

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE (CCTS)  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS  
RENOVÁVEIS (PPGPUR)

Daniel Fadel Junior

Cenários de Restauração para Implementação de Pagamento por  
Serviços Ecossistêmicos Visando à Conservação da Biodiversidade

Sorocaba  
2024

---

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE (CCTS)  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PLANEJAMENTO E USO DE RECURSOS  
RENOVÁVEIS (PPGPUR)

Daniel Fadel Junior

Cenário de Restauração para Implementação de Pagamento por Serviços  
Ecosistêmicos Voltados à Conservação da Biodiversidade

Defesa de dissertação de mestrado apresentada  
ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento  
e Uso de Recursos Renováveis (PPGPUR).

Orientação: Profa. Dra. Roberta Aversa Valente.

Coorientação: Profa. Dra. Kaline de Mello.

Financiamento: FAPESP 2023/06214-4.

Sorocaba

2024

Fadel Junior, Daniel

Cenários de restauração para implementação de pagamento por serviços ecossistêmicos visando à conservação da biodiversidade / Daniel Fadel Junior, Kaline de Mello -- 2023.  
95f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba  
Orientador (a): Roberta Aversa Valente  
Banca Examinadora: Milton Cezar Ribeiro, Thiago Philipe de Camargo e Timo  
Bibliografia

1. Restauração ecológica. 2. Modelagem de cenários.  
3. Conectividade da paisagem. I. Fadel Junior, Daniel.  
II. Mello, Kaline de. III. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano - CRB/8 6979



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade  
Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis

---

### Folha de Aprovação

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Daniel Fadel Junior, realizada em 20/12/2024.

#### Comissão Julgadora:

Profa. Dra. Roberta Avena Valente Botezelli Tolini (UFSCar)

Prof. Dr. Milton Cezar Ribeiro (UNESP)

Prof. Dr. Thiago Philipe de Camargo e Timo (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis.

## SUMÁRIO

---

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>6</b>
Referências Bibliográficas	9
<b>2. CAPÍTULO 1</b>	<b>13</b>
RESUMO	13
ABSTRACT	14
2.1. Introdução	15
2.2. Material e Métodos	17
2.2.1. Etapa de identificação das pesquisas	18
2.2.2. Etapa de triagem das pesquisas	18
2.2.3. Etapa de elegibilidade das pesquisas	19
2.2.4. Etapa de inclusão e análise dos dados	19
2.3. Resultados e Discussão	20
2.3.1. Análise dos artigos identificados	20
2.3.2. Análise dos artigos incluídos	24
2.4. Conclusão	31
Referências Bibliográficas	32
Apêndice 1	42
<b>3. CAPÍTULO 2</b>	<b>51</b>
RESUMO	51
ABSTRACT	52
3.1. Introdução	53
3.2. Material e Métodos	54
3.2.1. Área de estudo	54
3.2.2. Cenário Base e Cenários de Restauração	57
3.2.3. Fragmentos Fonte e Resistência da Paisagem	59
3.2.4. Análise de Conectividade	63
3.3. Resultados e Discussão	66
3.3.1. Cenário base	66
3.3.2. Cenários de restauração	68
3.3.3. Fragmentos fonte e análise estrutural	74
3.3.4. Conectividade Funcional	77
3.4. Conclusão	84
Referências Bibliográficas	85
<b>4. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>97</b>

---

## 1. INTRODUÇÃO

A Plataforma Intergovernamental sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (IPBES, 2019) destaca uma crise global em biodiversidade, impulsionada pela transformação de habitats naturais em áreas para agricultura ou pastagem.

Compromissos internacionais, como a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima, o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável nº 15 na Agenda 2030 e a Convenção sobre Diversidade Biológica da Organização das Nações Unidas (ONU), também focam na conservação e restauração de ecossistemas para mitigar mudanças climáticas. O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021) prevê um aquecimento de 1,5° C em duas décadas, exigindo reduções significativas nas emissões de gases de efeito estufa e reverter essa tendência é vital para o futuro do planeta (Krosby et al., 2010; Chazdon, 2019).

Este cenário ameaça os serviços gerados pelo ecossistema, incluindo a qualidade das águas e a conservação da biodiversidade, afetando diretamente a sobrevivência da humanidade e outras espécies (Gao et al., 2016; Keith et al., 2017). Esta crescente demanda na urgência de conservação dos ecossistemas naturais, uso sustentável de recursos e restauração de áreas degradadas é reforçada em estudos por todo o planeta (Strassburg et al., 2014; Strand et al., 2018; McNicol, Ryan e Mitchard, 2018; Grantham et al., 2020).

Iniciativas como estas buscam combater a fragmentação de ecossistemas, aumentar a qualidade de habitat e proteger zonas consideradas como hotspot de biodiversidade caracterizadas por elevada densidade de espécies, muitas delas endêmicas (Myers et al., 2000).

Sabe-se que essa fragmentação é uma das principais causas da crise de perda de biodiversidade (Berger-Tal e Saltz, 2019). Neste sentido, a conectividade da paisagem é fundamental, pois permite que as espécies se movam, reproduzam e se adaptem às mudanças ambientais (Hanski, 2011). A fragmentação do habitat é um processo que resulta na divisão de áreas contínuas em fragmentos menores, geralmente isolados por uma matriz composta por diferentes usos e coberturas da terra, influenciando a conectividade e a resistência de um organismo ao se movimentar pela paisagem (Spear et al., 2010).

Com o aumento da população os efeitos da expansão urbana não se restringem apenas nas grandes cidades mas em toda a região. No Brasil, São Paulo destaca-se como o estado mais populoso, com 21,9% dos habitantes, e o mais urbanizado, com 18,4% das áreas urbanas, decorrente de um longo histórico de ocupação e uso da terra baseado no

desenvolvimento e influência econômica (IBGE, 2022). Esta pressão antrópica destaca desafios crescentes quanto à conservação e recuperação de seus ecossistemas naturais, principalmente a Mata Atlântica, considerada um hotspot mundial de biodiversidade ainda muito ameaçada (Mittermeier et al., 2011; Hrdina e Romportl, 2017).

Atualmente a Mata Atlântica conserva cerca de 28% de sua vegetação original (Mapbiomas, 2023), com a maioria dos remanescentes fragmentados, pequenos e comprometidos (Rezende et al., 2018). O alto grau de degradação da vegetação remanescente também leva à perda de biodiversidade e biomassa, afetando ainda mais os serviços ecossistêmicos disponíveis (Ferraz et al., 2014; Lima, de et al., 2020).

Em seu estado original a mata atlântica cobria 83% do estado de São Paulo (Joly et al., 1999; Cavalcanti e Joly, 2002) e atualmente restam apenas 22,9% desta cobertura nativa (IF, 2020). Os fragmentos maiores e mais conservados são, em maior parte, protegidos por Unidades de Conservação (Ribeiro et al., 2009) porém não são suficientes para assegurar a conservação da biodiversidade (Metzger et al., 2019). Além disso, essas unidades se concentram principalmente nas regiões costeira e serrana, onde a expansão agrícola foi dificultada (Sobral-Souza et al., 2018). Desta forma, os serviços providos pelos ecossistemas naturais se encontram ameaçados e mal distribuídos, em regiões muitas vezes distantes de áreas que demandam desses serviços.

Os fragmentos remanescentes são indispensáveis para a manutenção da biodiversidade, qualidade da água, polinização, controle natural de pragas em culturas agrícolas e fixação de carbono (Alarcon et al., 2015; Saturni et al, 2016; Mello et al., 2018; Medeiros et al., 2019;) e considerando a relevância da estrutura espacial de uma paisagem nas interações ecológicas entre seus fragmentos (Fischer e Lindenmayer, 2007; Mitchell et al., 2013) torna-se imprescindível medir a capacidade de movimentação de espécies entre os diferentes usos do terra, bem como avaliar cenários que buscam maior conectividade e extensão dos ecossistemas.

Estudos neste sentido são essenciais para direcionar políticas públicas na restauração e redução do desmatamento (Mello et al., 2022), alcançando metas climáticas e assegurando o acesso aos serviços ecossistêmicos para as gerações atuais e futuras . A Lei n. 12.651/2012 de Proteção da Vegetação Nativa serve como medida essencial para proteger e preservar ecossistemas sensíveis em terras privadas, onde se encontra a maior parte da vegetação nativa do Brasil (Brançalion et al., 2016). Além disso, a Lei da Mata Atlântica (Lei n. 11.428/2006) exige a proteção de todos os seus remanescentes, atuando na maior parte do estado de São Paulo.

A Política Estadual de Mudanças Climáticas de São Paulo (Lei nº 13.798/2009), por meio do Plano de Ação Climática do Estado de São Paulo - Net Zero 2050, busca atingir a neutralidade de carbono até 2050. De acordo com o plano mais atualizado, a meta para a restauração da vegetação nativa é de 800 mil hectares até 2050, com etapas intermediárias de 200 mil hectares até 2030 e 500 mil hectares até 2040 (São Paulo, 2022).

Como uma das formas de alcançar esta meta, o estado de São Paulo investe em programas de incentivo econômico, sob a forma de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), estimulando proprietários de terras para adotarem práticas mais sustentáveis, como a conservação da vegetação nativa, a restauração florestal, a implementação de sistemas agroflorestais e outras práticas de manejo ecológico (Richards et al., 2015; Kroeger et al., 2019). A mudança transformadora nos sistemas econômico, social e político é fundamental para alcançar objetivos de proteção da biodiversidade e do sistema climático, caso contrário, as metas de desmatamento zero e de adoção de economia verde não serão alcançadas nas próximas décadas (Joly et al., 2019).

A descontinuidade de programas de PSA, tanto espacial quanto temporal, pode prejudicar a eficácia na promoção da conservação e restauração dos ecossistemas (Ruggiero et al., 2019). Por isso, é essencial avaliar os benefícios ambientais na implementação de programas de PSA, a fim de aprimorar o planejamento de tais iniciativas. Um planejamento estratégico de restauração pode gerar um aumento de até oito vezes no custo-benefício para a conservação da biodiversidade em comparação com a restauração não sistemática (Strassburg et al., 2019).

Desta forma, o estudo teve como objetivo modelar cenários de restauração com foco em iniciativas como os programas de PSA. O trabalho buscou identificar áreas para restauração incentivada em propriedades rurais e utilizá-las na criação de cenários para simular e avaliar o impacto na cobertura vegetal e conectividade da paisagem. Além disso, as informações geradas podem auxiliar o planejamento de políticas públicas.

A estruturação do texto de dissertação inclui inicialmente um artigo de revisão submetido na Revista Brasileira de Geografia Física (Qualis 2023 - A2) como primeiro capítulo, que foi desenvolvido como ponto de partida no estudo da conectividade, abordando modelos de conectividade associados a serviços ecossistêmicos. Essa etapa foi essencial para consolidar a base teórica e metodológica do estudo. Em seguida, apresenta-se o artigo principal, como segundo capítulo, responsável por apresentar a modelagem dos cenários de restauração e os resultados encontrados quanto ao incremento de cobertura vegetal e conectividade da paisagem, abordando a quantidade de áreas incentivadas e propriedades

rurais disponíveis para restauração via PSA e seu impacto na cobertura e conectividade da paisagem.

### **Referências Bibliográficas**

ALARCON, G. G.; AYANU, Y.; FANTINI, A. C.; et al. Weakening the Brazilian legislation for forest conservation has severe impacts for ecosystem services in the Atlantic Southern Forest. **Land Use Policy**, v. 47, n. 47, p. 1–11, 2015.

BERGER-TAL, O.; SALTZ, D. Invisible barriers: anthropogenic impacts on inter- and intra-specific interactions as drivers of landscape-independent fragmentation. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences**, v. 374, n. 1781, p. 20180049, 2019.

BRANCALION, P. H. S.; GARCIA, L. C.; LOYOLA, R.; et al. Análise crítica da Lei de Proteção da Vegetação Nativa (2012), que substituiu o antigo Código Florestal: atualizações e ações em curso. **Natureza & Conservação**, v. 14, p. e1–e16, 2016.

CHAZDON, R. L. Towards more effective integration of tropical forest restoration and conservation. **Biotropica**, v. 51, n. 4, p. 463–472, 2019.

FERRAZ, S. F. B.; FERRAZ, K. M. P. M. B.; CASSIANO, C. C.; et al. How good are tropical forest patches for ecosystem services provisioning? **Landscape Ecology**, v. 29, n. 2, p. 187–200, 2014.

FISCHER, J.; LINDENMAYER, D. B. Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis. **Global Ecology and Biogeography**, v. 16, p. 265–280, 2007.

GAO, J.; LI, F.; GAO, H.; ZHOU, C.; ZHANG, X. The impact of land-use change on water-related ecosystem services: a study of the Guishui River Basin, Beijing, China. **Journal of Cleaner Production**, 2016.

GRANTHAM, H. S.; DUNCAN, A.; EVANS, T. D.; et al. Anthropogenic modification of forests means only 40% of remaining forests have high ecosystem integrity. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, p. 5978, 2020.

HANSKI, I. Habitat loss, the dynamics of biodiversity, and a perspective on conservation. **Ambio**, v. 40, n. 3, p. 248–255, 2011.

HRDINA, A.; ROMPORTL, D. Evaluating global biodiversity hotspots – very rich and even more endangered. **Journal of Landscape Ecology**, v. 10, n. 1, p. 108–115, 2017.

IBGE. Áreas Urbanizadas do Brasil 2019. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/tipologias-do-territorio/15789-areas-urbanizadas.html>. Acesso em: 09 de fev. de 2024.

IPBES. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. **Zenodo**, p. 56, 2019.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Cambridge University Press**. In Press, 2021.

JOLY, C. A.; AIDAR, M. P. M.; RODRIGUES, R. R. Flora e estrutura da vegetação em uma topossequência de altitude da Serra do Japi. **Revista Brasileira de Botânica**, 22(2), 267-277. 1999.

JOLY, C. A.; SCARANO, F. R.; BUSTAMANTE, M.; et al. Brazilian assessment on biodiversity and ecosystem services: summary for policy makers. **Biota Neotropica**, v. 19, n. 4, 2019.

KEITH, H.; VARDON, M.; STEIN, J. A.; STEIN, J. L.; LINDENMAYER, D. Ecosystem accounts define explicit and spatial trade-offs for managing natural resources. **Nature Ecology & Evolution**, v. 1, n. 11, p. 1683–1692, 2017.

KROEGER, T.; KLEMZ, C.; BOUCHER, T.; et al. Returns on investment in watershed conservation: Application of a best practices analytical framework to the Rio Camboriú Water Producer program, Santa Catarina, Brazil. **The Science of the Total Environment**, v. 657, p. 1368–1381, 2019.

KROSBY, M.; TEWKSBURY, J.; HADDAD, N. M.; HOEKSTRA, J. Ecological connectivity for a changing climate. **Conservation Biology**, v. 24, n. 6, p. 1686–1689, 2010.

DE LIMA, R. A. F.; OLIVEIRA, A. A.; PITTA, G. R.; et al. The erosion of biodiversity and biomass in the Atlantic Forest biodiversity hotspot. **Nature Communications**, v. 11, n. 1, p. 6347, 2020.

MAPBIOMAS PROJECT, "MapBiomass General “Handbook” - Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) - Collection 8", <https://doi.org/10.58053/MapBiomass/OJ0EDK>, MapBiomass Data, V1, 2023.

MCNICOL, I. M.; RYAN, C. M.; MITCHARD, E. T. A. Carbon losses from deforestation and widespread degradation offset by extensive growth in African woodlands. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 3045, 2018.

MEDEIROS, H. R.; MARTELLO, F.; ALMEIDA, E. A. B.; et al. Landscape structure shapes the diversity of beneficial insects in coffee producing landscapes. **Biological conservation**, v. 238, p. 108193, 2019.

MELLO, K. DE; BRITES, A.; BORGES-MATOS, C.; et al. Science and environmental policy establishment: the case of the Forest Act in the State of São Paulo, Brazil. **Biota Neotropica**, v. 22, n. spe, 2022.

MELLO, K. DE; VALENTE, R. A.; RANDHIR, T. O.; VETTORAZZI, C. A. Impacts of tropical forest cover on water quality in agricultural watersheds in southeastern Brazil. **Ecological Indicators**, v. 93, p. 1293–1301, 2018.

METZGER, J. P.; BUSTAMANTE, M. M. C.; FERREIRA, J.; et al. Why Brazil needs its Legal Reserves. **Perspectives in Ecology and Conservation**, 2019.

MITCHELL, M. G. E.; BENNETT, E. M.; GONZALEZ, A. Linking landscape connectivity and ecosystem service provision: current knowledge and research gaps. **Ecosystems (New York, N.Y.)**, v. 16, n. 5, p. 894–908, 2013.

MITTERMEIER, R. A.; TURNER, W. R.; LARSEN, F. W.; BROOKS, T. M.; GASCON, C. Global Biodiversity Conservation: The Critical Role of Hotspots. In: F. E. Zachos; J. C. Habel (Eds.); **Biodiversity Hotspots**. p.3–22, 2011. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

MYERS, N.; MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; DA FONSECA, G. A.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853–858, 2000.

REZENDE, C. L.; SCARANO, F. R.; ASSAD, E. D.; et al. From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, 2018.

RIBEIRO, M. C.; METZGER, J. P.; MARTENSEN, A. C.; PONZONI, F. J.; HIROTA, M. M. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141–1153, 2009.

RICHARDS, R. C.; REROLLE, J.; ARONSON, J.; et al. Governing a pioneer program on payment for watershed services: Stakeholder involvement, legal frameworks and early lessons from the Atlantic forest of Brazil. **Ecosystem Services**, v. 16, p. 23–32, 2015.

SÃO PAULO. Plano de Ação Climática do Estado de São Paulo – Net Zero 2050. São Paulo: Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, 2022. Disponível em:

<https://semil.sp.gov.br/2022/11/consulta-publica-plano-de-acao-climatica-2050/>. Acesso em: 08 de dez. de 2024.

SATURNI, F. T.; JAFFÉ, R.; METZGER, J. P. Landscape structure influences bee community and coffee pollination at different spatial scales. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 235, p. 1–12, 2016.

SOBRAL-SOUZA, T.; VANCINE, M. H.; RIBEIRO, M. C.; LIMA-RIBEIRO, M. S. Efficiency of protected areas in Amazon and Atlantic Forest conservation: A spatio-temporal view. **Acta Oecologica**, v. 87, p. 1–7, 2018.

SPEAR, S. F.; BALKENHOL, N.; FORTIN, M.-J.; MCRAE, B. H.; SCRIBNER, K. Use of resistance surfaces for landscape genetic studies: considerations for parameterization and analysis. **Molecular Ecology**, v. 19, n. 17, p. 3576–3591, 2010.

STRAND, J.; SOARES-FILHO, B.; COSTA, M. H.; et al. Spatially explicit valuation of the Brazilian Amazon Forest's Ecosystem Services. **Nature Sustainability**, v. 1, n. 11, p. 657–664, 2018.

STRASSBURG, B. B. N.; BEYER, H. L.; CROUZEILLES, R.; et al. Strategic approaches to restoring ecosystems can triple conservation gains and halve costs. **Nature Ecology & Evolution**, v. 3, n. 1, p. 62–70, 2019.

STRASSBURG, B. B. N.; LATAWIEC, A. E.; BARIONI, L. G.; et al. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 28, p. 84–97, 2014.

TAVARES, P. A.; BRITES, A. D.; SPAROVEK, G.; et al. Unfolding additional massive cutback effects of the Native Vegetation Protection Law on Legal Reserves, Brazil. **Biota Neotropica**, v. 19, n. 4, 2019.

## 2. CAPÍTULO 1

### Conectividade Florestal: uma revisão de modelos e aplicações para Serviços Ecosistêmicos

#### RESUMO

A fragmentação dos habitats naturais e as mudanças climáticas ameaçam a capacidade dos ecossistemas de manter funções essenciais e prover serviços ecosistêmicos, tornando a conectividade da paisagem fundamental para a conservação da biodiversidade e resiliência dos ecossistemas. Este estudo realizou uma revisão sistemática sobre diferentes modelos de conectividade da paisagem com foco nos serviços ecosistêmicos providos pelas florestas, buscando identificar limitações e lacunas para avanços futuros. Utilizando a base de dados Web of Science, os termos de busca incluíram "model/modeling/modelling", "ecosystem service/environmental service", "forest" aplicados ao título, resumo e palavras-chave e "connectivity" apenas em títulos. A seleção de artigos foi baseada na metodologia PRISMA, com etapas de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão. Foram identificados 41 artigos publicados entre 2012 e 2024, e selecionados 21 após a etapa de triagem, que excluiu artigos da análise relacionados à conectividade em paisagens urbanas, habitats não terrestres ou artigos de revisão. Os resultados das pesquisas indicam aumento nas publicações, especialmente entre autores da China, Estados Unidos e Brasil, que aplicaram modelos de conectividade principalmente em Serviços Ecosistêmicos voltados à conservação da biodiversidade e manutenção dos recursos hídricos, incluindo também a regulação climática. Diversos *softwares* foram empregados, como Conefor, Linkage Mapper e Circuitscape, além de métodos como probabilidade de conectividade, caminho de menor custo e teoria de grafos, direcionando estudos para políticas públicas, como Pagamentos por Serviços Ambientais. Apesar dos avanços, os desafios persistem, incluindo padronização de modelos e inclusão de serviços culturais, limitando análises mais abrangentes e indicando áreas para inovação.

## ABSTRACT

The fragmentation of natural habitats and climate change threaten ecosystems' ability to sustain essential functions and provide ecosystem services, making landscape connectivity crucial for biodiversity conservation and ecosystem resilience. This study conducted a systematic review of various landscape connectivity models focusing on ecosystem services provided by forests, aiming to identify limitations and gaps for future advancements. Using the Web of Science database, the search terms included "model/modeling/modelling," "ecosystem service/environmental service," and "forest" applied to titles, abstracts, and keywords, while "connectivity" was restricted to titles. Article selection followed the PRISMA methodology, involving identification, screening, eligibility, and inclusion phases. A total of 41 articles published between 2012 and 2024 were identified, with 21 articles selected after screening to exclude studies addressing connectivity in urban landscapes, non-terrestrial habitats, or review papers. The findings indicate a growing number of publications, particularly from authors in China, the United States, and Brazil, who applied connectivity models mainly to ecosystem services related to biodiversity conservation and water resource management, including climate regulation. Various software tools were used, such as Conefor, Linkage Mapper, and Circuitscape, alongside methods like probability of connectivity, least-cost paths, and graph theory, with studies often guiding public policies such as Payments for Environmental Services. Despite these advancements, challenges remain, including the standardization of models and the inclusion of cultural services, limiting more comprehensive analyses and highlighting areas for innovation.

## 2.1. Introdução

As mudanças climáticas e a fragmentação dos habitats naturais têm intensificado preocupações sobre a capacidade dos ecossistemas em manter suas funções e fornecer serviços essenciais à sociedade. A fragmentação da paisagem, resultante principalmente de atividades humanas como a expansão urbana, atividades agropecuárias e silviculturais, interrompe processos ecológicos necessários como o fluxo gênico e a polinização (Beita et al., 2021), reduz a biodiversidade e compromete serviços ecossistêmicos como a regulação do clima, a purificação da água e a provisão de alimentos (Berger-Tal e Saltz, 2019; IPBES, 2019). A fragmentação dos habitats é o maior vetor da perda de biodiversidade global e da degradação dos ecossistemas naturais (Ma et al. 2023).

Nesse contexto, a conectividade da paisagem emerge como um conceito-chave na ecologia e na conservação da biodiversidade. Conectividade da paisagem é a capacidade da paisagem em permitir ou impedir o movimento de organismos entre manchas de habitats, influenciando diretamente processos ecológicos como dispersão, fluxo gênico, reprodução e a adaptação dos organismos às mudanças do ambiente (Spear et al., 2010; Hanski, 2011; Zeller et al., 2020). Por isso, mantê-la é essencial para a manutenção da biodiversidade e a resiliência dos ecossistemas frente às pressões ambientais e às mudanças climáticas (Diniz, et al., 2020).

Diversos compromissos internacionais reforçam a importância da conectividade na conservação da biodiversidade e na provisão de serviços ecossistêmicos. O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável nº 15 da Agenda 2030 Organização das Nações Unidas (ONU) enfatiza a necessidade de proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres. A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC) também reconhece a restauração e conservação de florestas como estratégia para mitigar os impactos das mudanças climáticas. Reverter os efeitos dessa crise torna-se uma prioridade para garantir os serviços ecossistêmicos, a sustentabilidade ambiental e o bem-estar das futuras gerações no planeta (Krosby et al., 2010; Chazdon, 2019; Strassburg et al., 2020).

O desenvolvimento de modelos de conectividade da paisagem adaptados às características locais e aos objetivos de estudo tem ganhado destaque em iniciativas globais. Exemplos incluem os corredores ecológicos de Santa Maria e Capivara-Confusões, no Brasil (Machado, 2023; MMA, 2024). Essas ações incluem a restauração de corredores essenciais para a migração de espécies, como áreas ripárias (Naiman, 1993), além de incentivos em propriedades privadas por meio de programas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA). Tais ações contribuem para conservar e restaurar ecossistemas críticos para a purificação e o

ciclo da água, como florestas e zonas úmidas (Chazdon, 2019); aumentam a capacidade de sequestro de carbono e de regulação climática, ajudando a mitigar os efeitos das mudanças climáticas (Ziter et al., 2013); além de permitir o livre deslocamento de animais e plantas, promovendo interações ecológicas e o acesso a recursos em diferentes áreas.

As peculiaridades de cada estudo da conectividade da paisagem, bem como escala e região influenciam na escolha e aplicação de modelos de conectividade, que podem incorporar características estruturais e/ou funcionais da paisagem (Mitchell, Bennett e Gonzalez, 2013; Laliberté et al., 2020). A estrutura da paisagem refere-se aos fragmentos de habitat e as ligações físicas entre si, considerando a presença e disposição dos fragmentos de habitat e corredores ecológicos na paisagem (Fischer; Lindenmayer, 2007). A conectividade funcional, por outro lado, integra características do ambiente que permitem que as espécies se desloquem entre os ecossistemas da paisagem, como o comportamento de determinadas espécies, medindo o grau de interferência dessas características sobre a movimentação das espécies (Goodwin, 2003; Masteali et al., 2023).

Conceitos matemáticos são amplamente utilizados nos estudos de conectividade da paisagem, como a teoria dos grafos, uma vez que ela é capaz de reduzir a complexidade da paisagem a configurações espaciais mais compreensíveis (Kong et al., 2010; Uroy et al., 2021). A teoria dos grafos permite representar a paisagem como uma rede de nós através dos fragmentos de habitat, e as ligações entre eles, representados por linhas ou arestas. Além disso, a incorporação de superfícies de resistência como funcionalidade nos modelos permite avaliar como diferentes características da paisagem influenciam o movimento das espécies (Zeller et al., 2012; Valente et al., 2023). Fatores como tipos de uso da terra, presença de estradas e urbanização são considerados para atribuir valores de resistência, refletindo a facilidade ou dificuldade de deslocamento dos organismos na paisagem (Spear et al., 2010).

A crescente importância dos serviços ecossistêmicos fornecidos pelas paisagens pode impulsionar mudanças nos avanços das metodologias e aplicações dos modelos de conectividade. O progresso computacional permite o desenvolvimento de novas ferramentas e métodos, e a interação dos modelos de conectividade. Essas inovações podem trazer modelos mais sofisticados, incorporando interações complexas e prioridades espaciais essenciais para estratégias de conservação e restauração. Sendo assim, o objetivo deste estudo foi realizar uma revisão sistemática do estado atual do conhecimento científico sobre os diferentes modelos de conectividade da paisagem utilizados em pesquisas com foco nos serviços ecossistêmicos providos pelas florestas e quais os serviços considerados nos estudos. Este trabalho pode auxiliar no planejamento de novas pesquisas ao se aprofundar nos

modelos que vêm sendo utilizados, identificação de autores influentes, e entendimento da distribuição geográfica dos estudos publicados. Além disso, esse estudo visa identificar limitações e lacunas de conhecimento para o desenvolvimento de modelos inovadores, com incorporação de elementos ainda não explorados nos modelos atuais.

## **2.2. Material e Métodos**

Para revisar o estado atual do conhecimento sobre modelos de conectividade da paisagem em pesquisas com focos nos serviços ecossistêmicos, foi realizada uma revisão sistemática seguindo as diretrizes do PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Moher et al., 2009; Degefu et al., 2022; Herrmann, Nascimento e Freitas, 2022), estruturada em quatro etapas: identificação, triagem, elegibilidade e inclusão (Figura 1).

Esse método permite identificar, selecionar e sintetizar estudos relevantes de forma transparente, proporcionando uma visão abrangente das tendências e avanços na área (Grant e Booth, 2009; James et al., 2016). A revisão reuniu publicações, números de citações e análise de veículos de publicação de todos os artigos identificados, abordando características gerais das publicações como o crescimento do interesse no tema, os veículos mais recorrentes e as dinâmicas de colaboração entre os autores.

