to ecosystem services provision: a social-ecological network approach)*, nós usamos uma abordagem socioecológica de redes para mostrar que modelos de governança hierárquica (como a criação de áreas protegidas), de mercado (por exemplo, pagamentos por serviços ambientais), e baseadas em comunidades (i.e., que fortalecem conexões entre as partes sociais interessadas) regulam diferentemente os componentes da cadeia de provisão na paisagem. Através da abordagem apresentada, nós mostramos que é possível identificar o tipo de intervenção de governança ideal para lidar com situações em que diferentes componentes da cadeia de provisão estão limitando o serviço ecossistêmico. Nós mostramos que conectar governança e serviços ecossistêmicos através das suas relações socioecológicas é essencial para se alcançar a provisão sustentável de serviços ecossistêmicos.

Dentro deste contexto mais amplo, no âmbito desta tese de doutorado, nós buscamos entender como a paisagem afeta a provisão dos serviços de polinização e controle de pragas em cafezais. Mais especificamente, nós buscamos avaliar como estes serviços são afetados por atributos da paisagem associados à oferta, demanda e aos fluxos. A produção de café é uma das principais atividades de importância econômica e cultural para o Brasil, o maior produtor e exportador de café do mundo (Conab 2018). Para esse cultivo, os serviços de polinização e controle de pragas podem representar um aumento de 20 a 40% na produtividade (Saturni et al. 2016; Aristizábal and Metzger, 2019). Assim, visto a importância do espaço em modular a provisão de serviços ecossistêmicos, nós buscamos responder três grandes perguntas:

**Como diferentes matrizes antrópicas modulam os efeitos da estrutura da paisagem na provisão do serviço de controle de pragas?**

Para responder essa pergunta, nós usamos experimentos de predação para investigar se matrizes com diferentes graus de similaridade estrutural às florestas

nativas (i.e., matrizes de pastagem e de cafezal) modulam os efeitos de cobertura florestal e proximidade à floresta sobre as taxas de predação por diferentes inimigos naturais. Nós mostramos que os efeitos da paisagem nas taxas de predação variam com a resposta dos diferentes inimigos naturais (i.e., artrópodes e aves) aos tipos de matriz. Os resultados deste capítulo estão publicados na revista *Agriculture, Ecosystem and Environment* com coautoria de Leandro R. Tambosi e Jean Paul Metzger.

**Como a estrutura da paisagem afeta o serviço de polinização em cafezais através dos seus efeitos na quantidade e intensidade das conexões entre áreas de oferta e demanda?**

Para responder essa pergunta, nós utilizamos dados sobre a produção de café, o fluxo de polinização, e a configuração e composição de áreas de oferta (i.e., fragmentos florestais) e demanda (i.e., cafezais). Com isso, nós avaliamos como se dá o serviço de polinização na paisagem através de uma abordagem de rede de interações socioecológicas, onde a oferta e a demanda são conectadas através do fluxo de polinização. Nós mostramos que atributos dos nós de demanda associados à quantidade e intensidade das interações com os nós de oferta afetam a produção de café. Esse capítulo foi pré-selecionado para ser submetido à edição especial da revista *People and Nature: Understanding land-use driven biodiversity change: frontiers in linking ecological and socio-economic data and models*. Neste capítulo, nós (Camila Hohlenwerger, Leandro R. Tambosi e Jean Paul Metzger) contamos com a colaboração de um grupo internacional de coautores: Laura J. Graham, Jonathan R. Rhodes, Marie-Josée Fortin, Matthew G. E. Mitchell, Barbara Schröter, Felix Eigenbrod, Anna Cord, Mariana M. Vidal, Claudia Sattler, Luis Roman Carrasco e Pedro Fieldman.

