



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE



MILENA VIVIANE VIEIRA DE ALMEIDA

**ESTIMAÇÃO DE BIOMASSA E CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL
DE ÁREAS RESTAURADAS DA MATA ATLÂNTICA COM DADOS 3D
OBTIDOS POR FOTOGRAMETRIA AÉREA DIGITAL**

MILENA VIVIANE VIEIRA DE ALMEIDA

**ESTIMAÇÃO DE BIOMASSA E CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL
DE ÁREAS RESTAURADAS DA MATA ATLÂNTICA COM DADOS 3D
OBTIDOS POR FOTOGRAMETRIA AÉREA DIGITAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestra em Desenvolvimento e Meio Ambiente, na área de Desenvolvimento de regiões semiáridas e costeiras.

Orientador: Prof. Dr. Milton Marques Fernandes

Coorientador: Prof. Dr. André Quintão de Almeida

SÃO CRISTÓVÃO
SERGIPE, BRASIL

2023

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

A447e Almeida, Milena Viviane Vieira de.
Estimação de biomassa e caracterização estrutural de áreas restauradas da Mata Atlântica com dados 3D obtidos por fotogrametria aérea digital / Milena Viviane Vieira de Almeida; orientador Milton Marques Fernandes. – São Cristóvão, SE, 2023.
71 f.; il.

Dissertação (mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente)
– Universidade Federal de Sergipe, 2023.

1. Meio ambiente. 2. Biomas – Mata Atlântica. 3. Agricultura – Aspectos ambientais. 4. Pecuária. 5. Degradação ambiental. 6. Sensoriamento remoto. I. Fernandes, Milton marques, orient. II. Título.

CDU 504.1

MILENA VIVIANE VIEIRA DE ALMEIDA

**ESTIMAÇÃO DE BIOMASSA E CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL
DE ÁREAS RESTAURADAS DA MATA ATLÂNTICA COM DADOS 3D
OBTIDOS POR FOTOGRAMETRIA AÉREA DIGITAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente, sendo discutida e aprovada pela comissão abaixo e assinada em 30 de agosto de 2023, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.

Documento assinado digitalmente
 **MILTON MARQUES FERNANDES**
Data: 29/09/2023 11:41:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Milton Marques Fernandes - Orientador
Universidade Federal de Sergipe – UFS

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE QUINTAO DE ALMEIDA**
Data: 29/09/2023 20:23:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. André Quintão de Almeida - Coorientador
Universidade Federal de Sergipe – UFS

Documento assinado digitalmente
 **ADAUTO DE SOUZA RIBEIRO**
Data: 02/10/2023 13:08:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adauto de Souza Ribeiro - Examinador Interno ao Programa
Universidade Federal de Sergipe – UFS

Documento assinado digitalmente
 **JANISSON BATISTA DE JESUS**
Data: 02/10/2023 21:12:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Janisson Batista de Jesus - Examinador Externo ao Programa
Universidade Federal de Sergipe – UFS

CESSÃO DE DIREITOS

É concedido ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal de Sergipe (UFS), responsável pelo Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente, permissão para disponibilizar, reproduzir cópia desta Dissertação e emprestar ou vender tais cópias.

Documento assinado digitalmente
 MILENA VIVIANE VIEIRA DE ALMEIDA
Data: 29/09/2023 11:58:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Milena Viviane Vieira de Almeida
Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente
Universidade Federal de Sergipe

Documento assinado digitalmente
 MILTON MARQUES FERNANDES
Data: 29/09/2023 11:43:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Milton Marques Fernandes
Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente
Universidade Federal de Sergipe

Documento assinado digitalmente
 ANDRE QUINTAO DE ALMEIDA
Data: 29/09/2023 20:30:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. André Quintão de Almeida
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos
Universidade Federal de Sergipe

DECLARAÇÃO DE VERSÃO FINAL

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente concluída no Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

Documento assinado digitalmente
 **MILENA VIVIANE VIEIRA DE ALMEIDA**
Data: 29/09/2023 11:56:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Milena Viviane Vieira de Almeida
Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente
Universidade Federal de Sergipe

Documento assinado digitalmente
 **MILTON MARQUES FERNANDES**
Data: 29/09/2023 11:41:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Milton Marques Fernandes
Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente
Universidade Federal de Sergipe

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE QUINTAO DE ALMEIDA**
Data: 29/09/2023 20:23:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. André Quintão de Almeida
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos
Universidade Federal de Sergipe

AGRADECIMENTOS

Agradeço àqueles que estiveram ao meu lado do início ao fim desta trajetória, mas também aos que passaram brevemente, e aos que de alguma forma contribuíram nesta etapa de aprendizado:

À minha mãe, irmãs e irmão, gratidão por serem minha família.

Aos meus sobrinhos, Augusto e Murilo porque transbordam amor.

À minha equipe de campo, Marcelo Brandão e Ítalo Costa – os quais preencheram os campos com muito aprendizado, alegria, parceria e comprometimento.

Aos meus colegas de Mestrado, Alice e Ramon que tiveram fundamental importância, desde momentos de desabafos, de risadas e de discussões de textos acadêmicos.

Ao meu orientador Milton Marques, por toda experiência compartilhada, conversas terapêuticas, compreensão e atenção dispensadas.

Ao meu coorientador André Quintão, por toda a disponibilidade, suporte e contribuições na pesquisa.

Aos professores Aduino Ribeiro e Janisson Batista que participaram da banca de defesa, como membros examinadores, oferecendo sugestões que permitiram enriquecer ainda mais o presente trabalho.