Para os artigos incluídos foi realizada uma análise mais profunda, incluindo as regiões de estudo, os parâmetros e modelos de conectividade, os métodos e *softwares* aplicados, além dos serviços ecossistêmicos abordados, buscando relações para aprofundar o entendimento sobre os procedimentos empregados, as abordagens metodológicas, as limitações existentes e as necessidades futuras no campo de pesquisa.

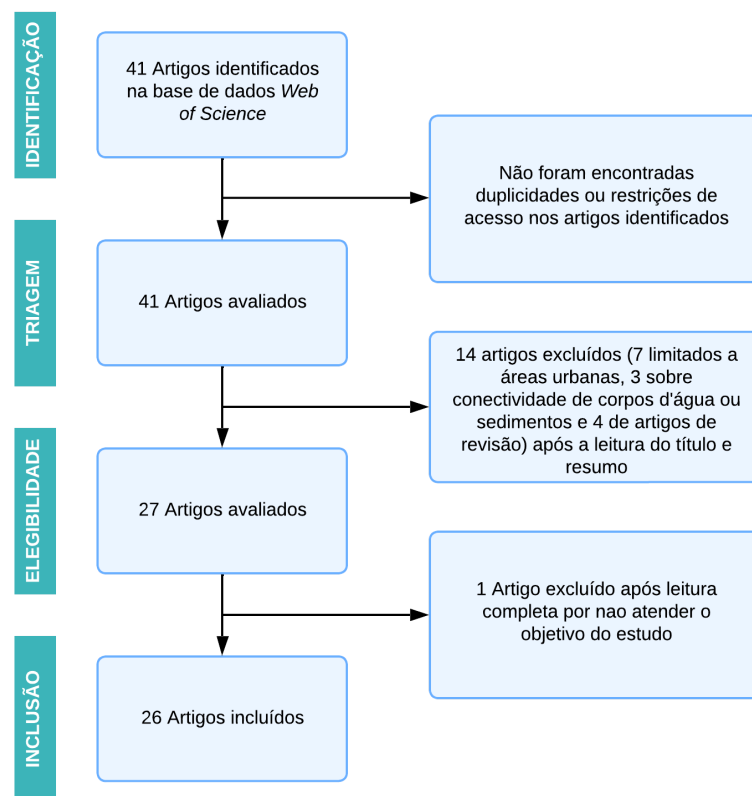


Figura 1. Fluxograma das etapas de revisão sistemática. Fonte: elaborado pelos Autores.

### 2.2.1. Etapa de identificação das pesquisas

A base de dados da *Web of Science* foi escolhida para o levantamento bibliográfico por sua abrangência e rigor nos critérios de indexação, além de ser amplamente utilizada em estudos científicos (Ortiz, Ortiz e Silva, 2002; Medeiros, 2014). Foram utilizados os seguintes termos de busca em inglês: “*model*” OR “*modeling*” OR “*modelling*” AND “*ecosystem service\**” OR “*environmental service\**” AND “*forest\**”, aplicados ao título, resumo e palavras-chave, e “*connectivity*” aplicado apenas ao título. Os operadores booleanos “AND” e “OR” foram utilizados para combinar termos e assegurar a inclusão das quatro dimensões temáticas: modelos, serviços ecossistêmicos, floresta e conectividade.

### 2.2.2. Etapa de triagem das pesquisas

Na etapa de triagem, foram lidos os títulos, resumos e palavras-chave para eliminar estudos que não atendiam aos critérios estabelecidos. Foram excluídos estudos que tratavam da conectividade em paisagens majoritariamente urbanas, pois estes geralmente se concentram em pequenos fragmentos de habitat com foco no planejamento urbano. O

objetivo desta pesquisa foi priorizar artigos que abordassem maior abrangência de classes de uso e cobertura do solo, incluindo maiores fragmentos de habitat. Além disso, foram excluídos estudos que exploravam a conectividade de outros elementos não relacionados a habitats terrestres e artigos de revisão.

### **2.2.3. Etapa de elegibilidade das pesquisas**

Na etapa de elegibilidade, foi realizada a leitura completa dos 27 artigos selecionados após triagem. Nesta fase, procurou-se artigos que, apesar de parecerem inicialmente relevantes, não atendiam à pergunta de pesquisa.

Durante essa análise aprofundada, um artigo foi excluído (Figura 1). Embora, inicialmente, relevante em mencionar a importância dos serviços ecossistêmicos providos pelos manguezais, como proteção costeira, suporte à pesca e sequestro de carbono e por abordar a conectividade dos mangues, a leitura completa revelou que o foco do modelo de conectividade empregado era a conectividade genética de populações de *Avicennia marina*.

Esta etapa foi fundamental para o presente estudo, que busca reunir informações detalhadas sobre a modelagem de conectividade e os serviços ecossistêmicos abordados nos artigos. A partir da seleção realizada, foi possível elaborar uma descrição mais aprofundada de cada publicação, sintetizando as evidências quanto aos modelos de conectividade utilizados, teorias empregadas, *softwares*, parâmetros, funcionalidades e serviços ecossistêmicos envolvidos.

### **2.2.4. Etapa de inclusão e análise dos dados**

Os artigos que atenderam aos critérios de elegibilidade foram considerados como incluídos. Na etapa de inclusão e análise dos dados, foram realizadas investigações detalhadas das regiões de estudo, modelos de conectividade empregados, parâmetros utilizados e serviços ecossistêmicos abordados em cada artigo. Este processo foi apoiado por um material suplementar elaborado especificamente para consolidar, relacionar e discutir as informações extraídas.

O material suplementar foi estruturado para analisar os modelos de conectividade adotados e os serviços ecossistêmicos avaliados, identificando as abordagens metodológicas predominantes, os parâmetros mais frequentemente considerados e os *softwares* utilizados como relações entre as regiões de estudo, parâmetros utilizados, modelo de conectividade desenvolvido e serviços ecossistêmicos. A análise também buscou identificar lacunas metodológicas e explorar tendências emergentes na integração de serviços ecossistêmicos

com a conectividade da paisagem, resultando em um panorama abrangente que apoia a construção de soluções mais efetivas e sustentáveis.

## 2.3. Resultados e Discussão

### 2.3.1. Análise dos artigos identificados

A revisão sistemática identificou inicialmente 41 artigos publicados entre os anos de 2012 a 2024. No período analisado observou-se um aumento progressivo no número de publicações ao longo deste período, evidenciando um crescente interesse e intensificação das pesquisas relacionadas ao tema. O pico de publicações ocorreu nos anos de 2021 e 2022, com 192 e 81 citações, respectivamente, o que ressalta a relevância e o impacto científico da área nos últimos anos (Figura 2). Estes dados sugerem uma consolidação do campo de pesquisa, como também o aumento da produção acadêmica e da demanda por soluções e abordagens inovadoras.

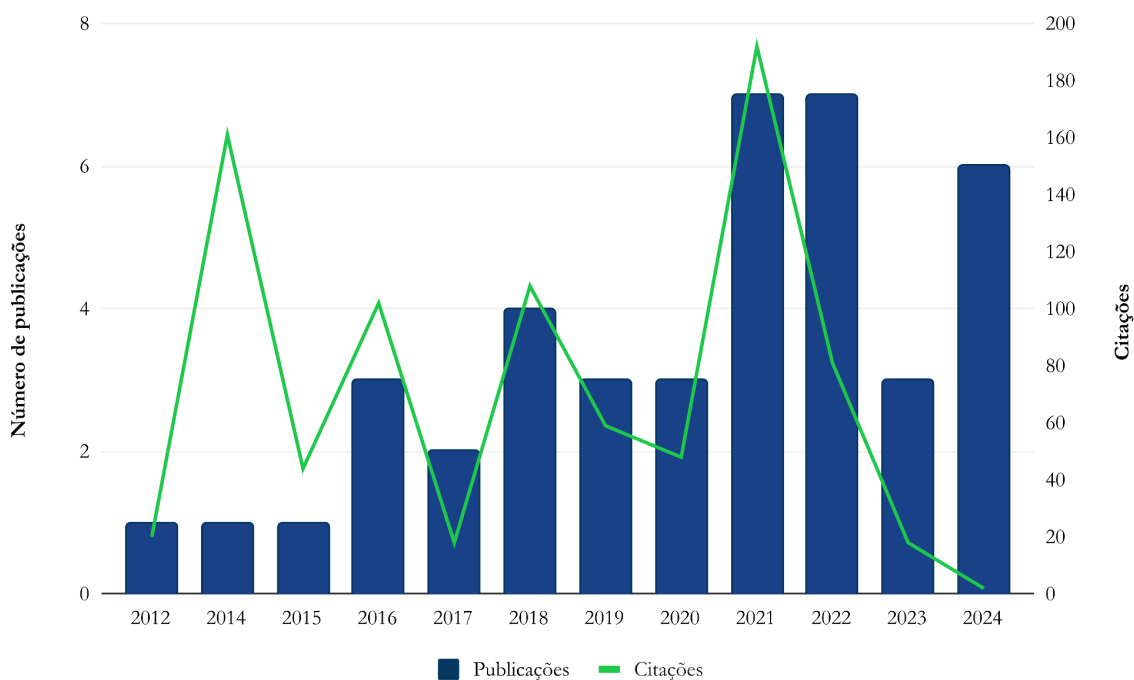


Figura 2. Quantidade de publicações e citações por ano, considerando os 41 artigos identificados.

Dentre as causas que podem explicar tais aumentos estão ações que visam a conservação e restauração da biodiversidade, principalmente de hotspots ecológicos, buscando mitigar os efeitos de mudanças climáticas e das mudanças do uso da terra (Latapí

Agudelo, Jóhannsdóttir e Davídsdóttir, 2019). Por serem considerados áreas prioritárias para conservação, já que detêm alta biodiversidade e espécies endêmicas ameaçadas de extinção, os hotspots são considerados cruciais na conectividade da paisagem e na manutenção dos ecossistemas (IPCC, 2022), sendo, portanto, importantes os estudos sobre esses aspectos. Avanços recentes na área legal, como incentivos fiscais e penas mais severas às empresas com alto potencial de degradação do meio ambiente também são responsáveis pelo aumento de investimentos privados em causas ambientais (Zhang, Yu e Kong, 2019), que por sua vez, podem promover a publicação de artigos sobre conectividade.

Os anos de 2014, 2016, 2018 e 2021, foram aqueles com maiores números de citações, com 161, 102, 108 e 192, respectivamente. Esse aumento pode ser atribuído a necessidade de estudos que se concentram em áreas prioritárias para conservação e conectividade, utilizando abordagens diversas, como a otimização de planos que priorizam fragmentos florestais para reduzir custos em contextos de escassez de recursos (Wang et al., 2016; Miranda et al., 2021; Salviano et al., 2021); pesquisas inovadoras que abordaram o PSA, temática em ascensão na época de publicação dos estudos (2016 e 2018) (Fagan et al., 2016; Viani et al., 2018), trabalhos que combinam métodos de análise de conectividade de paisagem (De La Fuente et al., 2018), bem como temas mais emergentes, como mudanças climáticas (Baumbach et al., 2021), e importância espacial do habitat e sua conservação para a conectividade da paisagem (QI et al., 2021).

Em relação ao veículo de publicação, os 41 artigos encontrados foram publicados em 30 periódicos e revistas diferentes. A revista *Ecological Indicators* apresenta a maior quantidade de publicações, com 5 artigos, seguido da revista *Biological Conservation e Journal of Environmental Management*, ambas com 4 e 3 artigos publicados, respectivamente.

Os artigos foco da *Ecological Indicators* são aqueles que integram o monitoramento e a avaliação de indicadores ecológicos e ambientais com práticas de gestão, focando em pesquisas sobre indicadores, modelagem de índices e métodos de avaliação relacionados à biodiversidade, agroecossistemas, ecossistemas florestais e aquáticos, integridade biológica e sustentabilidade. Dentre os 5 artigos encontrados nesta revisão, e publicados pela revista, aquele mais relevante quanto ao número de citações foi “*Constructing and optimizing urban ecological network in the context of rapid urbanization for improving landscape connectivity*”, de Huang et al. (2021), que aplicou índices de padrões paisagísticos para analisar as características da paisagem, e a análise de padrões morfológicos para identificar

fontes ecológicas, conectividade da paisagem e os atributos da região direcionados à superfície de resistência ecológica.

A revista *Biological Conservation*, por outro lado, destaca-se na ciência da conservação, publicando artigos que abordam as dimensões biológicas, sociológicas, éticas e econômicas da conservação, incluindo as consequências das ações humanas para ecossistemas terrestres, aquáticos e marinhos, riscos de extinção, fragmentação, organismos invasores, genética de conservação, gestão da conservação e impactos das mudanças globais. Dentre os artigos encontrados nesta revisão, aquele mais citado foi escrito por Wang et al. (2016): “*Conservation priorities of forest ecosystems with evaluations of connectivity and future threats: Implications in the Eastern Himalaya of China*”, que ofereceu uma abordagem alternativa de prioridade de conservação a ser utilizada quando os dados sobre espécies são insuficientes, a fim de possibilitar a modelagem dos fatores que favorecem um alto grau de biodiversidade e as ameaças.

Por fim, a *Journal of Environmental Management* foca na aplicação de práticas de gestão ambiental, tratando de avaliação e monitoramento ambiental, controle da poluição, gestão de resíduos, recursos naturais, mudanças climáticas, políticas ambientais e os impactos da poluição causada pelo homem. Dentre os encontrados nesta revisão, o artigo mais citado foi “*Managing the farmscape for connectivity increases conservation value for tropical bird species with different forest-dependencies*”, de Estrada-Carmona, et al. (2019), que testou como a adição e remoção de árvores em diferentes configurações em uma propriedade composta por plantações de café e pastagens para gado podem ajudar a avaliar a mobilidade das espécies no nível da paisagem agrícola, através do acoplamento de dados de captura de aves e modelagem de cenários.

Dentre todos os artigos identificados, os autores que mais publicaram são aqueles da China e Estados Unidos, que lideram com 10 artigos, seguidos do Brasil, com 8 artigos. De autoria chinesa, o artigo mais recente foi publicado por Zhou et al. (2023) (Figura 3f). Para autores estadunidenses, os artigos mais recentes foram desenvolvidos por Pashanejad et al. (2024) e Benez-Secanho et al. (2022). Por fim, apesar da publicação recente de Lamounier et al. (2024), autorias brasileiras ainda são numericamente menores se considerarmos a área de floresta remanescente que o país possui em comparação com outros países ao redor do mundo (Lewinsohn e Prado, 2005).

As interações entre autores é apresentada na Figura 3, com apenas 6 interações encontradas entre os 41 estudos identificados. O agrupamento mais significativo são de autores da China, envolvendo quatro artigos publicados entre 2019 e 2023 (Figura 3a).

Autores como Huang, X., Huang, Y., e Wang, S. são recorrentes, demonstrando uma continuidade de colaboração que culmina em uma publicação recente (Li, 2023) e envolve todos os três pesquisadores. Esse padrão evidencia um esforço coordenado de autores da China sobre o tema. Os outros agrupamentos envolvem apenas 2 artigos com destaque para pesquisadores da Espanha (Figura 3c) que resultaram na interação de dois autores entre 2 artigos publicados (Rubio, 2012; de la Fuente, 2018).

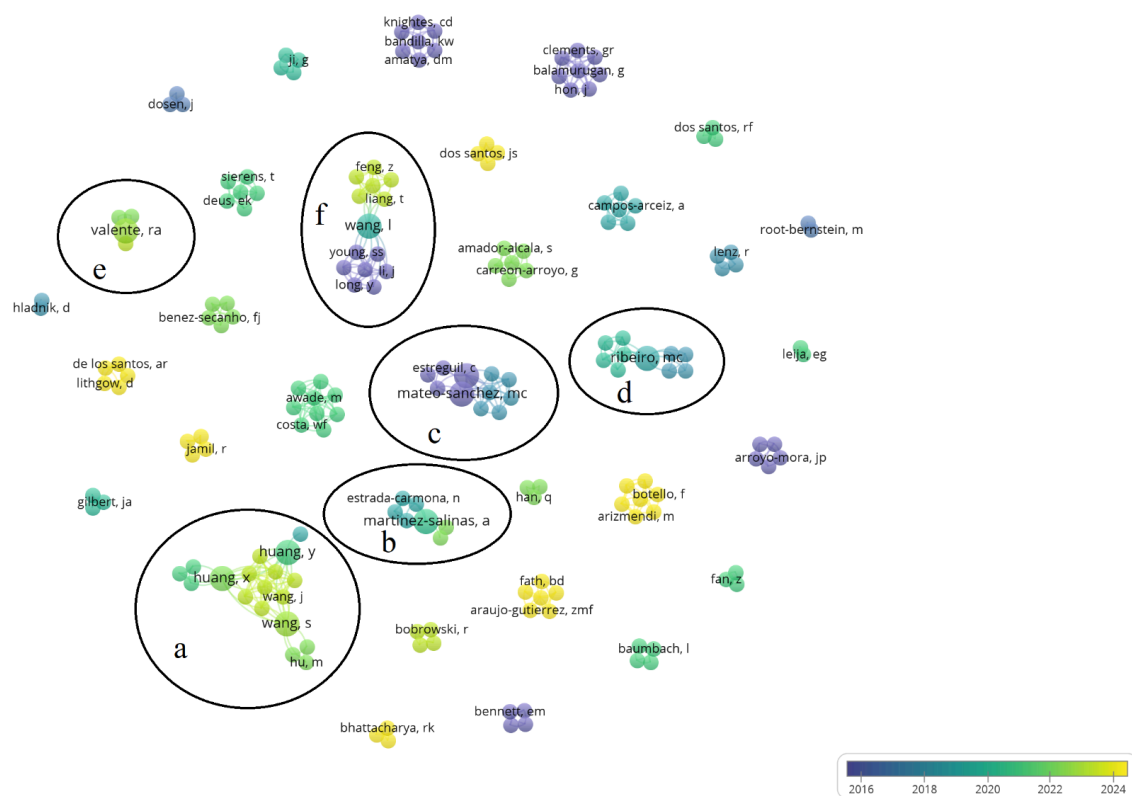


Figura 3. Interação de autores entre as 41 pesquisas identificadas. a) Huang, X., Huang, Y., e Wang, S; b) Martinez-Salinas, A.; c) Mateo-Sanchez, M. C. e Saura, S.; d) Ribeiro, M. C.; e) Valente, R. A.; f) Wang, L.

Observa-se pouca interação entre autores de diferentes países. A maioria das colaborações é regional, refletindo uma tendência de interação de autores de suas próprias regiões ou de áreas geográficas próximas. Além disso, autores de países da América Latina, como Martinez-Salinas, A. (Figura 3b), mantêm uma atuação mais isolada ou com co-autorias limitadas, concentrando-se principalmente em questões de conectividade funcional e conservação em paisagens tropicais. Outros clusters, como os liderados por Ribeiro, MC (Figura 3d) e Valente, RA (Figura 3e) no Brasil, mantêm uma abordagem mais

regional, focada na Mata Atlântica e em sistemas de PSA (Viani et al., 2018; Ramon et al., 2020; Ribeiro et al., 2022; Vanderley-Silva et al., 2023).

Essa análise destaca autores da China, onde a maior colaboração resultou em produções científicas consistentes e recentes. Isso pode indicar uma oportunidade de expansão para parcerias internacionais que possam enriquecer o campo de estudo da conectividade da paisagem com uma perspectiva mais global e integrada.

### **2.3.2. Análise dos artigos incluídos**

Entre os artigos identificados 14 artigos foram excluídos na triagem, 7 foram retirados por se concentrarem na conectividade de áreas urbanas, 3 artigos que abordavam a conectividade de sistemas aquáticos ou fluxo de sedimentos e 4 artigos eram revisões que não apresentavam o desenvolvimento de novos modelos ou metodologias aplicadas à conectividade da paisagem com foco em serviços ecossistêmicos. Além disso, na etapa da elegibilidade foi retirado 1 artigo que não corresponde ao objetivo de análise, totalizando os 26 artigos incluídos.

No Apêndice 1 é apresentado uma síntese dos modelos de conectividade e serviços ecossistêmicos entre os 26 artigos incluídos nesta análise, explorando como esses modelos são utilizados para compreender e avaliar a relação entre a conectividade florestal na paisagem e a provisão de serviços ecossistêmicos.

A análise desses estudos permitiu extrair percepções valiosas, incluindo as regiões estudadas, modelo de conectividade utilizado, *softwares* e métodos empregados, parâmetros de entrada e funcionalidades, bem como as inter-relações entre esses aspectos e tendências observadas ao longo do tempo.

Os modelos mais utilizados foram baseados principalmente em caminhos de menor custo, teoria de grafos e teoria de circuitos, integrando métricas de probabilidade de conectividade (PC), índice de conectividade integral (IIC), e métricas de sensoriamento remoto. Outros modelos foram gerados com base em análise multicriterial, integrando métodos como análise hierárquica e combinação linear ponderada, ou ainda métricas da paisagem ou redes neurais combinada com modelagens de distribuição e movimentação de espécies. Para entender o desenvolvimento do modelo de conectividade é importante relacionar os parâmetros utilizados que podem variar conforme a região, funcionalidade e objetivos de estudo.

Os artigos incluídos tiveram como foco de estudo, diferentes ecossistemas e regiões geográficas, o que pode influenciar no desenvolvimento dos modelos de conectividade, e os

parâmetros empregados. Nesse contexto, o Brasil foi o país com maior número de pesquisas, em especial o bioma da Mata Atlântica, com seis artigos focados nesse hotspot global. A Costa Rica e China também ocupam lugar de destaque, com 5 artigos que abordam diferentes regiões desses países (Figura 4).

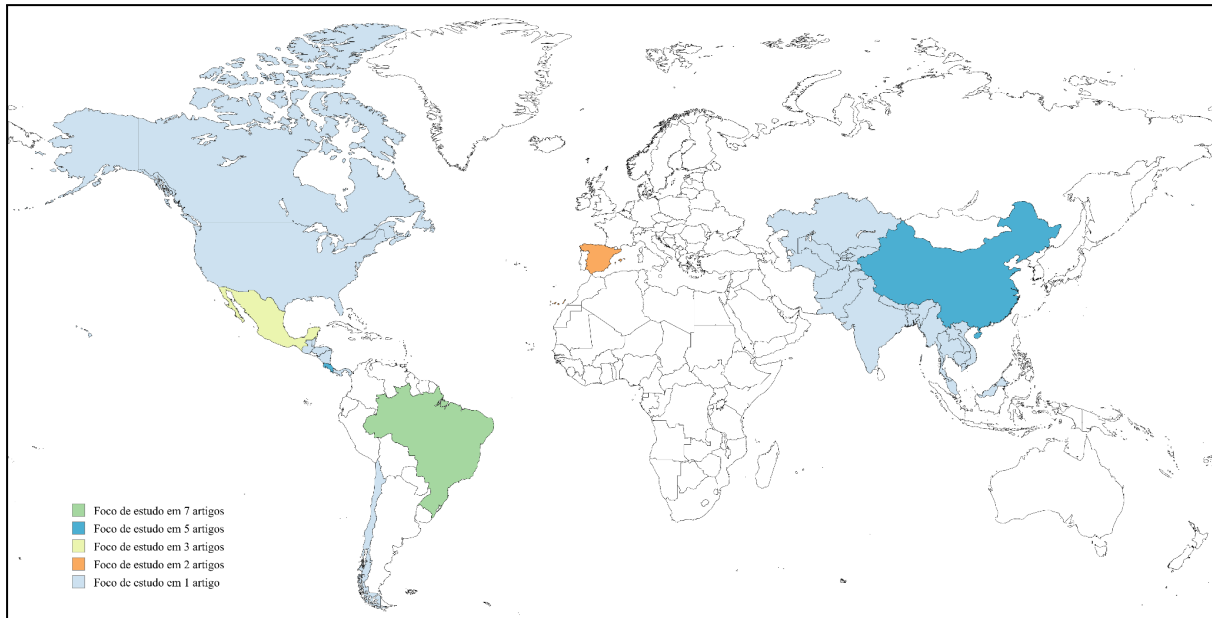


Figura 4. Regiões geográficas foco de estudo dos artigos incluídos. Nota: Destaque verde: Brasil; Destaque em azul escuro: China e Costa Rica; Destaque em creme: México; Destaque em laranja: Espanha; Destaque em azul claro: Chile, Malásia, Canadá, Estados Unidos, Região da Water Tower - Países da Ásia e Florestas da América Central.

Para o Brasil, as pesquisas sobre o bioma Mata Atlântica foram conduzidas em várias localidades, incluindo o Sul da Bahia, o município de Extrema e a região da Reserva da Biosfera da Serra do Espinhaço, em Minas Gerais, além de algumas áreas do Estado de São Paulo, como o Corredor Cantareira-Mantiqueira e a Biosfera do Cinturão Verde (Dosen et al., 2017; Viani et al., 2018; Ramos et al., 2020; Vanderley-Silva et al., 2023; Lamounier et al., 2024).

Nestes trabalhos, as aves foram frequentemente utilizadas como parâmetro nos modelos de conectividade funcional, presentes em três dos seis artigos (Viani et al., 2018; Ramos et al., 2020; Lamounier et al., 2024). Esse grupo é amplamente estudado e possui informações disponíveis, que são importantes para compor parâmetros em modelos de conectividade (Ramos et al., 2020). Espécies frugívoras florestais, com menor capacidade de dispersão, ajudam a capturar os desafios de conectividade em áreas fragmentadas como a

Mata Atlântica; além disso, muitas espécies com menor sensibilidade também podem ser utilizadas (Uezu et al., 2005).

Além das aves, mamíferos como primatas, roedores e marsupiais foram utilizados em modelos de conectividade na Mata Atlântica devido à sua sensibilidade às alterações na paisagem e importância na manutenção da biodiversidade, estes organismos servem como indicadores de ecossistemas conservados (Dosen et al., 2017; Salviano et al., 2021). A variação na sensibilidade entre as espécies permite que os modelos abordem diferentes desafios ecológicos, ajustando-se ao contexto e aos objetivos de cada estudo. Em outros trabalhos, a conectividade foi modelada com base em características funcionais da paisagem, utilizando atributos ambientais em vez de espécies específicas. Vanderley-Silva e Valente (2023) caracterizaram a resistência da paisagem por meio de critérios como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), a Temperatura da Superfície Terrestre (LST) e a luminosidade noturna.

Em ecossistemas tropicais como no Mosaico de Carajás, localizado na Amazônia Brasileira (Miranda et al., 2021) e no Corredor Biológico San Juan La Selva na Costa Rica (Fagan et al., 2016), aves e mamíferos também foram utilizadas como espécies alvo. Nesses ambientes, a complexidade da paisagem e a diversidade de espécies sugerem modelos que considerem mais de um grupo de espécies, incluindo polinizadores e dispersores de sementes.

Na China, em áreas montanhosas e fragmentadas na região Oriental do Himalaya e no Delta do Rio das Pérolas, os estudos incorporaram fatores como declividade e urbanização nos modelos, refletindo desafios específicos dessas paisagens (Wang et al., 2016, Wang et al., 2022). Em regiões semiáridas de floresta, como no Chile, o estudo sobre a reintrodução de guanacos (Root-Bernstein e Svenning, 2017) utilizou este mamífero para modelar a conectividade. No Canadá, o estudo das pradarias (Pashanejad et al., 2024) considerou a conectividade entre áreas florestais e agrícolas, sem foco em espécies específicas, mas na interação e nos pesos associados entre diferentes serviços do ecossistema.

A escolha das espécies foco e os parâmetros utilizados nos modelos variaram conforme o ecossistema e os objetivos dos estudos. Em regiões com espécies ameaçadas, a seleção de uma única espécie-chave forneceu informações detalhadas sobre as necessidades específicas de conservação e os pontos críticos na paisagem que precisam ser conectados, como o mico-leão-de-cara-dourada no Brasil (Dosen et al., 2017), os grandes carnívoros do Norte do México (Balbuena-Serrano et al., 2022) e o macaco-de-nariz-arrebitado da Região das Três Gargantas Paralelas, em Yunnan, na China (Li et al., 2023) foram utilizadas como indicadores ecológicos para modelar a conectividade e orientar ações de conservação.

A utilização de regiões muito extensas pode implicar em barreiras significativas para o modelo de conectividade, tanto para as questões ecológicas da paisagem quanto para o processamento de dados. Dois estudos se destacaram por tratarem de grandes áreas, englobando vários países (Figura 4): O estudo de Baumbach et al. (2021) utilizou as florestas da América Central, abrangendo os países México, Belize, Guatemala, Honduras, Nicarágua, Costa Rica e Panamá, enquanto o estudo de Zhou et al. (2023) focou na região da Asian Water Tower (AWT), que inclui 17 países com foco no Planalto Qinghai-Tibetano, como o Afeganistão, Bangladesh, Butão, Camboja, Cazaquistão, China, Índia, Laos, Mianmar, Nepal, Paquistão, Quirguistão, Tailândia, Tadjiquistão, Turcomenistão, Uzbequistão e Vietnã. Nos dois estudos, foram desenvolvidos modelos de conectividade utilizando diferentes abordagens, mas ambos com um interesse comum relacionado às mudanças climáticas e seus impactos nos ecossistemas.