**Em que escalas e como a estrutura da paisagem atua como motores comuns dos serviços de polinização e controle biológico de pragas em plantações de café?**

Neste capítulo, nós utilizamos dados já coletados sobre os serviços de polinização, controle de pragas por formigas, aves e morcegos para investigar a existência de sinergias ou demandas conflitantes entre estes serviços. Nós mostramos que atributos espaciais associados a uma maior heterogeneidade da paisagem aumentam a provisão de ambos os serviços, mas que o planejamento de paisagem precisa considerar o efeito de múltiplas escalas espaciais, além de

desserviços na produção de café. Esse capítulo foi pré-selecionado para a edição especial da revista *Landscape Ecology: Understanding relationships between biodiversity and ecosystem services in real landscapes*. Neste capítulo, nós (Camila Hohlenwerger, Leandro R. Tambosi e Jean Paul Metzger) tivemos a contribuição dos seguintes coautores: Rebecca Spake, Natália Aristizábal, Adrian González-Chaves, Felipe Librán-Embido, Fernanda Saturni e Felix Eigenbrod.

### Referências:

- Aristizabal, N., & Metzger, J. P. (2019). Landscape structure regulates pest control provided by ants in sun coffee farms. *Journal of Applied Ecology*, 56(1), 21-30.
- Baró, F., Gómez-Baggethun, E., & Haase, D. (2017). Ecosystem service bundles along the urban-rural gradient: Insights for landscape planning and management. *Ecosystem Services*, 24, 147-159.
- Blitzer, E. J., Dormann, C. F., Holzschuh, A., Klein, A. M., Rand, T. A., & Tschamntke, T. (2012). Spillover of functionally important organisms between managed and natural habitats. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 146(1), 34-43.
- Boesing, A. L., Nichols, E., & Metzger, J. P. (2018). Land use type, forest cover and forest edges modulate avian cross-habitat spillover. *Journal of Applied Ecology*, 55(3), 1252-1264.
- Boesing, A. L., Prist, P. R., Barreto, J., Hohlenwerger, C., Maron, M., Rhodes, J. R., ... & Metzger, J. P. (2020). Ecosystem services at risk: integrating spatiotemporal dynamics of supply and demand to promote long-term provision. *One Earth*, 3(6), 704-713.
- BPBES/REBIPP (2019): Relatório temático sobre Polinização, Polinizadores e Produção de Alimentos no Brasil. Marina Wolowski et al. (Orgs.). 1ª edição, São Carlos, SP: Editora Cubo. 184 pg.
- Conab (2018) Levantamento da companhia nacional de abastecimento de café. <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos>.
- Fisher, B., Turner, R. K., & Morling, P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for 831 decision making. *Ecological Economics*, 68(3), 643–653.
- González-Chaves, A., Jaffé, R., Metzger, J. P., & de MP Kleinert, A. (2020). Forest proximity rather than local forest cover affects bee diversity and coffee pollination services. *Landscape Ecology*, 35(8), 1841-1855.
- Hohlenwerger, C., Tambosi, L. R., & Metzger, J. P. (2022). Forest cover and proximity to forest affect predation by natural enemies in pasture and coffee plantations differently. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 333, 107958.
- IPBES. (2019). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. (C. N. Z. S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio E.S., H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S.

