

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA  
*CAMPUS LAGOA DO SINO*

HELOISA SATIE MATUNAGA

**MONITORAMENTO DA BIODIVERSIDADE EM ÁREAS DE RESTAURAÇÃO  
FLORESTAL: UMA ABORDAGEM INTEGRADA DE SENSORIAMENTO RE-  
MOTO**

BURI -SP  
2025

HELOISA SATIE MATUNAGA

**MONITORAMENTO DA BIODIVERSIDADE EM ÁREAS DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL: UMA ABORDAGEM INTEGRADA DE SENSORIAMENTO REMOTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Centro de Ciências da Natureza da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental

Orientador: Paulo Guilherme Molin

Buri - SP  
2025

Matunaga, Heloisa Satie

Monitoramento da biodiversidade em áreas de restauração florestal: uma abordagem integrada de sensoriamento remoto / Heloisa Satie Matunaga -- 2025. 57f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, campus Lagoa do Sino, Buri

Orientador (a): Paulo Guilherme Molin

Banca Examinadora: Yhasmin Paiva Rody, Renan

Tarenta Meirelles Brasil

Bibliografia

1. Sensoriamento remoto. 2. Restauração ecológica. 3. Monitoramento da biodiversidade florística. I. Matunaga, Heloisa Satie. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática (SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Lissandra Pinhatelli de Britto - CRB/8 7539

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

CENTRO DE CIÊNCIAS DA NATUREZA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

**Folha de Aprovação**

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso do(a) candidato(a) Heloisa Satie Matunaga, realizada em 21/01/2025:

Documento assinado digitalmente  
 PAULO GUILHERME MOLIN  
Data: 22/01/2025 11:46:09-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Gestor Ambiental Dr. Paulo Guilherme Molin – Orientador(a)  
Centro de Ciências da Natureza – UFSCar – Campus Lagoa do Sino.

Documento assinado digitalmente  
 YHASMIN PAIVA RODY  
Data: 28/01/2025 14:53:34-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Eng.a Floresta Dr.a Yhasmin Paiva Rody  
Suzano S.A.

Documento assinado digitalmente  
 RENAN TARENTE MEIRELLES BRASIL  
Data: 28/01/2025 15:22:42-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Eng. Florestal Me. Renan Tarenta Meirelles Brasil  
Suzano S.A.

## **DEDICATÓRIA**

À minha mãe e ao meu pai,

“Quando 'tá escuro e ninguém te ouve

Quando chega a noite e você pode chorar

Há uma luz no túnel dos desesperados

Há um cais de porto pra quem precisa chegar”

(Lanterna dos afogados, Paralamas do Sucesso)

Assim como a luz no túnel dos desesperados e o cais de porto, vocês sempre foram minha luz e meu porto seguro. Nos momentos mais difíceis, encontrei em vocês o apoio e o conforto necessários para seguir em frente.

## AGRADECIMENTO

Este trabalho representa não apenas o resultado de anos de estudo e esforço pessoal, mas também a força que encontrei nas pessoas que acreditaram em mim e me apoiaram em cada passo dessa jornada.

À minha Mãe, Alessandra, minha maior força e meu maior exemplo de resiliência. Obrigada por nunca duvidar de mim, por sempre acreditar que eu seria capaz e por ter colocado suas necessidades em segundo plano para me oferecer sempre o melhor. Mesmo nos momentos mais difíceis, suas palavras de conforto sempre me lembravam que os piores momentos passariam. Seu amor e dedicação foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Ao meu pai, Hélio, que desde o início disse com firmeza: "Ela vai pra faculdade." Seu apoio incondicional e a liberdade que sempre me deu para seguir os meus sonhos foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

Aos meus avós, Leiko, Maria das Dores e Geraldo, que tanto me ajudaram a trilhar esse caminho. Seja com apoio financeiro para que a faculdade fosse possível ou com o carinho e acolhimento que sempre ofereceram, sou eternamente grata. Não sei como retribuir tamanha generosidade, mas prometo honrar todo o esforço de vocês.

À minha irmã Hellen, ainda tão pequena, mas que enfrentou com maturidade a saudade da minha ausência. Eu sei o quanto foi difícil para você entender por que eu precisava ir, e quero que saiba que senti tanta falta quanto você. Chorei muitas vezes de saudade, mas cada vez que pensava em você, tinha mais força para continuar. Você é e sempre será uma das minhas maiores motivações.

Aos meus tios Alisson, Alcione, Vilson, Andiará, Vivi e Dekera, por suas palavras de incentivo, por acreditarem no meu potencial e por sempre acreditarem na minha capacidade de alcançar meus objetivos.

Às minhas amigas Gabriela e Joice, que tornaram a faculdade uma experiência única e inesquecível. As nossas risadas intermináveis e a nossa playlist especial, "Nave da Helo", que sempre alegrava os momentos e tornava os dias mais leves, são memórias que guardarei para sempre.

Ao Centro de Pesquisa e Extensão (CePE-Geo), por ter me proporcionado um ambiente rico em aprendizado, oportunidades e crescimento. Aqui, encontrei portas abertas para explorar meu potencial e crescer tanto academicamente quanto profissionalmente. Aos amigos e colegas do CePE-Geo, que sempre estavam dispostos a ajudar, em especial aqueles que, com paciência e boa vontade, ligaram e configuraram o *workstation* incontáveis vezes para o processamento deste trabalho. Muito obrigada pela parceria, apoio técnico e pela amizade.

Ao meu professor orientador, Paulo Guilherme Molin, pela paciência, pelos ensinamentos e pela orientação ao longo de todo o processo. Suas contribuições foram essenciais para que este trabalho tomasse forma, e sou imensamente grata por todo o suporte oferecido.

## RESUMO

A biodiversidade florística desempenha um papel fundamental na manutenção dos serviços ecossistêmicos e na resiliência das florestas frente à degradação ambiental. No contexto atual de degradação ambiental, tecnologias de Sensoriamento Remoto (SR) têm se destacado como alternativas eficazes para avaliação e monitoramento da biodiversidade florística. O monitoramento de forma remota é uma metodologia inovadora e promissora. Este trabalho discute a utilização de dados de SR para análise espacial da biodiversidade florística em ambientes de restauração florestal. A metodologia se baseia na utilização do pacote `biodivMapR`, que utiliza imagens de satélite e dados provenientes de sensores remotos. O método é capaz de gerar mapas de alfa e beta diversidade para estimar a diversidade de espécies florísticas (alfa) e a heterogeneidade dos ecossistemas (beta) de forma multitemporal. Os resultados mostraram que este método pode avaliar de forma eficaz a diversidade alfa e beta em um ambiente de vegetação nativa, neste caso em Áreas de Alto Valor de Conservação (AAVCs) pertencentes à Suzano S.A localizadas em terrenos planos. Quando se utilizam dados de inventário florestal para calibração do algoritmo, observa-se uma correlação de 0,7. Os melhores parâmetros utilizados para estimar a biodiversidade foram atribuídos a um tamanho de janela 2 e cluster 60, que foram utilizados como referência para mensurar a alfa e beta diversidade em ambientes de restauração ecológica. Durante o período de 2014 a 2024, as áreas de restauração ecológica mostraram um ganho na diversidade de espécies e a metodologia de monitoramento (`biodivMapR`) se mostrou eficaz para mensurar os ganhos de biodiversidade florísticas nesses ambientes. Contudo este trabalho busca avaliar a eficácia do pacote para o monitoramento da biodiversidade florística em ambientes de restauração ecológica.

Palavras-chave: restauração ecológica; biodiversidade florística; monitoramento; sensoriamento remoto.

## **ABSTRACT**

Floristic biodiversity plays a fundamental role in maintaining ecosystem services and enhancing forest resilience against environmental degradation. In the current context of environmental degradation, Remote Sensing (RS) technologies have emerged as effective alternatives for the assessment and monitoring of floristic biodiversity. Remote monitoring represents an innovative and promising methodology. This study discusses the use of RS data for spatial analysis of floristic biodiversity in forest restoration environments. The methodology is based on the use of the `biodivMapR` package, which utilizes satellite images and data from remote sensors. The method is capable of generating alpha and beta diversity maps to estimate floristic species diversity (alpha) and ecosystem heterogeneity (beta) in a multi-temporal manner. The results showed that this method effectively evaluates alpha and beta diversity in native vegetation environments, specifically in High Conservation Value Areas (AAVCs) owned by Suzano S.A., located on flat terrains. When forest inventory data is used to calibrate the algorithm, a correlation of 0.7 is observed. The optimal parameters for estimating biodiversity were determined to be a window size of 2 and a cluster size of 60, which served as references for measuring alpha and beta diversity in ecological restoration environments. Between 2014 and 2024, ecological restoration areas demonstrated an increase in species diversity, and the monitoring methodology (`biodivMapR`) proved effective in measuring gains in floristic biodiversity in these environments. However, this study aims to evaluate the effectiveness of the package for monitoring floristic biodiversity in ecological restoration environments.

Keyword: ecological restoration; floristic biodiversity; monitoring; remote sensing.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Etapas fundamentais do processo de planejamento da restauração ecológica                                                                                       | 20 |
| Figura 2 - Trajetória do processo de restauração florestal                                                                                                                | 22 |
| Figura 3 - Esquema de obtenção de dados por sensoriamento remoto                                                                                                          | 23 |
| Figura 4 - Fluxograma do processamento realizado no bioDivMapR                                                                                                            | 26 |
| Figura 5 - Mapa de localização da AAVC Montes Claros                                                                                                                      | 28 |
| Figura 6 - Mapa de localização da AAVC Bloco 43 – CB                                                                                                                      | 29 |
| Figura 7 - Mapa de localização da AAVC Bloco 58 – CB                                                                                                                      | 30 |
| Figura 8 - Mapa de localização UP                                                                                                                                         | 31 |
| Figura 9 - Mapa de localização área de restauração Espírito Santo – Itaúnas                                                                                               | 32 |
| Figura 10 - Mapa de localização área de restauração Bahia – Veredas                                                                                                       | 32 |
| Figura 11 - Tabela de correlação dos dados de alfa diversidade e dados de campo, referente aos anos de 2014, 2018 e 2022 da AAVC Montes Claros para diferentes parâmetros | 40 |
| Figura 12 - Tabela de resultados de correlação dos dados de alfa diversidade e dados de campo da AAVC Bloco 43 – CB                                                       | 42 |
| Figura 13 - Tabela de resultados de correlação dos dados de alfa diversidade e dados de campo da AAVC Bloco 43 – CB                                                       | 42 |
| Figura 14 - Mapa de alfa diversidade florística das AAVCs Bloco 43 CB e Bloco G8 CB                                                                                       | 43 |
| Figura 15 - Mapa de beta diversidade florística das AAVCs Bloco 43 CB e Bloco G8 CB                                                                                       | 44 |
| Figura 16 - Mapa de resultados de alfa diversidade florística da Unidade de Plantio para diferentes parâmetros                                                            | 45 |
| Figura 17 - Mapa de resultados de beta diversidade florística da Unidade de Plantio para diferentes parâmetros                                                            | 46 |
| Figura 18 - Mapa de declividade do terreno nas áreas de restauração ecológica                                                                                             | 47 |
| Figura 19 - Mapa de alfa e beta diversidade florística dos diferentes anos analisados da área de restauração Itaúnas – ES                                                 | 48 |
| Figura 20 - Gráfico das médias de alfa diversidade florística para os anos de 2010, 2014, 2020 e 2024                                                                     | 48 |
| Figura 21 - Mapa de alfa e beta diversidade florística dos diferentes anos analisados da área de restauração Veredas – BA                                                 | 49 |

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 22 - Gráfico das médias de alfa diversidade florística para os anos de 2010, 2014, 2020 e 2024 | 49 |
| Figura 23 - Mapa de declividade do terreno das AAVCs analisadas                                       | 50 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Informações sobre os produtos de sensoriamento remoto utilizados para o processamento no biodivMapR em diferentes áreas de estudo | 34 |
| Tabela 2 - Bandas do Landsat 8-9 utilizadas no processamento pelo pacote biodivMapR e suas respectivas aplicações                            | 35 |
| Tabela 3 - Bandas do Sentinel-2 utilizadas no processamento pelo pacote biodivMapR e suas respectivas aplicações                             | 36 |
| Tabela 4 - Parâmetros utilizados para atualização das máscaras em diferentes áreas de estudo                                                 | 37 |

## **LISTA DE SIGLAS**

SR – Sensoriamento Remoto

MMA - Ministério do Meio Ambiente

PCA - Principal Component Analysis

AAVC - Área de Alto Valor de Conservação

UP – Unidade de Plantio

DEM - Digital Elevation Model

NDVI - Normalized Difference Vegetation Index

NIR - Near Infrared

SIG - Sistema de Informação Geográfica

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha$  - Alfa

$\beta$  - Beta

nm - Nanômetros

ha - Hectare

## SUMÁRIO

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                             | <b>15</b> |
| <b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>                                  | <b>18</b> |
| 2.1 MATA ATLÂNTICA.....                                               | 18        |
| 2.2 RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA .....                                       | 19        |
| 2.3 SENSORIAMENTO REMOTO.....                                         | 22        |
| 2.4 SISTEMAS SENSORES .....                                           | 24        |
| 2.5 PROGRAMA LANDSAT.....                                             | 24        |
| 2.6 PROGRAMA SENTINEL .....                                           | 25        |
| 2.7 BiodivMapR.....                                                   | 25        |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                                    | <b>27</b> |
| 3.1 ÁREA DE ESTUDO.....                                               | 27        |
| 3.1.2 ÁREAS DE ALTO VALOR DE CONSERVAÇÃO .....                        | 27        |
| 3.1.3 UNIDADE DE PLANTIO.....                                         | 30        |
| 3.1.4 RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA.....                                      | 31        |
| 3.2 BANCO DE DADOS.....                                               | 33        |
| 3.3 PROCESSAMENTO .....                                               | 36        |
| 3.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS.....                                     | 38        |
| <b>4. RESULTADOS .....</b>                                            | <b>39</b> |
| 4.1 ÁREAS DE ALTO VALOR DE CONSERVAÇÃO .....                          | 39        |
| 4.2 UNIDADE DE PLANTIO .....                                          | 44        |
| 4.3 RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA .....                                       | 46        |
| <b>5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>                              | <b>50</b> |
| 5.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DE ALFA DIVERSIDADE E DADOS DE CAMPO.... | 50        |
| 5.2 UNIDADE DE PLANTIO .....                                          | 52        |
| 5.3 RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA .....                                       | 52        |
| 5.4 IMPORTÂNCIA DO ESTUDO.....                                        | 52        |
| 5.5 RECOMENDAÇÕES.....                                                | 53        |
| <b>6. CONCLUSÕES.....</b>                                             | <b>53</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                              | <b>54</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

A população tem crescido exponencialmente, principalmente nas áreas que abrangem o bioma Mata Atlântica, por consequência, o desmatamento se elevou da mesma forma, devido às necessidades humanas. As áreas que antes eram florestas homogêneas, foram destinadas para agricultura, pecuária, expansão urbana e silvicultura, para satisfazer as necessidades humanas e impulsionar o desenvolvimento econômico do país. E estas áreas, atualmente, são as principais causadoras do desmatamento nesse bioma (SANTOS et al., 2020). Devido às intensas atividades nessas áreas, os principais impactos negativos do desmatamento são a erosão, compactação do solo e o decaimento dos nutrientes do solo. O regime hidrológico também é afetado, onde as funções da bacia hidrográfica ficam sensibilizadas quando as florestas se tornam unidades de manejo de pastejo, por exemplo. Nessas áreas desmatadas, a precipitação escoar de forma rápida, formando cheias. Por fim, a perda da biodiversidade, que é mais elevada em áreas com pouca floresta (FEARNSIDE, 2022).

Entretanto, a restauração surgiu com o objetivo de preencher essas lacunas derivadas do desmatamento, restabelecendo e recuperando a função ambiental dessas áreas anteriormente degradadas. Mas, existem três abordagens principais para o manejo e preservação ambiental, que são voltadas para um estágio específico de conservação ou recuperação dos ecossistemas, que são: a proteção efetiva dos ecossistemas nativos inalterados ou pouco alterados, que visa garantir que os ecossistemas que ainda estão em seu estado natural ou que sofrem pouca intervenção humana sejam preservados de maneira eficaz. A conservação dos ecossistemas naturais alterados, mas que ainda mantêm uma integridade ecológica. Por fim a restauração dos ecossistemas degradados, que envolve a recuperação com plantio de espécies nativas, técnicas para controle de erosão e recuperação da funcionalidade dos ecossistemas, garantindo serviços ecológicos e consequentemente aumentando a biodiversidade (BRANCALION et al., 2015).

A biodiversidade corresponde à diversidade genética, responsável pela variação entre indivíduos, populações e grupos taxonômicos das espécies. Por isso, se torna fundamental para a saúde do planeta, isto é, considerada um dos componentes principais de suporte à vida, resulta de milhões de anos de evolução ecológica. Mas, desempenha também um papel importante na economia brasileira, capaz de gerar riquezas e oportunidades nos setores agroindustrial, florestal e pesqueiro, por exemplo (Ministério do Meio Ambiente, [s.d]; JOLY et al., 2011).

O Brasil é um dos países mais ricos em biodiversidade no mundo (Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2024; MITTERMEIER et al., 2005). Mas, ao mesmo tempo, dentre os principais desafios ambientais no Brasil, está a conservação da biodiversidade nesse

território (JOLY et al., 2011). Devido a expansão das atividades agrícolas, já citadas anteriormente, representam uma significativa transformação nas paisagens brasileiras. De acordo com os dados do MapBiomas (2024), a Mata Atlântica é reconhecida atualmente como o bioma mais degradado do Brasil. Contém apenas 12% da sua vegetação nativa original, e essas áreas estão, em sua maioria, altamente fragmentadas. As áreas suscetíveis ao processo de degradação variam entre 36% e 73% de sua vegetação restante, dependendo dos cenários considerados.

O bioma Mata Atlântica tem grande relevância, pois abriga mais de 70% da população, 80% da economia é favorecida devido a ele, sendo o local que engloba centros urbanos e industriais. Vale ressaltar também que é responsável por grande parte da produção de alimentos no país. Por isso, devido essa perda de área original, a Mata Atlântica é considerada como ecossistema prioritário para restauração. Diversas fundações vêm se mobilizando para fins de restauração florestal dessas áreas degradadas nesse bioma (SOS Mata Atlântica, 2022). De acordo com a Fundação SOS Mata Atlântica, suas iniciativas são uma das principais contribuições para restauração no país, com aproximadamente 44 milhões de árvores nativas plantadas em mais de 24 mil hectares, contemplando 9 estados e 550 municípios do Brasil. Outra fundação como a Pacto pela Restauração da Mata Atlântica também atua com o mesmo objetivo, e atualmente tem como meta “viabilizar a recuperação de 15 milhões de hectares até o ano de 2050, mas com metas e monitoramento dos resultados anuais”. Além disso, a fundação possui parceria com a Suzano S.A., unindo esforços para promover a restauração e conservação da Mata Atlântica, contribuindo para o equilíbrio ambiental e o desenvolvimento sustentável.