Baumbach et al. (2021) investigou como as mudanças climáticas podem afetar a conectividade das florestas da América Central, uma área rica em biodiversidade e importante para a conservação de espécies ameaçadas, através de modelos de distribuição de espécies (SDMs) e uma análise de fragmentação com base em classes específicas de áreas (interior, borda, transição e lacunas) para comparar cenários climáticos futuros e avaliar a conectividade dos ecossistemas. Já o estudo de Zhou et al. (2023) se concentrou na proteção dos ecossistemas da região da Asian Water Tower, reconhecida pela sua relevância na regulação hídrica e climática em toda a Ásia, utilizando uma modelagem de menor custo para a conectividade, buscando padrões de segurança ecológica.

Para explorar os modelos de conectividade observamos as particularidades de cada região, a forma como os pesquisadores decidiram abordar a conectividade e os serviços ecossistêmicos detalhados no Apêndice 1. Em Baumbach (2021), para investigar como as mudanças climáticas podem afetar a conectividade, o modelo foi desenvolvido no *software* R, com pacotes para modelagem de distribuição de espécies (SSDM) e *fasterRaster* para análise de fragmentação. Foram utilizados algoritmos como máxima entropia (MaxEnt) e modelos aditivos generalizados (GAM) para projetar a adequação climática futura, classificando áreas em diferentes níveis de fragmentação. Os principais serviços ecossistêmicos incluídos foram a manutenção de habitats, retenção de carbono e corredores para a migração de espécies.

Já no estudo de Zhou et al. (2023) que focou na proteção dos ecossistemas, o modelo foi desenvolvido utilizando o *software* ArcGIS para calcular os corredores ecológicos a partir de superfícies de resistência geradas com base em fatores como topografia, uso da terra e proximidade de infraestrutura humana. A análise envolveu o uso da metodologia de Análise

Hierárquica (AHP) para atribuir pesos a esses fatores de resistência, conectando fontes ecológicas através de caminhos de menor custo. Os serviços ecossistêmicos abordados incluem regulação hídrica, conservação da biodiversidade, sequestro de carbono e fixação de solos.

Os estudos analisados utilizaram diversos *softwares*, com tendências evoluindo ao longo dos anos. O *software* Conefor, Linkage Mapper e Circuitscape foram as ferramentas mais utilizadas na modelagem e análises. *Softwares* geoespaciais como o ArcGis, InVEST, R e Graphab também foram utilizados para análise de métricas, modelos de conectividade funcional e estrutural de paisagem, cenários de mudança de uso da terra e mobilidade de espécies.

O *software* Linkage Mapper foi o segundo mais observado e mostrou aumento de uso ao longo dos anos. Integrado ao ArcGIS, beneficia-se da facilidade de uso deste *software* SIG, permitindo identificar áreas de maior ou menor conectividade na paisagem com base em superfícies de resistência. Em seguida o *software* Circuitscape, reflete a tendência de modelar a conectividade como fluxos contínuos, utilizando a analogia de circuitos elétricos. É eficaz na identificação de áreas críticas para o fluxo de espécies em paisagens heterogêneas com múltiplos caminhos possíveis (McRae et al., 2016). Também é observado a preferência do *software* Circuitscape por autores que realizam o estudo em regiões da Costa Rica.

Outros *softwares* também foram empregados, oferecendo flexibilidade na modelagem de conectividade para múltiplas espécies e diferentes cenários de resistência da paisagem (LSCorridors no GRASS GIS e Graphab) e análises estruturais (Fragstats). Embora exijam maior conhecimento técnico, sua natureza de código aberto e a possibilidade de customização atraem usuários que buscam soluções gratuitas e adaptáveis.

A evolução dos métodos e a diversificação de *softwares* refletem avanços tecnológicos e maior disponibilidade e facilidade no acesso de dados espaciais. Observa-se uma transição de modelos baseados exclusivamente em métricas de grafos para abordagens que incorporam teoria de circuitos e otimização espacial. Ferramentas como Marxan e Prioritizr passaram a ser utilizadas para otimizar a seleção de áreas para conservação, integrando os modelos de conectividade e serviços ecossistêmicos para priorização espacial (Moran-Ordóñez et al., 2022; Benez-Secanho et al., 2022).

A escolha do *software* depende das necessidades específicas de cada estudo, da disponibilidade de dados e da familiaridade dos pesquisadores com as ferramentas. Além disso, os avanços no ambiente SIG, como imagens de alta resolução e a usabilidade de *Big Data*, têm influenciado a evolução e a preferência pelos *softwares* ao longo do tempo.

Em estudos recentes, o *software* InVEST tem sido utilizado para integrar a modelagem de conectividade com a quantificação de serviços ecossistêmicos, como sequestro de carbono, qualidade da água e biodiversidade. Essa abordagem integrada é facilitada pela evolução no ambiente SIG, permitindo análises multifuncionais e apoiando decisões de planejamento.

Os serviços ecossistêmicos considerados também variaram conforme a região e o ecossistema, e alguns foram comumente abordados (Figura 5). A conservação da biodiversidade, embora não considerada um serviço ecossistêmico por si só, esteve presente em todos os estudos, refletindo a importância universal da conectividade para a manutenção da diversidade biológica. Nesse contexto, a conservação da biodiversidade emerge como um conceito central, atuando como um “guarda-chuva”, sustentando os serviços ecossistêmicos mencionados (Le Provost et al., 2023). Além de ser fornecedora de bens e serviços, a biodiversidade é importante na manutenção da integridade, dinâmica e resiliência dos ecossistemas. Assim, os serviços ecossistêmicos dependem da conservação da biodiversidade, e vice-versa (Brasil, 2011; Oguh et al., 2021; Le Provost et al., 2023; Roma e Viana, 2023; FAO, 2024).

Em algumas bibliografias com foco em PSA, a conservação da biodiversidade encontra-se comumente relacionada aos serviços de polinização, dispersão, controle de pragas, manutenção da variabilidade genética, cultura, beleza cênica e conservação de habitat (Brasil, 2011; Conexão Mata Atlântica, 2024). Em outros estudos, a biodiversidade também é relacionada aos serviços de sequestro e estoque de carbono, e recreação (Hermoso et al., 2018). Dessa forma, é notável a estreita ligação entre a biodiversidade e serviços ecossistêmicos, abordagem que ganha crescente destaque.

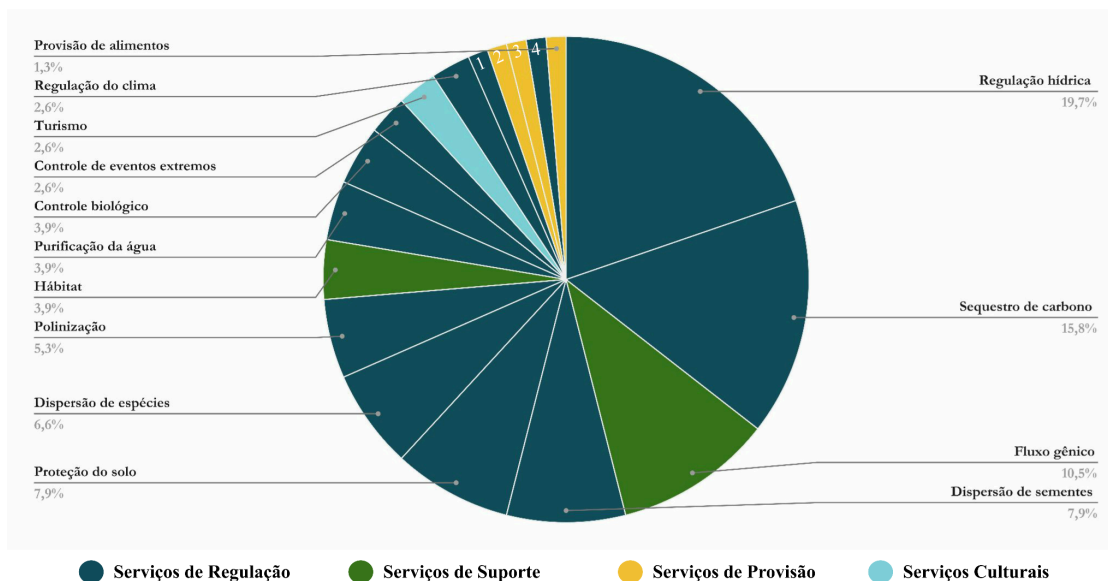


Figura 5. Quantidade de serviços ecossistêmicos citado pelos 26 artigos incluídos. Os números 1, 2, 3 e 4 são, respectivamente, correspondentes à: controle presa/predador, provisão de madeira, provisão de produtos não madeireiros e regulação do ciclo de nutrientes.

A regulação hídrica destacou-se em grande parte dos estudos, principalmente aqueles com foco em regiões de florestas ripárias e bacias hidrográficas, essenciais para a qualidade da água e o controle de inundações (Benez-Secanho et al., 2022; Wang et al., 2022).

O sequestro de carbono foi abordado em regiões com florestas tropicais e temperadas, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (Root-Bernstein e Svenning, 2017; Morán-Ordóñez et al., 2021; Von Thaden et al., 2023). O controle de erosão e proteção do solo foram relevantes em áreas montanhosas e agrícolas, como no México e pradarias canadenses (Balbuena-Serrano et al., 2022; Pashanejad et al., 2024). Serviços culturais e recreativos, como ecoturismo e observação de aves, foram mencionados em regiões com alto potencial turístico (de la Fuente et al., 2018; Moran-Ordóñez et al., 2021).

A relação entre os serviços ecossistêmicos e as regiões de estudo indica que a conectividade da paisagem impacta diretamente a provisão de serviços específicos, dependendo das características ecológicas e socioeconômicas locais. A influência das regiões nos serviços ecossistêmicos abordados reflete as necessidades e desafios de cada área, como a regulação hídrica em locais com escassez de água ou o sequestro de carbono em regiões muito fragmentadas.

Os estudos mostraram grande integração entre a modelagem de conectividade e a provisão de serviços ecossistêmicos, bem como a inclusão de políticas públicas e participação

comunitária. A implementação de programas de PSA e a consideração dos custos de oportunidade indicam uma preocupação crescente em alinhar conservação com desenvolvimento sustentável (Viani et al., 2018; Wood et al., 2020). A resposta às mudanças climáticas é outro aspecto enfatizado, com estudos destacando o impacto das alterações climáticas na conectividade e na provisão de serviços ecossistêmicos, indicando a necessidade de incorporar cenários futuros nas análises (Baumbach et al., 2022). Isso pode ter influência nos estudos futuros com conectividade, pois modelos para simulações subsidiam tomadas de decisões importantes quanto a ações governamentais ou até mesmo privadas de planejamento na conservação, compensação ambiental e programas de PSA (Leija e Mendoza, 2021).

#### **2.4. Conclusão**

A revisão sistemática realizada neste trabalho proporcionou uma visão abrangente sobre o uso de modelos de conectividade nas pesquisas encontradas na base de dados *Web of Science*, identificando 41 artigos, dos quais 26 foram selecionados para análise profunda. Embora o uso de uma única base de dados e a seleção restrita de artigos representem limitações, a análise detalhada dos métodos, parâmetros e serviços ecossistêmicos permitiu a elaboração de uma síntese valiosa e que pode ser disponibilizada integralmente em material suplementar. Além disso, a descrição dos *softwares* utilizados em diferentes regiões serve como um recurso importante para pesquisadores, facilitando a escolha de ferramentas apropriadas para diversos contextos.

Entre todas as pesquisas identificadas notou-se um aumento no número de publicações ao longo dos anos, evidenciando a relevância do tema na comunidade científica, com a maioria dos autores oriundos da China, Estados Unidos e Brasil. Entre os artigos incluídos, o Brasil destacou-se pelo maior número de regiões estudadas, especialmente no bioma Mata Atlântica; no entanto, apesar de sua rica biodiversidade e vasta extensão territorial, ainda não explora plenamente seu potencial ecológico. Também destacamos a importância dos modelos de conectividade na avaliação de serviços ecossistêmicos, influenciados pelas necessidades locais de conservação e características dos ecossistemas regionais.

Há uma tendência crescente no uso de modelagem de custo mínimo e de *softwares* como Circuitscape e Linkage Mapper, integrados a ferramentas de priorização como Marxan e Prioritizr, para identificar áreas prioritárias para conservação e restauração, alinhadas às políticas públicas em avanço. Observou-se uma evolução na interação entre conectividade e

serviços ecossistêmicos, com destaque para o crescente uso do *software* InVEST, que integra a modelagem de conectividade com a quantificação de SE, facilitando análises multifuncionais e apoiando decisões de planejamento com foco em serviço ecossistêmico de interesse.

Os modelos de conectividade demonstram grande potencial para a priorização de áreas e desenvolvimento de políticas, como PSA, essenciais para a gestão sustentável de serviços ecossistêmicos diretamente influenciados pela conectividade, como regulação hídrica, sequestro de carbono e manutenção da biodiversidade. No entanto, alguns serviços foram pouco mencionados e possuem sinergia com a conservação da biodiversidade, como serviços de provisão e culturais, sugerindo a necessidade de ampliar o escopo dos estudos para refletir os benefícios da conectividade (Root-Berstein et al., 2017; de La Fuente et al., 2018; Viani et al., 2018; Salviano et al., 2021; Morán-Ordóñez et al., 2022). Além disso, desafios na modelagem de grandes áreas devido à complexidade ecológica, limitações tecnológicas e de disponibilidade de dados dificultam análises mais precisas, e a falta de padronização nos métodos e parâmetros empregados torna a comparação entre estudos desafiadora. Alguns estudos, embora poucos, mostram a importância em incorporar projeções de cenários futuros e mudanças climáticas, que é essencial para aumentar a eficácia das recomendações a longo prazo e apoiar estratégias de adaptação.

### **Referências Bibliográficas**

AKIM, É. K. et al. Indicadores de sustentabilidade: a evolução do conhecimento na área da administração pública entre 1990 e 2016. **Research in Business and Management**, v. 23, n. 1, 1 Jun. 2020.

BALBUENA-SERRANO, Á. et al. Connectivity of priority areas for the conservation of large carnivores in northern Mexico. **Journal for Nature Conservation**, v. 65, p. 126116, Feb. 2022.

BAUMBACH, L. et al. Climate change may induce connectivity loss and mountaintop extinction in Central American forests. **Commun Biol** 4, p. 1–13. 2021.

BEITA, C. M.; MURILLO, L. F. S.; ALVARADO, L. D. A.. Ecological corridors in Costa Rica: An evaluation applying landscape structure, fragmentation-connectivity process, and climate adaptation. **Conservation Science and Practice**, v. 3, n. 8, p. e475, 2021.

BENEZ-SECANHO, F. J. et al. Trade-offs Between the Value of Ecosystem Services and Connectivity Among Protected Areas in the Upper Chattahoochee Watershed. **Environmental Management**, v. 69, n. 5, p. 937–951, May 2022.

BERGER-TAL, O.; SALTZ, D. Invisible barriers: anthropogenic impacts on inter- and intra-specific interactions as drivers of landscape-independent fragmentation. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, v. 374, n. 1781, p. 20180049, 16 Sep. 2019.

BRASIL, M. Pagamentos por Serviços Ambientais na Mata Atlântica: Lições aprendidas e desafios. 2011.

BUTER, R. K.; RAAN, A. F. J. Identification and analysis of the highly cited knowledge base of sustainability science. **Sustainability Science**, 24 Aug. 2012.

CHAZDON, R. L. Towards more effective integration of tropical forest restoration and conservation. **Biotropica**, v. 51, n. 4, p. 463–472, Jul. 2019.

Conexão Mata Atlântica; PROJETO RECUPERAÇÃO E PROTEÇÃO DOS SERVIÇOS RELACIONADOS AO CLIMA E À BIODIVERSIDADE NO CORREDOR SUDESTE DA MATA ATLÂNTICA DO BRASIL; 2022. Disponível em: <https://conexaomataatlantica.mctic.gov.br/>. Acesso em: 16 de set. de 2023.

CRUZ, C. B. M.; VICENS, R. S.; SEABRA, V. S. Classificação orientada a objetos no mapeamento dos remanescentes da cobertura vegetal do bioma Mata Atlântica, na escala 1: 250.000. **Simpósio Brasileiro**, 2007.

DEGEFU, M. A. et al. Regional and urban heat island studies in megacities: A systematic analysis of research methodology. **Indoor and Built Environment**, v. 31, n. 7, p. 1775–1786, Aug. 2022.

DE LA FUENTE, B. et al. Natura 2000 sites, public forests and riparian corridors: The connectivity backbone of forest green infrastructure. **Land Use Policy**, v. 75, n. 75, p. 429–441, 2018.

ESTRADA-CARMONA, Natalia et al. Managing the farmscape for connectivity increases conservation value for tropical bird species with different forest-dependencies. **Journal of environmental management**, v. 250, p. 109504, 2019.

FAO. Ecosystem services and biodiversity, 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/ecosystems-services-biodiversity/en/>. Acesso em: 16 de set. de 2023.

DINIZ, Milena F. et al. Landscape connectivity modeling from the perspective of animal dispersal. **Landscape Ecology**, v. 35, p. 41-58, 2020.

DOSEN, J.; FORTIN, M.-J.; RABOY, B. E. Restoration Strategies to Improve Connectivity for Golden-Headed Lion Tamarins (*Leontopithecus chrysomelas*) in the Bahian Atlantic Forest, Brazil. **International journal of primatology**, v. 38, n. 5, p. 962–983, 2017.

FAGAN, M. E. et al. Targeted reforestation could reverse declines in connectivity for understory birds in a tropical habitat corridor. **Ecological Applications**, v. 26, n. 5, p. 1456–1474, Jul. 2016.

FISCHER, J.; LINDENMAYER, D. B. Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis. **Global Ecology and Biogeography**, v. 16, p. 265–280, 1 Jan. 2007.

FISCHER, T. Administração pública como área de conhecimento e ensino: a trajetória brasileira. **Revista de Administração de Empresas**, v. 24, n. 4, p. 278–288, 1984.

FORERO-MEDINA, G.; VIEIRA, M. V. Conectividade funcional e a importância da interação organismo-paisagem. **Oecologia Brasiliensis**, v. 11, n. 04, p. 493–502, 2007.

GILLAN, S. L.; KOCH, A.; STARKS, L. T. Firms and social responsibility: A review of ESG and CSR research in corporate finance. **Journal of Corporate Finance**, v. 66, p. 101889, 2021.

GOODWIN, B. J. Is landscape connectivity a dependent or independent variable?. **Landscape ecology**, v. 18, n. 7, p. 687–699, 2003.

GRANT, M. J.; BOOTH, A. A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. **Health information and libraries journal**, v. 26, n. 2, p. 91–108, 2009.

HANSKI, I. Habitat loss, the dynamics of biodiversity, and a perspective on conservation. **Ambio**, v. 40, n. 3, p. 248–255, 2011.

Hermoso, V., Cattarino, L., Linke, S., Kennard, M.J. Catchment zoning to enhance cobenefits and minimize trade-offs between ecosystem services and freshwater biodiversity conservation. **Aquat. Conserv. Mar. Freshwat. Ecosyst.** 28, 1004–1014, 2018.

HERRMANN, P. B.; NASCIMENTO, V. F.; FREITAS, M. W. D. DE. Sensoriamento Remoto Aplicado à Análise de Fogo em Formações Campestres: Uma Revisão Sistemática. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 74, n. 2, p. 437–458, 2022.

HUANG, Y.; LIAO, T.-J. An integrating approach of cellular automata and ecological network to predict the impact of land use change on connectivity. **Ecological Indicators**, v. 98, p. 149–157, 2019.

HUANG, X. et al. Constructing and optimizing urban ecological network in the context of rapid urbanization for improving landscape connectivity. **Ecological Indicators**, v. 132, p. 108319, 2021.

IIF - Institute of International Finance. Sustainable Finance Working Group Report: The Case for Simplifying Sustainable Investment Terminology. 2019. Disponível em: <https://www.iif.com/Portals/0/Files/content/IIF%20SFWG%20%20Growing%20Sustainable%20Finance.pdf>. Acesso em: 11 de out. de 2023

IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

Change. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/>>. Acesso em: 29 out. 2024.

JAMES, K. L.; RANDALL, N. P.; HADDAWAY, N. R. A methodology for systematic mapping in environmental sciences. **Environmental Evidence**, v. 5, n. 1, p. 7, 2016.

KONG, F. et al. Urban green space network development for biodiversity conservation: Identification based on graph theory and gravity modeling. **Landscape and Urban Planning**, v. 95, n. 1–2, p. 16–27, 2010.

KROSBY, M. et al. Ecological connectivity for a changing climate. **Conservation Biology**, v. 24, n. 6, p. 1686–1689, 2010.

LALIBERTÉ, Jérôme; ST-LAURENT, Martin-Hugues. Validation of functional connectivity modeling: The Achilles' heel of landscape connectivity mapping. **Landscape and Urban Planning**, v. 202, p. 103878, 2020.

LAMOUNIER, W. L. et al. Defining priority areas for conservation based on multispecies functional connectivity. **Biological Conservation**, v. 290, p. 110438, 2024.

LATAPÍ AGUDELO, M. A.; JÓHANNSDÓTTIR, L.; DAVIDSDÓTTIR, B. A literature review of the history and evolution of corporate social responsibility. **International Journal of Corporate Social Responsibility**, v. 4, n. 1, p. 1, Dec. 2019.

LEIJA, E. G.; MENDOZA, M. E. Estudios de conectividad del paisaje en América Latina: retos de investigación. **Madera y Bosques**, v. 27, n. 1, 2021.

LEWINSOHN, T. M.; PRADO, P. I. Quantas espécies há no Brasil. **Megadiversidade**, 2005.

LE PROVOST, Gaëtane et al. The supply of multiple ecosystem services requires biodiversity across spatial scales. **Nature ecology & evolution**, v. 7, n. 2, p. 236-249, 2023.

MA, J. et al. Global forest fragmentation change from 2000 to 2020. **Nat. Commun**, v. 14, p. 3752, 2023.

MACHADO, G. S. Santa Maria. CPRM. Disponível em: <[https://caminhosdaconservacao.org/wp-content/uploads/2023/05/Cartilha\\_Instituto\\_Caminhos\\_da\\_Conservacao%CC%A7a%CC%83o.pdf](https://caminhosdaconservacao.org/wp-content/uploads/2023/05/Cartilha_Instituto_Caminhos_da_Conservacao%CC%A7a%CC%83o.pdf)>. Acesso em: 16 de nov. de 2023

MAGUIRE, D. Y. et al. Landscape connectivity and insect herbivory: A framework for understanding tradeoffs among ecosystem services. **Global ecology and conservation**, v. 4, p. 73–84, 2015.

MARCHESI, V. S. Aplicação dos conceitos da ecologia de paisagem para a definição de hotspots de conservação e de conectividade entre o Complexo Cantareira e Nazaré Paulista. 2012.

MASTEALI, Sahar Heidari et al. Comparison between graph theory connectivity indices and landscape connectivity metrics for modeling river water quality in the southern Caspian sea basin. **Journal of Environmental Management**, v. 328, p. 116965, 2023.

MEDEIROS, F. A historiografia medieval portuguesa na viragem do milénio: análise bibliométrica (2000-2010) e representação taxonómica. 2014.

MIRANDA, L. DE S. et al. Combining connectivity and species distribution modeling to define conservation and restoration priorities for multiple species: A case study in the eastern Amazon. **Biological Conservation**, v. 257, p. 109148, 2021.

MITCHELL, M. G. E.; BENNETT, E. M.; GONZALEZ, A. Linking landscape connectivity and ecosystem service provision: current knowledge and research gaps. **Ecosystems**, v. 16, n. 5, p. 894–908, 2013.

MMA. Corredores Ecológicos. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/areas-protegidas/instrumentos-de-gestao/corredores-ecologicos.html>> Acesso em: 1 de dez de 2024.

MOHER, D. et al. Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA statement. **Annals of Internal Medicine**, v. 151, n. 4, p. 264–9, 2009.

MORÁN-ORDÓÑEZ, A.; HERMOSO, V.; MARTÍNEZ-SALINAS, A. Multi-objective forest restoration planning in Costa Rica: Balancing landscape connectivity and ecosystem service provisioning with sustainable development. **Journal of Environmental Management**, v. 310, p. 114717, 2022.

NAIMAN, R. J.; DECAMPS, H.; POLLOCK, M. The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity. **Ecological Applications**, v. 3, n. 2, p. 209–212, 1993.

NOBRE, P. Mudanças climáticas e desertificação: os desafios para o Estado Brasileiro. Desertificação e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. **Campina Grande: INSA-PB**, p. 25-36, 2011.

OGUH, C. E. et al. Ecosystem and ecological services; need for biodiversity conservation-a critical review. **Asian Journal of Biology**, v. 11, n. 4, p. 1-14, 2021.

ORTIZ, L. C.; ORTIZ, W. A.; SILVA, S. L. DA. Ferramentas alternativas para monitoramento e mapeamento automatizado do conhecimento. **Ciência da Informação**, v. 31, n. 3, p. 66–76, 2002.

PASHANEJAD, Ehsan et al. A functional connectivity approach for exploring interactions of multiple ecosystem services in the context of agricultural landscapes in the Canadian prairies. **Ecosystem Services**, v. 68, p. 101639, 2024.

QI, K.; FAN, Z.; XIE, Y. The influences of habitat proportion and patch-level structural factors in the spatial habitat importance ranking for connectivity and implications for habitat conservation. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 64, p. 127239, 2021.

RAMOS, D. L. et al. Forest and connectivity loss drive changes in movement behavior of bird species. **Ecography**, v. 43, n. 8, p. 1203–1214, 2020.

ROMA, J. C.; VIANA, J. P. Biodiversidade e serviços ecossistêmicos: temas indissociáveis e estratégicos para o desenvolvimento econômico, socialmente inclusivo e ambientalmente sustentável do Brasil. 2023.

ROOT-BERNSTEIN, M.; SVENNING, J.-C. Restoring connectivity between fragmented woodlands in Chile with a reintroduced mobile link species. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 15, n. 4, p. 292–299, 2017.

RUBIO, L. et al. Sustaining forest landscape connectivity under different land cover change scenarios. **Forest systems**, v. 21, n. 2, p. 223, 2012.

SALVIANO, I. R.; GARDON, F. R.; DOS SANTOS, R. F. Ecological corridors and landscape planning: a model to select priority areas for connectivity maintenance. **Landscape Ecology**, v. 36, n. 11, p. 3311–3328, 2021.

SPEAR, S. F. et al. Use of resistance surfaces for landscape genetic studies: considerations for parameterization and analysis. **Molecular Ecology**, v. 19, n. 17, p. 3576–3591, 2010.

STRASSBURG, B. B., Iribarrem, A., Beyer, H. L., Cordeiro, C. L., Crouzeilles, R., Jakovac, C. C., et al. Global priority areas for ecosystem restoration. **Nature**, 586(7831), 724-729, 2020.

TAMBOSI, L.R., SILVA, M.M., RODRIGUES, R.R. Adequação ambiental de propriedades rurais e priorização da restauração florestal visando otimizar o ganho de conectividade da paisagem. **In Conservação da Biodiversidade com SIG**, p.24-38. 2012.

TORRE, J. A. et al. Using elephant movements to assess landscape connectivity under Peninsular Malaysia's central forest spine land use policy. **Conservation Science and Practice**, v. 1, n. 12, 2019.

UEZU, A.; METZGER, J. P.; VIELLIARD, J. M. E. Effects of structural and functional connectivity and patch size on the abundance of seven Atlantic Forest bird species. **Biological conservation**, v. 123, n. 4, p. 507-519, 2005.

UROY, Léa et al. How to assess the temporal dynamics of landscape connectivity in ever-changing landscapes: a literature review. **Landscape Ecology**, v. 36, n. 9, p. 2487-2504, 2021.

VALENTE, R. A.; VANDERLEY, I.; MORALES, M. V.; GERMANO, A. D.; SOARES, F. et al. Índice de resistência da paisagem como critério para programas de conectividade funcional. **XX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2023.

VANDERLEY-SILVA, I.; VALENTE, R. A. Functional connectivity supported by forest conservation in urban sprawl landscape in São Paulo, Brazil. **GeoJournal**, v. 88, n. 3, p. 3011-3028, 2023.

VIANI, R. A. G. et al. Synergism Between Payments for Water-Related Ecosystem Services, Ecological Restoration, and Landscape Connectivity Within the Atlantic Forest Hotspot. **Tropical Conservation Science**, v. 11, 2018.

WANG, L. et al. Conservation priorities of forest ecosystems with evaluations of connectivity and future threats: Implications in the Eastern Himalaya of China. **Biological Conservation**, v. 195, p. 128–135, 2016.

WANG, S. et al. Integrating ecosystem services and landscape connectivity into the optimization of ecological security pattern: a case study of the Pearl River Delta, China. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 29, n. 50, p. 76051–76065, 2022.

WOOD, M. A.; GILBERT, J. A.; LACHER, T. E. Payments for environmental service's role in landscape connectivity. **Environmental conservation**, v. 47, n. 2, p. 89–96, 2020.