- M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Ed.). Bonn, Germany.
- Kubiszewski, I., Costanza, R., Anderson, S., & Sutton, P. (2020). The future value of ecosystem services: Global scenarios and national implications. In *Environmental Assessments*. Edward Elgar Publishing.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment) (2005). *Ecosystems and human well-being: wetlands and water*. World resources institute.
- Metzger, J. P., Villarreal-Rosas, J., Suárez-Castro, A. F., López-Cubillos, S., González-Chaves, A., Runtting, R. K., Holenwerger, C. & Rhodes, J. R. (2021a). Considering landscape-level processes in ecosystem service assessments. *Science of The Total Environment*, 796, 149028.
- Metzger, J. P., Fidelman, P., Sattler, C., Schroter, B., Maron, M., Eigenbrod, F., Hohlenwerger, C. & Rhodes, J. R. (2021b). Connecting governance interventions to ecosystem services provision: A social-ecological network approach. *People and Nature*.
- Mitchell, M. G., Suarez-Castro, A. F., Martinez-Harms, M., Maron, M., McAlpine, C., Gaston, K. J., ... & Rhodes, J. R. (2015). Reframing landscape fragmentation's effects on ecosystem services. *Trends in ecology & evolution*, 30(4), 190-198.
- Prevedello, J. A., & Vieira, M. V. (2010). Does the type of matrix matter? A quantitative review of the evidence. *Biodiversity and Conservation*, 19(5), 1205-1223.
- Saturni, F. T., Jaffe, R., & Metzger, J. P. (2016). Landscape structure influences bee community and coffee pollination at different spatial scales. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 235, 1-12.
- Tscharntke, T., Klein, A. M., Kruess, A., Steffan-Dewenter, I., & Thies, C. (2005). Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity–ecosystem service management. *Ecology Letters*, 8(8), 857-874

## Discussão geral

---

Não há dúvidas que as sociedades dependem da provisão de diversos serviços ecossistêmicos, como os de produção de alimentos, limpeza da água e do ar, e do valor cultural e estético que a natureza tem para o ser humano (Constanza et al. 2014; IPBES 2019). Ainda, é sabido que muitos destes serviços que são fundamentais para o bem-estar humano atualmente se encontram em declínio ou sob pressão de extinção futura em função das alterações ambientais, como as transformações de áreas naturais em áreas agrícolas ou urbanas, das mudanças climáticas e da poluição (Kubiszewski et al. 2020). Dessa forma, para reduzir a degradação ambiental e gerir os recursos de modo a garantir a provisão longa e sustentável de serviços ecossistêmicos, é necessário entender não só como esses serviços ocorrem em paisagens antrópicas, mas também como mudanças nestas paisagens podem dificultar ou aumentar as provisões (Boesing et al. 2020). Dentro desse contexto, *essa tese assumiu como central a importância de se considerar o efeito do espaço nos três componentes da cadeia de provisão (i.e., oferta, demanda e fluxo)*, e buscou avançar no conhecimento de *como atributos da paisagem afetam a provisão de diferentes serviços através de mudanças na quantidade e qualidade da oferta, demanda e do fluxo entre estes componentes*.

No primeiro capítulo da tese, nós mostramos que a contribuição de inimigos naturais para o *controle natural de pragas* depende de como esses organismos respondem aos diferentes tipos de matrizes antrópicas. Nossos resultados mostram que *taxas de predação por artrópodes são consistentemente maiores em matrizes de café, entretanto, a depender da escala espacial, essas taxas podem aumentar ou reduzir com a quantidade de cobertura florestal do entorno*. Em uma escala local, o aumento na cobertura florestal tende a reduzir a taxa de predação por artrópodes, entretanto, esse efeito é invertido em escalas mais amplas, com paisagens com maior cobertura florestal contribuindo para maiores taxas de predação. Já *a taxa de predação por aves é maior próxima à borda de fragmentos florestais e similar às taxas por artrópodes, em matrizes de café*. Por fim, se considerarmos toda a comunidade de inimigos naturais, ou seja, sem separar grupos específicos, as taxas

de predação são maiores em matrizes de café próximas à borda dos fragmentos florestais e em paisagens com alta cobertura florestal. Assim, dada à clara importância do tipo da matriz para a provisão potencial do serviço de controle de pragas, nós recomendamos que *o manejo de paisagens foque não apenas em aumentar a quantidade e proximidade das florestas em relação às matrizes na paisagem, mas também reduzir o contraste estrutural entre o habitat nativo e a matriz*. Para isso, nós propomos uma série de ações no nível das fazendas que podem levar a uma maior heterogeneidade e permeabilidade da matriz e, portanto, beneficiar a provisão do serviço ecossistêmico de controle de pragas.