Contudo, Brancalion et al., (2015) menciona sobre a importância do monitoramento em áreas de restauração, para avaliar a eficácia das iniciativas de restauração e assim construir uma base de dados que pode ser utilizada para futuras iniciativas; avaliar a biodiversidade, que reflete diretamente na importância de preservar os ecossistemas dessas áreas; promover a responsabilidade das organizações e gestores de projetos, garantindo que os recursos foram utilizados de forma eficaz; planejar ações de manejo e conservação a longo prazo.

Atualmente, é realizado o monitoramento da biodiversidade por meio do inventário florestal, por sua vez, é uma ferramenta essencial para o monitoramento da composição e estrutura das florestas, fornecendo dados críticos para a avaliação da biodiversidade (BRANCALION et al., 2015; VIEIRA et al., 2021). O inventário florestal mensura a evolução de florestas e dispõe de dados de composição e estrutura de cada espécie presente na parcela florestal inventariada. Pode ser realizado uma única vez ou em múltiplas épocas ou anos para acompanhar o crescimento e evolução da floresta. Além disso, intensidade amostral em um inventário florestal está

relacionada aos custos e recursos disponíveis, que permite otimizar a alocação de recursos e melhorar a eficiência do inventário, garantindo que o número de amostras coletadas esteja alinhado com o orçamento disponível (FLORIANO, 2021).

No entanto, observa-se que há algumas limitações no monitoramento por meio de inventário florestal, como recursos financeiros, tempo de amostragem e áreas que às vezes são inacessíveis, por exemplo, áreas com vegetação densa e variada tendem a abrigar mais espécies de plantas, animais e outros organismos (SILVA, 2017). Por isso, métodos operacionais que utilizam de dados de Sensoriamento Remoto (SR) se tornaram essenciais para fornecer informações capazes de realizar avaliação contínua das comunidades biológicas e dos ecossistemas (ALMEIDA et al., 2023; SILVA et al., 2024).

Neste contexto, o pacote *biodivMapR*, desenvolvido por Jean-Baptiste Féret e Florian de Boissieu (2019), destaca-se como uma ferramenta potencial de mensurar indicadores importantes para a análise da biodiversidade. Alguns estudos têm destacado a eficácia e potencial do pacote nas análises de biodiversidade, utilizando dados de SR. Como por exemplo, o estudo realizado por Gastellu-Etchegorry et al. (2022), que explorou o uso do pacote e demonstrou a capacidade do *biodivMapR* em integrar múltiplas fontes de dados e realizar análises referente à riqueza de espécies.

A restauração ecológica é fundamental para recuperar ecossistemas degradados, restabelecendo sua saúde e sustentabilidade. Além disso, os ecossistemas restaurados frequentemente abrigam uma grande diversidade biológica, as quais são importantes para a resiliência e o funcionamento dos ecossistemas (BRANCALION et al., 2015). Para garantir a eficácia dessas ações, o monitoramento é essencial. Mas, como tecnologias de sensoriamento remoto podem ser utilizadas de forma eficiente para monitorar a biodiversidade florística em ambientes de restauração ecológica? Ferramentas como o *biodivMapR* utilizam dados de sensoriamento remoto que podem fornecer informações detalhadas sobre a biodiversidade, permitindo uma avaliação contínua e precisa das comunidades biológicas e dos ecossistemas (GASTELLU ET-CHEGORRY, et al., 2022; FÉRET et al., 2019).

Diante dessa questão, este estudo visa analisar a biodiversidade de modo multitemporal em ambientes de restauração florestal da Suzano S.A, utilizando indicadores alfa e beta diversidade do *biodivMapR*.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 MATA ATLÂNTICA

A Mata Atlântica, um dos biomas brasileiros que percorre alguns territórios dos estados do Espírito Santo, Rio de Janeiro, Santa Catarina, Alagoas, Bahia, Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraíba, Paraná, Pernambuco, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, São Paulo, Ceará, Piauí e Sergipe. Com extensão territorial de 1,3 milhões de km<sup>2</sup> (quilômetros quadrados), é composta por um conjunto de formações florestais, dentre elas: Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Estacional Semidecidual e Floresta Estacional Decidual. Mas, atualmente apenas 29% de sua cobertura vegetal natural está presente (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2024).

Esse percentual, reflete diretamente ao processo de degradação e desmatamento nesse bioma devido à “superexploração” dos recursos naturais, desde a época do descobrimento, começando com o principal alvo de extração: o pau-brasil, que atualmente encontra-se quase extinto, seguindo de outras madeiras como jacarandá, peroba, canela e sucupira, por exemplo, explorados na região nordeste do Brasil. Nas regiões ao sul, os cultivos de cana-de-açúcar também foram intensamente responsáveis pelo desmatamento na Mata Atlântica. Na região sudeste o café, que era uma das principais atividades econômicas, e conseqüentemente diversas áreas de florestas tropicais, como a Mata Atlântica, foram derrubadas para dar lugar à cultura cafeeira (INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS, [s.d]).

Mesmo com um percentual baixo de cobertura vegetal original, é uma das regiões mais ricas em biodiversidade do mundo. De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA) (2024), atualmente cerca de 20 mil espécies vegetais, o que corresponde a 35%, estão presentes no bioma. A Mata Atlântica tem uma importância significativa em várias funções, incluindo a produção e regulação da água, o equilíbrio do clima, a proteção de encostas e a mitigação de desastres. Ela também contribui para a fertilidade do solo, a produção de alimentos, madeira, fibras, óleos e remédios, além de criar paisagens bonitas e preservar um valor valioso. Essas funções se tornam essenciais e importantes, pois esse bioma também é ocupado por mais de 50% da população brasileira (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2024).

Uma vez que há vidas dependentes dos recursos daquele bioma, que mantêm nascentes e cursos d'água protegidas para abastecimento das cidades e comunidades presentes naquele território, por exemplo, sua preservação, conservação e recuperação se tornam essenciais. Por

isso, criou-se a Lei 11.428 de dezembro de 2006 que “Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências.”. Essa legislação considera, para os seus efeitos, aspectos como a população, pequenas produções rurais, a exploração sustentável e as atividades de manejo, envolvendo a proteção e a integridade da vegetação.

Neste contexto, a restauração é uma meta fundamental para a conservação desse bioma, por isso, o Brasil tem como meta restaurar, até 2030, 12 milhões de hectares de florestas e implementar 5 milhões de hectares de sistemas com integração entre lavoura, pecuária e floresta (INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 2024). Com isso, surgiram muitas fundações com iniciativas a contribuir com essa meta e com o cumprimento da Lei 11.428/2006, como o Pacto pela restauração da Mata Atlântica e SOS Mata Atlântica. Como evidência das iniciativas dessas fundações, o Atlas dos Remanescentes Florestais da Mata Atlântica (2023) identificou uma redução de 27% em relação ao período anterior, uma tendência de queda na taxa de desmatamento no bioma. Mas, vale ressaltar ainda que o desflorestamento ainda persiste, principalmente em áreas de transição.

## 2.2 RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA

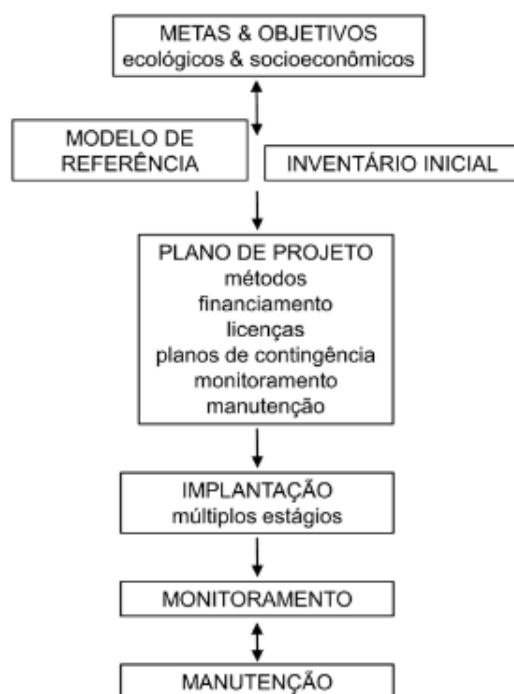
Diante do atual cenário e registros de degradação histórica dos ecossistemas naturais brasileiros, o Brasil se tornou um *hotspot* de restauração do mundo e uma vez que a qualidade de vida das pessoas é diretamente relacionada com a qualidade ambiental, a restauração passa a ter valor intrínseco às sociedades. A restauração ecológica se diferencia de alguns termos inseridos na literatura, que algumas vezes podem parecer similares, mas possuem um significado diferente, esses termos são: “reabilitação”, “recuperação”, “redesignação” e “revegetação” (BRANCALION et al., 2010). Entretanto, é um método que tem como objetivo recuperar os aspectos ambientais, sociais, econômicos, legais e culturais. Além disso, promover a produção de serviços ambientais de ambientes degradados, como produção de água, biodiversidade e carbono (ALMEIDA, 2016).

Por outro lado, a restauração é um pouco mais complexa, como visto na figura (1), que abrange conjuntamente ao processo o monitoramento, que visa direcionar a área em processo de restauração satisfatório. A restauração ecológica busca como sucesso na restauração que o ecossistema antes desagrado, tenha recursos bióticos suficientes para continuar seu desenvolvimento e funcionamento, que são a sustentação estrutural e funcional, ser resiliente às variações de estresses ambientais e perturbações e interação com ecossistemas (HOLL, 2023). Con-

siderada um instrumento de conservação da biodiversidade e de adequação ambiental, a restauração ganhou força devidos as políticas e objetivos, como a Lei Brasileira de Proteção da Vegetação Nativa (LPVN) 12.651 de maio de 2012, que estabelece:

[...] normas gerais sobre a proteção da vegetação, áreas de Preservação Permanente e as áreas de Reserva Legal; a exploração florestal, o suprimento de matéria-prima florestal, o controle da origem dos produtos florestais e o controle e prevenção dos incêndios florestais, e prevê instrumentos econômicos e financeiros para o alcance de seus objetivos (Lei 12.651/2012. p. 1).

**Figura 1** - Etapas fundamentais do processo de planejamento da restauração ecológica.



**Fonte:** HOLL, 2023.

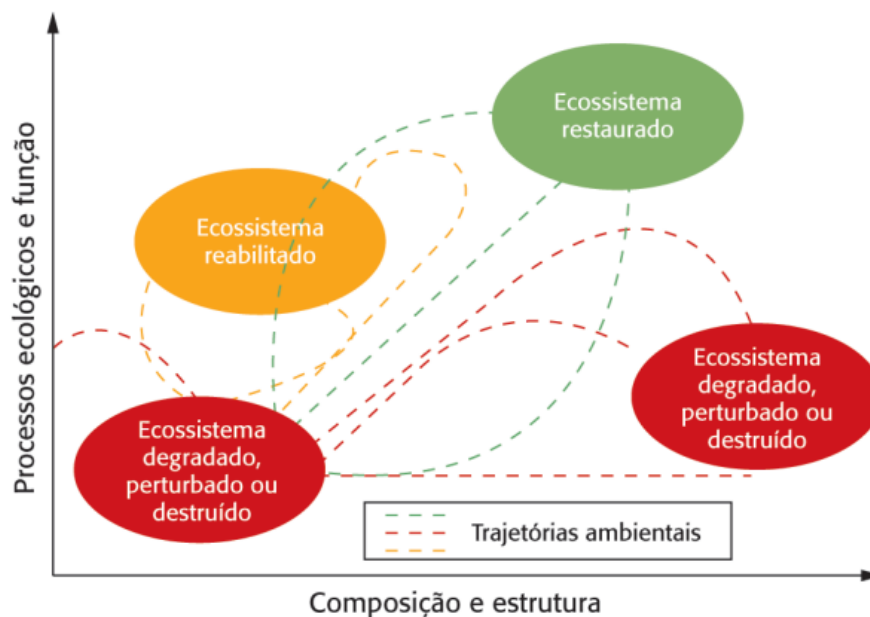
Para que a restauração atinja seus objetivos é importante realizar o diagnóstico ambiental da área degradada. A fim de compreender a causa do ambiente que está sofrendo aqueles impactos negativos, avaliar o potencial de regeneração do local, escolher melhores técnicas de restauração para o local específico, principalmente para otimização de recursos e custos, além do planejamento das fases do projeto de restauração (SAMPAIO et al., 2021). Esta etapa utiliza de muitas ferramentas de geoprocessamento e visitas de campo para o levantamento de informações necessárias para o diagnóstico.

Existem diferentes métodos de restauração florestal: a restauração passiva e a restauração ativa. A restauração passiva ocorre com a regeneração natural que ocorre de forma espontânea, uma vez que a interrupção de distúrbios antrópicos ocorre, a vegetação nativa se regenera. Por isso, torna-se fundamental o isolamento de área e a interrupção de práticas que prejudiquem a regeneração de espécies nativas. Mas, há casos em que as áreas não possibilitam o aproveitamento inicial da regeneração natural, devido ao tempo de uso do solo, em que a degradação do solo, incluindo compactação, perda de nutrientes e alteração na estrutura, pode inibir o crescimento de novas plantas. O histórico de distúrbios ambientais, como eventos como incêndios florestais, inundações e secas podem causar estresse adicional ao ecossistema, dificultando a regeneração. E a baixa disponibilidade de sementes, por exemplo, em que a escassez de sementes de espécies nativas na área pode limitar as possibilidades de regeneração natural (BRANCALION et al., 2015; BIOFLORA TECNOLOGIA DA RESTAURAÇÃO, 2016).

A restauração ativa corresponde ao método de plantio de mudas de espécies nativas de um determinado local, esse tipo de restauração possui diferentes métodos como a revegetação, que consiste no plantio de espécies nativas para promover a recuperação da vegetação. O enriquecimento da vegetação, realizado pela adição de espécies nativas em áreas com baixa diversidade e assim aumentar a resiliência do ecossistema. Por último, o controle de espécies invasoras, que consiste na remoção ou controle de espécies exóticas, que implicam a regeneração de espécies nativas. Além disso, esse método requer uma seleção adequada de espécies nativas e geneticamente apropriadas para a região em que a restauração será realizada, com o objetivo de garantir a adaptação ao ambiente e o sucesso ao longo do tempo (SAMPAIO et al., 2021).

Durante o processo de restauração a área restaurada passa por diferentes trajetórias ambientais, que mostra sua relação à função, aos processos ecológicos, à composição e à estrutura (Figura 2), essas trajetórias ou diferentes fases da restauração são de grande relevância para serem monitoradas (BRANCALION et al., 2015). Na figura (1) como “penúltima” etapa do processo de restauração está o monitoramento, essa etapa é de grande importância para avaliar a eficácia da restauração implementada, detectar problemas ou falhas no processo e ajustar estratégias de manejo conforme as condições da área em questão, que podem mudar ao longo do tempo, devido às condições e mudanças climáticas.

**Figura 2:** Trajetória do processo de restauração florestal.



**Fonte:** BRANCALION et al., 2015.

Brancalion et al., (2015) aborda também sobre o monitoramento, mas primeiramente é essencial definir indicadores que mensuram o sucesso da restauração, dentre eles estão os parâmetros ecológicos como a diversidade e riqueza de espécies e estrutura da vegetação, por exemplo. Utilizar de parcelas permanentes dentro da área restaurada, para realização de medições (características estruturais das espécies). Dos métodos, os mais convencionais são a coleta de dados em campo, os inventários florestais ou de vegetação, que catalogam todas as espécies de plantas presentes nas parcelas definidas para o monitoramento.

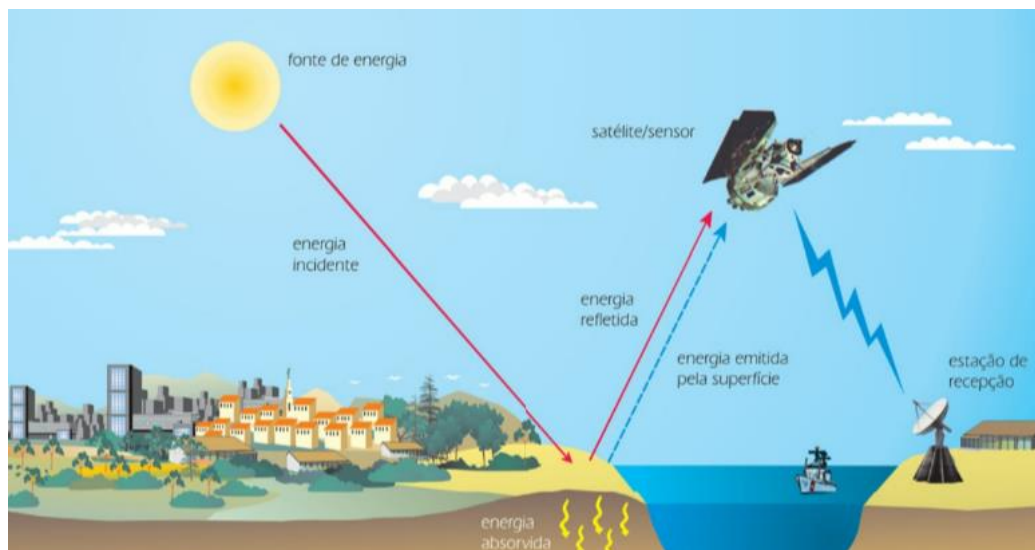
Ainda, Almeida et al., (2023) e Féret et al., (2014) abordam que com os modelos e tecnologias presentes neste momento possibilita análises complementares em grande escala, principalmente voltadas para o monitoramento de áreas restauradas. Uma das tecnologias é o SR que pode ser utilizado e que possui a capacidade de mensurar de maneira efetiva a diversidade de espécies presentes no ambiente em questão e métricas relacionadas a estrutura das espécies.

### 2.3 SENSORIAMENTO REMOTO

O Sensoriamento Remoto (SR) se baseia em uma tecnologia que possui a capacidade de capturar informações de objetos presentes na superfície terrestre, estas informações podem ser um registro fotográfico, por exemplo. A obtenção de dados por sensoriamento remoto, que constituem na detecção e aquisição passa por uma interação da radiação com a superfície. Uma

vez que a energia é refletida, parte é absorvida pelo objeto na superfície, que consequentemente muda sua temperatura ( $T$ ) para uma  $T$  maior que zero absoluto, isto é  $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$  (graus Celsius) ou  $0\text{ K}$  (Kelvin). A energia absorvida pelo objeto é então refletida para um sensor ou satélite em órbita, como visto na figura (3) (FLORENZANO. 2019).

**Figura 3:** Esquema de obtenção de dados por sensoriamento remoto.



**Fonte:** Florenzano, 2019.

Os dados de SR são dependentes de energia eletromagnética ou radiação eletromagnética, que é inibida e então registrada pelos sensores orbitais, por exemplo (MAIO et al., 2008). A forma de obtenção de dados por SR pode ser também por outras fontes, como drones, que também possuem sensores nas aeronaves remotamente pilotadas (FLORENZANO, 2019).

A energia eletromagnética ou radiação eletromagnética se propaga através de ondas. As ondas possuem uma variedade de comprimentos, que vão desde ondas de rádio (frequência baixa) até raios gama (frequência alta). O ser humano é capaz de visualizar parte do espectro entre  $380\text{ nm}$  (nanômetros) e  $750\text{ nm}$ , que está entre a radiação ultravioleta e infravermelho, denominadas a “luz visível”. Cada faixa tem uma capacidade de detecção quando se trata da interação da energia com a superfície terrestre (água, solo e vegetação), que transmitem radiação em proporções que variam com o comprimento da onda, se baseando também nas suas características químicas e biofísicas. A vegetação tem alta absorção visível, que se dá pela fotossíntese, baixa absorção em cores e alta reflectância no infravermelho próximo. O solo é influenciado pelas bandas de absorção de seus componentes e alguns fatores físicos são determinantes. A água tem comportamento espectral de acordo com um de seus três estados físicos, por exemplo a água líquida com baixa reflectância (LIU, 2015).