ZELLER, Katherine A.; MCGARIGAL, Kevin; WHITELEY, Andrew R. Estimating landscape resistance to movement: a review. **Landscape ecology**, v. 27, p. 777-797, 2012.

ZELLER, Katherine A. et al. Understanding the importance of dynamic landscape connectivity. **Land**, v. 9, n. 9, p. 303, 2020.

ZHANG, Q.; YU, Z.; KONG, D. The real effect of legal institutions: Environmental courts and firm environmental protection expenditure. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 98, p. 102254, 2019.

ZHOU, Guangjin et al. Constructing a multi-leveled ecological security pattern for improving ecosystem connectivity in the Asian water Tower region. **Ecological Indicators**, v. 154, p. 110597, 2023.

ZITER, C.; BENNETT, E. M.; GONZALEZ, A. Functional diversity and management mediate aboveground carbon stocks in small forest fragments. **Ecosphere**, v. 4, n. 7, p. 85, 2013.

## Apêndice 1

Resumo da análise detalhada dos 26 artigos incluídos contendo parâmetros e funcionalidades no desenvolvimento do modelo de conectividade e serviços ecossistêmicos abordados.

Autor/Ano	Modelo de Conectividade	Serviço Ecossistêmico
Rubio et al., 2012	<p>O estudo utilizou uma combinação de teoria de grafos e análise de menor custo implementada no <i>software</i> Conefor para avaliar a conectividade funcional de habitats florestais na Galícia, noroeste da Espanha. O foco foi no impacto de diferentes cenários de mudança no uso da terra sobre a conectividade do habitat do trepador-azul (<i>Sitta europaea</i>), uma espécie sensível à fragmentação. A métrica Probabilidade de Conectividade (PC) foi utilizada para quantificar a conectividade entre fragmentos de habitat, levando em consideração distâncias efetivas baseadas no custo de movimento entre os fragmentos. Foram avaliados sete cenários de mudanças de uso da terra, que incluíam conversões para agricultura intensiva, extensiva, áreas urbanas e regeneração natural. A análise identificou os principais conectores (fragmentos e corredores) que garantem a conectividade da espécie na paisagem.</p>	<p>O artigo destaca a conservação da biodiversidade, especialmente para o trepador-azul, como essencial para manter o fluxo gênico e a dispersão de espécies em habitats florestais. Além da biodiversidade, o estudo reconhece a importância da regulação hídrica e da proteção do solo proporcionadas pelos fragmentos florestais. A manutenção da conectividade do habitat ajuda a mitigar os impactos das mudanças climáticas e das alterações no uso da terra sobre os serviços ecossistêmicos dessas paisagens, promovendo resiliência ecológica em regiões com forte pressão de uso humano.</p>
Wang et al., 2016	<p>O estudo utilizou tanto a conectividade estrutural quanto funcional em seu modelo, para identificar e priorizar fragmentos florestais na região oriental do Himalaia, China. A análise foi baseada em métricas de conectividade da paisagem, utilizando o índice PC e a métrica delta de Probabilidade de Conectividade (dPC), que mede a variação na conectividade ao remover um fragmento de habitat. Essas métricas foram implementadas no <i>software</i> Conefor, permitindo avaliar a importância de cada fragmento para a conectividade geral da paisagem. O estudo também incluiu simulações de desmatamento até 2030, usando esses modelos para prever o impacto futuro nas florestas e priorizar as áreas mais ameaçadas para conservação.</p>	<p>As florestas na região do Himalaia oferecem serviços ecossistêmicos essenciais, como sequestro de carbono, regulação dos ciclos de nutrientes, provisão de madeira e produtos não madeireiros. A manutenção da conectividade dessas florestas é fundamental para garantir a continuidade desses serviços, particularmente para as comunidades que dependem dos recursos florestais. O estudo enfatiza que a conectividade funcional das paisagens florestais não só contribui para a conservação da biodiversidade, mas também assegura a resiliência ecológica necessária para manter esses serviços, mitigando os efeitos adversos do desmatamento futuro e das mudanças no uso da terra.</p>
Fagan et al., 2016	<p>O artigo utiliza uma combinação de modelos de conectividade baseados em grafos e análise de menor custo, implementados pelos <i>softwares</i> Graphab 1.2 e Linkage Mapper, para modelar a conectividade funcional de quatro espécies de</p>	<p>O estudo destaca a restauração de habitats como forma de conservar a biodiversidade, em particular as aves sensíveis à fragmentação, e de promover serviços ecossistêmicos, como a regulação hídrica e o armazenamento de</p>

	aves insetívoras de sub-bosque na região do Corredor Biológico San Juan–La Selva, na Costa Rica. O modelo considerou cenários de uso da terra com diferentes distâncias máximas de voo das aves e a resistência do terreno, com base em tipos de cobertura do solo, como florestas nativas e plantações de árvores exóticas. O índice PC foi utilizado para medir a conectividade funcional, levando em consideração a dispersão das aves entre os fragmentos florestais.	carbono. A manutenção da conectividade garante a continuidade de programas de Pagamento por Serviços Ambientais, mostrando como a restauração ecológica pode apoiar a biodiversidade e contribuir para a proteção dos serviços hídricos e mitigação das mudanças climáticas, fortalecendo iniciativas de conservação a longo prazo.
Dosen et al., 2017	Este estudo utilizou o <i>software</i> Linkage Mapper para calcular os caminhos de menor custo entre fragmentos de habitat, bem como o Conefor para avaliar a conectividade funcional na Mata Atlântica no sul da Bahia, Brasil. A funcionalidade do modelo foi caracterizada através do mico-leão-de-cara-dourada ( <i>Leontopithecus chrysomelas</i> ), uma espécie sensível à fragmentação. A conectividade foi mensurada usando o índice PC e a Área Conectada Equivalente (ECA), permitindo a comparação de diferentes cenários de restauração florestal, variando de 5% a 20% de área restaurada, e avaliando as estratégias de restauração dentro e entre propriedades. O estudo também investigou a importância de restaurar florestas ripárias como corredores de dispersão e a adição de pontes de copa ao longo de rios para aumentar a conectividade.	A restauração da conectividade funcional visa principalmente à conservação da biodiversidade, facilitando a dispersão e o fluxo gênico de espécies. Além disso, a restauração de florestas ripárias foi considerada crucial para garantir a regulação hídrica, essencial para a proteção dos recursos hídricos locais. Esses corredores ripários são fundamentais não apenas para manter a biodiversidade, mas também para restaurar serviços ecossistêmicos, como a mitigação de erosão e a proteção da qualidade da água, promovendo a sustentabilidade ecológica da região.
Root-Bernstein; Svenning et al., 2017	No artigo, o modelo de conectividade empregado foi baseado na análise de caminhos de menor custo para conectar fragmentos de florestas no Chile. A reintrodução dos guanacos ( <i>Lama guanicoe</i> ) foi proposta como uma espécie-chave para melhorar a conectividade entre fragmentos florestais, atuando como dispersores de sementes e facilitadores da regeneração florestal. A análise utilizou dados do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), da Produção Primária Líquida (NPP) e da Evapotranspiração (ET), derivados de imagens MODIS, para identificar áreas de alta e baixa qualidade ao longo dos anos de 2000 a 2013. As rotas de menor custo foram modeladas para simular os movimentos transumantes dos guanacos entre esses fragmentos, baseando-se nas condições ecológicas.	O estudo destaca a importância dos guanacos como dispersores de sementes e facilitadores da regeneração florestal, conectando áreas fragmentadas e promovendo a biodiversidade e resiliência ecológica em habitats semiáridos degradados. A restauração dessas áreas também contribui para a regulação hídrica e o armazenamento de carbono, essenciais para a sustentabilidade ecológica de ecossistemas sob pressão climática. Além disso, a recuperação das florestas apoia a sustentabilidade agrícola e melhora a qualidade de vida das populações locais que dependem desses recursos.
de la Fuente et al., 2018	No artigo, o modelo de conectividade utilizado foi baseado em uma combinação de análises de	Os serviços ecossistêmicos analisados incluem a conservação da biodiversidade,

	<p>grafos e modelagem de menor custo para avaliar a conectividade florestal na rede Natura 2000 na Espanha continental. O estudo usou o <i>software</i> Conefor para calcular a métrica PC e o Linkage Mapper para mapear os caminhos de menor custo entre os fragmentos de habitat. A análise identificou corredores ecológicos prioritários para a conservação e restauração, considerando cenários de uso da terra e focando em florestas públicas e ripárias como elementos-chave de infraestrutura verde. Além disso, o estudo avaliou os gargalos de conectividade, destacando os corredores mais críticos e as áreas prioritárias para intervenções de restauração.</p>	<p>particularmente de aves e mamíferos que dependem da conectividade funcional entre os fragmentos de habitat para garantir o fluxo genético e a resiliência das populações. Além disso, a conectividade das florestas e corredores ripários é fundamental para a provisão de recursos naturais, regulação hídrica e oportunidades de ecoturismo, promovendo um equilíbrio entre a conservação ambiental e o desenvolvimento socioeconômico sustentável nas comunidades locais</p>
Viani et al., 2018	<p>O estudo utilizou <i>softwares</i> como ArcGIS, LSMetrics no GRASS GIS e R para realizar as análises de conectividade funcional e estrutural em áreas restauradas da Mata Atlântica, no sudeste do Brasil. O estudo mediu a conectividade considerando diferentes capacidades de dispersão de aves locais (20, 40 e 60 metros), avaliando como as ações de restauração florestal promovidas pelo Programa Conservador das Águas influenciaram a conectividade da paisagem. A conectividade foi quantificada por meio do aumento de áreas florestais conectadas funcionalmente, permitindo uma avaliação detalhada dos impactos da restauração.</p>	<p>Os serviços ecossistêmicos abordados incluíram a proteção dos recursos hídricos e a regulação hídrica, destacando como o programa de PSA foi eficaz na restauração florestal em áreas ripárias e nascentes. Além da regulação hídrica, o estudo ressalta a sinergia entre a restauração e a conservação da biodiversidade, com a criação de corredores ecológicos que melhoraram a conectividade funcional e estruturaram a paisagem. Essa abordagem demonstrou a eficácia do PSA tanto para a proteção de ecossistemas quanto para a melhoria da qualidade de vida das comunidades locais.</p>
Huang et al., 2019	<p>O artigo utilizou um modelo de conectividade funcional que integrou redes neurais artificiais (ANN) com autômatos celulares (CA) e a modelagem de menor custo para simular a dinâmica da paisagem e prever os impactos das mudanças no uso da terra na conectividade. O estudo foi aplicado na área da Barragem das Três Gargantas, na China, e focou em mamíferos florestais de diferentes tamanhos e habilidades de dispersão. O <i>software</i> Linkage Mapper foi usado para identificar os caminhos de menor resistência para o movimento das espécies, enquanto o Conefor 2.6 foi empregado para calcular métricas de conectividade, como o índice PC. As simulações também consideraram diferentes cenários de expansão urbana e projeções futuras para entender a perda de conectividade.</p>	<p>Os serviços ecossistêmicos discutidos no estudo incluem a conservação da biodiversidade, destacando a importância da conectividade para manter o fluxo gênico e facilitar processos ecológicos, como a dispersão de sementes. Além disso, a conectividade florestal contribui para o sequestro de carbono, o controle de inundações e a provisão de habitats, mitigando os impactos negativos da urbanização e das mudanças no uso da terra da região.</p>
Estrada-Carmona et al., 2019	<p>No artigo, o modelo de conectividade funcional foi desenvolvido pelo <i>software</i> Circuitscape, aplicado para avaliar a mobilidade de cinco espécies de aves neotropicais com diferentes</p>	<p>O estudo destaca a importância da conservação da biodiversidade, especialmente no que diz respeito à conectividade funcional, que facilita a dispersão das espécies em</p>

	<p>dependências florestais. A análise foi realizada na paisagem agrícola de Turrialba, Costa Rica. O Circuitscape foi utilizado para estimar as probabilidades de movimentação das aves e a resistência relativa ao deslocamento em diferentes cenários de manejo agrícola, como o aumento da densidade de árvores nas agroflorestas de café e cercas vivas multiestrata. A conectividade também utilizou parâmetros com base nas características da paisagem, considerando a configuração do uso da terra e a diversidade de habitats.</p>	<p>paisagens fragmentadas. Além disso, a conectividade melhorada foi associada a serviços ecossistêmicos como controle de pragas e polinização, fornecidos por organismos móveis. Práticas de manejo agrícola, como o aumento da densidade e diversidade de árvores, foram identificadas como formas eficazes de beneficiar tanto a conservação da biodiversidade quanto a produtividade agrícola, contribuindo para serviços ecossistêmicos que suportam a sustentabilidade dos sistemas agroflorestais.</p>
de la Torre et al., 2019	<p>O artigo utilizou dados de movimentação de elefantes asiáticos para avaliar a conectividade funcional na Península da Malásia, empregando GPS de 53 indivíduos. A análise combinou modelos de função de seleção de passos (SSF) para calcular a resistência da paisagem com modelagem de menor custo e teoria de circuitos, utilizando os <i>softwares</i> Linkage Mapper e Circuitscape 4.0. A resistência da paisagem foi modelada para prever os caminhos de menor custo e os fluxos de corrente, identificando os fragmentos de habitat e corredores mais importantes para a conectividade dos elefantes. O estudo ainda comparou a eficiência dos 28 corredores ecológicos planejados pelo Central Forest Spine (CFS), destacando áreas prioritárias para a conectividade.</p>	<p>Os principais serviços ecossistêmicos associados ao estudo incluem a conservação da biodiversidade, regulação hídrica e proteção do solo. A conectividade entre os corredores ecológicos é essencial para a preservação dos elefantes e dos ecossistemas florestais da Malásia, contribuindo também para a sustentabilidade das comunidades locais. A conectividade funcional mantida entre os principais blocos florestais da Península assegura o fluxo gênico de espécies e resiliência ecológica.</p>
Ramos et al., 2020	<p>O estudo utiliza um modelo de conectividade funcional que integra o comportamento de movimento das aves com a estrutura da paisagem fragmentada na Mata Atlântica. Implementado usando o <i>software</i> R e MaxEnt, o modelo analisou como a perda de conectividade florestal afeta o movimento de 73 espécies de aves florestais. Foram utilizados <i>Joint Species Movement Models</i> (JSMM) que incorporam variáveis da paisagem (cobertura florestal, fragmentação, isolamento) e características das espécies (dieta, massa corporal) para prever padrões de movimento. O modelo simulou o uso de fragmentos de floresta e árvores isoladas como <i>stepping-stones</i> para manter a conectividade funcional.</p>	<p>Os serviços ecossistêmicos avaliados incluíram a dispersão de sementes por aves frugívoras, essencial para a regeneração florestal, e o controle biológico de insetos por aves insetívoras, contribuindo para o equilíbrio ecológico em paisagens fragmentadas. A perda de conectividade estrutural compromete a provisão desses serviços, destacando a importância de corredores ecológicos para a funcionalidade da paisagem.</p>
Wood et al., 2020	<p>Neste estudo o modelo de conectividade funcional foi desenvolvido pelo <i>software</i> Circuitscape, aplicado para analisar a conectividade da paisagem no Corredor Biológico Paso de las Nubes, Costa Rica. A análise considerou superfícies de resistência e a</p>	<p>O estudo destaca a importância dos PSA na conservação da biodiversidade, ao incentivar proprietários de terras a preservar e restaurar florestas, promovendo a regulação hídrica e o desenvolvimento de práticas agroflorestais sustentáveis. A conectividade das áreas</p>

	<p>densidade de corrente para modelar o movimento das espécies e identificar caminhos de menor custo. A avaliação focou-se em áreas antes e depois da implementação do Programa Nacional de Corredores Biológicos (NBCP) e de programas de PSA. A combinação das análises permitiu identificar áreas críticas com alta densidade de corrente, conhecidas como "gargalos", que são essenciais para manter a conectividade da paisagem.</p>	<p>florestais, facilitada pelo PSA, contribuiu para a manutenção de serviços ecossistêmicos, como o sequestro de carbono, a provisão de habitats e o suporte econômico para as comunidades locais, criando sinergias entre conservação e desenvolvimento sustentável.</p>
<p>Baumbach et al., 2021</p>	<p>No artigo, o modelo de conectividade baseia-se na projeção de como as mudanças climáticas impactam a adequação ambiental para os principais tipos funcionais de plantas (<i>Plant Functional Types</i> - PFTs) nas florestas da América Central. O estudo utilizou Modelos de Distribuição de Espécies Empilhados (<i>Stacked Species Distribution Models</i> - SSDMs) para avaliar as áreas adequadas sob diferentes cenários climáticos. A conectividade foi analisada com base na fragmentação de habitats e nas perdas de conectividade estrutural, especialmente em áreas montanhosas, onde as mudanças de elevação podem resultar em extinções de espécies no topo das montanhas. Foram utilizadas métricas de fragmentação, como interior, borda, transição e áreas perfuradas, para medir o grau de desconexão e gargalos de conectividade. Além disso, o estudo identificou áreas de transição entre tipos florestais e apontou regiões onde os habitats se tornam mais isolados.</p>	<p>Os serviços ecossistêmicos destacados incluem a regulação climática e o sequestro de carbono, essenciais para mitigar os impactos das mudanças climáticas. O estudo também destacou a importância de manter corredores ecológicos e áreas protegidas para garantir a conectividade e reduzir os riscos de extinção em habitats isolados, especialmente para as espécies que migram para altitudes mais elevadas em resposta ao aquecimento global.</p>
<p>Miranda et al., 2021</p>	<p>Neste estudo, conduzido na Amazônia Oriental, o modelo de conectividade foi utilizado para identificar áreas prioritárias para conservação e restauração. O modelo baseou-se no Fluxo de Movimento das Espécies (MF), utilizando a teoria dos circuitos e processado no <i>software</i> Circuitscape para avaliar o fluxo de espécies em cenários de fragmentação e mudança climática. Também foi utilizado a Adequação de Habitat (HS), com Modelos de Distribuição de Espécies (SDM), aplicado para 603 espécies de abelhas, aves e morcegos, através do <i>software</i> R. Esta abordagem combinada identificou áreas críticas para a restauração e conservação no Mosaico de Carajás, destacando a importância da conectividade funcional entre fragmentos de habitat.</p>	<p>A conectividade funcional foi vista como essencial para a manutenção de serviços ecossistêmicos, como a polinização, dispersão de sementes e controle biológico, especialmente para espécies de abelhas, aves e morcegos, que desempenham funções críticas na provisão desses serviços. A restauração florestal foi simulada em cenários de incremento de florestas, e o <i>software</i> Conefor foi utilizado para calcular o Índice Integral de Conectividade (IIC), identificando as áreas mais relevantes para aumentar a conectividade entre fragmentos florestais e assegurar a continuidade dos serviços ecossistêmicos na região.</p>
<p>Salviano et al., 2021</p>	<p>O artigo utiliza um modelo de conectividade funcional focado na criação e priorização de</p>	<p>Os serviços ecossistêmicos abordados no estudo incluem a regulação do ciclo da água,</p>

	<p>corredores ecológicos ripários para melhorar a conectividade da paisagem na Mata Atlântica, no estado de São Paulo. O modelo foi implementado no <i>software</i> ArcGIS, onde as superfícies de resistência foram construídas com base no movimento de pequenos mamíferos, como roedores e marsupiais, sensíveis à fragmentação. O <i>software</i> foi usado para modelar os caminhos de menor custo (<i>Least Cost Path</i> - LCP) e identificar os corredores ecológicos mais adequados para conectar fragmentos de habitat, assegurando a conectividade funcional das áreas ripárias.</p>	<p>prevenção da erosão do solo e manutenção da biodiversidade. A restauração das zonas ripárias pode melhorar a provisão desses serviços. Além disso, o estudo enfatiza que os corredores ecológicos podem beneficiar as comunidades locais, protegendo ecossistemas que fornecem recursos essenciais, como água potável e proteção contra enchentes, particularmente em áreas rurais e ribeirinhas.</p>
<p>Qi et al., 2021</p>	<p>No artigo, o modelo de conectividade utilizado avalia tanto a conectividade estrutural quanto a funcional em habitats fragmentados na província de Fujian, China, focando no movimento de aves florestais entre os fragmentos. O estudo usa o <i>software</i> Conefor para calcular métricas como PC, IIC e <i>Landscape Coincidence Probability</i> (LCP). Além disso, aplicou-se o modelo de menor custo para calcular caminhos de menor resistência e avaliar o impacto da remoção de fragmentos específicos na conectividade geral da paisagem. O estudo analisou três fatores estruturais principais (tamanho, forma e posição dos fragmentos) para classificar sua importância na manutenção da conectividade da paisagem.</p>	<p>Quanto aos serviços ecossistêmicos, o estudo destacou a importância da conectividade para processos ecológicos, como fluxo gênico e dispersão de espécies, o que contribui para a resiliência ecológica e a preservação da biodiversidade em paisagens fragmentadas.</p>
<p>Balbuena-Serrano et al., 2022</p>	<p>No artigo, foi utilizado um modelo de conectividade funcional com superfícies de resistência baseadas na probabilidade de presença de grandes carnívoros (jaguar, puma e urso-negro), refletindo a dificuldade de deslocamento dessas espécies na paisagem do norte do México. O <i>software</i> Linkage Mapper foi empregado para identificar corredores de menor custo, conectando áreas centrais prioritárias de habitat. Foram aplicadas análises de centralidade para avaliar a importância relativa das áreas e dos corredores, enquanto o módulo Pinch-point Mapper identificou gargalos de conectividade que ameaçam a funcionalidade dos corredores.</p>	<p>Quanto aos serviços ecossistêmicos, o estudo destacou a manutenção da biodiversidade, com ênfase no papel regulador dos grandes carnívoros nas interações ecológicas e no controle de populações de presas, o que influencia diretamente a estrutura e funcionalidade dos ecossistemas. Além disso, a conservação desses corredores pode mitigar os impactos de atividades humanas, trazendo benefícios como programas de compensação e restauração ecológica, incluindo cruzamentos de fauna para reduzir atropelamentos e programas de PSA.</p>
<p>Wang et al., 2022</p>	<p>No estudo, o modelo de conectividade foi baseado no modelo de resistência mínima acumulada (MCR), aplicado para extrair corredores e nós ecológicos no Delta do Rio das Pérolas, uma das regiões mais densamente urbanizadas da China. A resistência foi calculada inversamente à qualidade do habitat, utilizando o <i>software</i> InVEST para estimar a</p>	<p>Os principais serviços ecossistêmicos abordados no estudo incluem a manutenção da biodiversidade, conservação de habitats e regulação hídrica, com especial ênfase nas zonas ripárias para controlar o fluxo de água e mitigar os impactos da urbanização. A otimização do padrão de segurança ecológica utilizada no estudo visa garantir a resiliência</p>

	<p>qualidade dos ecossistemas, como florestas, pastagens e corpos d'água, considerados como fontes ecológicas. O <i>software</i> ArcGIS foi utilizado para aplicar o módulo de conectividade de custo e identificar corredores ecológicos, com a otimização baseada em uma matriz de risco que avaliou a vulnerabilidade dos corredores com maior resistência e comprimento. "<i>Stepping stones</i>" também foram identificadas como pontos de conectividade para minimizar a fragmentação dos corredores.</p>	<p>ecológica a longo prazo, mantendo a conectividade funcional entre áreas ecologicamente importantes.</p>
<p>Morán-Ordóñez et al., 2022</p>	<p>No artigo o modelo de conectividade utiliza o Marxan, uma ferramenta de priorização espacial, para identificar áreas prioritárias de restauração florestal no Corredor Biológico Volcânica Central Talamanca, Costa Rica. A conectividade foi avaliada por meio de um índice que mede a conectividade relativa em cada cenário, comparando-a com a conectividade máxima teórica. Além do Marxan, o modelo InVEST foi utilizado para estimar a provisão de serviços ecossistêmicos, como dispersão de sementes, ecoturismo e sequestro de carbono. O estudo testou diferentes cenários de restauração, considerando custos de oportunidade, para analisar como esses custos influenciam a seleção de áreas prioritárias e a conectividade da paisagem restaurada.</p>	<p>Os principais serviços ecossistêmicos analisados foram dispersão de sementes, ecoturismo (observação de aves) e sequestro de carbono. A dispersão de sementes foi modelada com base na distribuição de 62 espécies de aves frugívoras, enquanto o potencial para ecoturismo foi estimado pela adequação do habitat dessas aves. A restauração florestal foi vista como uma estratégia para aumentar a provisão desses serviços, equilibrando conservação e desenvolvimento sustentável.</p>
<p>Benez-Secanho et al., 2022</p>	<p>No estudo, o modelo de conectividade foi desenvolvido e integrado a uma abordagem de otimização espacial com penalidades de fronteira, utilizando a ferramenta prioritizr, integrada ao solver Gurobi. O objetivo foi identificar áreas prioritárias para conservação, buscando maximizar a conectividade entre áreas protegidas na bacia hidrográfica do Alto Chattahoochee, localizada no estado da Geórgia, EUA. O modelo considerou diferentes cenários de conectividade entre as áreas protegidas, levando em consideração a resistência da paisagem e a relação com os serviços ecossistêmicos, como armazenamento de carbono, qualidade da água e habitat para a fauna, visando uma otimização eficiente da conectividade funcional da paisagem.</p>	<p>Os principais serviços ecossistêmicos abordados no estudo foram o armazenamento de carbono, a qualidade da água (retenção de sedimentos e nutrientes) e o habitat para a vida selvagem. Esses serviços são cruciais para a sustentabilidade ambiental da região, que fornece a maior parte da água potável para a área metropolitana. A integração da conectividade com os serviços ecossistêmicos foi vista como uma forma de aumentar a resiliência dos ecossistemas locais, melhorar a biodiversidade e mitigar os impactos das mudanças climáticas.</p>
<p>Zhou et al., 2023</p>	<p>O artigo aplica a modelagem MCR para melhorar a conectividade entre áreas prioritárias de conservação na região da "<i>Asian Water Tower</i>". O MCR avalia a resistência da paisagem ao movimento de espécies e fluxos ecológicos, considerando fatores como cobertura</p>	<p>Os serviços ecossistêmicos avaliados incluem a conservação da água, sequestro de carbono, fixação de areia, conservação do solo e da biodiversidade. Esses serviços foram modelados com o uso de ferramentas como o InVEST, para o sequestro de carbono, e o</p>

	<p>do solo, topografia e interferências humanas. O processo de Hierarquia Analítica (AHP) foi utilizado para atribuir pesos de resistência a diferentes fatores, como declividade e vegetação. A análise foi conduzida no <i>software</i> ArcGIS, gerando mapas de resistência e identificando corredores ecológicos que asseguram a ligação funcional entre áreas ecológicas críticas.</p>	<p>RUSLE, para a conservação do solo. O objetivo do estudo foi melhorar a estabilidade da conectividade funcional e estrutural dos ecossistemas, garantindo a provisão contínua desses serviços.</p>
Vanderley-Silva et al., 2023	<p>O artigo utiliza uma abordagem de Avaliação Multicritério (MCE) combinada com o método <i>Weighted Linear Combination</i> (WLC) em ambiente GIS para priorizar áreas de conservação florestal na Reserva da Biosfera do Cinturão Verde de São Paulo, Brasil, uma região sob intensa expansão urbana. Os critérios utilizados para modelar a conectividade funcional incluíram o Índice NDVI, Temperatura da Superfície Terrestre e Refletância Noturna, formando o índice de resistência da paisagem. A proximidade dos fragmentos florestais, da rede de drenagem, o Índice de Umidade Topográfica (TWI) e a declividade também foram considerados para gerar o mapa de áreas prioritárias.</p>	<p>O estudo destacou como principais serviços ecossistêmicos a manutenção da biodiversidade, dispersão de espécies, fluxo gênico entre habitats e regulação hídrica proporcionada pelas zonas ripárias. O trabalho sugere que as áreas identificadas pelo modelo podem ser elegíveis para programas de PSA, que já são implementados no Brasil, especialmente na Mata Atlântica. O modelo apoia a seleção de áreas para PSA, promovendo a restauração da paisagem e a provisão desses serviços ecossistêmicos em regiões vulneráveis à expansão urbana.</p>
Li et al., 2023	<p>O artigo utilizou a modelagem de menor custo combinado com o Índice de Conectividade Ecológica (ECI) e o Índice de Impacto de Barreira (BEI) para avaliar a conectividade funcional na região das Três Gargantas Paralelas, Yunnan, China. O <i>software</i> Conefor foi empregado para calcular a métrica PC, levando em consideração a resistência da paisagem. A análise focou na conectividade entre áreas centrais de reservas e considerou a mudança na paisagem entre 2000 e 2020 utilizando o macaco-de-nariz-arrebitado como espécie indicadora da integridade ecológica da região.</p>	<p>Os principais serviços ecossistêmicos avaliados incluem a conservação da biodiversidade e a regulação climática. A restauração e manutenção de corredores ecológicos desempenharam um papel crucial para a conservação de espécies ameaçadas. Além disso, o estudo destacou a importância da regulação hídrica e do armazenamento de carbono para a sustentabilidade ambiental na região de Yunnan.</p>
Pashanejad et al., 2024	<p>O estudo utiliza um modelo de conectividade funcional, baseado na construção de redes ecológicas que representam as interações entre áreas de provisão de serviços ecossistêmicos no contexto das paisagens agrícolas das pradarias canadenses. A conectividade foi definida pela proximidade geográfica e sobreposição espacial entre os serviços. Foram aplicados os modelos ARIES e InVEST para mapear os serviços, com a análise das redes realizada por meio da biblioteca networkX do Python. Esse modelo de conectividade foi desenvolvido para identificar</p>	<p>O estudo destacou a importância da restauração e preservação dos fragmentos florestais na promoção de serviços ecossistêmicos essenciais, como a captura de carbono e controle da erosão do solo, especialmente em regiões montanhosas. A conectividade entre fragmentos florestais melhora a biodiversidade e ajuda a mitigar os impactos da urbanização e das mudanças no uso da terra. Além disso, serviços como polinização, provisão de alimentos agrícolas e regulação hídrica em zonas úmidas são</p>