No segundo capítulo, nós desenvolvemos uma abordagem de redes para avaliar como a estrutura da paisagem afeta a provisão do *serviço de polinização de café* através dos seus efeitos no número e quantidade de conexões (i.e., fluxo de polinização) entre áreas de oferta e demanda. Nós mostramos que *ao modelar o serviço de polinização como uma rede espacialmente explícita de interações entre oferta e demanda, é possível identificar como a paisagem afeta a provisão através de efeitos tanto estruturais como funcionais*. Por exemplo, nossos resultados mostram que a produção de café é afetada pela competição entre áreas de demanda por áreas de oferta. Ou seja, *características do arranjo espacial* (e.g., grau de interpolação entre áreas de oferta e demanda) *e da capacidade de ofertar recursos* (e.g., quantidade limite de recurso ofertado por uma mesma área de oferta) *afetam conjuntamente o serviço de polinização*. Diante desses e dos demais resultados deste capítulo, nós discutimos que a abordagem de redes permitiu que nós identificássemos quais características da paisagem são mais relevantes para produção de café, considerando em particular o efeito desses atributos nos fluxos que ligam a oferta à demanda. Nós discutimos a importância de se identificar esses padrões para *melhor desenhar estratégias de manejo que permitam aumentar e intensificar os fluxos de polinização e, portanto, as conexões entre oferta e demanda, aumentando assim a provisão do serviço e a produção do café*.

No terceiro capítulo, nós buscamos avançar no conhecimento de como atributos da paisagem associados à oferta, demanda e fluxo podem atuar como motores comuns do *serviço de polinização e controle de pragas em cafezais*. Esse estudo surge da necessidade de se criar paisagens multifuncionais que possam atender à alta demanda por produção, reduzindo os níveis de degradação ambiental e, portanto, promover a provisão sinérgica de serviços de forma sustentável ao longo



do tempo. Nossos resultados mostram que *os serviços de controle de pragas e de polinização são diferentemente afetados pela estrutura da paisagem, e que esses efeitos se dão em escalas espaciais distintas*. Apesar disso, nossos resultados também mostram que *a diversidade de tipo de matriz ao redor das áreas de café age como um motor comum a ambos os serviços ecossistêmicos*. Ainda, esse efeito ocorre predominantemente em escalas locais (até 300 m da área de cultivo), o que reforça a *importância de processos ecológicos associados ao fluxo local de espécies* para a provisão da polinização e controle de pragas. Por fim, nossos resultados sobre a complexidade da provisão do controle de pragas sugerem que *o desenho de paisagens multifuncionais deve considerar não só a provisão de serviços, como a de desserviços*.

No conjunto dos três capítulos, fica claro que é necessário considerar os efeitos da estrutura da paisagem para promover sinergias entre os serviços de polinização e controle de pragas, e que estes estudos requerem análises espaciais em múltiplas escalas. Enquanto o nosso primeiro capítulo destaca a importância do maior grau de permeabilidade da matriz para o serviço de controle de pragas, o segundo capítulo adiciona a necessidade de se considerar como a matriz (neste contexto, a demanda) está distribuída na paisagem em relação aos fragmentos florestais (a oferta). Ainda, este capítulo realça a importância de manter vários e grandes fragmentos florestais próximos às áreas de demanda, para aumentar o fluxo e, portanto, a provisão do serviço de polinização. Estes resultados reforçam a importância de sistemas de manejo que combinem o aumento do contato matriz-floresta e mantenham níveis médios (30-40%) de coberturas florestais na paisagem (González-Chaves et al. 2022) como uma via potencial para reduzir os efeitos negativos de competição pela oferta. Ainda, o nosso terceiro capítulo avança na discussão sobre os efeitos da oferta na provisão de múltiplos serviços ecossistêmicos mostrando que outros tipos de uso da terra também podem atuar como áreas de oferta para uma demanda focal (aqui, as plantações de café), provavelmente devido ao seu potencial em oferecer recursos complementares àqueles presentes em fragmentos florestais (Prevedello and Vieira, 2010; Blitzer et al., 2012). Por fim, nossos trabalhos apontam para a necessidade do manejo em múltiplas escalas como uma via de gerir a paisagem de modo a evitar demandas conflitantes entre os serviços de polinização e controle de pragas. Nós propomos, então, que essas estratégias de manejo ocorram tanto em escalas locais, no nível