## 2.4 SISTEMAS SENSORES

Os sistemas sensores são dispositivos que detectam a energia eletromagnética refletida em algumas faixas como o infravermelho, por exemplo. Os sensores estão presentes nos dispositivos utilizados para auxiliar na obtenção de dados como satélites e drones, essas informações capturadas pelos sensores são então convertidas em feições que descrevem o objeto que refletiu a energia. Os sensores podem ser classificados em passivos, aqueles que não possuem uma fonte específica de energia, mas muitas das vezes capturam a luz refletida pela energia solar, um exemplo são os instalados em satélites orbitais. E os sensores ativos, responsáveis por emitir sua própria radiação e mensurar a resposta, os radares, por exemplo. Os dados capturados pelos sensores dependem diretamente da sua capacidade de captar detalhadamente a energia eletromagnética refletida. A capacidade dos sensores para obter dados de qualidade estão relacionados com a resolução (MAIO et al., 2008).

A resolução espacial está relacionada à distância entre diferentes pontos de uma imagem, em que o sensor possa distingui-las. Entretanto, para mais detalhamento o sensor precisa se localizar mais próximo ao objeto e sensores posicionados mais longe, com maior resolução espacial tendem a apresentar menor detalhamento no que pretende-se observar. A resolução espectral se dá pela importância na identificação de diferentes objetos, por exemplo. Possui a capacidade de detectar diferentes comprimentos de onda da faixa de radiação eletromagnética. Logo, quanto maior a medida de comprimento de onda, melhor a resolução espectral da coleta. A capacidade de um sensor distinguir diferenças na intensidade da radiação que o mesmo obtém, se dá pela resolução radiométrica. Por último, a resolução temporal, que é relacionada ao tempo que aquele sensor irá realizar a captura de uma cena em um mesmo local (LIU, 2015). As diferentes resoluções variam de acordo com os níveis de aquisição requerido e utilizado para uma análise específica, atualmente existem os drones e os satélites, que oferecem dados com diferentes resoluções, como por exemplo os satélites Landsat e Sentinel.

## 2.5 PROGRAMA LANDSAT

O satélite Landsat, atua desde 1972 fornecendo imagens da superfície terrestre, gerenciado pela NASA e pelo US Geological Survey (USGS). O objetivo do programa é fornecer informações e dados para análise ambiental e uso da terra. Os dados são pré-processados e assim fornecidos gratuitamente pela USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) (NASA, [s.d]). O Landsat é dividido em coleções e níveis. A coleção 1 abrange dados de 1972 a 2021 em nível 1. Já a coleção 2 contém dados tanto de nível 1 de todos os Landsat, produtos científicos de nível 2 e nível 3 dos Landsat 4 a 9, com correções atmosféricas, geométricas e

radiométricas. Ambas coleções e satélites possuem a mesma resolução espacial de 30x30m (metros) (USGS,[s.d]) .

Atualmente os dados do Landsat 8 e 9, lançados a partir de 2013, utilizam sensores como o Operational Land Imager (OLI) e o Thermal Infrared Sensor (TIRS), com capacidade de capturar várias bandas espectrais, considerados da coleção 2 e de nível 2, são os que apresentam maior qualidade e calibração dos dados. O Landsat captura dados em diversas bandas espectrais, como luz visível, infravermelho próximo e térmico. Seu tempo de revisita ocorre a cada 16 dias em um mesmo local (NASA, [s.d]).

## 2.6 PROGRAMA SENTINEL

O Sentinel é operado pela Agência Espacial Europeia (ESA) e disponibilizado pela Copernicus Data Space Ecosystem. Atualmente conta com 4 satélites (Sentinel 1, 2 3 e 5P), cada um com uma capacidade diferente. O Sentinel 1A e 1B, disponibiliza imagens de radar, dia e noite, de todas as condições climáticas, para os serviços do meio terrestre e do oceano. O Sentinel 2 - 1C e 2A capturam imagens multiespectrais da superfície terrestre, o 3 mensura a topografia da superfície do mar e a temperatura da superfície do mar e da terra. Por fim o Sentinel 5P, mapeia uma grande quantidade de gases vestigiais, como dióxido de enxofre, metano, monóxido de carbono e aerossóis (ESA, [s.d]).

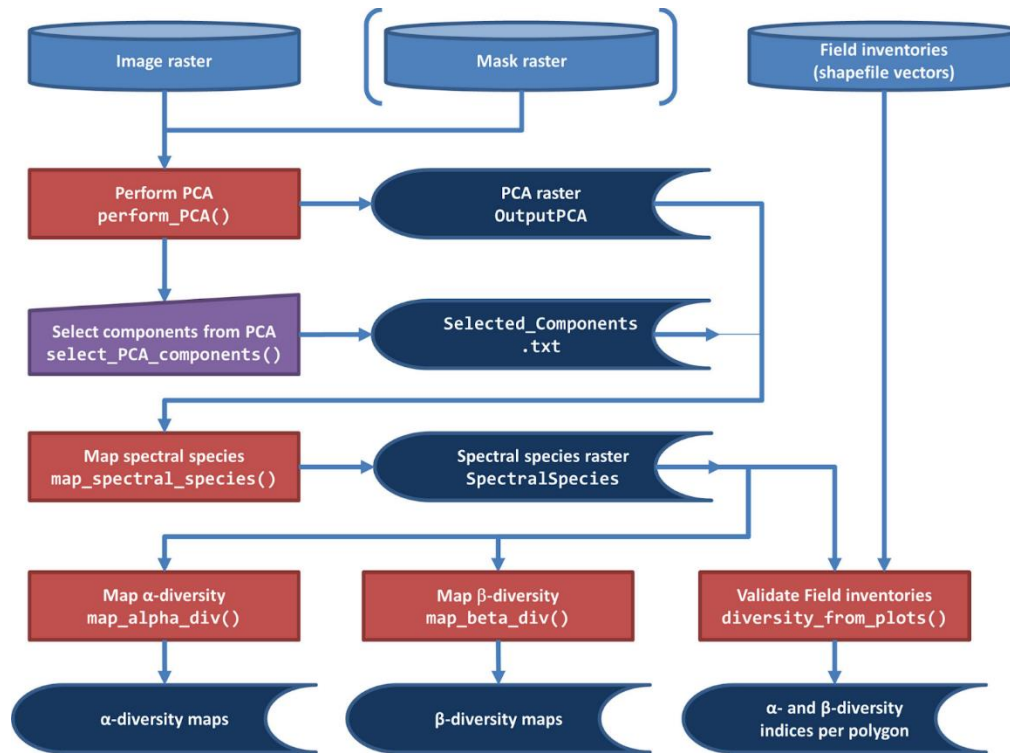
Os dados do Sentinel da cobertura global possuem um tempo de revisita de a cada 5 dias, a resolução espacial varia de 10, 20 e 60 para algumas bandas espectrais. As imagens disponibilizadas em nível 2A possuem correções atmosféricas, geométricas e radiométricas, que melhoram a qualidade das imagens, permitindo análises mais precisas (COPERNICUS, [s.d]).

## 2.7 BiodivMapR

O BiodivMapR é um pacote limitado integrado ao *software* RStudio, adaptado por Jean-Baptiste Féret e Florian de Boissieu. O objetivo do pacote é mapear a biodiversidade através de dados de SR, por espectroscopia de imagem de alta dimensionalidade capturadas por sensores aéreos ou satélites, mais precisamente dados de Sentinel-2. Demais dados de satélites podem ser utilizados, mas adaptações do pacote serão necessárias. A metodologia do pacote contempla a imagem óptica a ser processada, que posteriormente é transformada com *Principal Component Analysis* (PCA) e um subconjunto de componentes que são selecionados para produzir mapas espectrais de espécies com base no agrupamento *k-means*, o passo-a-passo do

pacote está ilustrado na figura (4). Os indicadores calculados pelo pacote são os componentes  $\alpha$  (alfa) e  $\beta$  (beta) diversidade (FÉRET et al., 2019).

**Figura 4:** Fluxograma do processamento realizado no biodivMapR.



**Fonte:** FÉRET et al., 2019.

O primeiro passo para utilização do pacote é definir os caminhos de arquivo de entrada e saída e a resolução espacial de saída. Dependendo da opção de imagem óptica a utilizar, há opções de pré-processamento antes da utilização do pacote. Posteriormente, o arquivo raster de entrada, precisa estar pareado com um arquivo com extensão “.hdr”. Além da imagem raster, pode-se inserir um arquivo máscara, a fim de detectar nuvens ou qualquer outro objeto da imagem que sejam desnecessários. A função “perform\_PCA” permite a aplicação de PCA e contabiliza automaticamente a máscara. A análise de componentes principais prepara a extração de características para reduzir o ruído na imagem. A redução de dimensionalidade é realizada para selecionar as informações espectrais mais interessantes em relação à diversidade espectral e remover ruído espacial e artefatos de sensor. Para o mapeamento de diversidade corresponde à computação de um *SpectralSpecies* mapa, que identifica o *cluster* (espécie espectral) atribuído a cada pixel na imagem, após o *clustering k-means* ser executado. A maioria dos parâmetros de entrada são obtidos ao executar “perform\_PCA” (FÉRET et al., 2024).

O mapeamento de  $\alpha$  diversidade são computados pela função “map\_alpha\_div”, através

do raster que é gerado pela imagem óptica (*input*) denominado *SpectralSpecies*, o pacote inclui dois indicadores  $\alpha$ , o índice de Shannon-Wiener e Simpson (FÉRET et al., 2019). O índice de Shannon-Wiener é um indicador que mensura a identidade de uma espécie dado o número e a distribuição de abundância para cada espécie presente em uma parcela amostral (HEIP, et al., 1998). De forma convencional, é calculado pela equação (1) abaixo.

$$H' = \sum_{i=1}^S p_i \cdot \ln(p_i) \quad (1)$$

Em que:

- $H'$  é o índice de Shannon-Wiener, com ausência de valor máximo, mas na literatura muito comum variar de 0 a 5, os valores máximos indicam maior diversidade;
- $p_i$  é a abundância relativa de cada espécie, calculada pela proporção de uma espécie pelo número total de indivíduos;
- $\ln$  é o logaritmo natural.

O mapeamento de  $\beta$  é derivado da matriz de dissimilaridade de Bray-Curtis, também obtida pelo raster de espécies espectrais. O processamento ocorre pela ordenação, que define o espaço 3D a partir de um subconjunto de janelas. Em seguida, calcula-se a dissimilaridade entre cada janela da imagem e o subconjunto usado na ordenação, e as coordenadas são atribuídas com base nas três janelas mais semelhantes, usando distância ponderada inversa. O NMDS (Non-metric multidimensional scaling) e a análise de coordenadas principais (PCoA) são os métodos de ordenação padrão utilizados no pacote (Féret et al., 2019 apud Legendre, 1998).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

##### 3.1.2 ÁREAS DE ALTO VALOR DE CONSERVAÇÃO

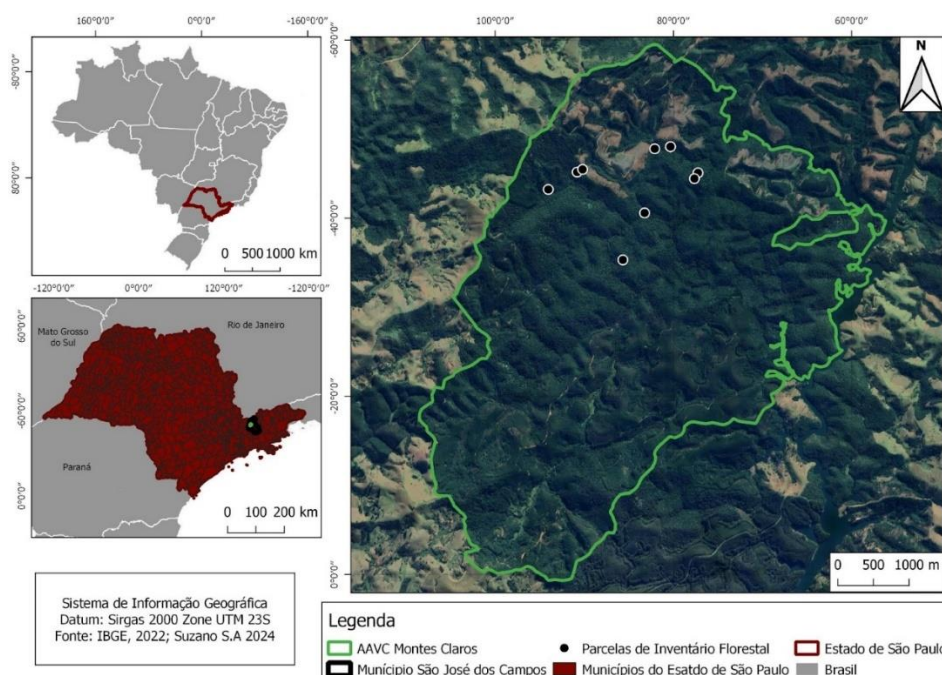
Foram utilizadas três áreas de estudos para avaliar, validar e calibrar o pacote. As Áreas de Alto Valor de Conservação (AAVCs) são áreas que apresentam atributos excepcionais, como elevada diversidade de espécies, ocorrência de espécies ameaçadas ou endêmicas, ecossistemas raros ou ameaçados, e a provisão de serviços ecossistêmicos essenciais, além de valores socioculturais relevantes. A Suzano, por exemplo, adota esse conceito em suas práticas de manejo florestal, protegendo remanescentes de vegetação nativa e recursos hídricos, bem como fomentando a conservação da biodiversidade por meio de monitoramentos ambientais e

restauração ecológica, conforme descrito em seu padrão corporativo (Suzano, 2021).

Essas áreas são pertencentes à Suzano S.A. Para obter-se os resultados de alfa e beta diversidade do biodivMapR, testaram-se diferentes parâmetros e avaliou-se a correlação dos dados de alfa diversidade com os dados de inventário florestal realizados em campo (índice de Shannon-Wiener). Para obter os resultados de alfa e beta diversidade utilizando o pacote, foram testados diferentes parâmetros e avaliada a correlação dos dados de alfa diversidade com os dados do inventário florestal realizado em campo, utilizando o índice de Shannon-Wiener. A correlação da beta diversidade com os dados de campo não foi realizada, pois os parâmetros utilizados na alfa diversidade foram suficientes para avaliar a eficácia dos parâmetros e conseguir os resultados de beta diversidade.

A primeira área de estudo, em que testou-se o biodivMapR foi a AAVC Montes Claros, conforme mapa abaixo (Figura 5), está localizada no Estado de São Paulo, no município de São José dos Campos, entre as coordenadas geográficas 23°02'33.59"S e 46°02'19.27"O. Esta área foi escolhida devido que as AAVCs localizadas no Estado de São Paulo são áreas que possuem maior registro de monitoramento de biodiversidade florística, ou seja, a área possui dados de composição de espécies referente ao inventário florestal realizado nos anos de 2014, 2018 e 2022. A área tem aproximadamente 1.231,13 ha (hectares) de extensão, com presença de 1.765,28 ha vegetação nativa (65%), 841,52 ha de eucalipto (31%) e 89,99 ha de outros usos, como estradas e edificações (4%) (CASA DA FLORESTA, 2022).

**Figura 5:** Mapa de localização da AAVC Montes Claros.

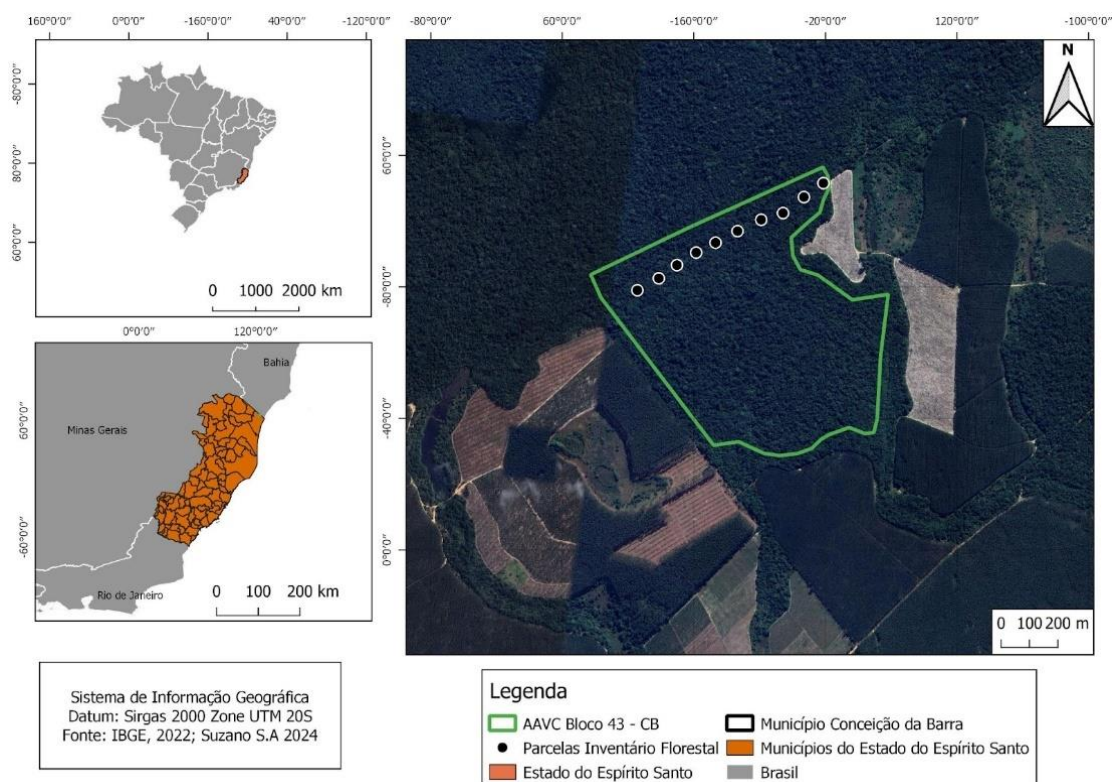


**Fonte:** Autoria própria, 2024.

Ainda para validação, escolheu-se duas AAVCs, uma localizada na Bahia e outra no Espírito Santo. Mas, para esta análise, verificou-se se essas duas AAVCs, estavam localizadas em locais mais planos, por isso foi elaborado um mapa de declividade utilizando o Digital Elevation Model (DEM) SRTM 1 Arc-Second Global, obtido do USGS, com resolução de 30 metros. O processamento do DEM foi realizado no QGIS, onde inicialmente o DEM foi preenchido para corrigir depressões. Em seguida, foi gerado um mapa de declividade, expressando a inclinação do terreno em porcentagem.