	<p>como diferentes tipos de cobertura do solo suportam ou inibem a provisão desses serviços, mapeando as áreas de maior interação entre eles e ajudando a definir zonas prioritárias para resiliência ecológica e provisão sustentável dos serviços ecossistêmicos na paisagem.</p>	<p>beneficiados por essas conexões, reforçando a interdependência entre a produção agrícola e a integridade ecológica da paisagem.</p>
<p>Lamounier et al., 2024</p>	<p>O artigo utiliza um modelo de conectividade funcional para identificar áreas prioritárias de conservação na Mata Atlântica, focando em aves e mamíferos. As superfícies de resistência foram baseadas em opiniões de especialistas, representando a dificuldade de movimentação das espécies. As simulações dos corredores ecológicos foram realizadas no <i>software</i> LSCorridors no GRASS GIS, usando algoritmos de menor custo para cada espécie individualmente. Foram geradas 100 simulações de rotas entre pares de áreas fonte e alvo para cada espécie, e o Índice de Frequência de Seleção de Rotas (RSFI) foi utilizado para identificar as rotas preferenciais e definir as áreas prioritárias.</p>	<p>O artigo visa preservar serviços ecossistêmicos essenciais, como dispersão de sementes, polinização e manutenção do fluxo gênico. Ao identificar áreas prioritárias de conservação e corredores ecológicos que conectam fragmentos de habitat, o modelo visa promover a continuidade desses serviços, essenciais para a biodiversidade e a resiliência da Mata Atlântica, mitigando os impactos da fragmentação do habitat e assegurando a integridade ecológica da região.</p>
<p>Von Thaden et al., 2024</p>	<p>No artigo o modelo de conectividade foi avaliado com o uso do <i>software</i> Fragstats para análise da conectividade estrutural da paisagem e do Graphab para calcular o Índice PC. O estudo foi realizado no México, onde foram simuladas três práticas inteligentes para o clima: a implementação de árvores isoladas, a recuperação de vegetação ripária e o uso de cercas vivas. Essas práticas foram modeladas para melhorar a conectividade funcional da paisagem, principalmente para espécies com limites curtos de deslocamento (50 a 100 m). As simulações demonstraram que a implementação dessas práticas obteve efeitos positivos na conectividade, com benefícios mais significativos observados quando há maior participação dos proprietários de terras.</p>	<p>O estudo destaca o potencial dessas práticas para aumentar o sequestro de carbono e promover a conectividade da paisagem. A recuperação de corredores ripários e cercas vivas também proporciona regulação hídrica, suporte à biodiversidade, e a captura de carbono, serviços essenciais em áreas com intensa atividade agrícola.</p>

### 3. CAPÍTULO 2

## Cenários de Restauração para Implementação de Pagamento por Serviços Ecossistêmicos Visando à Conservação da Biodiversidade

### RESUMO

A fragmentação da paisagem compromete a biodiversidade e a conectividade dos ecossistemas. Este estudo modelou cenários de restauração com base em programas de Pagamento por Serviços Ambientais, visando integrar benefícios ambientais. Foram analisados cenários de restauração utilizando áreas de baixa aptidão agrícola em pastagens dentro de propriedades rurais no Vale do Paraíba Paulista, São Paulo, Brasil. Utilizando dados de uso do solo e ferramentas SIG, foram modelados dois cenários de restauração. O cenário de restauração integral, utilizando todas as áreas de restauração, incrementou 27,35% na cobertura florestal e 31,85% na conectividade média, conectando fragmentos e criando novos habitats, com 134.498 ha restaurados. Já o cenário de restauração parcial, com a seleção das áreas de restauração, incrementou 72.182 ha de cobertura florestal, priorizando a ampliação de fragmentos maiores que 60 ha, aumentando a conectividade média em 26,82% e otimizando recursos. Ambos aumentaram áreas com conectividade muito alta e reduziram áreas de conectividade muito baixa, com a maior diferença em classes intermediárias de conectividade. O estudo destaca que as restaurações mediadas por Pagamento por Serviços Ambientais podem reduzir a fragmentação e fortalecer a sustentabilidade regional, servindo como subsídio para políticas públicas que alinhem conservação da biodiversidade e o combate às mudanças climáticas.

## ABSTRACT

Landscape fragmentation compromises biodiversity and ecosystem connectivity. This study modeled restoration scenarios based on Payment for Ecosystem Services programs, aiming to integrate environmental benefits. Restoration scenarios were analyzed using low natural agricultural suitability areas currently covered by pastures within rural properties in the Vale do Paraíba Paulista, São Paulo, Brazil. Using land use data and geographic information system tools, two restoration scenarios were modeled. The integral restoration scenario, which included all restoration areas, increased forest cover by 27.35% and average connectivity by 31.85%, connecting fragments and creating new habitats, with 134,498 hectares restored. The partial restoration scenario, focusing on selected restoration areas, increased forest cover by 72,182 hectares, prioritizing the expansion of fragments larger than 60 hectares, boosting average connectivity by 26.82% while optimizing resources. Both scenarios increased areas with very high connectivity and reduced areas with very low connectivity, with the most significant differences observed in intermediate connectivity classes. The study highlights that restorations facilitated by Payment for Ecosystem Services programs can reduce fragmentation and enhance regional sustainability, providing a basis for public policies that align biodiversity conservation with climate change mitigation.

### 3.1. Introdução

A fragmentação da paisagem representa um desafio para a conservação da biodiversidade e a provisão de serviços ecossistêmicos, comprometendo processos ecológicos essenciais e a conectividade funcional entre habitats (Spear et al., 2010).

No estado de São Paulo, Brasil, a intensificação do uso do solo, dominada pela agropecuária e expansão urbana, tem contribuído para a desconexão de habitats naturais e a perda de conectividade funcional (IBGE, 2022). Essa configuração reduz a resiliência dos ecossistemas e ameaça espécies sensíveis à perda de habitat e a funcionalidade da paisagem (Tambosi et al., 2014, Paise, Vieira e Prado, 2020).

Nesse contexto, programas de incentivo como os Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) emergem como instrumentos para promover a restauração de ecossistemas e incentivar práticas sustentáveis, ao integrar benefícios ecológicos e econômicos (Alexander et al., 2016; Bremer et al., 2016; Kroeger et al., 2019).

Esses programas oferecem suporte técnico e financeiro aos proprietários rurais, incentivando a restauração de áreas estratégicas que podem ampliar a cobertura de vegetação, mitigar processos erosivos e conectar fragmentos florestais, favorecendo a recuperação de serviços como regulação hídrica, sequestro de carbono e proteção da biodiversidade (Wunder, 2007; Taffarello et al., 2017).

Estudos demonstram que a implementação de práticas de restauração em áreas estratégicas, como áreas degradadas, margens de corpos d'água e zonas de recarga hídrica, não apenas recupera a cobertura vegetal, mas também contribui para a resiliência da paisagem em resposta a pressões antrópicas e mudanças climáticas (Rey Benayas et al., 2009; Brancalion et al., 2014). Com o incentivo de programas de PSA, essas iniciativas podem integrar múltiplos serviços ecossistêmicos, potencializando os benefícios obtidos com recursos financeiros (Strassburg et al., 2010; Wendland et al., 2010).

Programas para reduzir emissões de gases do efeito estufa associados ao desmatamento e a degradação florestal destacam a correlação entre a conservação da biodiversidade e o sequestro de carbono, sugerindo que esforços integrados podem reduzir a dívida de extinção e melhorar a funcionalidade dos ecossistemas (Strassburg et al., 2012).

Desta forma, a restauração ecológica mediada por PSA pode ser uma das ferramentas para mitigar os efeitos da fragmentação, quando facilita o restabelecimento de conexões funcionais entre fragmentos florestais e áreas de alto valor ecológico (Wood et al., 2020; Benez-Secanho et al., 2022).

Estratégias baseadas em modelagem de cenários de restauração podem identificar áreas prioritárias e quantificar os impactos potenciais de programas de PSA, proporcionando uma opção para o planejamento territorial e para a formulação de políticas públicas e privadas (Strassburg et al., 2010; Viani et al., 2018).

Mapear a conectividade da paisagem, integrando variáveis de permeabilidade das espécies e dados de uso e cobertura do solo, é essencial para entender como as áreas de intervenção podem contribuir para a conservação e reduzir a fragmentação da paisagem em cenários mais amplos. Além disso, tais análises permitem identificar propriedades rurais prioritárias para adesão a programas de PSA, considerando o potencial de restauração e os custos associados (Jones et al., 2020; Jardim e Bursztyn, 2015).

Desta forma, este estudo teve como objetivo principal modelar cenários de restauração e comparar os impactos no aumento de vegetação e conectividade em uma região estratégica, marcada pela fragmentação da paisagem e esforços em iniciativas de restauração, conhecida como Vale do Paraíba Paulista, no estado de São Paulo, Brasil.

Buscou-se identificar áreas de baixa aptidão agrícola em pastagens de propriedades rurais para restauração através do incentivo de programas de PSA, formulando cenários para avaliar o incremento de cobertura vegetal e conectividade. Além disso, as informações têm como propósito orientar o planejamento de políticas públicas, fornecendo subsídios para o alcance de metas de restauração e programas de PSA.

## **3.2. Material e Métodos**

### **3.2.1. Área de estudo**

O local de estudo foi o Vale do Paraíba Paulista (VPP), umas das 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI 02) do estado de São Paulo, sudoeste do Brasil (Figura 1). Compreende a porção paulista da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e da Baía da Ilha Grande, cobrindo aproximadamente 5% do estado (CBH-PS, 2021). A sua posição geográfica se destaca entre dois importantes centros urbanos, São Paulo e Rio de Janeiro, delimitada pelas Serras do Mar e da Mantiqueira, duas cadeias montanhosas que abrigam remanescentes significativos da Mata Atlântica.

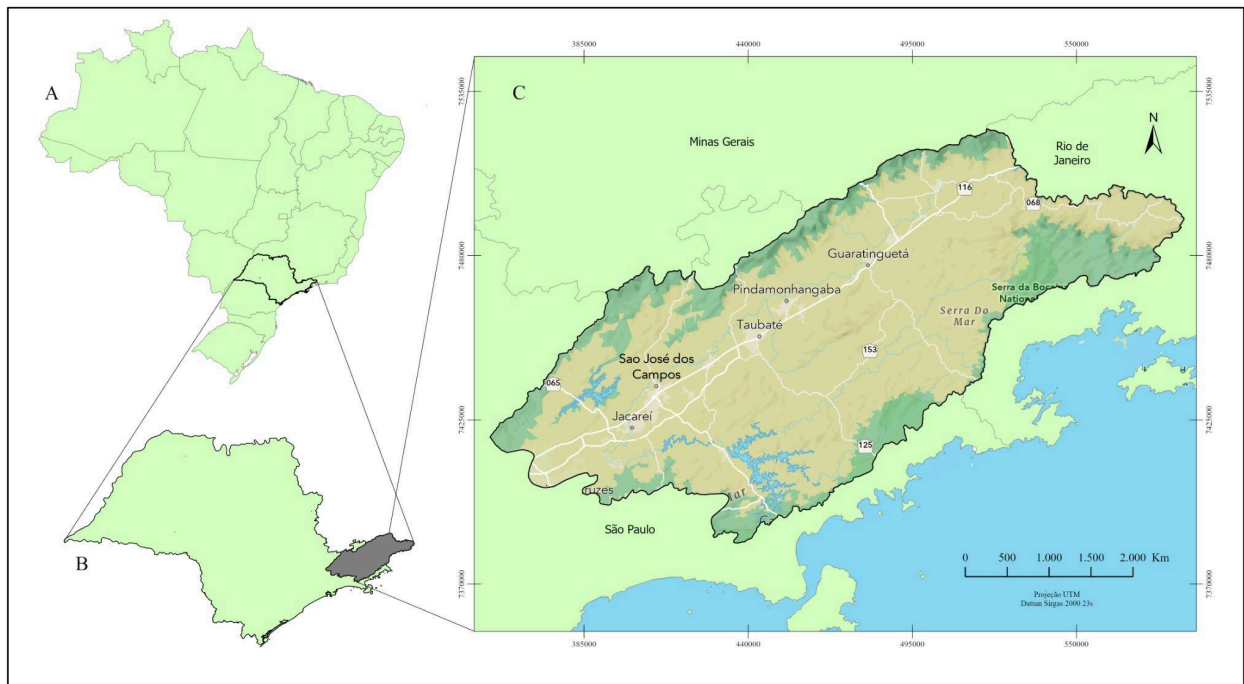


Figura 1. Local do estudo no Sudeste do Brasil (A), Estado de São Paulo (B), Bacia do Paraíba do Sul (C).

O rio Paraíba do Sul com os seus afluentes e as águas subterrâneas da bacia fornecem água e energia elétrica para mais de 2 milhões de habitantes em São Paulo, além de abastecer um grande polo industrial existente na região (Silva et al., 2016a). Na agricultura, destacam-se a produção de arroz e milho forrageiro, embora a maior parte do território seja ocupada por pastagens caracterizadas em sua maior parte por baixa produtividade (CBH-PS, 2021).

As áreas de mata nativa e eucalipto concentram-se nas regiões montanhosas e de maior declividade, enquanto as áreas urbanizadas estão localizadas nas planícies e próximas à infraestrutura principal, como a rodovia Presidente Dutra que conecta as grandes metrópoles São Paulo e Rio de Janeiro (Ronquim et al., 2016).

A dinâmica de desenvolvimento e uso de recursos naturais no VPP ao longo do tempo tem gerado implicações significativas para a sustentabilidade dos Serviços Ecosistêmicos na região. A expansão das áreas urbanizadas e industriais, juntamente com a predominância de pastagens e plantações de eucalipto, tem aumentado a pressão sobre os ecossistemas locais, resultando na fragmentação da paisagem, degradação do solo, erosão e assoreamento dos rios (REGEA, 2016; AGEVAP, 2020).

O VPP está inserido majoritariamente no domínio da Mata Atlântica, embora restam aproximadamente 30% de sua cobertura original. Apesar dessa área remanescente reduzida,

ela representa mais que o dobro da média nacional, onde apenas 14,5% da Mata Atlântica original persiste (CBH-PS, 2021).

Dentre as formações florestais presentes, a mais expressiva é a Floresta Ombrófila Densa, que se encontra tanto em estágio médio (3.381,98 km<sup>2</sup>) quanto em estágio avançado (640,39 km<sup>2</sup>), perfazendo juntas cerca de 83% da vegetação nativa da região. Outras formações espacialmente relevantes incluem a Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Ombrófila Mista, ambas em diferentes estágios de regeneração, e Refúgio Ecológico (Campos Rupestres) (IF, 2020).

O local de estudo abriga uma rica e endêmica biodiversidade, com 2.058 espécies registradas de fauna e flora, das quais 63 estão ameaçadas (SMA, 2011). Essa diversidade é protegida em 38 Unidades de Conservação, que cobrem aproximadamente 31% da área da bacia, sendo 12 de Proteção Integral e 26 de Uso Sustentável (CBH-PS, 2021). Entre as Unidades de Conservação de proteção integral, destacam-se a Estação Ecológica do Bananal, o Parque Estadual da Serra do Mar, o Parque Nacional da Serra da Bocaina, o Monumento Natural Estadual Mantiqueira Paulista e o Parque Estadual Itaberaba (CNUC, 2021).

Para mitigar os impactos ambientais gerados pela dinâmica de desenvolvimento e garantir a continuidade dos serviços ecossistêmicos, em destaque os valiosos serviços relacionados aos recursos hídricos da bacia, ações de incentivo à restauração ecológica têm sido implementadas no VPP (Lemos et al., 2023).

Dentre essas ações, destacam-se investimentos em projetos de restauração de áreas sem cobertura vegetal como áreas degradadas ou com potencial para processos erosivos, Áreas de Preservação Permanente (APPs) ao longo dos cursos d'água, nascentes e áreas de recarga hídrica, especialmente nas cabeceiras do rio paraíba do sul, como as regiões de Paraitinga e Paraibuna (Moraes et al., 2022).

Além disso, existe um estímulo que foca nas propriedades rurais, onde proprietários podem participar de programas de PSA voltados para a restauração e conservação de ecossistemas, com benefícios que incluem tanto incentivos financeiros quanto apoio técnico.

Um grande exemplo é o PSA Proteção, parte do projeto Conexão Mata Atlântica. Com uma meta de 1.300 contratos e 14.300 ha protegidos, o programa foca em garantir a continuidade dos serviços ecossistêmicos essenciais, como a proteção da biodiversidade, o aumento dos estoques de carbono e a melhoria da resiliência dos ecossistemas (São Paulo, 2019). O Programa Refloresta-SP e o Programa Nascentes reforçam os esforços de restauração ecológica e a recuperação de áreas prioritárias, contribuindo para a restauração de ecossistemas degradados e a manutenção dos serviços ecossistêmicos (São Paulo, 2024).

Iniciativas recentes com foco na conectividade ecológica e sustentabilidade na região da Mantiqueira são o Programa Conservador da Natureza em Pindamonhangaba e o Programa Renascentes de Jacareí (Conservador da Mantiqueira, 2023) e outros exemplos incluem o PSA Água Vale do Paraíba, com abrangência de 21 municípios, Projeto Mina D'Água que incentiva a recuperação de áreas degradadas com a participação de pequenos produtores, programa Mais Água e o Programa Produtor de Água com a recomposição de mata ciliares e nascentes (Brasil, 2011; Silva et al., 2017a).

Considerando o histórico de desenvolvimento do vale com a atual predominância de pastagens e áreas particulares, a baixa aptidão agrícola e a importância da região para a conservação da biodiversidade, sendo palco de diversas iniciativas, como o PSA, selecionamos esta área de estudo para desenvolver um cenário de restauração focado na recomposição de áreas incentivadas dentro de propriedades rurais da bacia.

### **3.2.2. Cenário Base e Cenários de Restauração**

O mapa base para a produção dos cenários foi a classificação de uso e cobertura do solo do Mapbiomas, ano de 2022, com resolução espacial de 10 metros (Mapbiomas, 2022). Os limites da área de estudo foram obtidos a partir da base de dados do Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SIGRH) do estado de São Paulo (SIGRH, 2024).

A coleção de 10 metros do Mapbiomas segue uma estrutura hierárquica de classes de uso e cobertura do solo organizada em três níveis. No Nível 1, as categorias abrangem Floresta, Formação Natural Não Florestal, Agropecuária, Área Não Vegetada e Corpo d'Água. Dentro dessas categorias, destacam-se as classes específicas presentes no VPP do nível 2 e 3, como Formação Florestal, Campo Alagado e Área Pantanosa, Afloramento Rochoso, Pastagem, Lavoura Temporária, Silvicultura, Mosaico de Usos, Área Urbanizada, Mineração, Outras Áreas não Vegetadas e Rio, Lago e Oceano.

O cenário base, anterior à restauração, caracteriza-se pelo estado da paisagem no ano de 2022, contendo todas as classes de uso e cobertura do solo presentes nos limites da área de estudo. Para os cenários de restauração, que considera as áreas restauradas via PSA, buscamos o incremento de vegetação dentro de propriedades rurais, tendo em vista que são responsáveis por 71% da área do VPP e da maior parte da perda da cobertura original (Silva et al., 2017a). As áreas particulares do vale podem complementar os esforços de conservação em áreas públicas, como unidades de conservação onde estão a maior parte dos remanescentes de Mata Atlântica, contribuindo para a proteção de habitats e a manutenção da conectividade entre fragmentos florestais (Schunck et al., 2022).

Utilizou-se como alvo para o cenário de restauração áreas de pastagem dentro de propriedades rurais presentes no Cadastro Ambiental Rural (CAR). As propriedades rurais utilizadas neste estudo baseiam-se nos dados gerados pelo projeto Biota-FAPESP Código Florestal, que refinou as geometrias das propriedades autodeclaradas no CAR até dezembro de 2019. Por meio de um modelo de posse de terra, os limites foram ajustados, integrando informações de diferentes bases fundiárias e eliminando conflitos espaciais, resultando em uma ferramenta estratégica para restauração em áreas de baixa aptidão agrícola (Mello et al., 2022).

Para representar áreas vulneráveis de pastagens e maior interesse ao proprietário e/ou produtor, utilizou-se apenas áreas de pastagem que possuem baixa aptidão agrícola, definidas como áreas incentivadas.

Essas áreas são candidatas ideais para a implementação de PSA, devido ao seu menor impacto na produção agrícola e à possibilidade de benefícios econômicos com a restauração florestal (Strassburg et al., 2014; Jones et al., 2020), além da compensação do custo de oportunidade associado aos serviços ecossistêmicos (Jardim e Bursztyn, 2015; Viani et al., 2018).

As áreas de baixa aptidão agrícola foram identificadas utilizando o índice de adequação agrícola *Cropping Suitability Index (Cropping SI)*, que combina variáveis de clima, solo e relevo, conforme metodologia proposta por Safanelli et al. (2023). Implementada no Google Earth Engine, essa abordagem permite a personalização de parâmetros para adequar o índice às necessidades da análise, como ajuste de camadas, pesos atribuídos a cada componente e definição de limiares de classificação.

O componente climático avalia limitações de estresses hídricos e térmicos com base em dados históricos de evapotranspiração e temperatura. O componente de solo reflete atributos físicos, químicos e biológicos, como carbono orgânico e capacidade de retenção de água, que afetam a qualidade para cultivo. Para o relevo, foi utilizada a declividade extraída do Modelo Digital de Elevação da NASA (disponível no Google Earth Engine), com ajustes para considerar a agregação média em resolução de 30 metros, considerando as restrições de declividade e terrenos montanhosos.

O método gera um mapa contínuo de aptidão agrícola em uma escala de 0 a 100. Para a definição de áreas de baixa aptidão agrícola, utilizamos a média entre os componentes, e um limiar de *Cropping SI* inferior a 50, indicando condições desfavoráveis à conversão de pastagens em práticas agrícolas. Essas áreas podem apresentar baixa fertilidade natural e alta acidez natural, drenagem deficiente, alta acidez, solo raso ou com restrições físicas,

precipitação irregular, temperaturas extremas e inclinações acima de 8% que dificultam a mecanização e aumentam a erosão, além de terrenos rochosos ou com obstáculos naturais.

Além disso, para aproximar o cenário de restauração às condições reais de projetos de PSA, realizou-se uma análise fundamentada em consultas com integrantes da Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística (SEMIL) do estado de São Paulo e na utilização de dados do programa de PSA Conexão Mata Atlântica. A partir dessas fontes, definiu-se um valor mínimo de área incentivada para restauração dentro de cada propriedade, com o objetivo de alinhar a modelagem do cenário à realidade prática de programas de PSA e retirar áreas incentivadas irrelevantes.

O critério estabelecido excluiu propriedades com menos de 1.000 m<sup>2</sup> (0,1 ha) de áreas incentivadas, já que essa medida reflete o tamanho das menores áreas de intervenção identificadas em dados do programa Conexão Mata Atlântica relacionadas à restauração. Como consequência, tanto as propriedades rurais quanto suas áreas incentivadas foram retiradas do cenário de restauração.

O cenário base representando o uso e cobertura do solo em 2022 e o cenário de restauração incorporando as áreas incentivadas como vegetação serão utilizados para quantificar o incremento de vegetação e conectividade que ações como o PSA podem alcançar neste contexto. Além disso realizou-se duas variações do cenário de restauração, um cenário de restauração integral, com todas as áreas incentivadas e um cenário de restauração parcial, com a seleção de áreas incentivadas que receberam o maior valor de conectividade, buscando a seleção de áreas incentivadas.

### **3.2.3. Fragmentos Fonte e Resistência da Paisagem**

A conectividade dos cenários foi avaliada por meio de uma modelagem de custo mínimo, considerando como alvo de conexão grandes fragmentos de habitat e a resistência da paisagem entre eles. Para embasar essa análise, realizou-se um levantamento de espécies de aves registradas nas cidades que compõem o VPP (Hasui et al., 2018). Dentre as espécies presentes na região, foram selecionadas aquelas com parâmetros funcionais disponíveis, como a área mínima de habitat, para subsidiar a definição dos fragmentos alvo de conectividade.

A dependência de determinadas aves em relação a ambientes florestais permite utilizá-las como indicadoras de como a biodiversidade responde à configuração da paisagem, especialmente no que diz respeito ao efeito do tamanho dos fragmentos e da conectividade na diversidade e na quantidade de espécies (Martensen et al., 2012).

Desta forma, definiu-se uma área mínima de vegetação, denominada fragmentos fonte, representando habitats capazes de sustentar populações de espécies em suas relações ecológicas. Esses fragmentos serão considerados pontos de entrada e saída de espécies no modelo de conectividade.

Para garantir a presença de espécies exigentes, como *Trogon surrucura*, foram selecionados fragmentos com mais de 60 ha (Uezu et al., 2005; Boscolo et al., 2006) como fragmentos fonte. Essa espécie, que habita o dossel de florestas tropicais, desempenha um importante papel como dispersora de sementes ao se alimentar predominantemente de frutos, porém também pode ir em busca de insetos (Willis, 1979; Stotz, 1996; Sick 1997; Pizo, 2007; Duca, 2023). A *Trogon surrucura* é uma espécie com baixa capacidade de atravessar áreas abertas, sensível à perda de habitat e mostra uma preferência clara por fragmentos que oferecem maior quantidade de recursos (Uezu et al., 2005), reforçando a importância de considerar grandes áreas como alvo de conexão.

A utilização de uma espécie que pode ser encontrada em fragmentos (sem a necessidade de florestas contínuas) e exige habitats extensos e conseqüentemente bem conservados, como a *Trogon surrucura*, também inclui outras espécies encontradas na região, tais como *Chiroxiphia caudata*, *Pyriglena leucoptera*, *Myiothlypis leucoblephara*, *Thamnophilus caerulescens* e *Basileuterus culicivorus* (Hofling, 1992; Hasui et al., 2018; Schunck et al., 2018).

Apesar de diferenças em atributos ecológicos da espécie, todas elas podem ser encontradas em fragmentos menores que 60 ha e se beneficiam dos fragmentos grandes. *Pyriglena leucoptera* e *Myiothlypis leucoblephara* são encontradas em fragmentos menores que 60 ha, mas sua abundância aumenta com a presença de corredores e trampolins. *Chiroxiphia caudata* e *Basileuterus culicivorus* demonstram adaptabilidade em pequenos fragmentos, sendo que a primeira depende fortemente da composição da matriz em sua abundância. *Thamnophilus caerulescens* apresenta boa adaptabilidade, mas obtém mais benefícios em fragmentos grandes e bem conectados (Uezu et al., 2005; Barbosa et al., 2017).

Para selecionar os Fragmentos Fonte (>60 ha) utilizou-se, além da classe de Formação Florestal (que abrange Floresta Ombrófila Densa e Mista, Floresta Estacional Semidecidual, Floresta Estacional Decidual e Formação Pioneira Arbórea) duas classes de Formação Natural não Florestal. Essas classes, que representam apenas 0,58% das classes de cobertura do vale, incluem áreas de Campo Alagado e Área Pantanosa (caracterizadas por vegetação influenciada por regimes fluviais ou lacustres) e Afloramentos Rochosos (compostos por

rochas expostas na superfície, frequentemente em terrenos de alta inclinação, com vegetação rupícola esparsa).

As Formações Naturais não Florestais são relevantes para a manutenção da biodiversidade e provisão de serviços ecossistêmicos, facilitando a interação ecológica com as Formações Florestais e apoiando a movimentação de espécies entre habitats fragmentados (Brockerhoff et al., 2017). Mesmo com baixa representatividade na cobertura do VPP, áreas como essas sustentam uma flora adaptada e diversa, que contribui significativamente para a conectividade e a diversidade geral, importante nas interações ecológicas entre as formações florestais e habitats fragmentados (Ribeiro et al., 2007).

Com a área mínima e as classes de cobertura do solo definidas utilizamos o *software* ArcGIS Pro para a etapa de agrupamento dos fragmentos. A ferramenta *Region Group* foi aplicada para identificar os fragmentos conectados em todas as direções (horizontal, vertical e diagonal), atribuindo um identificador único a cada fragmento. Posteriormente, foram calculadas as áreas de cada fragmento, selecionando os maiores de 60 ha.