das fazendas, buscando diversificar a produção e o arranjo espacial das matrizes agrícolas, como em escalas regionais, através de incentivos e regulamentações governamentais para a gestão dos recursos naturais em propriedades privadas (Metzger et al. 2019; González-Chaves et al. 2022).

É importante destacar que o desenvolvimento destes três capítulos muito se beneficiou da produção paralela à tese de três abordagens espaciais de avaliações de serviços ecossistêmicos. O capítulo um permitiu que nós expandíssemos o entendimento de como características da composição das matrizes antrópicas, que até recentemente costumavam ser ignoradas no manejo de paisagens agrícolas, modulam a provisão potencial do serviço de controle de pragas. Esse capítulo dialoga muito proximamente, portanto, com a abordagem desenvolvida em *Metzger et al (2021a)*, a qual ressalta a necessidade de se considerar o efeito de processos no nível da paisagem na provisão de serviços. Esta mesma abordagem foi também fundamental para o desenvolvimento do capítulo dois, visto que ela permitiu com que nós tivéssemos clareza tanto: i) da importância de se considerar os efeitos da estrutura da paisagem; ii) da necessidade de considerar estes efeitos sobre a oferta, demanda e fluxo conjuntamente; quanto iii) do potencial da abordagem de redes socioecológicas para a avaliação espacial da provisão de serviços ecossistêmicos. Esse capítulo também se beneficiou muito da abordagem produzida em *Metzger et al. (2021b)*, visto que ela elucida a importância de se identificar corretamente a oferta, demanda, e fluxo de um serviço para que haja o manejo adequado do mesmo. Ainda, a abordagem proposta em *Metzger et al. (2021b)* permite entender como diferentes estratégias de gestão da oferta e da demanda atuam aumentando ou reduzindo o fluxo que sai e chega até esses componentes. Esse entendimento foi particularmente útil para que nós, frente aos resultados do capítulo dois, pudéssemos propor estratégias de manejo que promovessem a provisão do serviço de polinização em paisagens cafeeiras.

Por fim, o conhecimento produzido em *Boesing et al. (2020)* serviu de base teórica e de motivador para o desenvolvimento do capítulo três. Embora haja evidências na literatura dos efeitos da paisagem sobre a provisão dos serviços de polinização e controle de pragas separadamente (Saturni et al., 2016; Librán-Embí et al., 2017; González-Chaves et al., 2020), é preciso considerar esses serviços conjuntamente para que estratégias de manejo permitam estimular sinergias e evitar demandas conflitantes (Chain-Guadarrama et al. 2022). Ainda, somente ao

considerar paisagens multifuncionais, ou seja, paisagens que permitem a provisão de múltiplos serviços, é que podemos corretamente acessar o potencial destas paisagens em ofertar esses serviços no longo prazo. Assim, a abordagem proposta em *Boesing et al. (2020)* elucidada as implicações dos nossos resultados frente a necessidade de evitar padrões espaço-temporais de redução ou extinção da provisão de serviços ecossistêmicos.