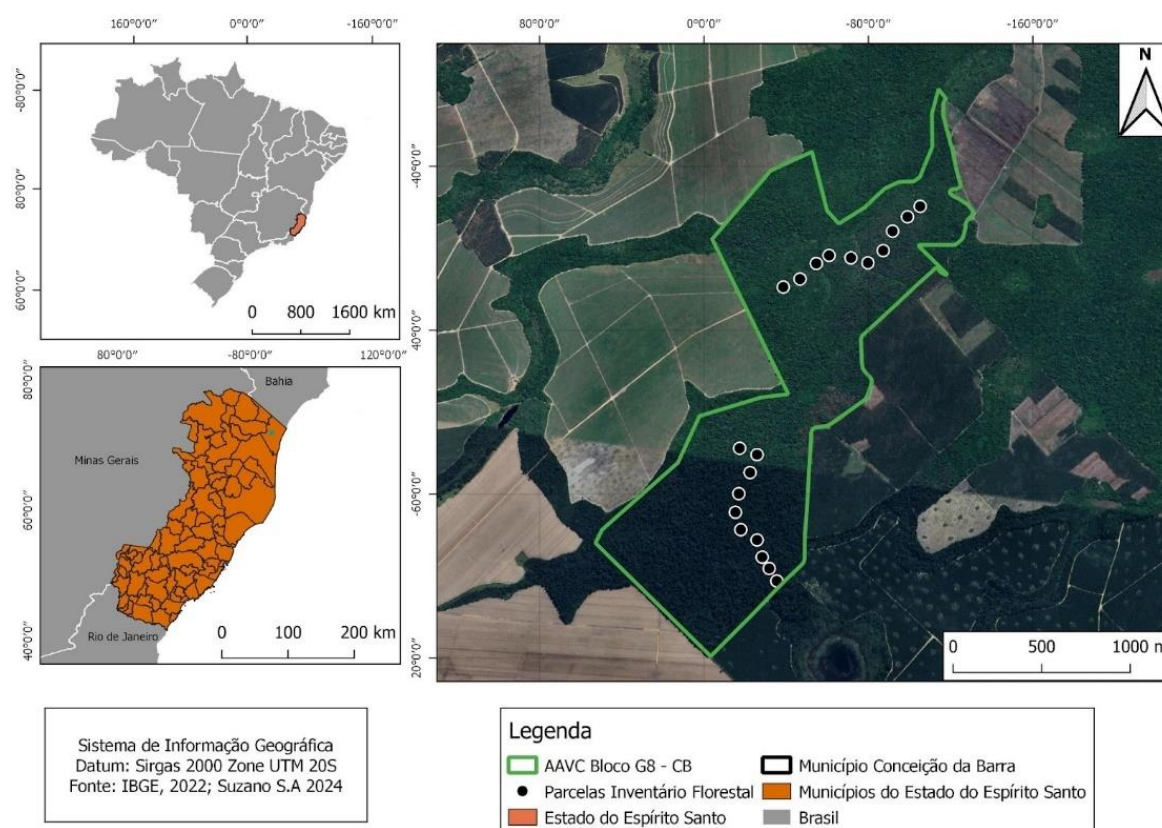
A AAVC Bloco 43 CB, localizada entre as coordenadas geográficas  $18^{\circ}16'53,85''\text{S}$  e  $39^{\circ}47'41,73''\text{O}$  possui 10 parcelas permanentes com dados de características de composição no inventário florestal referente ao ano de 2017 (Figura 6) e a AAVC Bloco 58 CB, localizada entre as coordenadas geográficas  $18^{\circ}25'24,07''\text{S}$  e  $39^{\circ}24'24,05''\text{O}$ , possui dados de 20 parcelas florestais permanente referente ao ano de 2021 (Figura 7). As AAVCs possuem área de extensão de 61,38 ha e 227,99 ha, respectivamente, apenas com presença de vegetação nativa.

**Figura 6:** Mapa de localização da AAVC Bloco 43 - CB.



**Fonte:** Autoria própria, 2024.

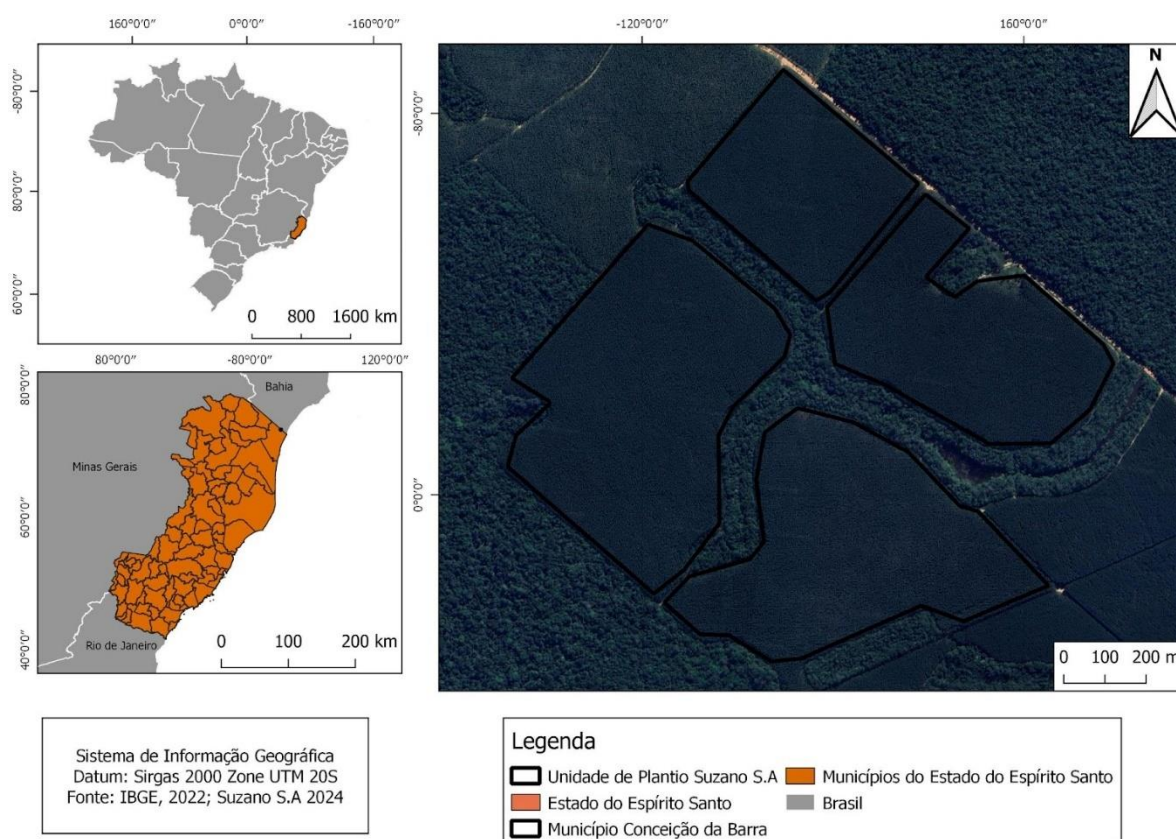
**Figura 7:** Mapa de localização da AAVC Bloco 58 - CB.



**Fonte:** Autoria própria, 2024.

### 3.1.3 UNIDADE DE PLANTIO

A fim de avaliar o potencial do pacote, realizou-se uma análise dos resultados de alfa e beta diversidade em ambiente com baixa diversidade florística, escolheu-se uma área denominada Unidade de Plantio (UP) apenas com presença de eucalipto, a UP está localizada no Norte do Espírito Santo, entre as coordenadas geográficas  $18^{\circ}16'54,24''S$  e  $39^{\circ}45'41,30''O$  no município Conceição da Barra, conforme mapa abaixo (Figura 8). A área tem aproximadamente 104,02 ha de extensão e a idade do eucalipto no ano de 2024 é de 4 anos, desde o seu plantio realizado em 11 de setembro de 2020.

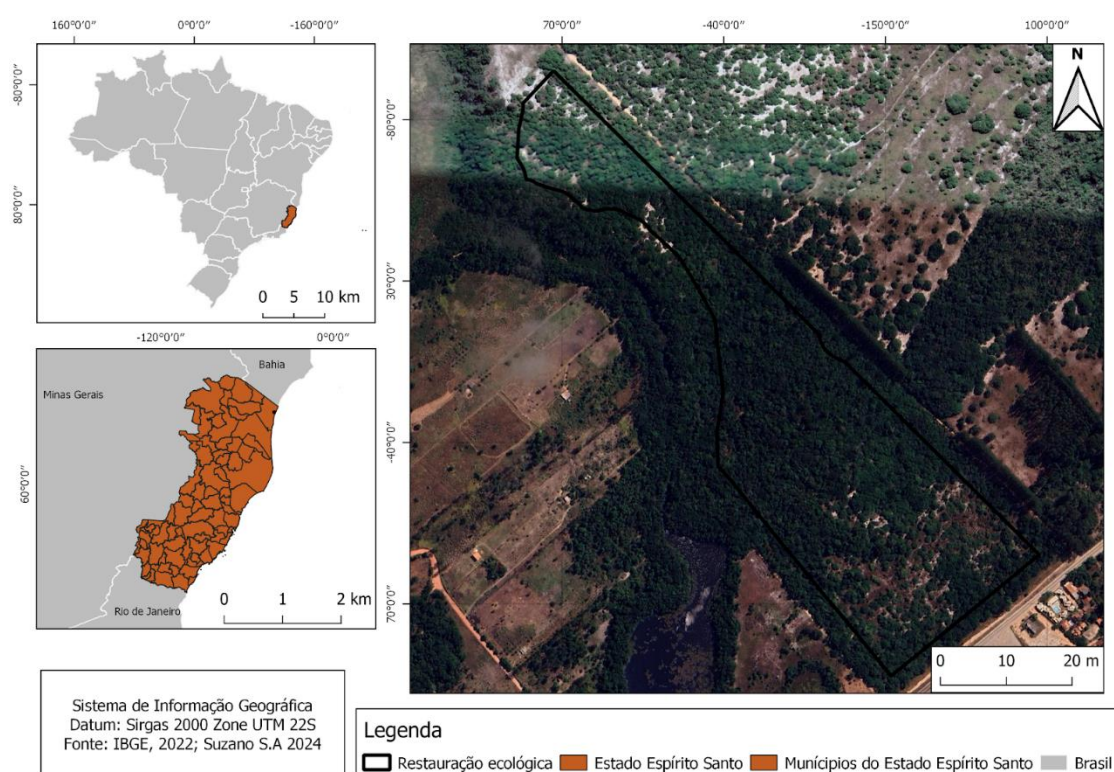
**Figura 8:** Mapa de localização UP.

**Fonte:** Autoria própria, 2024.

### 3.1.4 RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA

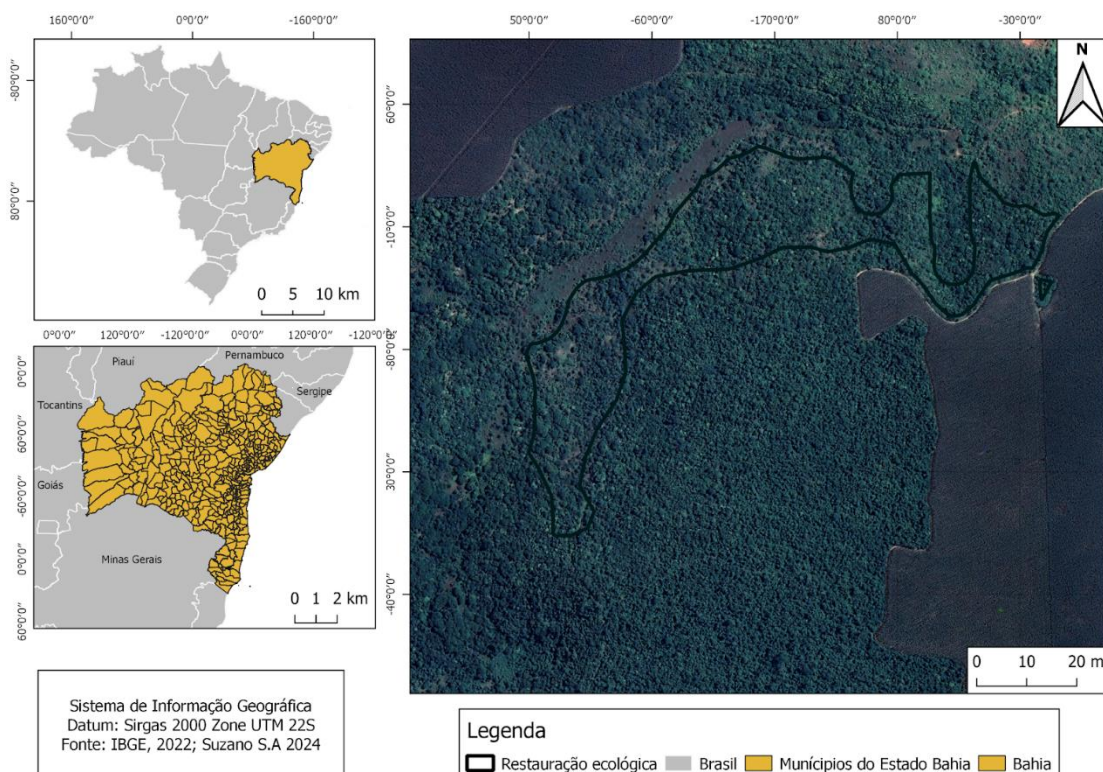
O estudo utilizou duas áreas de vegetação nativa como referência para aplicar os melhores parâmetros para mensurar o ganho de biodiversidade florísticas em ambientes de restauração ecológica. Essas duas áreas de restauração também são pertencentes à Suzano S.A., ambas iniciadas em 2010. A primeira área de restauração está localizada no município de Itaúnas, Espírito Santo, entre as coordenadas  $18^{\circ}25'36,32''S$  e  $39^{\circ}43'23,21''O$ , com uma extensão de 26 ha (Figura 9). A segunda área está situada no município de Vereda, Bahia, entre as coordenadas  $17^{\circ}15'25,80''S$  e  $39^{\circ}41'25,08''O$ , abrangendo 23 ha (Figura 10).

**Figura 9:** Mapa de localização área de restauração Espírito Santo – Itaúnas.



**Fonte:** Autoria própria, 2024.

**Figura 10:** Mapa de localização área de restauração Bahia – Veredas.



**Fonte:** Autoria própria, 2024.

A declividade do terreno foi analisada em ambas as áreas de restauração por meio do processamento do DEM no QGIS, resultando na elaboração do mapa de declividade. Essa análise foi necessária, pois ambas as áreas deveriam estar situadas em terrenos de relevo plano a ondulado.

Todas as áreas são pertencentes ao Bioma Mata Atlântica. O clima predominante nas áreas de estudo é tropical úmido, com temperaturas médias anuais variando entre 20°C e 26°C. A precipitação anual é elevada, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano, embora haja uma concentração maior nos meses de verão (ESPÍRITO SANTO, 2018; PEREIRA, 2009).

### 3.2 BANCO DE DADOS

Para o processamento do pacote `biodivMapR` a fim de obter os resultados de alfa diversidade, utilizaram-se imagens de satélite, para cada área de estudo a tabela (1) abaixo mostra informações do produto utilizado para cada processamento.

**Tabela 1:** Informações sobre os produtos de sensoriamento remoto utilizados para o processamento no biodivMapR em diferentes áreas de estudo.

| Área de estudo          | Ano do inventário realizado | Estação do ano realizado o inventário florestal | Imagem de satélite utilizada para o processamento | Resolução (m) | Fonte      |
|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------|------------|
| AAVC Montes Claros - SP | 2014                        | Verão                                           | Coleção 2 Landsat 8-9 Level 2                     | 30x30         | USGS       |
|                         | 2018                        | Inverno                                         | Coleção 2 Sentinel-2 Level 2A                     | 10x10         | Copernicus |
|                         | 2022                        | Inverno                                         | Coleção 2 Sentinel-2 Level 2A                     | 10x10         | Copernicus |
| AAVC Bloco 43 CB - ES   | 2017                        | Inverno                                         | Coleção 2 Sentinel-2 Level 2A                     | 10x10         | Copernicus |
| AAVC Bloco G8 CB - ES   | 2021                        | Inverno                                         | Coleção 2 Sentinel-2 Level 2A                     | 10x10         | Copernicus |
| UP                      | 2024                        | Primavera                                       | Coleção 2 Sentinel-2 Level 2A                     | 10x10         | Copernicus |
| Restauração             | 2014                        | Primavera                                       | Coleção 2 Landsat 8-9 Level 2                     | 30x30         | USGS       |
|                         | 2020                        | Primavera                                       | Coleção 2 Sentinel-2 Level 2A                     | 10x10         | Copernicus |
|                         | 2024                        | Primavera                                       | Coleção 2 Sentinel-2 Level 2A                     | 10x10         | Copernicus |

Ao escolher as imagens de satélite, filtrou-se imagens de boa qualidade, com baixa cobertura de nuvens e realizou-se a composição das bandas espectrais com o software QGIS versão 3.10.14. As bandas utilizadas no pacote são importantes para o mapeamento de diversidade espectral, visto que determinadas bandas permitem a captura de informações espectrais que estão correlacionadas com características de vegetação, estrutura e composição.

Das imagens Landsat 8-9 foram utilizadas as seguintes bandas descritas na tabela (2) e para Sentinel 2, descritas na tabela (3) abaixo.

**Tabela 2:** Bandas do Landsat 8-9 utilizadas no processamento pelo pacote biodivMapR e suas respectivas aplicações.

| <b>Banda</b>  | <b>Comprimento de Onda (nm)</b> | <b>Resolução (m)</b> | <b>Aplicação</b>                                    |
|---------------|---------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------------|
| B2 (Azul)     | 452-512                         | 30                   | Índices aquáticos e de vegetação                    |
| B3 (Verde)    | 533-590                         | 30                   | Monitoramento de saúde da vegetação                 |
| B4 (Vermelho) | 636-673                         | 30                   | Índices de vegetação (NDVI) e análise de biomassa   |
| B5 (NIR)      | 851-879                         | 30                   | Estudo da cobertura vegetal e de índices espectrais |
| B6 (SWIR 1)   | 1566-1651                       | 30                   | Análise de umidade e cobertura do solo              |
| B7 (SWIR 2)   | 2107-2294                       | 30                   | Detecção de mudanças e estresse hídrico             |

**Fonte:** USGS, [s.d].

**Tabela 3:** Bandas do Sentinel-2 utilizadas no processamento pelo pacote biodivMapR e suas respectivas aplicações.

| Banda              | Comprimento de Onda (nm) | Resolução (m)            | Aplicação                                                          |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| B2 (Azul)          | 490                      | 10                       | Detecção de corpos d'água, suporte para índices como NDVI          |
| B3 (Verde)         | 560                      | 10                       | Monitoramento de vegetação e índices espectrais                    |
| B4 (Verme-lho)     | 665                      | 10                       | Índices de vegetação, como NDVI, e detecção de saúde da vegetação. |
| B5 (Red Edge 1)    | 705                      | 20 (reamostrado para 10) | Estimativa de clorofila, sensível ao estresse da vegetação         |
| B6 (Red Edge 2)    | 740                      | 20 (reamostrado para 10) | Análise de estrutura foliar e estresse hídrico                     |
| B7 (Red Edge 3)    | 783                      | 20 (reamostrado para 10) | Modelagem de biomassa e diversidade espectral                      |
| B8 (NIR)           | 842                      | 10                       | Índices de vegetação como NDVI                                     |
| B8A (NIR estreito) | 865                      | 20 (reamostrado para 10) | Estudos detalhados de vegetação                                    |
| B11 (SWIR 1)       | 1610                     | 20 (reamostrado para 10) | Análise de umidade do solo e vegetação                             |
| B12 (SWIR 2)       | 2190                     | 20 (reamostrado para 10) | Detecção de mudanças e análise de cobertura do solo                |

**Fonte:** Copernicus, [s.d].

As bandas B5, B6, B7, B8A, B11 e B12 do Sentinel 2 foram reamostradas para 10x10 m com interpolação bilinear, para combinação com as demais bandas. O processo foi realizado pelo software QGIS versão 3.10.14.