Com os fragmentos fonte identificados, foi gerado um raster binário, no qual os valores 1 representam os fragmentos fonte e 0 as áreas não classificadas como fragmentos fonte. Esse raster foi importado no Google Earth Engine para a modelagem de conectividade. Nesta etapa, as informações espaciais dos fragmentos fonte foram integradas ao mapa de resistência da paisagem, com base em pesos atribuídos às diferentes classes de uso e cobertura do solo, refletindo sua permeabilidade ao deslocamento das espécies sensíveis entre os fragmentos (Tabela 1).

Tabela 1. Pesos de resistência das classes de uso e cobertura do solo na paisagem do Vale do Paraíba Paulista, São Paulo, Brasil.

Uso e Cobertura do Solo	Pesos de Resistência
Formação Florestal (Floresta Ombrófila Densa e Mista, Floresta Estacional Semi-Decidual, Floresta Estacional Decidual e Formação Pioneira Arbórea)	1
Campo Alagado e Área Pantanosa (vegetação com influência fluvial e/ou lacustre)	30
Afloramento Rochoso (rochas naturalmente expostas na superfície terrestre sem cobertura de solo, muitas vezes com presença parcial de vegetação rupícola e alta declividade)	30
Pastagem (áreas de pastagem predominantemente plantadas, diretamente relacionadas à atividade agropecuária)	70
Silvicultura (espécies arbóreas plantadas para fins comerciais)	60
Lavoura Temporária (cultivos agrícolas de curta ou média duração, geralmente com ciclo vegetativo inferior a um ano, que após a colheita necessitam de novo plantio para produzir)	80
Mosaico de Usos (áreas de uso agropecuário onde não foi possível distinguir entre pastagem e agricultura)	70
Rio e Lago (rios, lagos, represas, reservatórios e outros corpos d'água)	50
Área Urbanizada (áreas com significativa densidade de edificações e vias, incluindo áreas livres de construções e infraestrutura)	90
Mineração (áreas referentes a extração mineral de porte industrial ou artesanal, havendo clara exposição do solo por ação por ação antrópica)	95
Outras Áreas não Vegetadas (áreas de superfícies não permeáveis como infraestrutura, rodovias, estradas, expansão urbana ou mineração)	80

Os pesos de resistência apresentados na Tabela 1 foram definidos por meio de um formulário elaborado para avaliar a permeabilidade das diferentes classes de uso e cobertura do solo ao deslocamento das espécies. O formulário foi direcionado a especialistas do tema e validado com dois ornitólogos, considerando as espécies mencionadas anteriormente e utilizando a *Trogon surrucura* como referência principal. Essa espécie, devido às suas altas exigências ecológicas e sensibilidade à perda de habitat, foi escolhida para ajustar os pesos de resistência e representar as barreiras e facilidades encontradas na paisagem.

Essa abordagem buscou incluir não apenas espécies com exigências ecológicas similares às de *Trogon surrucura*, mas também aquelas com maior tolerância à matriz da paisagem, ampliando a representatividade do modelo.

Essa abordagem, ao integrar os fragmentos fonte com os pesos de resistência das classes de uso e cobertura do solo, forneceu os elementos necessários para a análise da conectividade da paisagem através da modelagem de custo mínimo. Esses dados foram utilizados para modelar a conectividade entre os fragmentos fonte, permitindo a avaliação comparativa dos cenários em relação à conectividade.

### 3.2.4. Análise de Conectividade

As análises de conectividade desenvolveram-se em ambientes de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), utilizando tanto plataformas de processamento em nuvem, como o Google Earth Engine, quanto *softwares* como o ArcGIS Pro e o R.

Para calcular a conectividade da paisagem, utilizou-se uma ferramenta no Google Earth Engine implementada por Theobald (2023) através da biblioteca LandSCaPeN. A função de conectividade total (*lsc.connectivityAll*) calcula a conectividade de toda a paisagem considerando todos os nós (Fragmentos Fonte) de forma simultânea, através de uma superfície de resistência.

Essa função ajuda a avaliar como as áreas da paisagem estão conectadas considerando um custo de deslocamento entre os diferentes pontos da paisagem. Para isso, utiliza-se a distância do custo acumulado a partir dos Fragmentos Fonte, considerando a resistência de cada pixel na paisagem, e esse custo é calculado integrando a função *.cumulativeCost* do Google Earth Engine (GEE, 2023).

O custo acumulado utiliza dois mapas de entrada, o mapa binário de fragmentos fonte (Figura 2) e o mapa de resistência, que incorpora os pesos de resistência (Tabela 1) às suas respectivas classes na paisagem. Para mover-se de um pixel para o pixel vizinho, o algoritmo da função *.cumulativeCost* soma o custo acumulado do pixel atual com a média das resistências entre os dois pixels. Isso garante que o movimento entre as células seja considerado de forma equilibrada. O algoritmo verifica os oito pixels vizinhos para permitir movimentos em todas as direções. No caso de direções diagonais, o custo é multiplicado pela raiz quadrada de dois para compensar a distância maior (Gustafson e Gardner, 1996; Adriaensen et al., 2001).

Após calcular a distância de custo acumulada na paisagem, realiza-se uma transformação exponencial decrescente para converter esses valores em medidas de conectividade. Essa transformação inverte a relação entre distância de custo e conectividade, de modo que maiores distâncias de custo correspondem a menores probabilidades de dispersão das espécies, e vice-versa.

Ao definir uma probabilidade mínima de dispersão para uma distância máxima, a função determina a taxa com que essa probabilidade diminui conforme a distância de custo aumenta. Essa abordagem normaliza os valores de custo acumulado em uma escala de valores que pode ser utilizada como porcentagem, refletindo a facilidade ou dificuldade com que as espécies podem se dispersar através da paisagem.

A imagem resultante da função *lse.connectivityAll* apresenta valores de probabilidade de dispersão a cada pixel, representando a conectividade da paisagem de forma contínua. Valores próximos a 1 indicam áreas de alta conectividade, enquanto valores próximos a 0 representam áreas de baixa conectividade. Esses valores refletem a conectividade entre os Fragmentos Fonte, porém para a conectividade média de toda a paisagem os pixels de valor 1 (100% de conectividade), atribuídos apenas aos fragmentos fonte, também influenciam no aumento de conectividade.

Os Fragmentos Fonte expressam 100% de conectividade, pois são os pontos de entrada e saída, e no modelo, não apresentam resistência ao movimento. Já os fragmentos de vegetação menores que os Fragmentos Fonte (>60 ha) são considerados áreas de baixa resistência, atuando como corredores ou trampolins que facilitam o movimento e a adaptação das espécies na paisagem. Desta forma, fragmentos menores que 60 ha, também são utilizados no cálculo da conectividade da paisagem, porém não serão considerados como fonte.

A conectividade dos fragmentos menores que 60 ha é influenciada pela distância entre os Fragmentos Fonte e da matriz da paisagem ao entorno, ou seja, a presença de um maior número de pequenos fragmentos, a menor distância entre os Fragmentos Fonte e usos do solo mais permeáveis podem aumentar a conectividade da paisagem (Guarengi et al., 2023).

Áreas próximas aos fragmentos fonte e com baixa resistência apresentam valores mais altos de conectividade, enquanto áreas mais distantes ou com maior resistência exibem valores mais baixos. Além disso, mesmo que uma classe de uso do solo tenha baixa resistência, sua grande extensão na paisagem pode resultar em valores reduzidos de conectividade. Isso ocorre porque, apesar da baixa resistência, a predominância dessa classe aumenta o custo acumulado ao longo da distância.

Além do cenário de restauração integral, com todas as áreas incentivadas, realizou-se a análise de conectividade para um cenário de restauração parcial. Esse cenário considera exclusivamente as áreas incentivadas que se conectam estruturalmente a fragmentos fonte, sendo atribuídas com a conectividade máxima (1 ou 100%).

A proximidade de fragmentos florestais é fundamental para impulsionar a dinâmica de regeneração. (Silva et al., 2016b). Áreas próximas aos Fragmentos Fonte funcionam como núcleos de regeneração, acelerando a recuperação florestal por meio do fornecimento de sementes, condições microclimáticas favoráveis e atração de dispersores, o que reduz a necessidade de intervenções intensivas e maximiza a recuperação ecológica de forma

eficiente e econômica (Poorter et al., 2021), beneficiando os proprietários com menores custos e potenciais retornos em programas de PSA.

Esse cenário de restauração parcial foi refinado ao nível de propriedade, com a seleção das áreas incentivadas do cenário de restauração integral. Durante o processo, foi necessário um novo refinamento, pois a exclusão de áreas incentivadas não conectadas estruturalmente aos fragmentos fonte poderia resultar em propriedades com áreas de intervenção inferiores a 1.000 m<sup>2</sup>, valor definido neste estudo como o mínimo necessário para intervenção de restauração via programas de PSA. Assim, foram excluídas propriedades rurais e suas respectivas áreas incentivadas que não atendiam a esses critérios.

Permaneceram no cenário de restauração parcial as áreas incentivadas que: (i) tornaram-se fragmentos fonte; (ii) conectaram e/ou ampliaram fragmentos fonte do cenário base, formando fragmentos maiores; e (iii) conectaram e/ou aumentaram fragmentos menores que 60 ha do cenário base, gerando novos fragmentos fonte. Dessa forma, além do cenário base, inclui-se para as análises de conectividade duas variações do cenário de restauração: um cenário de restauração integral, que inclui todas as áreas incentivadas e um cenário de restauração parcial, que prioriza as áreas incentivadas de maior interesse neste contexto.

Para analisar os resultados entre os cenários, estratificou-se os valores de conectividade em cinco classes (Tabela 2). Utilizou-se o método de intervalo geométrico disponível no *software* ArcGIS Pro para definir os limites das classes, adequado para dados com distribuição exponencial (Frye, 2007). Este método cria intervalos de classe que aumentam exponencialmente, permitindo capturar a variação em dados com comportamento não linear e refletindo adequadamente a distribuição assimétrica dos valores de conectividade.

Tabela 2. Estratificação dos valores de conectividade da paisagem por intervalo geométrico.

<b>Classe de Conectividade</b>	<b>Intervalo de Valores</b>
Muito alta	1 - 0,8787
Alta	0,8786 - 0,1449
Média	0,1448 - 0,02343
Baixa	0,02342 - 0,003326
Muito baixa	0,003325 - 0

Sendo assim, para comparar os cenários, utilizou-se estatísticas descritivas, como conectividade média e desvio padrão, juntamente com a estratificação dos valores de conectividade. Essa abordagem possibilitou a análise espacial, em termos de área, por nível de conectividade e o cálculo do incremento percentual entre os cenários, fornecendo uma visão das alterações na conectividade funcional.

Além disso, para comparar os cenários quanto ao número e quantidade de fragmentos, realizou-se o agrupamento dos fragmentos de vegetação do VPP em cada cenário. O processo foi similar ao processamento aplicado para identificar os fragmentos fonte. Em cada cenário selecionou-se as classes de vegetação e agrupou-se os fragmentos estruturalmente conectados em todas as direções (horizontal, vertical e diagonal) através da ferramenta *Region Group* do *software* ArcGIS Pro. Após identificar unicamente todos os fragmentos calculou-se a área, em hectares, para cada um deles, resultando em uma tabela para integração no *software* R e estratificação do número de fragmentos por classes de área (ha).

No *software* R, as tabelas de atributos geradas para cada cenário foram importadas para a classificação. Cada fragmento foi classificado em classes de área predefinidas, variando de fragmentos menores que 1 ha até fragmentos maiores que 50.000 ha para refletir a distribuição dos fragmentos. Áreas menores receberam classes mais detalhadas devido à alta quantidade de fragmentos pequenos, enquanto fragmentos médios tiveram intervalos ampliados gradualmente para simplificar a análise sem perder representatividade. Para áreas maiores, as classes foram ainda mais amplas, capturando a baixa frequência desses fragmentos.

Essa classificação foi realizada para representar a variação do número de fragmentos por classes de área. Após a categorização, foi contabilizado o número de fragmentos em cada classe de área para cada um dos três cenários de conectividade, permitindo a análise da variação dos fragmentos estruturalmente conectados.

### **3.3. Resultados e Discussão**

#### **3.3.1. Cenário base**

No cenário base, a paisagem do VPP apresentou mais de 14 mil km<sup>2</sup>, com predomínio de áreas de Agropecuária, que representam 59,48% do total, sendo a maior parte composta por Pastagens (32,52%). A cobertura Florestal e de Formação Natural não Florestal é responsável por 34,79% da cobertura do solo no VPP, enquanto as Áreas não Vegetadas e Corpos D'água ocupam 3,88% e 1,85%, respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3. Uso e cobertura do solo para o ano de 2022 na Bacia do Paraíba do Sul, São Paulo, Brasil.

	<b>Classe de Uso e Cobertura do Solo</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Cobertura (%)</b>
Floresta e Formação Natural não Florestal	Formação Florestal	491.838,43	34,21
	Campo Alagado e Área Pantanosa	340,20	0,02
	Afloramento Rochoso	8.054,03	0,56
Agropecuária	Pastagem	467.621,16	32,52
	Lavoura temporária	1.320,84	0,09
	Silvicultura	107.869,59	7,50
	Mosaico de Usos	278.489,24	19,37
Áreas não Vegetadas	Área Urbanizada	52.834,21	3,67
	Mineração	1.320,48	0,09
	Outras Áreas não Vegetadas	1.607,26	0,11
Corpos D'água	Rio, Lago e Oceano	26.568,78	1,85

O resultado encontrado para a cobertura de Formação Florestal no VPP indica a continuidade do processo de recuperação florestal, conforme observado em estudos que destacam o início desse incremento desde a segunda metade do século XX, relacionado ao êxodo rural e à implementação de políticas ambientais (Silva et al., 2017a; Ronquim et al., 2016). O abandono de terras no VPP foi impulsionado por fatores como a exaustão dos solos, a modernização agrícola e o deslocamento econômico para os setores industriais e urbanos, levando a recomposição da vegetação, principalmente em terras próximas a remanescentes florestais (Silva et al. 2016b).

A regeneração florestal histórica no VPP ocorreu principalmente em pastagens degradadas e terras de baixa produtividade, especialmente próximas a remanescentes florestais, onde a dispersão de sementes e o estabelecimento de espécies nativas foram facilitados (Silva et al. 2016a). Alinhados com o Plano de Ação Climática - Net Zero 2050 (São Paulo, 2022) os programas de PSA oferecem sinergias importantes que ressaltam a integração da conservação da biodiversidade e o combate às mudanças climáticas, como o sequestro de carbono e ainda oferecer suporte financeiro e técnico para restaurar terras privadas de baixa produtividade (Ronquim et al., 2016, Silva et al., 2017b; Lemos et al., 2023).

A predominância de pastagens no cenário base de 2022 reflete o histórico de uso intensivo da terra, com a maior parte dos remanescentes florestais concentrados nas

extremidades da bacia, em regiões montanhosas e áreas de maior declividade como a Serra do Mar, Serra de Paranapiacaba, Serra da Mantiqueira e Serra da Bocaina (Figura 2).

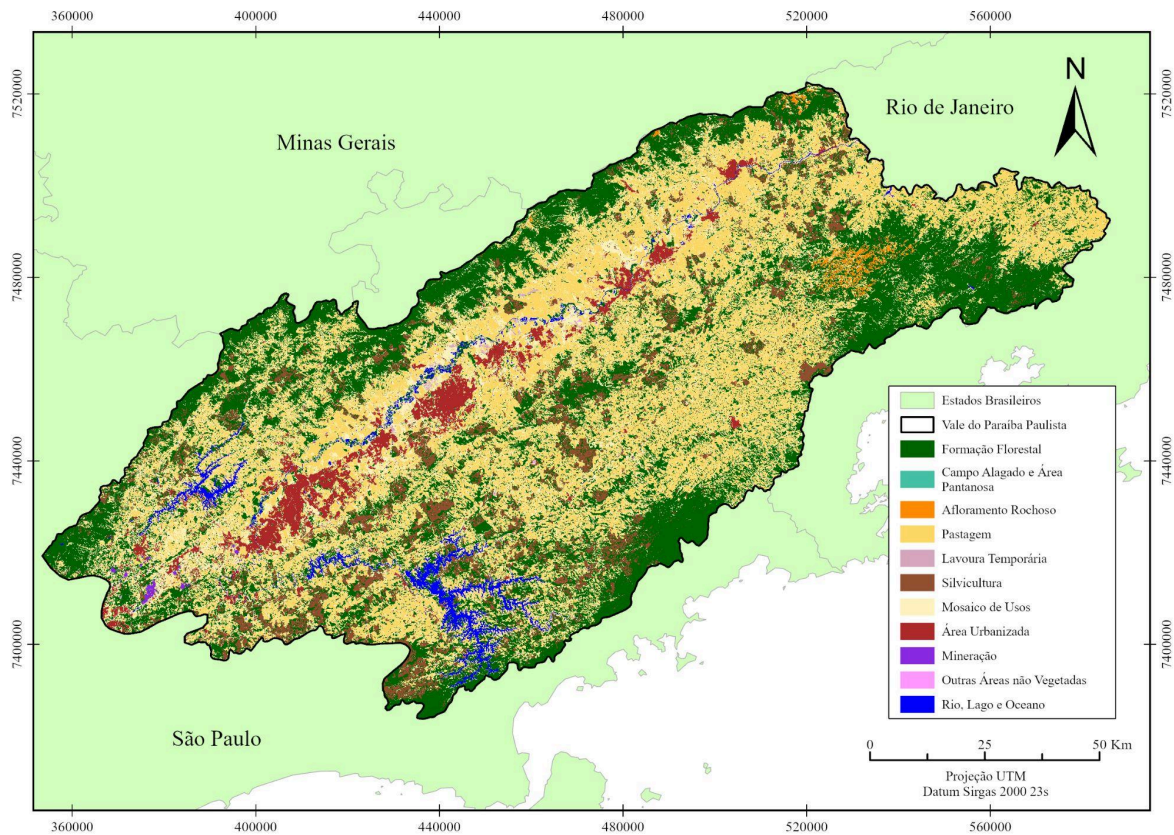


Figura 2. Uso e cobertura do solo do Cenário Base de 2022 no Vale do Paraíba Paulista, São Paulo, Brasil.

### 3.3.2. Cenários de restauração

As áreas incentivadas resultaram da interseção entre as pastagens do cenário base e áreas de baixa aptidão agrícola dentro de propriedades rurais no VPP. Ao aplicar o critério mínimo de 1.000 m<sup>2</sup> por propriedade e descartar aquelas sem áreas incentivadas, o conjunto inicial de 21.511 propriedades foi reduzido para 12.300, totalizando 134.498,17 ha, equivalentes a 9,34% da paisagem (Figura 3).

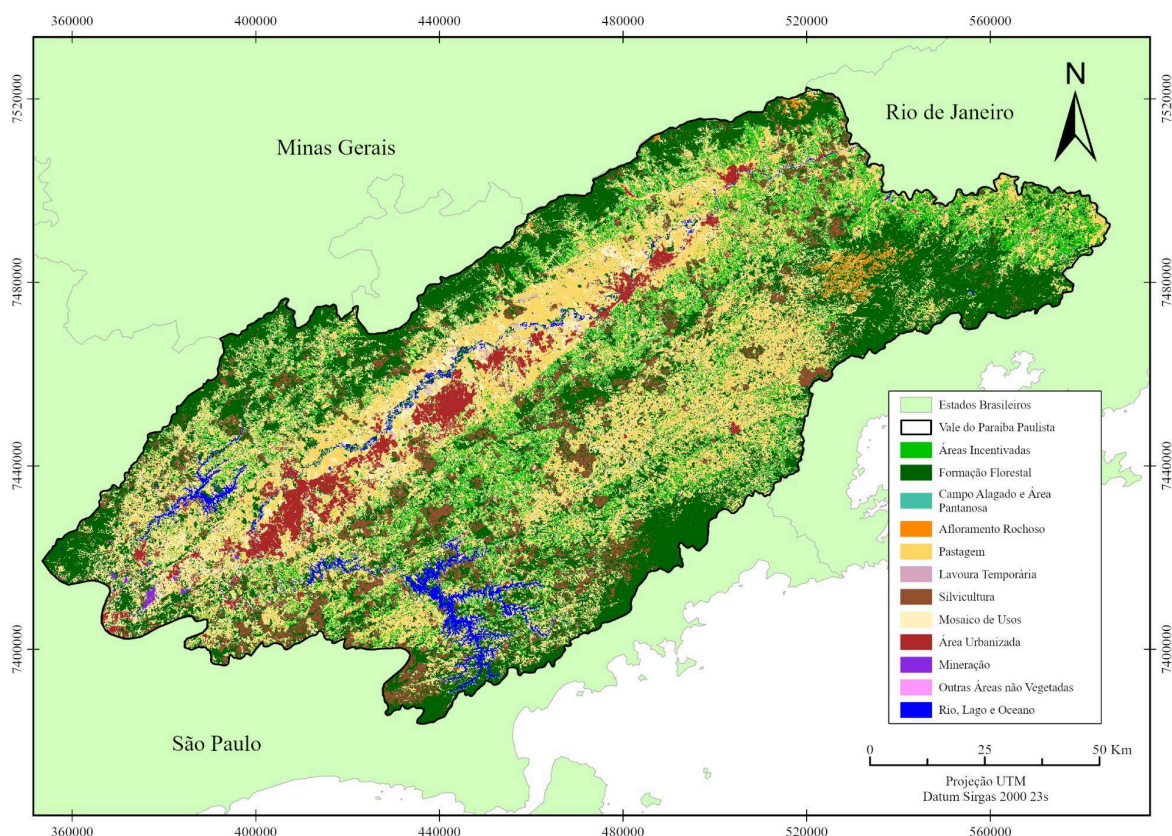


Figura 3. Uso e cobertura do solo do Cenário de Restauração Integral, Vale do Paraíba Paulista, São Paulo, Brasil.

Para o cenário de restauração integral, que conta com todas as áreas incentivadas, observou-se um incremento de 27,35% de cobertura florestal, totalizando 626.336,60 ha. Essa expansão foi acompanhada pela redução de 28,76% das áreas de pastagem, que diminuíram de 467.621,16 ha no cenário base para 333.122,99 no cenário de restauração integral (Tabela 4).

Tabela 4. Classes que apresentaram mudança no uso e cobertura do solo no Cenário de Restauração Integral no Vale do Paraíba Paulista, Brasil.

<b>Cenário de Restauração Integral</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Cobertura (%)</b>
Formação Florestal	626.336,60	43,56
Pastagem	333.122,99	23,17
Agropecuária	720.802,66	50,13
Incremento com Restauração		27,35%
Decremento de Pastagem		-28,76%
Decremento de Agropecuária		-15,73%

O impacto desse incremento na cobertura florestal é particularmente relevante quando comparado aos avanços históricos registrados na região. Entre 1985 e 2015, as áreas de floresta nativa no VPP aumentaram de 249.542 ha para 455.232 ha, um crescimento de 205.690 ha em 30 anos (Ronquim et al., 2016). O cenário de restauração integral, ao introduzir 134.498,17 ha adicionais de vegetação, alcança mais da metade desse incremento, destacando a potencialidade de estratégias baseadas em PSA para continuar e acelerar a recuperação florestal no VPP.

No cenário de restauração parcial, as áreas incentivadas foram reduzidas, totalizando 72.182,25 ha e 5,02% de cobertura da paisagem no VPP. Esta redução é oriunda da retirada de áreas incentivadas que não conectaram estruturalmente ou ampliaram os fragmentos fonte na paisagem (Figura 4).

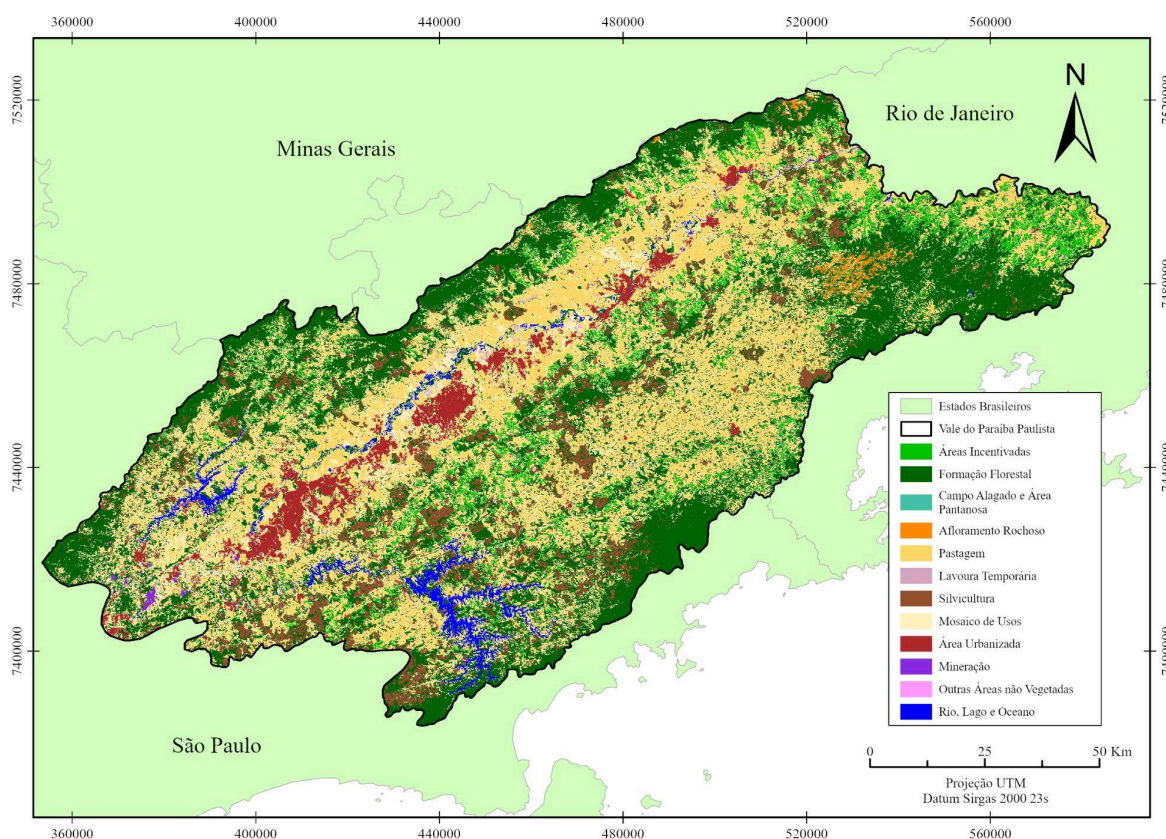


Figura 4. Uso e cobertura do solo do Cenário de Restauração Parcial, Vale do Paraíba Paulista, São Paulo, Brasil.

Mesmo com essa abordagem mais seletiva, foi possível alcançar um incremento de 14,68% na cobertura florestal em comparação com o cenário base, resultando em 564.020,68

ha. Essa expansão foi acompanhada por uma redução de 15,44% nas áreas de pastagem, que diminuíram para 395.438,91 ha (Tabela 5).

Tabela 5. Classes que apresentaram mudança no uso e cobertura do solo no Cenário de Restauração Parcial no Vale do Paraíba Paulista, Brasil.

<b>Cenário de Restauração Parcial</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Cobertura (%)</b>
Formação Florestal	564.020,68	39,23
Pastagem	395.438,91	27,50
Agropecuária	783.118,58	54,46
Incremento com Restauração (%)		14,68
Decremento de Pastagem (%)		-15,44
Decremento de Agropecuária (%)		-8,44

O número de propriedades rurais com áreas de intervenção mínima foi reduzido de 12.300 do cenário de restauração integral para 4.919 no cenário de restauração parcial, representando uma diminuição de 7.381 propriedades. Essa seleção possibilita uma maior eficiência na implementação de programas de PSA, concentrando os esforços em propriedades com maior potencial de impacto para a conectividade e a conservação da biodiversidade.

A Política Estadual de Mudanças Climáticas de São Paulo (Lei nº 13.798/2009) por meio do Plano de Ação Climática - Net Zero 2050, de acordo com o documento mais atualizado, estabelece uma meta de restaurar 800 mil hectares até 2050 (São Paulo, 2022).

Considerando que o VPP representa cerca de 5,8% do território do estado, a meta proporcional para a região seria de aproximadamente 46.400 ha. As áreas incentivadas totais no VPP totalizam 134.498,17 ha, superando em 189,86% o esperado proporcionalmente ao seu tamanho. Essa contribuição equivale a 16,81% da meta total de 800 mil de hectares para o estado e revela o potencial das áreas de pastagem e baixa aptidão agrícola natural do VPP para o incremento de vegetação.

Apenas para a restauração de áreas incentivadas do cenário parcial, com 72.182,25 ha, é possível atingir um acréscimo de 55,56% da meta proporcional do VPP, priorizando a conectividade e a resiliência do habitat na região, com a restauração facilitada devido a proximidade aos grandes fragmentos. A predominância de pastagens e regiões montanhosas fortalece a restauração mediada por programas de PSA e pode compensar a atividade agropecuária em outras áreas mais importantes no estado de São Paulo.

A Figura 5 ilustra a diferença espacial entre os cenários de restauração, onde na letra A é apresentado as formações florestais do vale com o incremento das áreas incentivadas em seu máximo potencial e na letra B com a seleção das áreas incentivadas que ampliaram os fragmentos fonte na paisagem.