O conhecimento produzido nesta tese e ao longo desse período permitiram, assim, avançar na compreensão de como o espaço modula as relações entre a oferta, demanda e fluxo de múltiplos serviços ecossistêmicos. Mais especificamente, nossos trabalhos apontam para a necessidade de considerar e caracterizar corretamente esses componentes da cadeia de provisão ao longo do espaço e tempo. Nesse contexto, nós mostramos a importância e potencial da diversidade de tipos de uso da terra para provisão de múltiplos serviços ecossistêmicos ligados à produção de café. Por fim, nós evidenciamos como diferentes estratégias de gestão da demanda e da oferta podem afetar a provisão dos serviços através do efeito da paisagem sobre os fluxos. Nós esperamos que esses trabalhos avancem o conhecimento científico da área, bem como fortaleçam propostas de manejo da paisagem que favoreçam tanto a sociedade como a biodiversidade.

### **Referências:**

- Boesing, A. L., Prist, P. R., Barreto, J., Hohlenwerger, C., Maron, M., Rhodes, J. R., ... & Metzger, J. P. (2020). Ecosystem services at risk: integrating spatiotemporal dynamics of supply and demand to promote long-term provision. *One Earth*, 3(6), 704-713.
- Blitzer, E. J., Dormann, C. F., Holzschuh, A., Klein, A. M., Rand, T. A., & Tschamtker, T. (2012). Spillover of functionally important organisms between managed and natural habitats. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 146(1), 34-43.
- Costanza, R., De Groot, R., Sutton, P., Van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., ... & Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global environmental change*, 26, 152-158.
- González-Chaves, A., Jaffé, R., Metzger, J. P., & de MP Kleinert, A. (2020). Forest proximity rather than local forest cover affects bee diversity and coffee pollination services. *Landscape Ecology*, 35(8), 1841-1855.
- González-Chaves, A., Carvalheiro, L. G., Garibaldi, L. A., & Metzger, J. P. (2022). Positive forest cover effects on coffee yields are consistent across regions. *Journal of Applied Ecology*, 59(1), 330-341.
- Chain-Guadarrama, A., Martínez-Salinas, A., Aristizábal, N., & Ricketts, T. H. (2019). Ecosystem services by birds and bees to coffee in a changing climate: A review

- of coffee berry borer control and pollination. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 280, 53-67.
- IPBES. (2019). The global assessment report on summury on policymakers of the IPBES global asesment report on biodiversity and ecosystem services. ( and C. N. Z. S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio E.S., H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A, Ed.). Bonn, Germany.
- Kubiszewski, I., Costanza, R., Anderson, S., & Sutton, P. (2020). The future value of ecosystem services: Global scenarios and national implications. In *Environmental Assessments*. Edward Elgar Publishing.
- Librán-Embid, F., De Coster, G., & Metzger, J. P. (2017). Effects of bird and bat exclusion on coffee pest control at multiple spatial scales. *Landscape Ecology*, 32(9), 1907-1920.
- Metzger, J. P., Bustamante, M. M., Ferreira, J., Fernandes, G. W., Librán-Embid, F., Pillar, V. D., ... & Overbeck, G. E. (2019). Why Brazil needs its legal reserves. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 17(3), 91-103.
- Metzger, J. P., Villarreal-Rosas, J., Suárez-Castro, A. F., López-Cubillos, S., González-Chaves, A., Runting, R. K., ... & Rhodes, J. R. (2021a). Considering landscape-level processes in ecosystem service assessments. *Science of The Total Environment*, 796, 149028.
- Metzger, J. P., Fidelman, P., Sattler, C., Schroter, B., Maron, M., Eigenbrod, F., ... & Rhodes, J. R. (2021b). Connecting governance interventions to ecosystem services provision: A social-ecological network approach. *People and Nature*.
- Prevedello, J. A., & Vieira, M. V. (2010). Does the type of matrix matter? A quantitative review of the evidence. *Biodiversity and Conservation*, 19(5), 1205-1223.
- Saturni, F. T., Jaffe, R., & Metzger, J. P. (2016). Landscape structure influences bee community and coffee pollination at different spatial scales. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 235, 1-12.