### 3.3 PROCESSAMENTO

Com as imagens de satélite recortadas para as áreas de estudo, seguiu-se o passo-a-passo conforme o fluxograma da figura acima (4). Para cada área de estudo e imagem utilizada foram utilizados e testados diferentes parâmetros que influenciam na correlação entre os dados de alfa diversidade com os dados de inventário florestal. O pacote possui funções para eliminação de pixels não vegetados, eliminação de nuvens residuais e áreas sombreadas. Entretanto,

foi realizada etapa de atualização da máscara com base no limiar de *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) e os pixels abaixo do limiar estabelecido são mascarados, indicando ausência de vegetação. A máscara foi atualizada com base no limiar de reflectância no domínio azul, logo, pixels com reflectância no domínio acima do limiar definido são mascarados, indicando presença de nuvens. Por fim, atualizou-se a máscara com base no limiar de reflectância no domínio do *Near Infrared* (NIR) e pixels com reflectância no domínio NIR abaixo do limiar estabelecido são mascarados, indicando áreas com sombras.

Os valores dos limiares utilizados para cada área de estudo e imagem analisada estão descritos na tabela (4) abaixo. Esses parâmetros foram definidos considerando as condições locais de vegetação, cobertura de nuvens e sombreamento.

**Tabela 4:** Parâmetros utilizados para atualização das máscaras em diferentes áreas de estudo.

| Área de estudo          | NDVI | BLUE | NIR   |
|-------------------------|------|------|-------|
| AAVC Montes Claros - SP | 0,2  | 9200 | 10000 |
|                         | 0,2  | 500  | 1000  |
|                         | 0,45 | 500  | 1000  |
| AAVC Bloco 43 CB - ES   | 0,4  | 1350 | 3200  |
| AAVC Bloco G8 CB - ES   | 0,42 | 1350 | 2500  |
| UP                      | 0,4  | 1350 | 3000  |
| Restauração             | 0,3  | 9200 | 19000 |
|                         | 0,35 | 1500 | 3000  |
|                         | 0,45 | 1600 | 2900  |

**Fonte:** Autoria própria, 2024.

Os parâmetros testados para identificar o melhor para cada estudo foram: Definição do tamanho da janela para cálculo da diversidade espectral “*window\_size*”, que define a extensão da área considerada para cada cálculo de diversidade, influenciando como as variações espectrais em diferentes escalas espaciais são capturadas. Foram analisados diferentes tamanhos de janelas (2, 5 e 10), que permitiram identificar a escala mais adequada para o ecossistema estudado; O número de espécies espectrais “*nbclusters*”, o qual define a quantidade de grupos espectralmente distintos identificados após o processo de redução de dimensionalidade e agrupamento dos dados. Este parâmetro influencia diretamente a granularidade dos resultados e a

correspondência com a heterogeneidade ambiental. Foi realizada a avaliação de diferentes valores para *nbclusters* (50, 60 e 65) nas AAVCs; A escolha a partir de 50, de acordo com os estudos que aplicaram o *biodivMapR* em áreas florestais, realizados por Féret et al (2019), utilizam valores de na faixa de 50 a 100 para capturar a complexidade da biodiversidade espectral, garantindo maior detalhamento, representando adequadamente as variações associadas a diferentes tipos de vegetação.

Para a UP, que consiste em uma área apenas com plantio de eucalipto, testou-se o pacote com diferentes *nbclusters* de 2, 5, 10, 15, 50 e 60, a fim de testar a capacidade do pacote identificar baixa diversidade florística e um tipo de ecossistema. Para as áreas de restauração ecológica, que passam por diferentes estágios ao longo do tempo, foram utilizados diferentes valores de *nbcluster* para cada ano analisado. Especificamente, os valores foram: Em 2014, foi utilizado um valor de 20 para *nbcluster*. Em 2020, o valor foi ajustado para 40, e em 2024, foi utilizado um valor de 60. A atribuição do *nbcluster* reflete a necessidade de adaptar o número de espécies espectrais às características específicas de cada ecossistema.

A etapa de redução de dimensionalidade é usada para selecionar informações espectrais relevantes e remover ruídos e artefatos do sensor. A seleção dos componentes é feita com base na interpretação visual. O objetivo é descartar componentes que não mostram informações relevantes sobre a vegetação ou que contêm artefatos do sensor.

### 3.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Com os rasters de alfa diversidade das AAVCs foi realizado a validação com os dados de composição de espécies do inventário florestal. Calculou-se o índice de Shannon-Wiener com a equação (1) através dos dados de espécies observadas nas parcelas inventariadas com auxílio do Microsoft Excel. Cada parcela inventariada possui 10x10m e com o auxílio do software de Sistema de Informação Geográfica (SIG) QGIS versão 3.10.14 plotou-se as parcelas com seus respectivas Latitude e Longitude e acrescentou-se um buffer de 30x30m, porque há erro de acurácia do marco do ponto de aproximadamente 30m, por isso realizou-se esse aumento. Em seguida, com a ferramenta *Zonal Statistics* do QGIS foi possível adquirir os valores de alfa diversidade (índice de Shannon-Wiener) referente à parcela inventariada.

Com os resultados obtidos, no Microsoft Excel organizou-se os dados de índice de Shannon- Wiener calculado referente aos dados de inventário florestal e os dados obtidos de alfa diversidade e calculou-se a correlação entre ambos os dados. A correlação é uma medida que permite avaliar o grau de similaridade entre duas ou mais variáveis (GUIMARÃES, 2016).

## 4. RESULTADOS

### 4.1 ÁREAS DE ALTO VALOR DE CONSERVAÇÃO

Os resultados obtidos para as parcelas de inventário florestal da AAVC Montes Claros, indicaram baixas correlações, para todos os anos de validação (2014, 2018 e 2022), como visto nas tabelas dispostas na figura abaixo (Figura 10) abaixo. Essa baixa correlação foi observada independentemente do "*window\_size*" e do número de clusters atribuídos no processamento.

**Figura 11:** Tabela de correlação dos dados de alfa diversidade e dados de campo, referente aos anos de 2014, 2018 e 2022 da AAVC Montes Claros para diferentes parâmetros.

| 2014        |                    |                            |                            |                             |             |                    |                            |                            |                             |             |                    |                            |                            |                             |
|-------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Clusters 50 |                    |                            |                            |                             | Clusters 60 |                    |                            |                            |                             | Clusters 65 |                    |                            |                            |                             |
| Parcela     | Shannon Inventário | Window_size 2 SHANNON ALFA | Window_size 5 SHANNON ALFA | Window_size 10 SHANNON ALFA | Parcela     | Shannon Inventário | Window_size 2 SHANNON ALFA | Window_size 5 SHANNON ALFA | Window_size 10 SHANNON ALFA | Parcela     | Shannon Inventário | Window_size 2 SHANNON ALFA | Window_size 5 SHANNON ALFA | Window_size 10 SHANNON ALFA |
| 1           | 1,95               | 0,94                       | 2,16                       | 2,80                        | 1           | 1,95               | 0,98                       | 2,25                       | 2,88                        | 1           | 1,95               | 0,94                       | 2,33                       | 2,99                        |
| 2           | 2,20               | 1,14                       | 2,38                       | 2,68                        | 2           | 2,20               | 1,16                       | 2,46                       | 2,80                        | 2           | 2,20               | 1,18                       | 2,52                       | 2,87                        |
| 3           | 2,88               | 1,14                       | 2,38                       | 2,68                        | 3           | 2,88               | 1,16                       | 2,46                       | 2,80                        | 3           | 2,88               | 1,18                       | 2,52                       | 2,87                        |
| 4           | 3,26               | 1,26                       | 2,27                       | 3,01                        | 4           | 3,26               | 1,27                       | 2,36                       | 3,05                        | 4           | 3,26               | 1,29                       | 2,41                       | 3,09                        |
| 5           | 2,33               | 1,15                       | 2,26                       | 3,01                        | 5           | 2,33               | 1,23                       | 2,35                       | 3,05                        | 5           | 2,33               | 1,29                       | 2,38                       | 3,09                        |
| 6           | 3,27               | 1,06                       | 2,23                       | 2,86                        | 6           | 3,27               | 1,20                       | 2,33                       | 2,95                        | 6           | 3,27               | 1,15                       | 2,38                       | 0,30                        |
| 7           | 2,03               | 1,19                       | 2,28                       | 2,92                        | 7           | 2,03               | 1,25                       | 2,35                       | 3,04                        | 7           | 2,03               | 1,24                       | 2,43                       | 3,12                        |
| 8           | 2,89               | 1,13                       | 2,32                       | 2,78                        | 8           | 2,89               | 1,22                       | 2,45                       | 2,84                        | 8           | 2,89               | 1,22                       | 2,48                       | 2,87                        |
| 9           | 2,64               | 1,13                       | 2,03                       | 2,84                        | 9           | 2,64               | 1,13                       | 2,20                       | 2,88                        | 9           | 2,64               | 1,10                       | 2,26                       | 2,91                        |
| 10          | 3,11               | 1,15                       | 2,68                       | 2,87                        | 10          | 3,11               | 1,21                       | 2,73                       | 2,90                        | 10          | 3,11               | 1,24                       | 2,76                       | 2,92                        |
| Correlação  |                    | 0,4                        | -0,3                       | 0,1                         | Correlação  |                    | 0,5                        | 0,4                        | 0,0                         | Correlação  |                    | 0,4                        | 0,3                        | -0,5                        |
| 2018        |                    |                            |                            |                             |             |                    |                            |                            |                             |             |                    |                            |                            |                             |
| Clusters 50 |                    |                            |                            |                             | Clusters 60 |                    |                            |                            |                             | Clusters 65 |                    |                            |                            |                             |
| Parcela     | Shannon Inventário | Window_size 2 SHANNON ALFA | Window_size 5 SHANNON ALFA | Window_size 10 SHANNON ALFA | Parcela     | Shannon Inventário | Window_size 2 SHANNON ALFA | Window_size 5 SHANNON ALFA | Window_size 10 SHANNON ALFA | Parcela     | Shannon Inventário | Window_size 2 SHANNON ALFA | Window_size 5 SHANNON ALFA | Window_size 10 SHANNON ALFA |
| 1           | 2,27               | 0,81                       | 2,14                       | 2,58                        | 1           | 2,27               | 0,82                       | 2,37                       | 2,81                        | 1           | 2,27               | 1,09                       | 2,38                       | 2,84                        |
| 2           | 2,29               | 1,14                       | 2,56                       | 2,97                        | 2           | 2,29               | 1,35                       | 2,72                       | 3,13                        | 2           | 2,29               | 1,24                       | 2,69                       | 3,08                        |
| 3           | 2,82               | 0,90                       | 2,11                       | 2,66                        | 3           | 2,82               | 1,35                       | 2,72                       | 3,13                        | 3           | 2,82               | 1,16                       | 2,33                       | 2,86                        |
| 4           | 3,10               | 1,03                       | 1,94                       | 2,16                        | 4           | 3,10               | 1,15                       | 2,23                       | 2,60                        | 4           | 3,10               | 1,12                       | 2,29                       | 2,69                        |
| 5           | 2,10               | 1,03                       | 1,94                       | 2,16                        | 5           | 2,10               | 1,16                       | 2,46                       | 2,65                        | 5           | 2,10               | 1,19                       | 2,55                       | 2,75                        |
| 6           | 3,21               | 1,08                       | 2,26                       | 2,56                        | 6           | 3,21               | 1,26                       | 2,37                       | 2,68                        | 6           | 3,21               | 1,20                       | 2,43                       | 2,73                        |
| 7           | 2,76               | 1,18                       | 2,19                       | 2,69                        | 7           | 2,76               | 1,18                       | 2,29                       | 2,72                        | 7           | 2,76               | 1,35                       | 2,35                       | 2,78                        |
| 8           | 3,00               | 0,75                       | 2,28                       | 2,76                        | 8           | 3,00               | 0,77                       | 2,46                       | 2,91                        | 8           | 3,00               | 1,08                       | 2,50                       | 2,94                        |
| 9           | 2,86               | 1,07                       | 2,24                       | 2,63                        | 9           | 2,86               | 1,21                       | 2,38                       | 2,73                        | 9           | 2,86               | 1,09                       | 2,50                       | 2,85                        |
| 10          | 3,26               | 1,07                       | 2,24                       | 2,61                        | 10          | 3,26               | 1,18                       | 2,45                       | 2,74                        | 10          | 3,26               | 1,19                       | 2,46                       | 2,88                        |
| Correlação  |                    | 0,1                        | -0,7                       | 0,0                         | Correlação  |                    | 0,1                        | -0,3                       | -0,2                        | Correlação  |                    | -0,1                       | -0,4                       | -0,3                        |
| 2022        |                    |                            |                            |                             |             |                    |                            |                            |                             |             |                    |                            |                            |                             |
| Clusters 50 |                    |                            |                            |                             | Clusters 60 |                    |                            |                            |                             | Clusters 65 |                    |                            |                            |                             |
| Parcela     | Shannon Inventário | Window_size 2 SHANNON ALFA | Window_size 5 SHANNON ALFA | Window_size 10 SHANNON ALFA | Parcela     | Shannon Inventário | Window_size 2 SHANNON ALFA | Window_size 5 SHANNON ALFA | Window_size 10 SHANNON ALFA | Parcela     | Shannon Inventário | Window_size 2 SHANNON ALFA | Window_size 5 SHANNON ALFA | Window_size 10 SHANNON ALFA |
| 1           | 1,79               | 1,05                       | 2,17                       | 2,37                        | 1           | 1,79               | 1,13                       | 2,11                       | 2,39                        | 1           | 2,27               | 1,15                       | 2,17                       | 2,54                        |
| 2           | 2,12               | 1,21                       | 2,26                       | 2,66                        | 2           | 2,12               | 1,20                       | 2,33                       | 2,74                        | 2           | 2,29               | 1,04                       | 2,27                       | 2,78                        |
| 3           | 2,50               | 0,99                       | 2,09                       | 2,39                        | 3           | 2,50               | 1,20                       | 2,33                       | 2,74                        | 3           | 2,82               | 1,24                       | 0,02                       | 2,64                        |
| 4           | 2,71               | 1,01                       | 2,24                       | 2,66                        | 4           | 2,71               | 1,10                       | 2,19                       | 2,75                        | 4           | 3,10               | 1,24                       | 2,41                       | 3,14                        |
| 5           | 1,92               | 0,89                       | 2,51                       | 2,89                        | 5           | 1,92               | 0,91                       | 2,59                       | 3,00                        | 5           | 2,10               | 1,03                       | 2,37                       | 3,01                        |
| 6           | 2,93               | 1,10                       | 1,81                       | 2,28                        | 6           | 2,93               | 1,13                       | 1,85                       | 2,35                        | 6           | 3,21               | 1,15                       | 1,84                       | 2,52                        |
| 7           | 2,03               | 0,97                       | 2,05                       | 2,40                        | 7           | 2,03               | 1,01                       | 2,16                       | 2,40                        | 7           | 2,76               | 0,75                       | 2,17                       | 2,68                        |
| 8           | 2,37               | 1,01                       | 2,35                       | 2,78                        | 8           | 2,37               | 1,02                       | 2,42                       | 2,83                        | 8           | 3,00               | 0,56                       | 2,25                       | 2,79                        |
| 9           | 2,66               | 1,04                       | 2,64                       | 3,06                        | 9           | 2,66               | 1,05                       | 2,61                       | 3,04                        | 9           | 2,86               | 0,99                       | 2,62                       | 3,11                        |
| 10          | 2,51               | 1,20                       | 2,49                       | 3,08                        | 10          | 2,51               | 1,00                       | 2,58                       | 3,08                        | 10          | 3,26               | 0,94                       | 2,60                       | 3,17                        |
| Correlação  |                    | 0,2                        | 0,3                        | 0,1                         | Correlação  |                    | 0,2                        | -0,2                       | 0,1                         | Correlação  |                    | -0,1                       | 0,0                        | 0,2                         |

Fonte: Autoria própria, 2024.

Conforme visto nas tabelas das figuras abaixo (Figura 12 e 13) é possível observar que, para a AAVC Bloco 43 - CB, a correlação diminui à medida que aumenta o número de clusters e o tamanho da janela. No entanto, a AAVC Bloco G8 - CB apresentou uma alta correlação de 0,9 com um número de clusters de 65 e uma janela de 10.