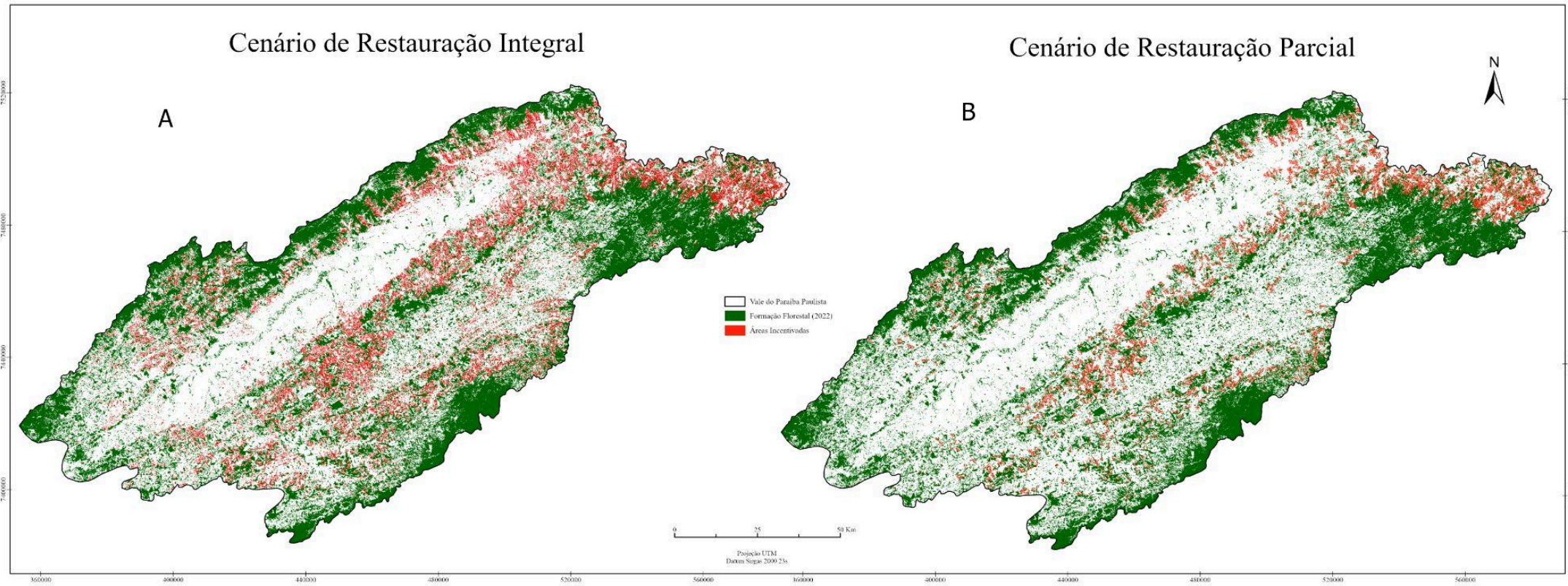


Figura 5. Áreas Incentivadas do Cenário de Restauração Integral (A) e do Cenário de Restauração Parcial (B) no Vale do Paraíba Paulista, São Paulo, Brasil.

Além de expandir a cobertura florestal, a restauração das áreas incentivadas pode promover uma reorganização das classes de uso do solo. A redução de áreas de pastagens, que tradicionalmente ocupam uma posição predominante no VPP, demonstra o potencial das áreas de baixa aptidão agrícola para contribuir na restauração de serviços ecossistêmicos. A conversão da matriz agropecuária, com uma diminuição de 15,73% na área total no cenário de restauração integral e 8,44% na área total no cenário de restauração parcial, reflete uma substituição estratégica de usos de baixa produtividade por vegetação restaurada, maximizando os benefícios ecológicos da região.

Para analisar a conectividade entre os cenários as áreas incentivadas foram introduzidas à cobertura de Formação Florestal do cenário base, considerando-as como restauradas.

### **3.3.3. Fragmentos fonte e análise estrutural**

A inclusão das áreas incentivadas, distribuídas por toda a paisagem, contribui para ampliar a conectividade ecológica e a provisão de habitats no VPP. No cenário base, os fragmentos maiores que 60 ha, definidos como fragmentos fonte, totalizavam 389.919,14 ha distribuídos em 542 fragmentos, correspondendo a 27,12% da paisagem do VPP e 77,95% da cobertura das classes de Floresta e Formação Natural não Florestal.

Com a restauração integral das áreas incentivadas, a área total dos fragmentos fonte aumentou para 486.293,65 ha em 671 fragmentos, correspondendo a um incremento de 24,72% em comparação com o cenário base. Este aumento reflete a incorporação de áreas incentivadas que contribuíram para a ampliação ou criação de novos fragmentos com mais de 60 hectares, reforçando a conectividade estrutural da paisagem.

No cenário de restauração parcial, os fragmentos fonte totalizaram 485.787,41 ha, apenas 506,24 ha a menos que no cenário integral. Essa redução deve-se ao fato de o cenário parcial incluir exclusivamente áreas incentivadas que efetivamente se converteram em fragmentos fonte. Ao excluir áreas incentivadas sem esse resultado, algumas propriedades passaram a apresentar menos de 1.000 m<sup>2</sup> de área de intervenção, exigindo uma nova filtragem e remoção desses casos, mantendo assim o cenário parcial coerente com os critérios mínimos estabelecidos.

Para os fragmentos menores que 60 ha o cenário base obteve 110.313,52 ha representados por 40.731 fragmentos. No cenário de restauração integral, a área total desses fragmentos aumentou para 148.437,18 ha e o número de fragmentos para 79.103, indicando a

formação de novos fragmentos menores a partir das áreas restauradas. No entanto, para o cenário de restauração parcial, a área total e o número dos fragmentos menores que 60 ha foi menor que o cenário base, com 86.627,50 ha e 36.582 fragmentos respectivamente, devido a conexão estrutural realizada pelas áreas incentivadas.

As áreas incentivadas converteram um total de 23.686,02 ha de fragmentos menores que 60 ha do cenário base em fragmentos fonte, um total de 4.153 fragmentos, mostrando o impacto estratégico de intervenções direcionadas. A análise estratificada dos fragmentos por classes de área da Tabela 6 indica que o cenário de restauração integral, ao incorporar todas as áreas incentivadas, amplia expressivamente o número de fragmentos na maioria das classes, especialmente nas menores.

Na classe de fragmentos menor que 1 ha, o aumento do cenário de restauração integral em relação ao cenário base é de 132,23%, refletindo a adição difusa de pequenas áreas restauradas. Esse padrão se mantém em classes como 1 - 5 ha e 5 - 10 ha, demonstrando a formação de numerosos fragmentos de menor porte que ampliam a cobertura vegetal e podem contribuir para a conectividade funcional em médio ou longo prazo.

O cenário de restauração parcial, ao adotar critérios mais seletivos, reduziu o número de fragmentos em relação ao cenário base e reduziu o número de fragmentos em relação ao cenário de restauração integral nas classes abaixo de 60 ha. A classe 30 - 60 ha, por exemplo, apresenta uma redução de 38,42%, enquanto nas classes inferiores os decréscimos também são acentuados (-22,11% em 10 - 30 ha e -16,03% em 5 - 10 ha).

Esse padrão confirma a priorização de fragmentos que contribuíram para a formação ou ampliação de fragmentos fonte. Nesse processo, fragmentos menores presentes no cenário base foram incorporados a unidades maiores, diminuindo a quantidade de fragmentos mas aumentando a cobertura florestal no cenário de restauração parcial.

Tabela 6. Número de fragmentos por classes de área dos Cenários do Vale do Paraíba Paulista, São Paulo, Brasil.

Classes de Áreas (ha)	Cenário Base		Cenário de Restauração Integral		Cenário de Restauração Parcial	
	Número de Fragmentos	Número de Fragmentos	Incremento (%)	Número de Fragmentos	Incremento (%)	
<1	24.513	56.926	132,23	22.716	-7,33	
1 - 5	11.154	15.318	37,33	9.861	-11,59	
5 - 10	2.458	3.393	38,04	2.064	-16,03	
10 - 30	2.062	2.740	32,88	1.606	-22,11	
30 - 60	544	726	33,46	335	-38,42	
60 - 120	286	367	28,32	366	27,97	
120 - 180	92	116	26,09	116	26,09	
180 - 240	46	55	19,57	55	19,57	
240 - 500	65	70	7,69	70	7,69	
500 - 1.000	23	32	39,13	32	39,13	
1.000 - 5.000	20	23	15,00	23	15,00	
5.000 - 10.000	4	3	-25,00	3	-25,00	
10.000 - 50.000	4	2	-50,00	2	-50,00	
>50.000	2	3	50,00	3	50,00	
Total	41.273	79.774	93,28	37.252	-9,74	

Acima de 60 ha, constata-se que o cenário parcial praticamente mantém os valores de incremento observados no cenário integral, sinalizando que a seleção de áreas incentivadas privilegiou fragmentos para aumentar a cobertura vegetal e a conectividade estrutural. Na classe >50.000 ha, tanto o cenário integral quanto o parcial dobraram o número de fragmentos em relação ao cenário base, conectando grandes remanescentes, localizados em regiões montanhosas nas extremidades do VPP como a Serra da Bocaina, Serra do Mar e Serra da Mantiqueira.

Apesar do incremento de cobertura florestal essas dinâmicas resultam em contrastes entre os cenários, enquanto o cenário integral expande o número total de fragmentos em 93,28%, o cenário parcial reduz o número de fragmentos em 9,74%.

Este ajuste criterioso no cenário de restauração parcial, ao consolidar grandes fragmentos e priorizar a conectividade estrutural da paisagem, sugere um maior potencial para serviços ecossistêmicos associados à disposição física dos habitats. Entre eles incluem-se a regulação da erosão do solo, a melhoria da qualidade da água por meio da retenção de sedimentos e poluentes, a regulação climática por meio do sequestro de carbono,

a resiliência do ecossistema como a redução do efeito de borda, bem como o fortalecimento de serviços culturais associados à integridade da paisagem (Mitchell et al., 2013; Soares et al., 2022).

Embora o cenário integral apresente maior fragmentação devido o aumento dos pequenos fragmentos ele favorece a conectividade funcional geral da paisagem, ao facilitar o movimento e as interações em mais áreas. Por outro lado, a abordagem parcial pode priorizar blocos vegetais mais robustos, reforçando a resiliência e a funcionalidade ecológica dos fragmentos com técnicas de restauração mais atrativas.

#### **3.3.4. Conectividade Funcional**

A média da conectividade funcional nos cenários de restauração analisados reflete a probabilidade de dispersão em toda a paisagem, considerando o custo acumulado ao movimento entre os Fragmentos Fonte, reforçando os aumentos da cobertura florestal e número de fragmentos.

Os resultados obtidos evidenciam um aumento da conectividade da paisagem nos cenários de restauração, quando comparados ao cenário base. A média geral de conectividade encontrada no cenário base foi de 34,34%, com os valores mais altos atribuídos a fragmentos maiores que 60 ha e suas proximidades (Figura 6). Desta forma é possível entender onde esses fragmentos se concentram na paisagem e onde há maior movimentação de espécies.

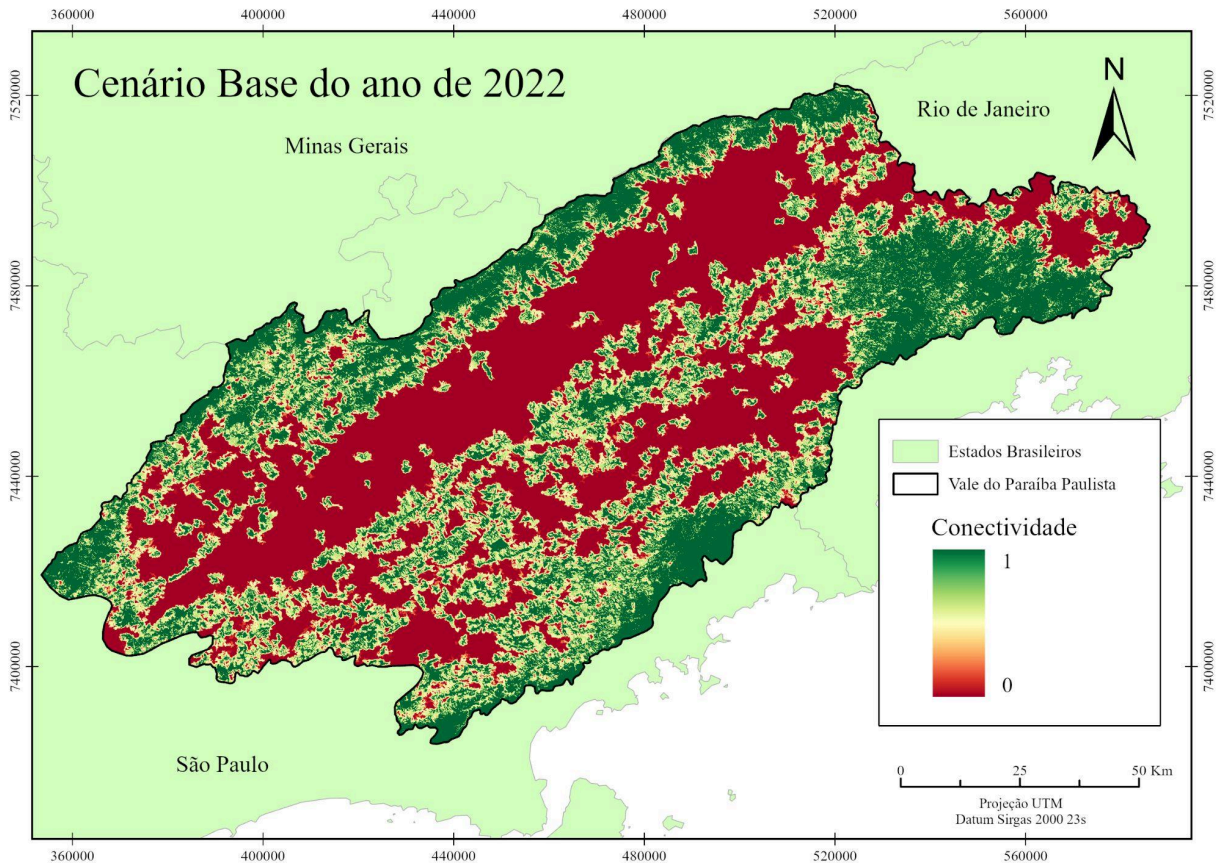


Figura 6. Conectividade da Paisagem do Cenário Base no Vale do Paraíba Paulista, São Paulo, Brasil.

Os menores valores de conectividade para o cenário base se concentram em uma faixa central do VPP, revelando fragmentos isolados. Essas áreas são responsáveis por abrigar extensas coberturas de pastagens consolidadas e a maior parte da população do VPP, em cidades como Jacareí, São José dos Campos e Taubaté, além da rodovia Presidente Dutra que liga São Paulo ao Rio de Janeiro (CBH-PS, 2021). No sudeste da bacia, próximo ao litoral paulista, a intensa atividade agropecuária também reduz a conectividade, evidenciando o impacto da fragmentação no ambiente rural.

O cenário de restauração integral totalizou uma conectividade média de 45,28%. Se considerarmos que um cenário 100% conectado, para esta análise de conectividade, equivale a uma paisagem coberta integralmente por formações naturais, sem resistência ao movimento, a conectividade média encontrada no cenário de restauração integral representa pouco menos da metade da conexão máxima. O aumento da conectividade média na bacia está relacionado ao incremento de fragmentos fonte, que recebem o maior valor de

conectividade e à redução da distância de custo acumulado entre eles que reflete menor distância acumulada (Figura 7).

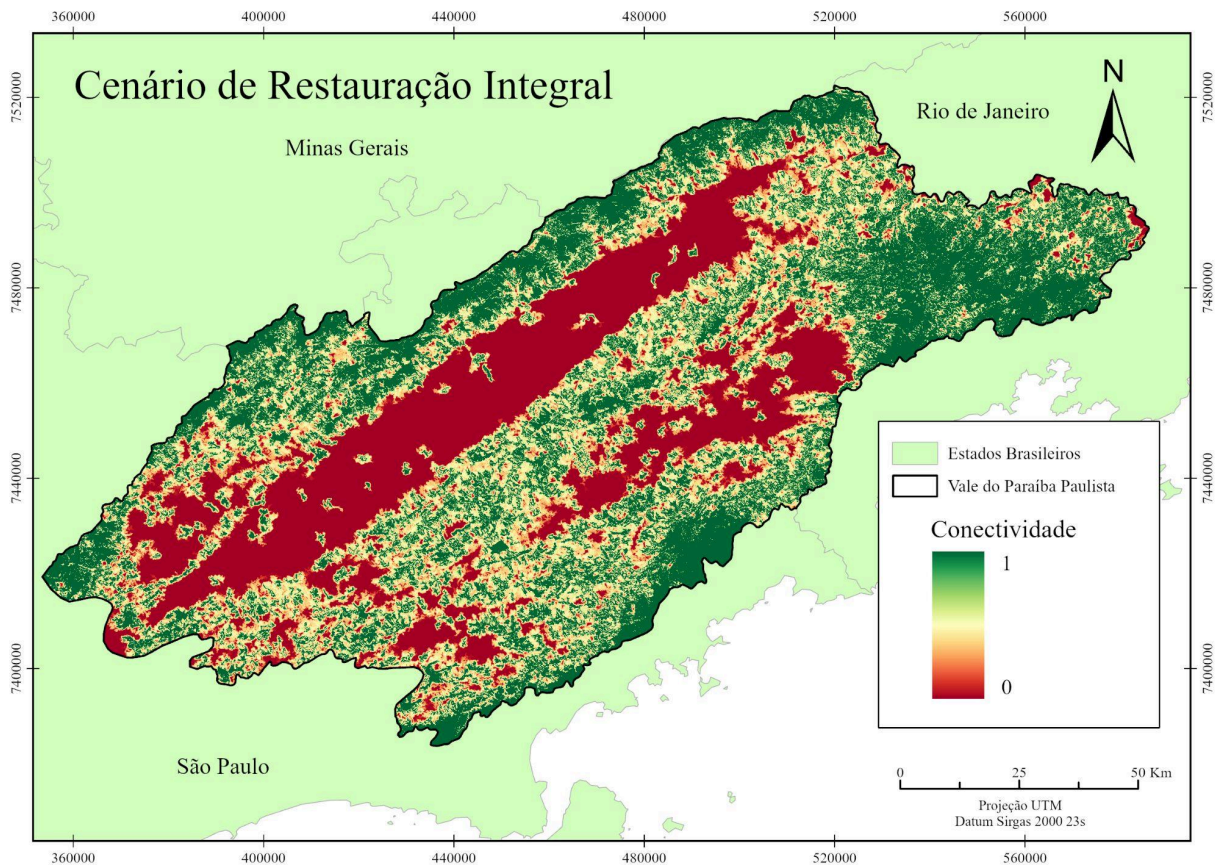


Figura 7. Conectividade da Paisagem do Cenário de Restauração Integral no Vale do Paraíba Paulista, São Paulo, Brasil.

Mesmo convertendo a resistência de apenas uma classe na paisagem, reduzindo 28,76% da cobertura de pastagens, o cenário de restauração integral foi capaz de elevar a conectividade em 31,85% em relação ao cenário base, incrementando um corredor funcional entre São Paulo e Rio de Janeiro paralelo a faixa de maior resistência, importante para contribuir com o fluxo de espécies dos grandes remanescentes florestais localizados nas extremidades da bacia.

O aumento de conectividade dessas áreas também reforça a sinergia entre os serviços ecossistêmicos relacionados aos recursos hídricos, contribuindo com a restauração em áreas próximas aos reservatórios, e zonas de recarga do rio Paraitinga e Paraibuna (CEIVAP, 2021).

Utilizando apenas as áreas incentivadas que contribuíram para o incremento dos fragmentos fonte, o cenário de restauração parcial resultou em uma conectividade média de

43,56%. Em comparação com o cenário base, o aumento de 26,82% na conectividade média ocorreu principalmente em locais de pastagem e baixa aptidão próximos a fragmentos de vegetação mais extensos e regiões com maior concentração de fragmentos (Figura 8). A seleção destas áreas incentivadas sugere um contexto atrativo para a restauração via PSA, tanto do ponto de vista econômico, pela facilidade de regeneração (Crouzeilles et al., 2020) e incentivo financeiro, quanto ambiental, pela melhoria nos serviços ecossistêmicos associados à presença de vegetação remanescente (Strassburg et al., 2020).

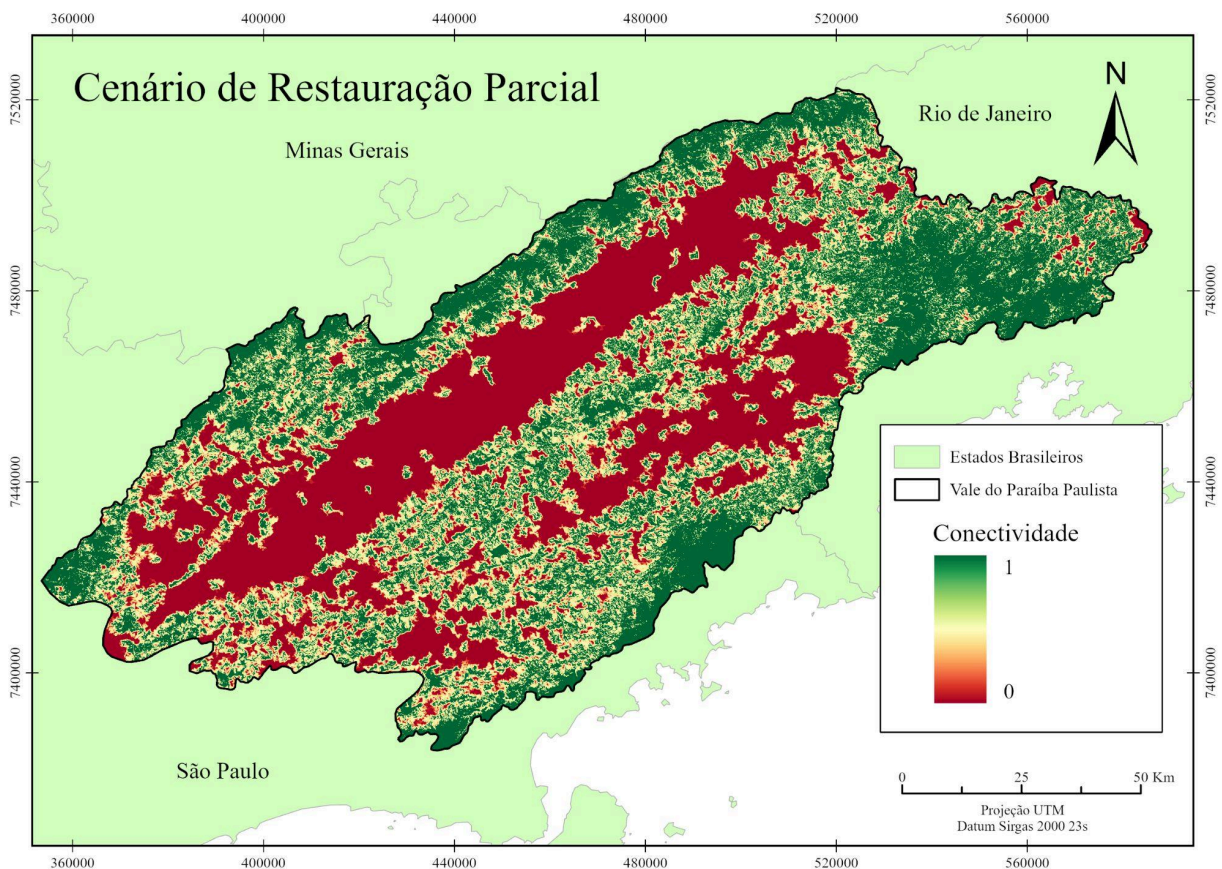


Figura 8. Conectividade da Paisagem do Cenário de Restauração Parcial no Vale do Paraíba Paulista, São Paulo, Brasil.

Este aumento de conectividade funcional do cenário de restauração parcial está relacionado principalmente ao incremento dos fragmentos fonte que reduziram as distâncias de custo acumulado na paisagem do VPP. Com a exclusão de áreas incentivadas que, mesmo conectadas a pequenos fragmentos, não foram maiores que 60 ha, reduziu-se a conectividade funcional entre os fragmentos fonte em relação ao cenário de restauração integral.

Desta forma, o cenário de restauração integral destacou-se por maximizar a conectividade, alcançando um aumento de 18,76% em comparação ao incremento do cenário de restauração parcial. Essa diferença reflete o potencial dos fragmentos menores que 60 h na conectividade funcional, alinhando-se a estudos que apontam a redução de custos acumulados no movimento através da matriz como uma estratégia essencial para a conectividade da paisagem (Adriaensen et al., 2003; Etherington, 2016).

A Figura 9 apresenta o aumento de conectividade, pixel a pixel, em relação ao cenário base. Regiões que não apresentaram mudança representam o valor 0 e aquelas com maior incremento de conectividade, valor 1. Essa diferença após restauração reforça a capacidade do cenário de restauração integral em promover conectividade entre os fragmentos fonte, quando comparado ao cenário parcial. O cenário de restauração parcial, por outro lado, evidencia o potencial da seleção de áreas incentivadas que receberam o maior valor de conectividade.

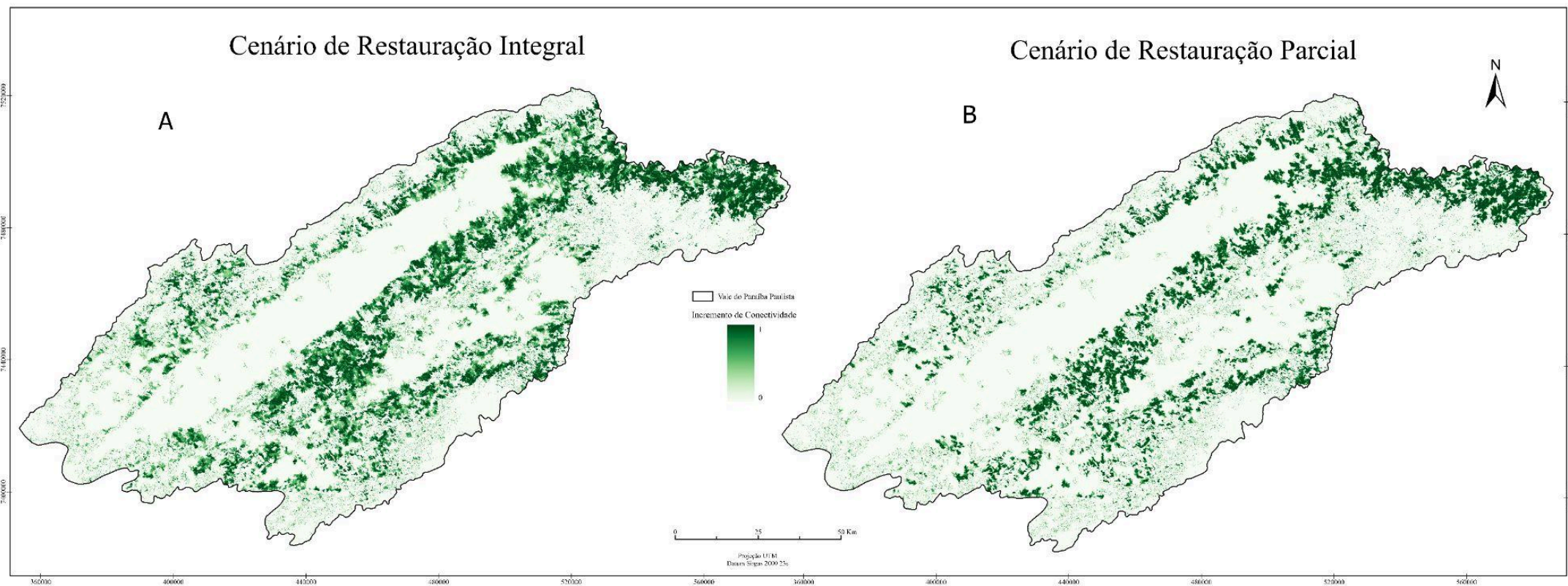


Figura 9. Incremento de Conectividade do Cenário de Restauração Integral (A) e Cenário de Restauração Parcial (B) em Relação ao Cenário Base no Vale do Paraíba Paulista, São Paulo, Brasil.

A inclusão de todas as áreas incentivadas reduz a quantidade de regiões com baixa conectividade devido à menor distância de custo acumulado entre os fragmentos fonte. Esse aumento no potencial funcional favorece serviços ecossistêmicos quanto ao movimento de organismos, como a polinização, o controle de pragas, a dispersão de sementes e a transferência de nutrientes entre diferentes fragmentos (Sekercioglu, 2012; Kunz et al., 2020).