**Figura 12:** Tabela de resultados de correlação dos dados de alfa diversidade e dados de campo da AAVC Bloco 43 – CB.

| Clusters 50 |                    |                                |                                |                                 | Clusters 60 |                    |                                |                                |                                 | Clusters 65 |                    |                                |                                |                                 |
|-------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Parcela     | Shannon Inventário | Window_size 2 Alfa diversidade | Window_size 5 Alfa diversidade | Window_size 10 Alfa diversidade | Parcela     | Shannon Inventário | Window_size 2 Alfa diversidade | Window_size 5 Alfa diversidade | Window_size 10 Alfa diversidade | Parcela     | Shannon Inventário | Window_size 2 Alfa diversidade | Window_size 5 Alfa diversidade | Window_size 10 Alfa diversidade |
| 1           | 0,37               | 0,94                           | 2,40                           | 2,88                            | 1           | 0,37               | 0,98                           | 2,34                           | 2,95                            | 1           | 0,37               | 1,14                           | 2,38                           | 2,97                            |
| 2           | 2,67               | 1,2                            | 2,48                           | 2,90                            | 2           | 2,67               | 1,12                           | 2,53                           | 2,96                            | 2           | 2,67               | 1,21                           | 2,61                           | 3,02                            |
| 3           | 2,52               | 1,3                            | 2,60                           | 2,87                            | 3           | 2,52               | 1,33                           | 2,67                           | 2,94                            | 3           | 2,52               | 2,87                           | 2,87                           | 2,87                            |
| 4           | 2,62               | 1,17                           | 2,53                           | 2,53                            | 4           | 2,62               | 1,30                           | 2,56                           | 2,87                            | 4           | 2,62               | 2,53                           | 2,53                           | 2,53                            |
| 5           | 2,38               | 1,18                           | 2,64                           | 2,96                            | 5           | 2,38               | 1,29                           | 2,72                           | 3,04                            | 5           | 2,38               | 1,23                           | 2,74                           | 3,06                            |
| 6           | 1,56               | 1,24                           | 2,70                           | 2,70                            | 6           | 1,56               | 1,26                           | 2,77                           | 3,12                            | 6           | 1,56               | 2,70                           | 2,70                           | 2,70                            |
| 7           | 2,35               | 1,34                           | 2,71                           | 2,86                            | 7           | 2,35               | 1,35                           | 2,79                           | 2,93                            | 7           | 2,35               | 1,31                           | 2,78                           | 2,95                            |
| 8           | 2,44               | 1,29                           | 2,64                           | 2,82                            | 8           | 2,44               | 1,28                           | 2,69                           | 2,88                            | 8           | 2,44               | 1,35                           | 2,71                           | 2,90                            |
| 9           | 1,10               | 1,29                           | 2,63                           | 2,63                            | 9           | 1,10               | 1,18                           | 2,63                           | 2,63                            | 9           | 1,10               | 2,63                           | 2,63                           | 2,63                            |
| 10          | 2,27               | 1,28                           | 2,35                           | 3,00                            | 10          | 2,27               | 1,29                           | 2,41                           | 3,05                            | 10          | 2,27               | 1,15                           | 2,45                           | 3,06                            |
| Correlação  |                    | 0,6                            | 0,2                            | 0,1                             | Correlação  |                    | 0,7                            | 0,4                            | 0,2                             | Correlação  |                    | 0,0                            | 0,5                            | 0,1                             |

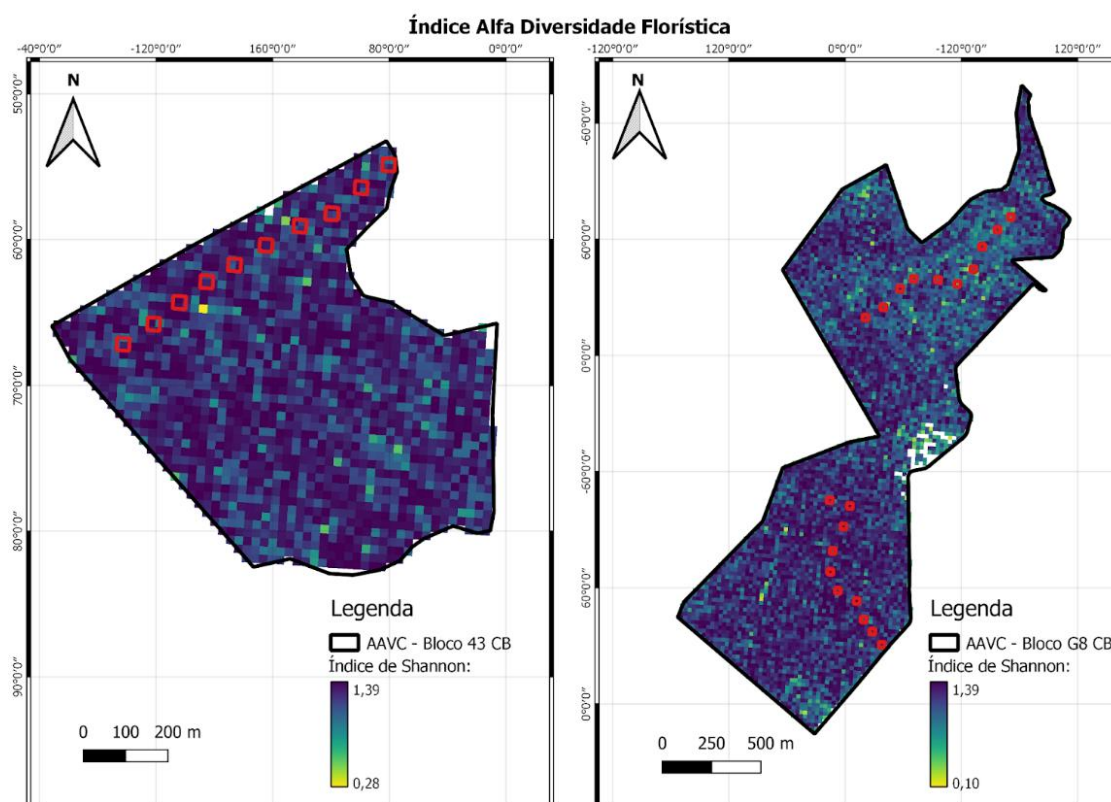
**Fonte:** Autoria própria, 2024.**Figura 13:** Tabela de resultados de correlação dos dados de alfa diversidade e dados de campo da AAVC Bloco G8 – CB.

| Clusters 50 |                    |                                |                                |                                 | Clusters 60 |                    |                                |                                |                                 | Clusters 65 |                    |                                |                                |                                 |
|-------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Parcela     | Shannon Inventário | Window_size 2 Alfa diversidade | Window_size 5 Alfa diversidade | Window_size 10 Alfa diversidade | Parcela     | Shannon Inventário | Window_size 2 Alfa diversidade | Window_size 5 Alfa diversidade | Window_size 10 Alfa diversidade | Parcela     | Shannon Inventário | Window_size 2 Alfa diversidade | Window_size 5 Alfa diversidade | Window_size 10 Alfa diversidade |
| 1           | 2,13               | 0,87                           | 2,35                           | 2,05                            | 1           | 2,13               | 0,77                           | 2,58                           | 2,56                            | 1           | 2,13               | 0,96                           | 2,50                           | 2,47                            |
| 2           | 2,97               | 0,87                           | 1,76                           | 2,49                            | 2           | 2,97               | 0,84                           | 1,94                           | 2,50                            | 2           | 2,97               | 0,67                           | 1,90                           | 2,56                            |
| 3           | 1,76               | 1,01                           | 2,26                           | 1,87                            | 3           | 1,76               | 1,17                           | 2,25                           | 2,54                            | 3           | 1,76               | 1,09                           | 2,26                           | 2,55                            |
| 4           | 1,72               | 0,96                           | 2,10                           | 1,53                            | 4           | 1,72               | 1,05                           | 2,03                           | 2,16                            | 4           | 1,72               | 2,16                           | 2,12                           | 2,44                            |
| 5           | 2,33               | 1,14                           | 2,45                           | 1,72                            | 5           | 2,33               | 0,97                           | 1,72                           | 2,26                            | 5           | 2,33               | 1,13                           | 2,49                           | 2,73                            |
| 6           | 2,97               | 1,17                           | 2,17                           | 1,51                            | 6           | 2,97               | 1,04                           | 2,44                           | 2,05                            | 6           | 2,97               | 1,15                           | 2,46                           | 2,79                            |
| 7           | 3,09               | 1,16                           | 2,68                           | 2,34                            | 7           | 3,09               | 1,17                           | 2,75                           | 2,59                            | 7           | 3,09               | 1,16                           | 2,78                           | 3,10                            |
| 8           | 2,75               | 1,02                           | 2,59                           | 2,82                            | 8           | 2,75               | 0,96                           | 2,68                           | 2,97                            | 8           | 2,75               | 0,94                           | 0,94                           | 2,95                            |
| 9           | 3,02               | 1,29                           | 2,56                           | 2,79                            | 9           | 3,02               | 1,23                           | 2,65                           | 2,90                            | 9           | 3,02               | 1,31                           | 2,67                           | 3,02                            |
| 10          | 2,60               | 1,12                           | 2,48                           | 2,82                            | 10          | 2,60               | 0,95                           | 2,59                           | 2,97                            | 10          | 2,60               | 1,21                           | 2,63                           | 3,11                            |
| 11          | 1,68               | 0,66                           | 1,94                           | 2,61                            | 11          | 1,68               | 0,72                           | 2,13                           | 2,82                            | 11          | 1,68               | 0,84                           | 1,94                           | 2,29                            |
| 12          | 1,30               | 0,75                           | 1,84                           | 2,55                            | 12          | 1,30               | 0,82                           | 2,05                           | 2,82                            | 12          | 1,30               | 0,89                           | 1,89                           | 2,00                            |
| 13          | 1,68               | 0,90                           | 1,95                           | 2,46                            | 13          | 1,68               | 0,85                           | 2,16                           | 2,49                            | 13          | 1,68               | 1,10                           | 2,07                           | 2,04                            |
| 14          | 2,01               | 0,98                           | 2,15                           | 2,15                            | 14          | 2,01               | 1,02                           | 2,14                           | 2,29                            | 14          | 2,01               | 1,13                           | 2,20                           | 2,08                            |
| 15          | 2,03               | 0,61                           | 1,83                           | 2,47                            | 15          | 2,03               | 0,52                           | 1,75                           | 2,74                            | 15          | 2,03               | 0,64                           | 1,78                           | 2,52                            |
| 16          | 3,14               | 1,20                           | 2,64                           | 2,55                            | 16          | 3,14               | 1,24                           | 2,69                           | 2,63                            | 16          | 3,14               | 1,30                           | 2,77                           | 3,02                            |
| 17          | 3,38               | 0,96                           | 2,52                           | 2,91                            | 17          | 3,38               | 1,09                           | 2,56                           | 3,07                            | 17          | 3,38               | 1,01                           | 2,59                           | 2,94                            |
| 18          | 3,15               | 1,26                           | 2,57                           | 2,75                            | 18          | 3,15               | 1,20                           | 2,62                           | 2,91                            | 18          | 3,15               | 1,33                           | 2,67                           | 3,01                            |
| 19          | 2,87               | 1,28                           | 2,55                           | 2,81                            | 19          | 2,87               | 1,26                           | 2,64                           | 3,00                            | 19          | 2,87               | 1,32                           | 2,76                           | 2,84                            |
| 20          | 2,91               | 1,23                           | 2,42                           | 2,94                            | 20          | 2,91               | 1,0                            | 2,54                           | 3,06                            | 20          | 2,91               | 1,38                           | 2,58                           | 2,82                            |
| Correlação  |                    | 0,7                            | 0,7                            | 0,4                             | Correlação  |                    | 0,6                            | 0,6                            | 0,3                             | Correlação  |                    | 0,1                            | 0,4                            | 0,9                             |

**Fonte:** Autoria própria, 2024.

Na figura (14) abaixo, é apresentado o mapa da diversidade florística para as AAVCs Bloco 43 CB e Bloco G8 CB. O índice de Shannon, que mede a diversidade de espécies, variou de 0,28 a 1,39 para a AAVC Bloco 43 CB e de 0,10 a 1,39 para a AAVC Bloco G8 CB. Esses valores indicam a variação na diversidade florística dentro de cada área, com algumas regiões apresentando maior diversidade de espécies do que outras.

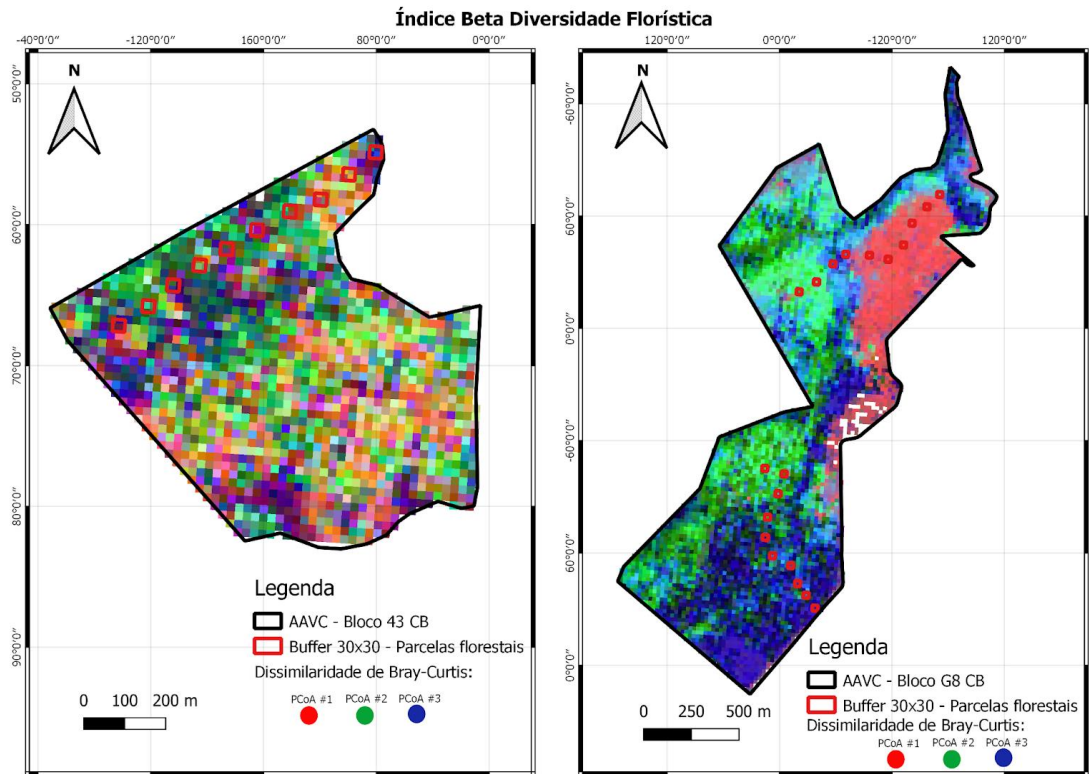
**Figura 14:** Mapa de alfa diversidade florística das AAVCs Bloco 43 CB e Bloco G8 CB.



**Fonte:** Autoria própria, 2024.

Na figura (15) abaixo, é apresentado o mapa de beta diversidade para as AAVCs Bloco 43 CB e Bloco G8 CB. No mapa da AAVC Bloco 43 CB, é possível observar uma heterogeneidade de ecossistemas bem misturada, indicando uma distribuição mais homogênea dos diferentes tipos de ecossistemas. Já na AAVC Bloco G8 CB, a heterogeneidade de ecossistemas é mais concentrada em alguns pontos específicos, com áreas distintas apresentando diferentes cores, como rosa e amarelo, que identificam diferentes tipos de ecossistemas. Ambas as áreas são de vegetação nativa.

**Figura 15:** Mapa de beta diversidade florística das AAVCs Bloco 43 CB e Bloco G8 CB.

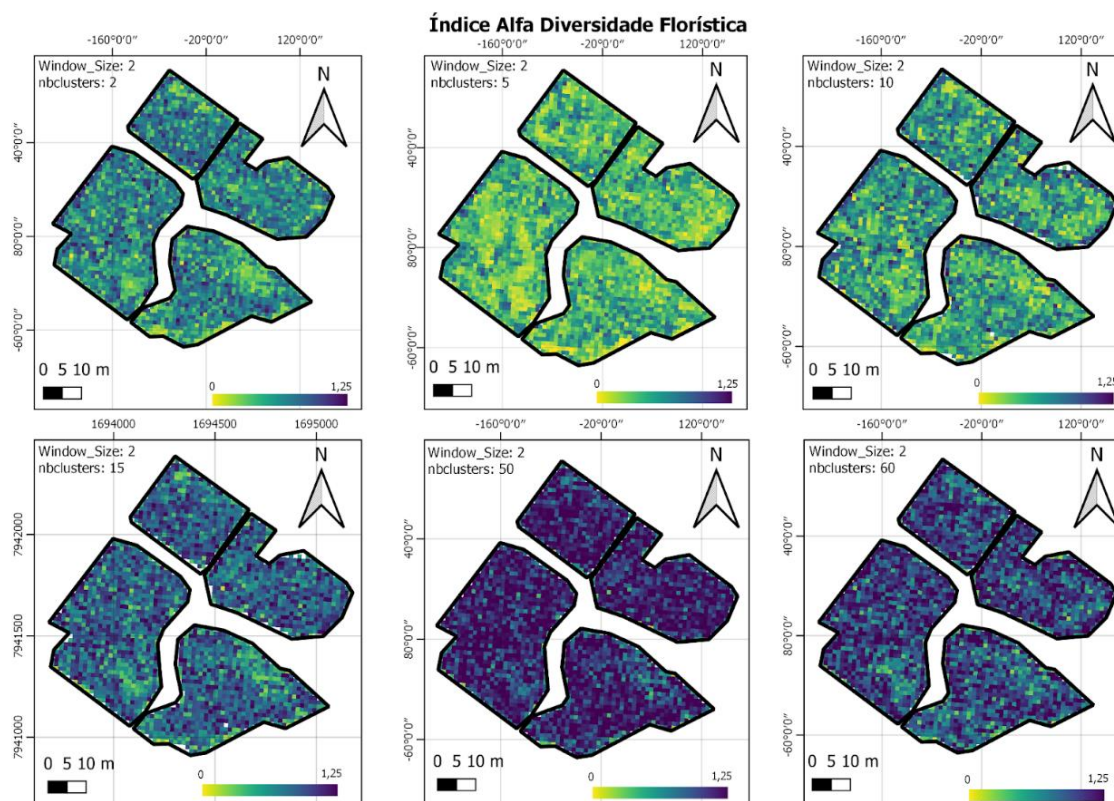


**Fonte:** Autoria própria, 2024.

## 4.2 UNIDADE DE PLANTIO

Os testes de parâmetros para análise da diversidade florística da UP não foram satisfatórios. O mapa na figura (16) apresenta os resultados gerados para diferentes números de clusters. Nenhum dos mapas de alfa diversidade exibiu um índice consistentemente, neste caso, baixo em toda a área. No mapa com “*nbclusters*” igual a 5, muitos pixels apresentaram valores próximos de 0, mas ainda é evidente a concentração de pixels com valores próximos de 1,25, indicando uma diversidade elevada em certas regiões da área estudada.

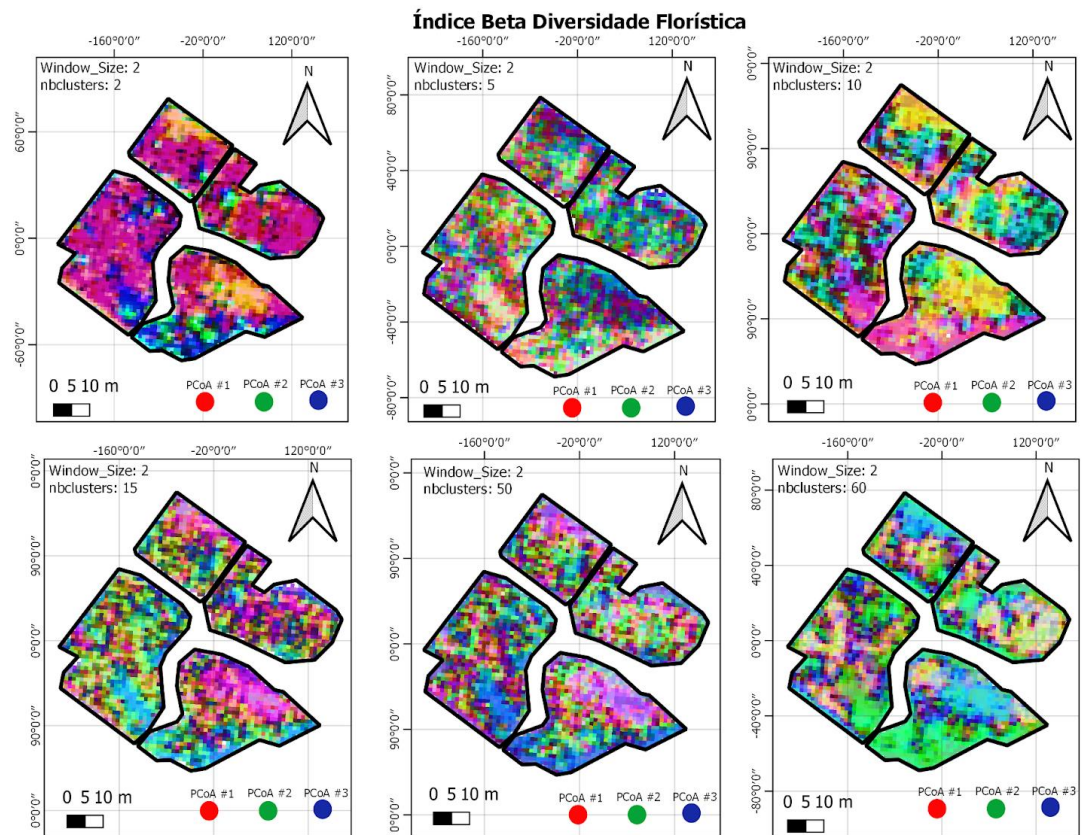
**Figura 16:** Mapa de resultados de alfa diversidade florística da Unidade de Plantio para diferentes parâmetros.



**Fonte:** Autoria própria, 2024.

Além disso, a análise de beta diversidade também não conseguiu identificar a área como um único tipo de ecossistema, como o eucalipto. No mapa (Figura 17) com cluster de 2, houve uma maior concentração de cor rosa, mas ainda é possível observar que a beta diversidade se confundiu e identificou outros ecossistemas na mesma área.

**Figura 17:** Mapa de resultados de beta diversidade florística da Unidade de Plantio para diferentes parâmetros.

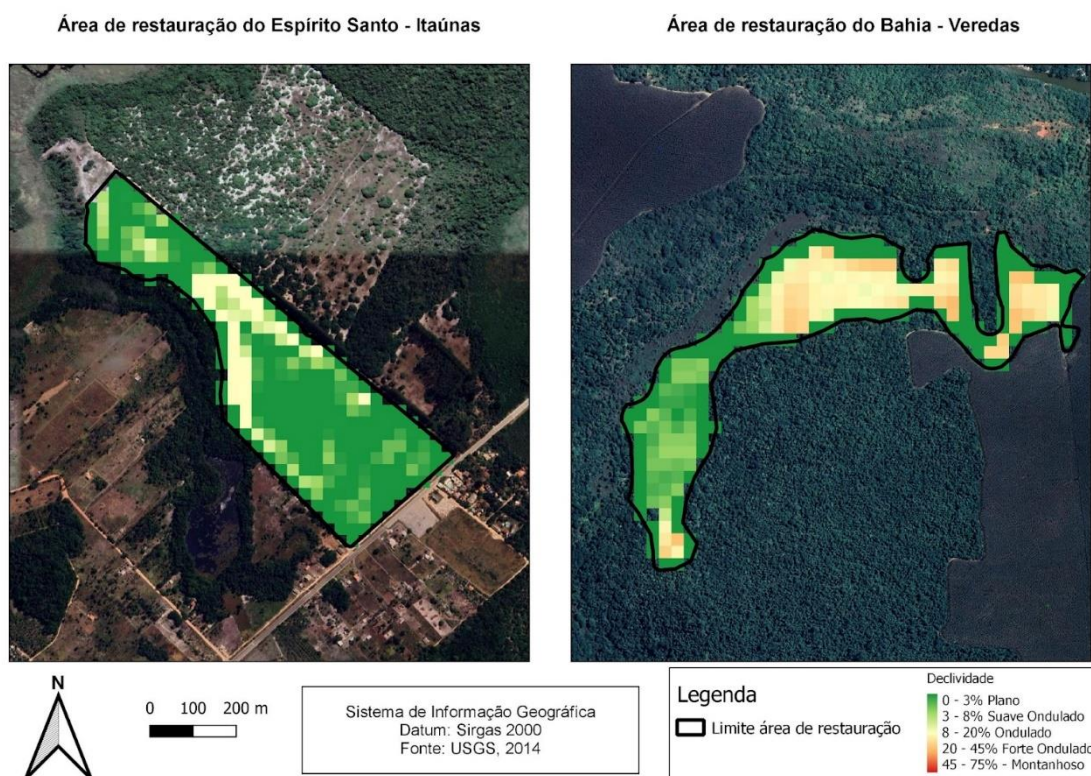


**Fonte:** Autoria própria, 2024.

### 4.3 RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA

As áreas de restauração estão situadas em terrenos com baixa declividade, não ultrapassando 45°, conforme mapa abaixo (Figura 18).

**Figura 18:** Mapa de declividade do terreno nas áreas de restauração ecológica.

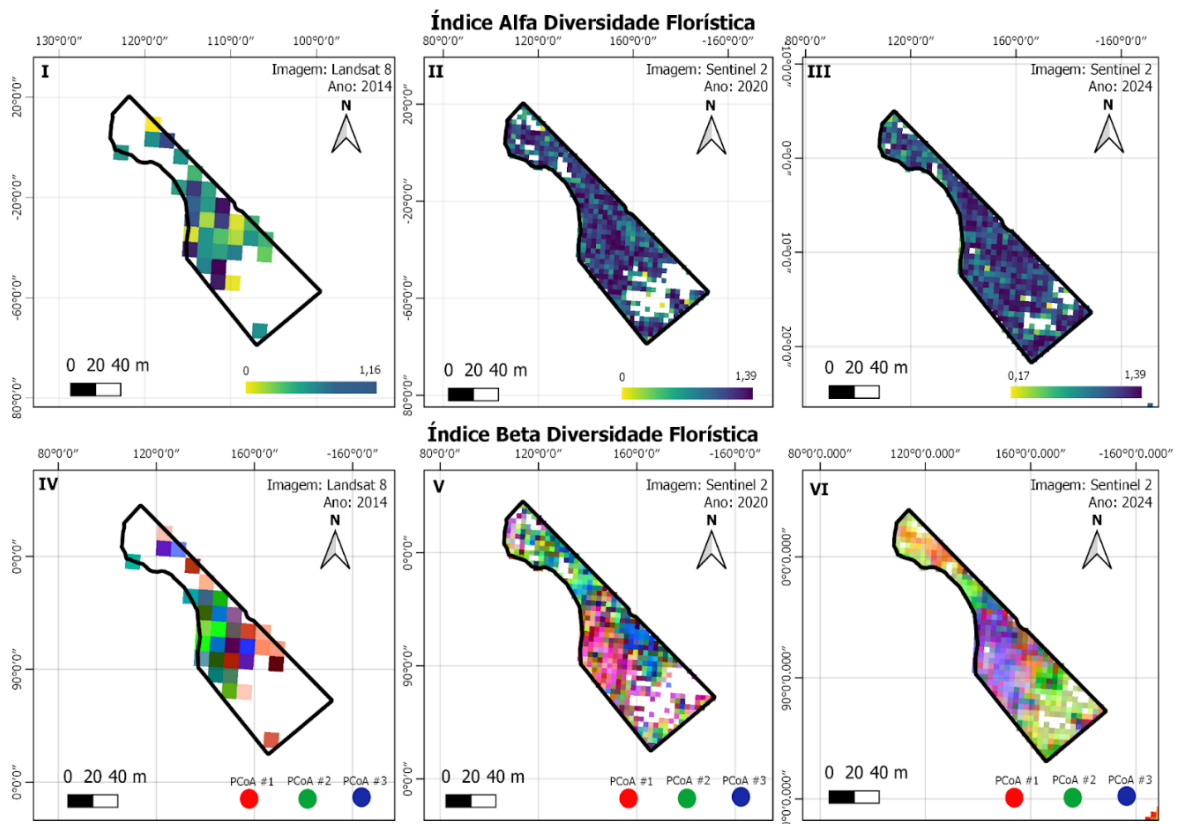


**Fonte:** Autoria própria, 2024.

Com isso, a restauração ecológica nas áreas de estudo foi iniciada em 2010 e os resultados mostraram ganhos significativos na biodiversidade florística ao longo dos anos. Em 2014, ambas as áreas apresentaram um aumento inicial na diversidade, com o índice de Shannon variando de 0 a aproximadamente 1,16 na área de restauração de Itaúnas - ES (Figura 19) e de 0 a 1,07 na área de restauração de Vereda - BA (Figura 21). Ainda era possível observar áreas com solo exposto ou pouca vegetação. Em 2020, houve um ganho significativo na biodiversidade em ambas as áreas, com o índice de Shannon variando de 0 a 1,39. No ano de 2024 (mapa III de ambas as áreas), observou-se uma maior ocupação de biodiversidade nas áreas que anteriormente apresentavam pouca vegetação.

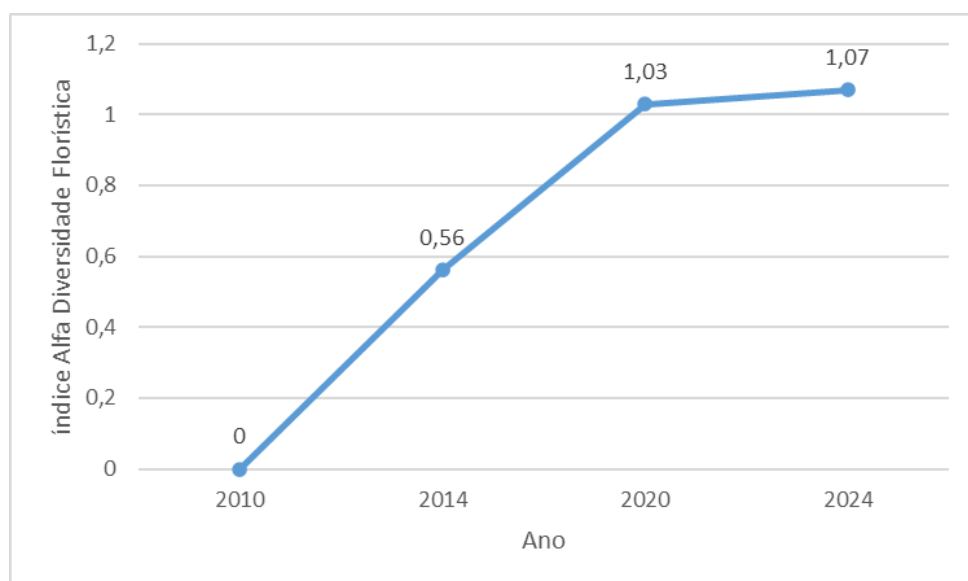
Os gráficos das médias de diversidade alfa (Figura 20 e 22) para ambas as áreas mostraram um aumento constante na diversidade florística desde o início da restauração, confirmando o sucesso das práticas implementadas. A análise de beta diversidade revelou uma heterogeneidade crescente dos ecossistemas nas duas áreas ao longo dos anos. Entre 2020 e 2024, foi possível observar uma ocupação mais completa e diversificada da vegetação.

**Figura 19:** Mapa de alfa e beta diversidade florística dos diferentes anos analisados da área de restauração Itaúnas – ES.



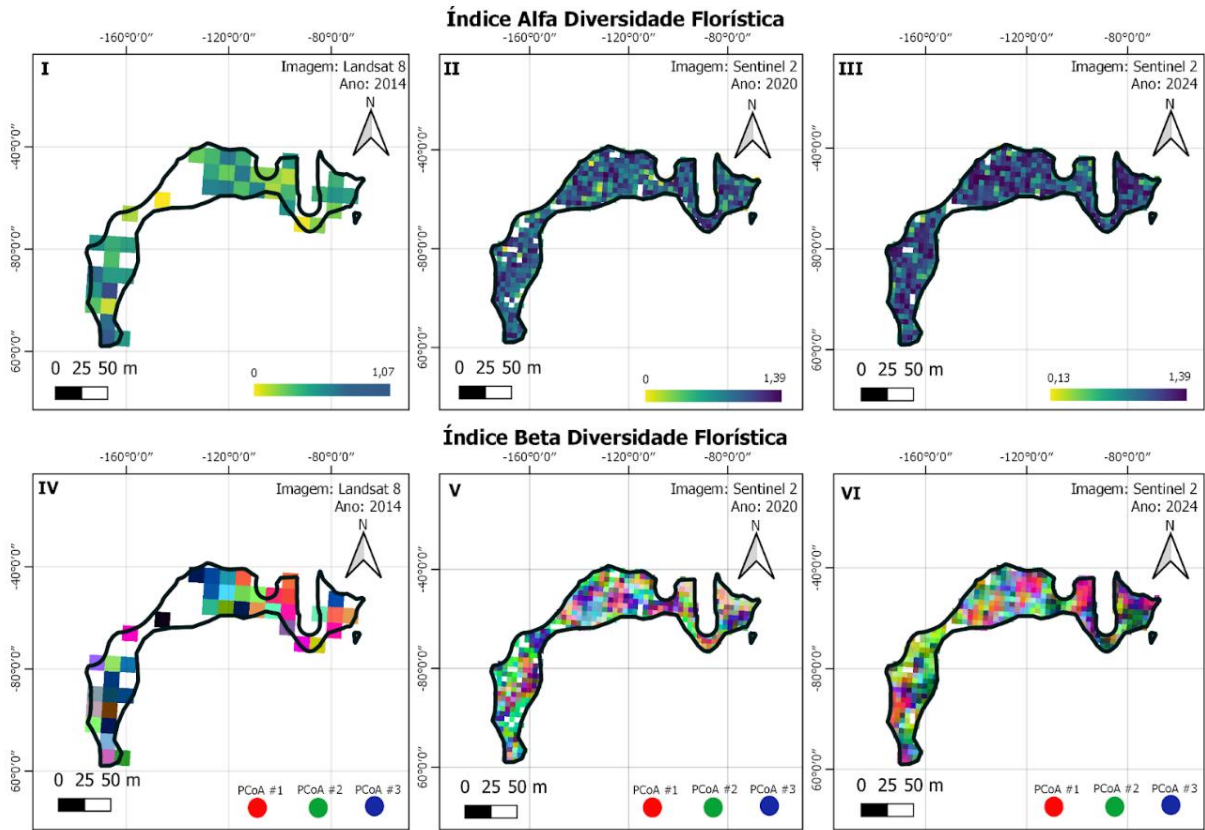
**Fonte:** Autoria própria, 2024.

**Figura 20:** Gráfico das médias de alfa diversidade florística para os anos de 2010, 2014, 2020 e 2024.



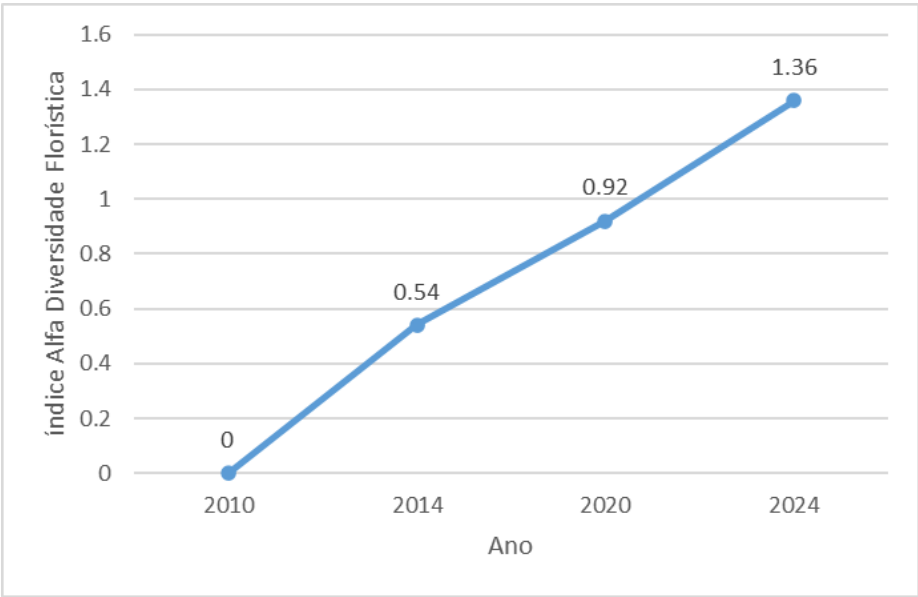
**Fonte:** Autoria própria, 2024.

**Figura 21:** Mapa de alfa e beta diversidade florística dos diferentes anos analisados da área de restauração Veredas – BA.



Fonte: Autoria própria, 2024.

**Figura 22:** Gráfico das médias de alfa diversidade florística para os anos de 2010, 2014, 2020 e 2024.



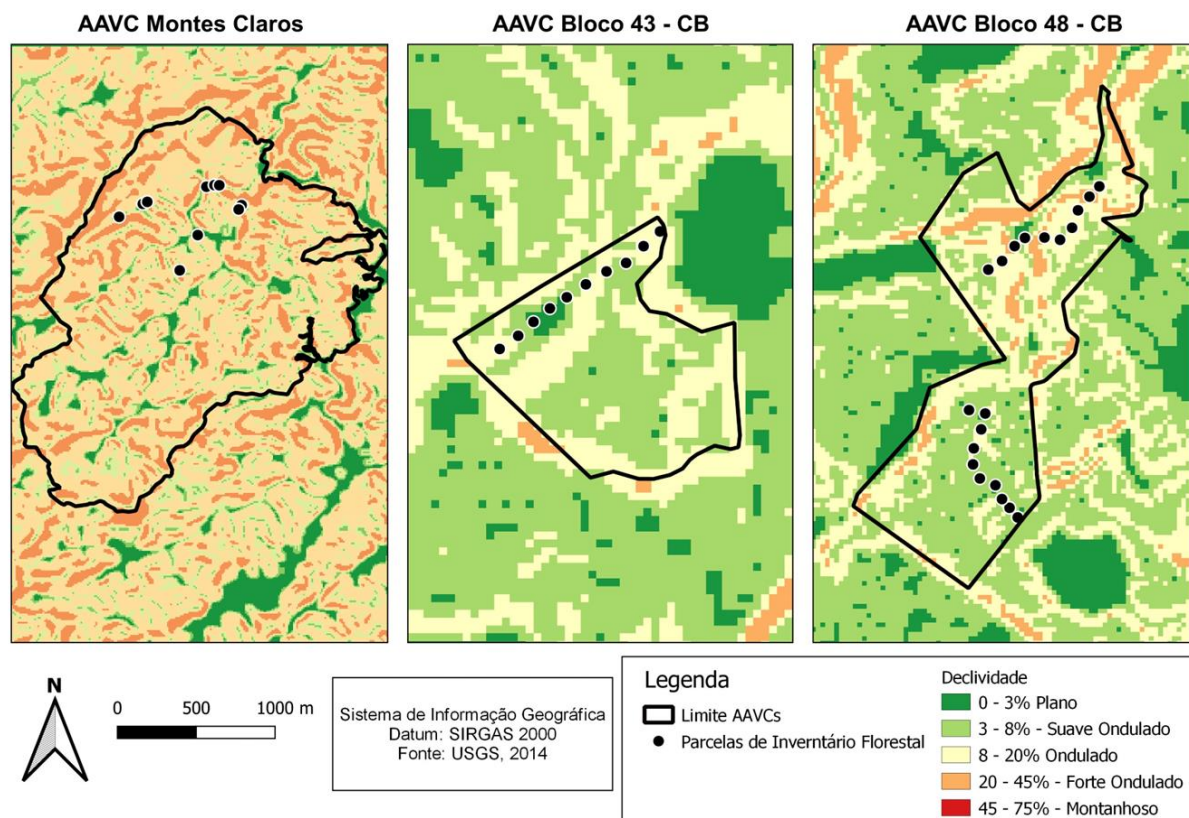
Fonte: Autoria própria, 2024.