A Tabela 7 reforça os resultados observados, convertendo em área as regiões com maior e menor conectividade. No cenário de restauração integral a expansão das regiões com conectividade funcional classificadas de “média” a “muito alta” é maior quando comparado aos cenário de restauração parcial que obteve um valor similar apenas para regiões com conectividade “muito alta”. Esses resultados destacam a importância dos fragmentos fonte em seu papel central de conectividade, bem como a influência dos fragmentos menores quanto seu posicionamento na paisagem através de métricas baseadas em custo acumulado ao capturar a complexidade do movimento em grandes paisagens heterogêneas. (Theobald et al., 2012; Etherington e Holland, 2013)

Tabela 7. Classes de Conectividade Funcional por Área no Vale do Paraíba Paulista, São Paulo, Brasil

Conectividade	Cenário Base (2022)		Cenário de Restauração Integral			Cenário de Restauração Parcial		
	Área (ha)	Cobertura (%)	Área (ha)	Cobertura (%)	Incremento (%)	Área (ha)	Cobertura (%)	Incremento (%)
Muito alta	406.247,04	28,25	512.642,29	35,65	26,19	512.194,79	35,62	26,08
Alta	171.345,81	11,92	271.503,62	18,88	58,45	217.096,06	15,1	26,7
Média	107.768,80	7,5	134.414,73	9,35	24,73	110.274,48	7,67	2,33
Baixa	86.396,57	6,01	88.354,91	6,14	2,27	80.232,33	5,58	-7,13
Muito baixa	666.106,15	46,33	430.948,82	29,97	-35,3	518.066,71	36,03	-22,22

Além disso, a mudança das áreas com “muito baixa” conectividade no cenário de restauração integral é a maior redução observada, com 35,3%. Ambos os cenários de restauração indicam uma diminuição de áreas com “muito baixa” conectividade, isso pode ser um reflexo da importância do aumento similar entre as áreas com “muito alta” conectividade.

Embora os cenários de restauração apresentem ganhos similares na classe “muito alta”, com 26,19% no integral e 26,08% no parcial, as demais classes apresentam maiores diferenças. As áreas com “alta” conectividade do cenário de restauração integral resultaram em um aumento de 58,45%, enquanto no cenário de restauração parcial 26,7% e essa

diferença é maior nas áreas com “média” conectividade, apresentando um incremento de 24,73% e 2,33% respectivamente.

Esse padrão se reflete nas classes de menor conectividade. Enquanto o cenário integral aumenta a cobertura de áreas “baixa” conectividade em 2,27%, o parcial apresenta uma redução de 7,13%. Embora o incremento na classe de “baixa” conectividade do cenário de restauração integral possa parecer menos vantajoso, ele ocorre simultaneamente com uma redução mais acentuada das áreas de “muito baixa” conectividade.

Esta diferença nos níveis de conectividade entre os cenários influencia diretamente o potencial de dispersão. No cenário de restauração integral, a expansão das classes intermediárias de conectividade aumenta a área da paisagem para movimentação de espécies menos exigentes, capazes de utilizar fragmentos menores como áreas de passagem ou habitat. Já o cenário de restauração parcial, ainda que reduza o número total de fragmentos em comparação com o cenário de restauração integral (Tabela 6), conserva a maior parte de áreas de alta conectividade do cenário de restauração integral, importantes para espécies mais exigentes, dependentes de fragmentos maiores que 60 ha.

Embora a paisagem tenha se tornado mais conectada, continua existindo uma polarização nos valores de conectividade que ressalta a complexidade inerente às paisagens reais, onde melhorias na conectividade não resultam necessariamente em homogeneização completa do potencial de dispersão (Etherington, 2016).

Esta diferença abrupta de valores muito altos e muito baixos destaca a importância de intervenções adicionais para alinhar a conectividade com a sustentabilidade na paisagem, como a incorporação de outras modalidades de PSA além da restauração, que podem ser incentivadas para reduzir a resistência na matriz, especialmente em classes com áreas extensas.

Os incrementos observados na conectividade, bem como a maior proporção de áreas com altos valores de dispersão potencial, indicam que tanto a restauração integral quanto a parcial podem melhorar a conectividade funcional no VPP, a primeira expandindo amplamente os núcleos vegetais e caminhos de menor resistência na paisagem e a segunda priorizando áreas que potencializam a função de fragmentos fonte já existentes.

### **3.4. Conclusão**

Os cenários apresentados destacam o potencial das propostas de restauração florestal, apoiadas por programas de PSA, para fortalecer a conectividade ecológica e ampliar a cobertura florestal. A predominância histórica de pastagens na paisagem, combinada com a

presença de áreas de baixa aptidão agrícola, expõe essas regiões à degradação atual ou iminente. Essas áreas, inadequadas para usos agrícolas intensivos, tornam-se propícias para iniciativas de restauração incentivada, contribuindo para a conservação da biodiversidade, a sustentabilidade do uso da terra e a provisão de serviços ecossistêmicos.

Os cenários de restauração analisados demonstraram resultados promissores. O cenário de restauração integral, abrangendo todas as áreas incentivadas, apresentou maior potencial de aumento do número de fragmentos e da conectividade funcional, com um incremento de 27,35% na cobertura de Formação Florestal. Esse cenário promoveu um maior incremento de pequenos fragmentos, a ampliação destes pequenos fragmentos e a consolidação de grandes núcleos vegetais, aumentando áreas de alta conectividade e reduzindo drasticamente áreas de muito baixa conectividade.

Por outro lado, o cenário de restauração parcial, focado em áreas com máxima conectividade, obteve um incremento de 14,68% na cobertura florestal com maior eficiência na alocação de recursos em áreas de muito alta conectividade. Esse cenário alcançou resultados semelhantes na ampliação de áreas com muito alta conectividade, além de reduzir as áreas de muito baixa conectividade, porém com menor redistribuição nas classes intermediárias de conectividade. Um grande potencial nestas áreas é a proximidade de grandes fragmentos, o que favorece a viabilidade da restauração.

Por outro lado, o cenário de restauração parcial, focado em áreas com máxima conectividade, obteve um incremento de 14,68% na cobertura florestal com maior eficiência na alocação de recursos em áreas de muito alta conectividade e para a ampliação de fragmentos maiores que 60 ha.

Os cenários demonstraram a capacidade do VPP em contribuir com as metas de restauração estabelecidas pelo Plano de Ação Climática - Net Zero 2050 do estado de São Paulo. Além disso, o estudo fornece subsídios práticos para o planejamento territorial, revelando as propriedades rurais com potencial de incentivo, o que pode auxiliar no direcionamento e continuidade de programas de PSA para superar a fragmentação e manter, a longo prazo, recursos naturais e serviços ecossistêmicos essenciais no VPP.

## **Referências Bibliográficas**

ADRIAENSEN, F.; CHARDON, J. P.; DE BLUST, G.; et al. The application of ‘least-cost’ modelling as a functional landscape model. **Landscape and Urban Planning**, v. 64, n. 4, p. 233–247, 2001.

ADRIAENSEN, F.; CHARDON, J. P.; DE BLUST, G.; et al. The application of ‘least-cost’ modelling as a functional landscape model. **Landscape and Urban Planning**, v. 64, n. 4, p. 233–247, 2003.

AGEVAP. Associação Pró-Gestão Das Águas Da Bacia Hidrográfica Do Rio Paraíba Do Sul. **Relatório de Situação: Bacia do Rio Paraíba do Sul**. 2020. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/conteudo/relsituacao2020.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2024.

ALEXANDER, S.; ARONSON, J.; WHALEY, O.; LAMB, D. The relationship between ecological restoration and the ecosystem services concept. **Ecology and Society**, v. 21, n. 1, p. 34, 2016.

BARBOSA, K. V. de C.; KNOGGE, C.; DEVELEY, P. F.; JENKINS, C. N.; UEZU, A. Use of small Atlantic Forest fragments by birds in Southeast Brazil. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 15, n. 1, p. 42–46, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2016.11.001>.

BENEZ-SECANHO, F. J.; DWIVEDI, P.; FERREIRA, S.; HEPINSTALL-CYMERMAN, J.; WENGER, S. Trade-offs between the value of ecosystem services and connectivity among protected areas in the Upper Chattahoochee Watershed. **Environmental Management**, v. 69, n. 5, p. 937–951, 2022.

BOSCOLO, D.; METZGER, J. P.; VIELLIARD, J. M. E. Efficiency of playback for assessing the occurrence of five bird species in Brazilian Atlantic Forest fragments. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, p. 629–644, 2006.

BRANCALION, P. H. S.; CARDOZO, I. V.; CAMATTA, A.; ARONSON, J.; RODRIGUES, R. R. Cultural ecosystem services and popular perceptions of the benefits of an ecological restoration project in the Brazilian Atlantic Forest. **Restoration Ecology**, v. 22, p. 65–71, 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade e Florestas. Departamento de Conservação da Biodiversidade. **Pagamentos por serviços ambientais na Mata Atlântica: lições aprendidas e desafios**. Brasília: MMA, 2011.

BREMER, L.; AUERBACH, D. A.; GOLDSTEIN, J. H.; VOGL, A. L.; SHEMIE, D.; KROEGER, T.; TIEPOLO, G. One size does not fit all: Natural infrastructure investments within the Latin American Water Funds Partnership. **Ecosystem Services**, v. 17, p. 217–236, 2016.

BROCKERHOFF, E. G.; BARBARO, L.; CASTAGNEYROL, B.; FORRESTER, D. I.; GARDINER, B.; GONZÁLEZ-OLABARRIA, J. R.; LYVER, P. O'B.; MEURISSE, N.; OXBROUGH, A.; TAKI, H.; THOMPSON, I. D.; VAN DER PLAS, F.; JACTEL, H. Forest biodiversity, ecosystem functioning and the provision of ecosystem services. **Biodiversity and Conservation**, v. 26, p. 3005–3035, 2017.

CBH-PS. Comitê das Bacias Hidrográficas do Rio Paraíba do Sul. **Revisão e Atualização do Plano de Bacia Hidrográfica da UGRHI 02 - Paraíba do Sul (2020-2023): Síntese**. São Paulo: Fundo Estadual de Recursos Hídricos (FEHIDRO), 2021. Disponível em: [https://comiteps.sp.gov.br/wp-content/uploads/2024/08/VOLUME\\_X\\_UGRHI\\_02\\_PBH\\_Planodeacao.pdf](https://comiteps.sp.gov.br/wp-content/uploads/2024/08/VOLUME_X_UGRHI_02_PBH_Planodeacao.pdf). Acesso em: 22 out. 2024.

CEIVAP. Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul**. 2021. Disponível em: [http://18.229.168.129:8080/publicacoesArquivos/ceivap/arq\\_pubMidia\\_Processo\\_030-2018-RF01.pdf](http://18.229.168.129:8080/publicacoesArquivos/ceivap/arq_pubMidia_Processo_030-2018-RF01.pdf). Acesso em: 2 nov. 2024.

CNUC/MMA. **Cadastro das Unidades de Conservação**. 2021. Disponível em: [https://dados.gov.br/dataset/unidadesdeconservacao/resource/baf25448-5064-4ece9a0e-d778b0eca542?inner\\_span=True](https://dados.gov.br/dataset/unidadesdeconservacao/resource/baf25448-5064-4ece9a0e-d778b0eca542?inner_span=True). Acesso em: 21 ago. de 2024.

CONSERVADOR DA MANTIQUEIRA. Cidades do Vale do Paraíba começam 2023 em fase de implementação de ações de restauração florestal. 2023. Disponível em:

<https://conservadordamantiqueira.org/cidades-do-vale-do-paraiba-comecam-2023-em-fase-de-implementacao-de-aco-es-de-restauracao-florestal>. Acesso em: 17 nov. 2024.

CROUZEILLES, R.; BEYER, H. L.; MILLS, M.; GRELLE, C. E. V.; POSSINGHAM, H. P. Achieving cost-effective landscape-scale forest restoration through targeted natural regeneration. **Conservation Letters**, v. 13, n. 3, e12709, 2020.

DA SILVA, R. F. B.; BATISTELLA, M.; MORAN, E. F.; LU, D. Land changes fostering Atlantic Forest transition in Brazil: Evidence from the Paraíba Valley. **The Professional Geographer**, v. 69, n. 1, p. 80–93, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/00330124.2016.1178151>.

DA SILVA, R. F. B.; BATISTELLA, M.; MORAN, E. F. Drivers of land change: Human-environment interactions and the Atlantic forest transition in the Paraíba Valley, Brazil. **Land Use Policy**, v. 58, p. 133–144, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.07.021>.

DA SILVA, R. F. B.; BATISTELLA, M.; MORAN, E. F. Socioeconomic changes and environmental policies as dimensions of regional land transitions in the Atlantic Forest, Brazil. **Environmental Science & Policy**, v. 74, p. 14–22, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.04.019>.

DA SILVA, R. F. B.; RODRIGUES, M. D. A.; VIEIRA, S. A.; BATISTELLA, M.; FARINACI, J. Perspectives for environmental conservation and ecosystem services on coupled rural–urban systems. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 15, n. 2, p. 74–81, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.05.005>.

DUCA, C.; DA SILVA, J. N.; ALVARENGA, F. B. Diet of birds: assessing the stomach contents of some Neotropical species. **Ornithology Research**, v. 31, n. 4, p. 298–301, 2023.

ETHERINGTON, T. R.; PENELOPE HOLLAND, E. Least-cost path length versus accumulated-cost as connectivity measures. **Landscape Ecology**, v. 28, n. 7, p. 1223–1229, 2013.

ETHERINGTON, T. R. Least-Cost Modelling and Landscape Ecology: Concepts, Applications, and Opportunities. **Current Landscape Ecology Reports**, v. 1, n. 1, p. 40–53, 2016.

FRYE, C. About the Geometrical Interval Classification Method. ArcGIS Blog: Mapping, 2007. Disponível em: <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/product/mapping/about-the-geometrical-interval-classification-method/>. Acesso em: 22 nov. 2024.

GEE, Google Earth Engine. Guia do desenvolvedor: método cumulativeCost. 2023. Disponível em: [https://developers.google.com/earth-engine/guides/image\\_cumulative\\_cost](https://developers.google.com/earth-engine/guides/image_cumulative_cost). Acesso em: 19 nov. 2024.

GUARENghi, M. M.; WALTER, A.; DOS SANTOS, R. F. Integrating Habitat Availability, Permeability, and Configuration in a Model of Landscape Connectivity: The Contribution of Habitat's Site-to-Site. **Environmental Management**, v. 71, p. 998–1010, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00267-022-01783-9>.

GUSTAFSON, E. J.; GARDNER, R. H. The effect of landscape heterogeneity on the probability of patch colonization. **Ecology**, v. 77, n. 1, p. 94–107, 1996.

HASUI, É.; METZGER, J. P.; PIMENTEL, R. G.; SILVEIRA, L. F.; DE ABREU BOVO, A. A.; MARTENSEN, A. C.; RIBEIRO, M. C. ATLANTIC BIRDS: A dataset of bird species from the Brazilian Atlantic Forest. **Ecology**, v. 99, p. 497, 2018.

HOFLING, E.; LENCIONI, F. Avifauna da floresta atlântica, região de Salesópolis, estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Biologia**, v. 52, n. 3, p. 361–378, 1992.

IBGE. Áreas urbanizadas do Brasil 2019. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/tipologias-do-territorio/15789-areas-urbanizadas.html>. Último acesso em: 9 fev. 2024.

**IF. Inventário Florestal do Estado de São Paulo: Mapeamento da Cobertura Vegetal Nativa.** São Paulo: Instituto Florestal, Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 2020. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/wp-content/uploads/2020/07/inventarioflorestal2020.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2024.

JARDIM, M. H.; BURSZTYN, M. A. Pagamento por serviços ambientais na gestão de recursos hídricos: o caso de Extrema (MG). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 3, p. 353–360, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020000106299>.

JONES, K. W.; POWLEN, K.; ROBERTS, R.; SHINBROT, X. Participation in payments for ecosystem services programs in the Global South: A systematic review. **Ecosystem Services**, v. 45, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101159>.

KROEGER, T.; KLEMZ, C.; BOUCHER, T.; et al. Returns on investment in watershed conservation: Application of a best practices analytical framework to the Rio Camboriú Water Producer program, Santa Catarina, Brazil. **The Science of the Total Environment**, v. 657, p. 1368–1381, 2019.

KUNZ, T. H.; DE TORREZ, E. C.; BAUMGARTNER, C. D.; REID, F. A.; ADAMS, R. A. Ecosystem services provided by bats. **Integrative Zoology**, v. 15, n. 4, p. 372–386, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/1749-4877.12552>.

LEMOS, C. M. G.; BEYER, H. L.; RUNTING, R. K.; ANDRADE, P. R.; AGUIAR, A. P. D. Multicriteria optimization to develop cost-effective PES schemes to restore multiple environmental benefits in the Brazilian Atlantic Forest. **Ecosystem Services**, v. 60, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2023.101515>.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomias – Coleção Beta de Mapas Anuais de Cobertura e Uso da Terra do Brasil com 10 metros de resolução espacial. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/mapbiomas-cobertura-10m/>. Acesso em: 19 nov. 2024.

MARTENSEN, A. C.; RIBEIRO, M. C.; BANKS-LEITE, C.; PRADO, P. I.; METZGER, J. P. Associations of forest cover, fragment area, and connectivity with neotropical understory bird species richness and abundance. **Conservation Biology**, v. 26, p. 1100–1111, 2012.

MELLO, K.; BRITES, A.; BORGES-MATOS, C.; TAVARES, P. A.; METZGER, J. P.; RODRIGUES, R. R.; SANTOS, Z. L.; JOLY, C. A.; SPAROVEK, G. Science and environmental policy establishment: the case of the Forest Act in the State of São Paulo, Brazil. **Biota Neotropica**, v. 22, p. 8, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1676-0611-bn-2022-1373>.

MITCHELL, M. G. E.; BENNETT, E. M.; GONZALEZ, A. Linking landscape connectivity and ecosystem service provision: current knowledge and research gaps. **Ecosystems**, v. 16, p. 894–908, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10021-013-9647-2>.

MORAES, A.; SEIXAS, C.; FARINACI, J.; VIEIRA, S. Do local ao regional: um panorama da ação coletiva em prol de serviços ecossistêmicos no Vale do Paraíba paulista. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 60, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5380/dma.v60i0.78132>.

PAISE, G.; VIEIRA, E. M.; PRADO, P. I. Small mammals respond to extreme habitat fragmentation in the Brazilian Atlantic Forest according to the landscape continuum model. **Mammalian Research**, v. 65, p. 309–322, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13364-019-00464-z>.

PIZO, M. A. The relative contribution of fruits and arthropods to the diet of three trogon species (Aves, Trogonidae) in the Brazilian Atlantic Forest. **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 24, p. 515–517, 2007.

POORTER, L.; CRAVEN, D.; JAKOVAC, C. C.; VAN DER SANDE, M. T.; AMISSAH, L.; BONGERS, F.; CHAZDON, R. L.; et al. Multidimensional tropical forest recovery. **Science**, v. 374, n. 6573, p. 1370–1376, 2021.

REGEA. Geologia, Engenharia E Estudos Ambientais. **Revisão e Atualização do Plano de Bacia Hidrográfica da UGRHI 02 – Paraíba do Sul**. Taubaté: CBH-PS, 2016. Disponível

em:

[https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/CBH-PS/14089/sintese-do-plano-de-bacia-ugrhi\\_02-01-08-17-completo.pdf](https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/CBH-PS/14089/sintese-do-plano-de-bacia-ugrhi_02-01-08-17-completo.pdf). Acesso em: 22 out. 2024.

REY BENAYAS, J. M.; NEWTON, A. C.; DIAZ, A.; BULLOCK, J. M. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: A meta-analysis. **Science**, v. 325, p. 1121–1124, 2009.

RIBEIRO, K. T.; MEDINA, B. M. O.; SCARANO, F. R. Species composition and biogeographic relations of the rock outcrop flora on the high plateau of Itatiaia, SE-Brazil. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 30, n. 4, p. 623–639, 2007.

RONQUIM, C. C.; DA SILVA, R. F. B.; FIGUEIREDO, E. B.; BORDONAL, R. O.; TEIXEIRA, A. H. de C.; COCHASRK, T. C. D.; LEIVAS, J. F. Carbon sequestration associated to the land-use and land-cover changes in the forestry sector in Southern Brazil. **Proceedings of SPIE - Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVIII**, v. 9998, p. 576-589, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2242094>.

SAFANELLI, J. L.; NÓIA JÚNIOR, R. de S.; COUTINHO, P. A. Q.; ARAUJO, M. A.; FENDRICH, A. N.; RIZZO, R.; CHAMMA, A. L. S.; BARRETTO, A. G. de O. P.; MAULE, R. F.; REICHARDT, K.; SPAROVEK, G.; NETO, D. D. Grain-cropping suitability for evaluating the agricultural land use change in Brazil. **Applied Geography**, v. 154, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2023.102937>.

SÃO PAULO. Plano de Ação Climática do Estado de São Paulo – Net Zero 2050. São Paulo: Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, 2022. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/2022/11/consulta-publica-plano-de-acao-climatica-2050/>. Acesso em: 08 de dez. de 2024.

SÃO PAULO. Programa Refloresta-SP. 2024. Disponível em: <https://semil.sp.gov.br/sma/programa-refloresta-sp/#1695733118650-4daba93d-1eb7>. Acesso em: 17 nov. 2024.

SÃO PAULO. Projeto Mata Conexão Atlântica em São Paulo: Pagamento por Serviços Ambientais. São Paulo, 2019. Disponível em: <https://smastr16.blob.core.windows.net/home/2019/09/helena-carrascosa-dia-09.pdf>. Acesso em: 17 nov. 2024.

SCHUNCK, F.; GALLARDO, C. C.; BENEDICTO, G. A.; YABE, R. S.; ANTAS, P. T. Z. A importância das áreas particulares na conservação da avifauna do estado de São Paulo, sudeste do Brasil. **Revista Biodiversidade**, v. 21, n. 1, 2022.

SCHUNCK, F.; PACHECO, J. F.; ANTUNES, A. Z.; GAGLIARDI, R. L.; SILVEIRA, L. F. A review of the ornithological knowledge of the northern Serra do Mar mountains in the state of São Paulo, southeastern Brazil. **Revista Brasileira de Ornitologia**, v. 26, n. 1, p. 15–44, 2018.

SEKERCIOGLU, C. H. Functional diversity of birds provides insurance against environmental change. **Journal of Ornithology**, v. 153, n. 1, p. 225–230, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10336-012-0869-4>.

SICK, H.; BARRUEL, P.; ANDRADE, C. D. D.; LEÃO, A. A. P. **Ornitologia brasileira**. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira, 1997.

SIGRH - Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. Divisão hidrográfica. 2024. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/divisaohidrografica>. Acesso em: 21 nov. 2024.

SMA. Secretaria do Meio Ambiente. Governo do Estado de São Paulo. **Subsídios ao Planejamento Ambiental: Unidade hidrográfica de gerenciamento de recursos hídricos**. Paraíba do Sul. São Paulo, 2011. Disponível em: [http://s.ambiente.sp.gov.br/cpla/Subsidios\\_ao\\_Planejamento\\_Ambiental\\_UGRHI-021.pdf](http://s.ambiente.sp.gov.br/cpla/Subsidios_ao_Planejamento_Ambiental_UGRHI-021.pdf). Acesso em: 22 out. 2024.

SOARES, D. R.; NAHSSEN, M. H. C.; SOARES, F. da S.; MORALES, M. V.; RIGONATO, M. B.; GERMANO, A. D.; VALENTE, R. A. Conectividade estrutural da vegetação nativa

para o planejamento da conservação florestal. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 4, e39811427492, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i4.27492>.

SPEAR, S. F.; BALKENHOL, N.; FORTIN, M.-J.; MCRAE, B. H.; SCRIBNER, K. Use of resistance surfaces for landscape genetic studies: considerations for parameterization and analysis. **Molecular Ecology**, v. 19, n. 17, p. 3576–3591, 2010.

STOTZ, D. F. **Neotropical birds: ecology and conservation**. Chicago: University of Chicago Press, 1996.

STRASSBURG, B. B. N.; IRIBARREM, A.; BEYER, H. L.; CORDEIRO, C. L.; CROUZEILLES, R.; JAKOVAC, C. C.; BALMFORD, A. Global priority areas for ecosystem restoration. **Nature**, v. 586, n. 7831, p. 724–729, 2020.

STRASSBURG, B. B. N.; KELLY, A.; BALMFORD, A.; DAVIES, R. G.; GIBBS, H. K.; LOVETT, A.; RODRIGUES, A. S. L. Global congruence of carbon storage and biodiversity in terrestrial ecosystems. **Conservation Letters**, v. 3, p. 98–105, 2010.

STRASSBURG, B. B. N.; LATAWIEC, A. E.; BARIONI, L. G.; NOBRE, C. A.; DA SILVA, V. P.; VALENTIM, J. F.; VIANNA, M.; ASSAD, E. D. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 28, p. 84–97, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.06.001>.

STRASSBURG, B. B. N.; RODRIGUES, A. S. L.; GUSTI, M.; BALMFORD, A.; FITZ, S.; OBERSTEINER, M.; BROOKS, T. M. Impacts of incentives to reduce emissions from deforestation on global species extinctions. **Nature Climate Change**, v. 2, p. 350–355, 2012.

TAFFARELLO, D.; CALIJURI, M. C.; VIANI, R. A. G.; MARENGO, J. A.; MENDIONDO, E. M. Hydrological services in the Atlantic Forest, Brazil: An ecosystem-based adaptation using ecohydrological monitoring. **Climate Services**, v. 8, p. 1–16, 2017.

TAMBOSI, L. R.; MARTENSEN, A. C.; RIBEIRO, M. C.; METZGER, J. P. Framework to optimize biodiversity restoration efforts based on habitat amount and landscape connectivity. **Restoration Ecology**, v. 22, p. 169–177, 2014.

THEOBALD, D. M. LandSCaPeN v1.0: A Google Earth Engine toolbox to support analyses of landscape structure, composition, process, connectivity, and networks. 2023. Disponível em: <https://github.com/davidtheobald8/landscapen>. Acesso em: 18 nov. 2024.

THEOBALD, David M.; REED, Sarah E.; FIELDS, Kenyon; SOULÉ, Michael. Connecting natural landscapes using a landscape permeability model to prioritize conservation activities in the United States. **Conservation Letters**, v. 5, n. 2, p. 123–133, 2012. DOI: 10.1111/j.1755-263X.2011.00218.x.

UEZU, A.; METZGER, J. P.; VIELLIARD, J. M. E. Effects of structural and functional connectivity and patch size on the abundance of seven Atlantic forest bird species. **Biological Conservation**, v. 123, p. 507–519, 2005.

VIANI, R. A. G.; BRAGA, D. P. P.; RIBEIRO, M. C.; PEREIRA, P. H.; BRANCALION, P. H. S. Synergism between payments for water-related ecosystem services, ecological restoration, and landscape connectivity within the Atlantic Forest hotspot. **Tropical Conservation Science**, v. 11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1177/1940082918790222>.

WENDLAND, K. J.; HONZÁK, M.; PORTELA, R.; VITALE, B.; RUBINOFF, S.; RANDRIANARISOA, J. R. Targeting and implementing payments for ecosystem services: Opportunities for bundling biodiversity conservation with carbon and water services in Madagascar. **Ecological Economics**, v. 69, p. 2093–2107, 2010.

WILLIS, E. O. The composition of avian communities in remanescent woodlots in southern Brazil. **Papéis Avulsos de Zoologia**, v. 33, p. 1–25, 1979.

WOOD, M. A.; GILBERT, J. A.; LACHER, T. E. Payments for environmental services' role in landscape connectivity. **Environmental Conservation**, v. 47, n. 2, p. 89–96, 2020.

WUNDER, S. The efficiency of payments for environmental services in tropical conservation. **Conservation Biology**, v. 21, p. 48–58, 2007.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Este texto de dissertação estudou os desafios e soluções para a fragmentação florestal e a restauração de ecossistemas, enfatizando a importância da conectividade da paisagem e dos serviços ecossistêmicos no contexto das crises climática e de biodiversidade.

O artigo de revisão sistemática forneceu uma visão abrangente sobre o uso de modelos de conectividade, identificando tendências metodológicas e destacando ferramentas como Circuitscape, Linkage Mapper e InVEST, que integram a conectividade com a gestão de serviços ecossistêmicos. Além disso, o artigo apontou lacunas, como a necessidade de maior foco em serviços culturais e sociais, e desafios relacionados à padronização metodológica, projeções de cenários futuros e conectividade em grandes escalas.

O artigo principal avançou ao modelar cenários de restauração florestal no estado de São Paulo, evidenciando o potencial dos programas de Pagamento por Serviços Ambientais para ampliar a cobertura vegetal e fortalecer a conectividade funcional da paisagem.

De maneira conjunta, os dois artigos reforçam o papel estratégico da conectividade ecológica na conservação da biodiversidade, no planejamento territorial e no subsídio de políticas públicas para decisões sustentáveis que conciliam conservação ambiental e o desenvolvimento humano.

Agradecimentos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro que viabilizou este estudo (Processo nº 2023/06214-4) e à Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), por meio do Programa de Pós-Graduação em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis (PPGPUR), pelo apoio financeiro e estrutural.