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS DE ALFA DIVERSIDADE E DADOS DE CAMPO

As baixas correlações observadas nos diferentes parâmetros de calibração para obter os dados de alfa diversidade na AAVC Montes Claros pode ser atribuídas à declividade da área, classificada como ondulada e fortemente ondulada, conforme mapa (Figura 23) abaixo (AAVC Montes Claros). Essa característica topográfica resultou em sombras nas imagens de satélite, afetando os resultados. A declividade pode causar inconsistências na captura de dados de satélite, comprometendo a precisão das medições de diversidade. As sombras podem obscurecer detalhes importantes da vegetação (VENEZIANI, 1982), levando à subestimação ou superestimação da diversidade em determinadas áreas.

**Figura 23:** Mapa de declividade do terreno das AAVCs analisadas.



**Fonte:** Autoria própria, 2024.

Embora o *biodivMapR* utilize parâmetros como: “*Blue thresh*” e “*NIR thresh*” para criar máscaras que identificam áreas com sombras, por exemplo, ajudando a minimizar esses impactos, as correlações ainda permaneceram baixas. Isso ocorre porque o pacote captura e exclui

pixels com valores fora de um intervalo esperado. No entanto, essa exclusão também pode remover parcelas florestais, o que pode contribuir para as correlações mais baixas observadas, independentemente do número de clusters ("*nbclusters*") e do tamanho da janela ("*window\_size*") atribuídos. Não foram encontradas evidências científicas publicadas que analisaram a eficácia do pacote *biodivMapR* em áreas com as mesmas características para comparativos de parâmetros de calibração.

Para mitigar os efeitos da declividade, escolheu-se duas áreas, localizadas em terrenos mais planos, como visto no mapa acima (Figura 23), para realizar novos testes: AAVC 43 - CB e AAVC Bloco 48 - CB.

Estudos como os realizados por Zhang et al. (2023) e Robertson et al. (2023) que analisaram o uso de dados de SR com o pacote *biodivMapR* para monitorar a diversidade alfa e beta em ambientes com topografia predominantemente plana a forte ondulada. A análise revelou uma correlação positiva (0,6827) entre a diversidade alfa estimada e o índice de Shannon-Wiener obtido em campo (ZHANG et al., 2023) em terras áridas perturbadas pela mineração. Além disso, os resultados adquiridos por Robertson et al. (2023) indicam que tanto a resolução espacial da imagem quanto o tamanho da janela de mapeamento, influenciam diretamente a capacidade de diferenciar comunidades usando o *biodivMapR*. A resolução da imagem e o tamanho da janela de análise afetam a observação da diversidade beta e os padrões espaciais. Imagens de alta resolução oferecem mais detalhes locais, enquanto uma janela pequena capta variações mais locais, permitindo que você veja padrões de diversidade em escalas menores. Resoluções menores e janelas maiores suavizam esses padrões, dificultando a detecção de diferenças entre áreas e podem até misturar informações.

Contudo, a abordagem nas AAVCs localizadas em locais mais planos, permitiu melhor captura de dados uma vez que a ausência de declividade significativa, que geram sombras, permite uma captura de dados de satélite mais precisa e consistente. As correlações altas indicaram que, com janelas menores (*window\_size* 2) e com atribuição de um clusters de 60, há uma maior consistência na alfa diversidade em áreas planas (correlação de 0,7 e 0,6).

Os parâmetros utilizados na correlação que apresentou bons resultados (*window\_size* 2 e *nbclusters* 60) foram usados como referência inicial. No entanto, é necessário recalibrar esses parâmetros para diferentes paisagens, garantindo que o índice de Shannon seja preciso em diversas condições ecológicas. Ressalta-se que dados de campo, como a composição de espécies e a estrutura da vegetação, são essenciais para validar e calibrar alfa e beta diversidade. A calibração melhora a precisão das análises de diversidade, permitindo uma melhor compreensão do

ambiente estudado. Sem dados de campo, os resultados obtidos por algoritmos podem não refletir com precisão a realidade ecológica das áreas estudadas.

## 5.2 UNIDADE DE PLANTIO

A UP apresenta resultados inconsistentes com a área em questão, como é possível observar nos mapas das figuras acima (16 e 7), que há pixels com valores altos para área em questão, visto que é apenas um tipo de espécie, o índice de Shannon para a área é considerado elevado. Essa inconsistência pode ser atribuída às limitações do algoritmo em detectar áreas com apenas um tipo de espécie, pois o mesmo depende de variações espectrais para mapear a diversidade. Segundo o autor Jean-Baptiste Feret, o *biodivMapR* possui limitações nesse quesito. Embora não haja evidências documentadas em artigos científicos publicados, em comunicação direta com o autor, ele confirmou essa limitação para a área em questão.

## 5.3 RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA

Os resultados da restauração ecológica nas áreas de Itaúnas (ES) e Vereda (BA) mostram um progresso significativo na biodiversidade florística desde o início das intervenções em 2010. Os gráficos (Figura 20 e 22) mostraram um aumento constante na diversidade florística desde 2010. Esses aumentos iniciais indicam que as práticas de restauração começaram a ter efeito, promovendo uma maior diversidade florística. No entanto, a presença de áreas com solo exposto ou pouca vegetação no ano de 2014, sugere que o processo de recuperação ainda estava em estágios iniciais.

A heterogeneidade crescente dos ecossistemas indica que as áreas restauradas estão se tornando mais variadas em termos de composição de espécies, de acordo com os mapas de beta diversidade (Figura 19 e 21). Isso é fundamental para a resiliência ecológica, pois ecossistemas mais diversos são geralmente mais resistentes a perturbações (LOREAU, et al., 2001).

## 5.4 IMPORTÂNCIA DO ESTUDO

De acordo com Brancalion et al., (2015), o monitoramento de áreas em processo de restauração é essencial para avaliar o sucesso das iniciativas de restauração ecológica. O uso do pacote *biodivMapR* para monitoramento de áreas de restauração florestal pode ser utilizado, visto que houve uma correlação positiva entre os dados gerados pelo pacote e os dados de campo, indicando a eficácia do método para as áreas de vegetação nativa conservada. No entanto, para utilização do pacote ainda faz-se necessário dados de campo para calibração do algoritmo para assim obter dados mais concisos.

## 5.5 RECOMENDAÇÕES

Analisando os resultados e confirmando a eficácia do pacote apenas em áreas com baixa declividade e em ambientes de vegetação nativa conservada. Recomenda-se realizar novos testes, especialmente em áreas com declividade acentuada, para investigar e implementar técnicas de correção de sombras e melhorar a qualidade das imagens de satélite utilizadas pelo pacote. Ainda, continuar a validar os resultados do biodivMapR com dados de campo, especialmente em áreas com diferentes tipos de vegetação, topografia variada e diferentes biomas e coletar dados de campo em diferentes épocas do ano para avaliar a consistência e a robustez do pacote em condições sazonais variadas.

## 6. CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi analisar a biodiversidade de modo multitemporal em ambientes de restauração florestal da Suzano S.A, utilizando indicadores alfa e beta diversidade do biodivMapR e para atingir este objetivo, foi necessário avaliar a eficácia do pacote utilizando dados de inventário florestal.

Os resultados mostraram que com o uso de dados de sensoriamento remoto e do pacote biodivMapR no mapeamento e monitoramento da diversidade alfa e beta, pode haver limitação em áreas com declividade elevada, em topografia ondulado a forte ondulado o pacote não apresentou correlações satisfatórias. Mas, em áreas mais planas e onduladas, a correlação entre a diversidade alfa e a diversidade adquirida em campo, através de inventários florestais, foi de 0,7, indicando uma correlação positiva. Em que, os melhores parâmetros de calibração para as AAVCs analisadas foram uma “*window\_size*” de 2 e “*nbcluster*” de 60.

Os resultados indicam que os parâmetros podem ser utilizados como referência para avaliar a diversidade e suas mudanças em ambientes com características semelhantes. Mas, recomenda-se a utilização de dados de inventário para calibração dos parâmetros e análise de correlação entre os dados, em locais com características diferentes.

Contudo, foi possível analisar o ganho da biodiversidade florística em duas áreas de restauração ecológica. Em que, foi possível através dos mapas espacialmente explícitos analisar o processo de restauração em diferentes anos (2014, 2020 e 2024), após as intervenções em 2010.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Danilo Sette de. *Recuperação ambiental da mata atlântica*. 3. ed. rev. e ampl. Ilhéus: Editus, 2016. 200 p. Disponível em: [https://www.uesc.br/editora/livrosdigitais2016/recuperacao\\_ambiental\\_da\\_mata\\_atlantica\\_nova.pdf](https://www.uesc.br/editora/livrosdigitais2016/recuperacao_ambiental_da_mata_atlantica_nova.pdf). Acesso em: 2 set. 2024.
- BIOFLORA TECNOLOGIA DA RESTAURAÇÃO. *Manual de restauração ecológica: técnicos e produtores rurais no extremo sul da Bahia*. Março de 2016. Disponível em: [https://www.mpba.mp.br/sites/default/files/biblioteca/meio-ambiente/downloads/2016/manual\\_restauracao\\_ecologica\\_2016.pdf](https://www.mpba.mp.br/sites/default/files/biblioteca/meio-ambiente/downloads/2016/manual_restauracao_ecologica_2016.pdf). Acesso em: 6 jan. 2025.
- BRANCALION, P. H. S. *Restauração florestal: princípios e práticas*. 1. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2019.
- BRANCALION, Pedro Henrique S.; RODRIGUES, Ricardo Ribeiro; GANDOLFI, Sergius; KAGEYAMA, Paulo Yoshio; NAVE, André Gustavo; GANDARA, Flávio Bertin; BARBOSA, Luiz Mauro; TABARELLI, Marcelo. *Instrumentos legais podem contribuir para a restauração de florestas tropicais biodiversas*. Revista Árvore, Viçosa-MG, v. 34, n. 3, p. 455-470, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/dT3sKDF9Nr9dNsB6PL9F8Tf/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 14 out. 2024.
- BRANCALION, Pedro Henrique Santin; VIANI, Ricardo Augusto Gorne; RODRIGUES, Ricardo Ribeiro; GANDOLFI, Sergius. *Avaliação e monitoramento de áreas em processo de restauração*. Disponível em: <https://www.esalqlastrop.com.br/img/aulas/Cumbuca%206.pdf>. Acesso em: 14 out. 2024.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, nº 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e nº 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm). Acesso em: 12 out. 2024.
- CASA DA FLORESTA. *Monitoramento de fragmentos florestais de propriedade da Suzano na Unidade de Negócio Florestal São Paulo*. Piracicaba: Casa da Floresta, nov. 2022. 89 p.
- COPERNICUS. *Sentinel Online*. Disponível em: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/home>. Acesso em: 28 set. 2024.
- DI MAIO, Angélica et al. *Sensoriamento Remoto*. Curso Astronáutica e Ciências do Espaço. Agência Espacial Brasileira (AEB), INPE, 2008.
- ESPÍRITO SANTO. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos; Instituto Jones dos Santos Neves. *Atlas da Mata Atlântica do Estado do Espírito Santo*. Vitória: IJSN, [s.d.]. Disponível em: <https://ijsn.es.gov.br/Media/IJSN/PublicacoesAnexos/livros/Atlas-Mata-Atlantica-ES.pdf>. Acesso em: 08 out. 2024.
- FEARNSIDE, Philip M. *Destruição e conservação da floresta amazônica*. Manaus: Editora INPA, 2022. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/38899>. Acesso em: 12 out. 2024.
- FÉRET, Jean-Baptiste; ASNER, Gregory P. *Mapping tropical forest canopy diversity using*

*high-fidelity imaging spectroscopy*. Ecological Applications, v. 24, n. 6, p. 1289-1296, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1890/13-1824.1>. Acesso em: 16 ago. 2024.

FÉRET, Jean-Baptiste; DE BOISSIEU, Florian. *BiodivMapR: alpha and beta diversity maps*. Versão 1.14.4. 2024. Disponível em: <https://github.com/jean-baptisteferet/biodivMapR>. Acesso em: 01 set. 2024.

FÉRET, Jean-Baptiste; DE BOISSIEU, Florian. *biodivMapR: An R package for  $\alpha$ - and  $\beta$ -diversity mapping using remotely sensed images*. Methods in Ecology and Evolution, v. 11, n. 1, p. 64-70, jan. 2020. Disponível em: [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938522001902?casa\\_token=Gsfj8rRP\\_rwAAAAA:CLYJf8PciQm5wI2DAwPch\\_PLzHkgT4mn7UZ1J7pKDZZq\\_LdD6oW3SR\\_jyIKsoontlVbv6Njj6tk](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352938522001902?casa_token=Gsfj8rRP_rwAAAAA:CLYJf8PciQm5wI2DAwPch_PLzHkgT4mn7UZ1J7pKDZZq_LdD6oW3SR_jyIKsoontlVbv6Njj6tk). Acesso em: 8 ago. 2024.

FLORENZANO, Teresa Gallotti. *Iniciação em sensoriamento remoto*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 24 out. 2024.

FLORIANO, Eduardo Pagel. *Inventário florestal*. Edição do Autor. Rio Largo, AL: Centro de Ciências Agrárias : Universidade Federal de Alagoas, 2021. 135 p. ISBN 978-65-00-21723-0. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/123456789/8194>. Acesso em: 12 set. 2024.

GASTELLU-ETCHEGORRY, J.-P. et al. Biodiversity mapping with the BiodivMapR package: A promising tool for ecological studies. Ecological Informatics, v. 70, 101215, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101215>. Acesso em: 10 jul. 2024.

GUIMARÃES, Paulo Ricardo B. *Análise de Correlação e medidas de associação*. Curitiba: universidade federal do paraná, p. 1-26, 2017. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7965891/mod\\_resource/content/1/An%C3%A1lise%20de%20Correl%C3%A7%C3%A3o.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7965891/mod_resource/content/1/An%C3%A1lise%20de%20Correl%C3%A7%C3%A3o.pdf). Acesso em 12 out. 2024.

HEIP, Carlo H.R.; HERMAN, Peter M.J.; SOETAERT, Karline. *Indices of diversity and evenness*. Oceanis, v. 24, n. 4, p. 61-87, 1998.

HOLL, Karen D. *Fundamentos da restauração ecológica*. CopIt ArXives, 2023. INSTITUTO BRASILEIRO DE FLORESTAS - IBFL. *Bioma Mata Atlântica*. Disponível em: <https://www.ibflorestas.org.br/bioma-mata-atlantica>. Acesso em: 02 set. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. *Biomass brasileiros*. Disponível em: <https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/territorio/18307-biomass-brasileiros.html#:~:text=O%20Bioma%20Mata%20Atl%C3%A2ntica%20ocupa,florestal%20original%20ainda%20est%C3%A1%20preservada>. Acesso em: 02 set. 2024.

Legendre, P. , & Legendre, L. ( 1998 ). Ecologia numérica ( 2ª ed. ). Burlington, VT : Elsevier. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-294X.2003.01937.x>. Acesso em 02 out. 2024.

LIU, William Tse Horng. *Aplicações de sensoriamento remoto*. Oficina de Textos, 2015. Loreau, M., Naeem, S., Inchausti, P., Bengtsson, J., Grime, J. P., Hector, A., Hooper, D. U.,

Huston, M. A., Raffaelli, D., Schmid, B., Tilman, D., & Wardle, D. A. (2001). *Biodiversidade e funcionamento dos ecossistemas: conhecimento atual e desafios futuros*. Science, 294(5543), 804-808. DOI: 10.1126/science.1064088. Acesso em: 28 set. 2024.

MAPBIOMAS. *Até 25% da vegetação nativa do Brasil pode estar degradada*. 5 jul. 2024. Disponível em: [https://brasil.mapbiomas.org/2024/07/05/ate-25-da-vegetacao-nativa-do-brasil-pode-estar-degradada/#:~:text=5%20de%20ju-lho%20de%202024&text=Mais%20da%20metade%20\(64%25\),vegeta%C3%A7%C3%A3o%20em%20todo%20territ%C3%B3rio%20brasileiro](https://brasil.mapbiomas.org/2024/07/05/ate-25-da-vegetacao-nativa-do-brasil-pode-estar-degradada/#:~:text=5%20de%20ju-lho%20de%202024&text=Mais%20da%20metade%20(64%25),vegeta%C3%A7%C3%A3o%20em%20todo%20territ%C3%B3rio%20brasileiro). Acesso em: 13 set. 2024.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Biodiversidade e biomas*. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas#:~:text=O%20Brasil%20ocupa%20quase%20metade,a%20maior%20biodiversidade%20do%20mundo>. Acesso em: 14 out. 2024.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Mata Atlântica em desenvolvimento*. Disponível em: [https://antigo.mma.gov.br/biomas/mata-atl%C3%A2ntica\\_emdesenvolvimento.html](https://antigo.mma.gov.br/biomas/mata-atl%C3%A2ntica_emdesenvolvimento.html). Acesso em: 02 set. 2024.

NASA. *Landsat Science*. Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>. Acesso em: 28 set. 2024.

PEREIRA, Anísio Baptista. *Mata Atlântica: uma abordagem geográfica*. Nucleus, v. 6, n. 1, p. 1-27, 2009. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4033686>. Acesso em: 12 out. 2024.

ROBERTSON, Kevin M. et al. *Effects of spatial resolution, mapping window size, and spectral species clustering on remote sensing of plant beta diversity using biodivMapR and hyperspectral imagery*. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, v. 128, n. 7, e2022JG007350, 2023. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2022JG007350>. Acesso em: 05 dez. 2024.

SANTOS, Leandro Duarte dos; SCHLINDWEIN, Sandro Luís; FANTINI, Alfredo Celso; HENKES, Jairo Afonso; BELDERRAIN, Mischel Carmen Neyra. *Dinâmica do desmatamento da Mata Atlântica: causas e consequências*. Revista de Gestão Sustentável Ambiental, Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 378-402, jul./set. 2020. Disponível em: [https://portaldeperiodicos.anima-educacao.com.br/index.php/gestao\\_ambiental/article/view/8339/5389](https://portaldeperiodicos.anima-educacao.com.br/index.php/gestao_ambiental/article/view/8339/5389). Acesso em: 12 out. 2024.

SOS MATA ATLÂNTICA. *Atlas da Mata Atlântica*. 2023. Disponível em: <https://www.sosma.org.br/iniciativas/atlas-da-mata-atlantica>. Acesso em: 02 set. 2024.

SOS MATA ATLÂNTICA. *Restauração da floresta*. Disponível em: <https://www.sosma.org.br/causas/restauracao-da-floresta/>. Acesso em: 28 set. 2024.

SUZANO S.A. *Área de alto valor de conservação*. Central de Sustentabilidade. Disponível em: <https://centraldesustentabilidade.suzano.com.br/indicadores/?ind=area-de-alto-valor-de-conservacao-63aacecddb940>. Acesso em: 27 jan. 2025.

USGS. *Landsat Missions*. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions>. Acesso em: 28 set. 2024.

ENEZIANI, P.; ANJOS, C. E. *Metodologia de interpretação de dados de sensoriamento remoto e aplicação em geologia*. São José dos Campos: INPE, 61p. (INPE-2227-MD/014), Nov. 1982

ZHANG, Yan; TANG, Jiajia; WU, Qinyu; HUANG, Shuai; YAO, Xijun; DONG, Jing. *Assessment of the capability of Landsat and BiodivMapR to track the change of alpha diversity in dryland disturbed by mining*. *Remote Sensing*, v. 15, n. 6, p. 1554, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/6/1554>. Acesso em: 8 ago. 2024.