Ao PRODEMA/UFS, em especial aos docentes, que por seu caráter interdisciplinar me permitiu permear por diversas fontes do conhecimento e ter contato com pessoas de diferentes áreas de atuação, o que me estimulou a analisar as coisas por novas perspectivas e fazer questionamentos para além de minha área de formação.

Aos meus colegas de trabalho do IPan (Instituto Pangea – Meio Ambiente, Cultura e Educação), André Souza e Thiago Roberto, pelo encorajamento e apoio.

Às minhas amigas, Yarin, Raphaela, Maíra, Raianny e Fernando, pelo acolhimento e força.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de pesquisa científica.

Ao presidente Luís Inácio Lula da Silva pelo reajuste de bolsas de pesquisa e de estudo, as quais permaneciam com o valor monetário defasado há mais de uma década, sendo este um ato simbólico de valorização dos esforços da comunidade científica, os quais refletem positivamente para a continuidade de pesquisas e para a evolução da humanidade.

ESTIMAÇÃO DE BIOMASSA E CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DE ÁREAS RESTAURADAS DA MATA ATLÂNTICA COM DADOS 3D OBTIDOS POR FOTOGRAMETRIA AÉREA DIGITAL

RESUMO

Os desmatamentos para agricultura e pecuária no bioma Mata Atlântica são os principais geradores de áreas perturbadas e/ou degradadas, sendo necessário monitorá-los continuamente. A problemática consiste em conciliar um método de coleta de dados, em áreas de restauração, que seja eficiente, célere e com comprovado custo-benefício. O monitoramento, seja de áreas degradadas ou em restauração, normalmente utilizados em diferentes fases de planos de recuperação de áreas degradadas (PRADs), permite visualizar os indicadores/resultados obtidos em comparação com as metas estabelecidas, seja por acordos globais, protocolos ou PRADs. No entanto, nos quesitos espaço-tempo e custos, as campanhas de campo tornam-se muito onerosas. Como alternativa aos inventários tradicionais, dados de sensoriamento remoto 3D, como *Light Detection and Ranging* (LiDAR), vêm sendo utilizados para auxiliar no monitoramento dessas áreas. Devido ao LiDAR possuir elevado custo quando comparado aos métodos de inventário realizados em campo, uma tecnologia de baixo custo, como as nuvens de pontos 3D de fotogrametria aérea digital (FAD) obtidas via aeronave remotamente pilotada (RPA) vem sendo aprimorada. Pretende-se, portanto, com esta pesquisa, realizar a (i) caracterização da estrutura vertical e de cobertura e (ii) estimativa de biomassa acima do solo (AGB) com nuvens de pontos 3D obtidas por FAD-RPA em áreas de Mata Atlântica restauradas. Essas áreas foram agrupadas de acordo com o método de restauração: RAM (restauração ativa), RAR (restauração ativa consorciada com eucalipto) e RPA (restauração passiva). Foram inventariados 1.797 indivíduos arbóreos, distribuídos em 59 espécies e 26 famílias. Dentre os três modelos de restauração estudados, a RAR apresentou os maiores valores de NA, H, AB e AGB. As áreas em restauração que apresentaram maior similaridade florística (55%) foram RAR e RPA. O modelo numérico do terreno superestimou os valores de elevação do terreno, com RMSE 1,5 m (3%) e um viés de -0,7 m, (1,3%). Já os valores de altura dominante das árvores das parcelas, foram subestimados em 1 m (viés de 11,7%), com um erro de 2,3 m (RMSE de 25,8%). Foi possível caracterizar e diferenciar (agrupar) os sistemas de restauração analisados com as métricas de altura e de cobertura da nuvem de pontos FAD-RPA. O modelo de regressão ajustado apresentou bom desempenho, com valores de R^2 de 0,84 e o RMSE de 11,1 Mg.ha⁻¹ (39,2%). Na validação, R^2 foi de 0,75 e o RMSE ao nível de parcela de 13,0 Mg.ha⁻¹ (46%). Podemos concluir que, apesar de superestimar os valores de elevação do terreno e, conseqüentemente, subestimar as alturas das árvores, os dados de FAD-RPA podem ser utilizados para caracterizar os diferentes sistemas de restauração analisados e estimar os valores de AGB com acurácia satisfatória.

Palavras-Chave: Drone. Aeronave remotamente pilotada. Biomassa acima do solo Nordeste do Brasil. Sergipe.

**BIOMASS ESTIMATION AND STRUCTURAL CHARACTERIZATION
OF RESTORED AREAS OF THE ATLANTIC FOREST WITH 3D DATA
OBTAINED BY DIGITAL AERIAL PHOTOGRAMMETRY**

ABSTRACT

Deforestation for agriculture and livestock in the Atlantic Forest biome is the main generator of disturbed and/or degraded areas, and it is necessary to monitor them continuously. The problem is to reconcile a method of data collection, in areas of restoration, that is efficient, fast and with proven cost-benefit. The monitoring, whether of degraded areas or under restoration, usually used in different phases of degraded areas recovery plans (PRADs), allows to visualize the indicators/results obtained in comparison with the established goals, either by global agreements, protocols, or PRADs. However, in terms of space-time and costs, field campaigns become very costly. As an alternative to traditional inventories, 3D remote sensing data, such as Light Detection and Ranging (LiDAR), have been used to assist in monitoring these areas. Because LiDAR has a high cost when compared to inventory methods performed in the field, a low-cost technology, such as 3D point clouds of digital aerial photogrammetry (FAD) obtained via remotely piloted aircraft (RPA) has been improved. It is intended, therefore, with this research, to perform the (i) characterization of the vertical structure and cover and (ii) estimation of above-ground biomass (AGB) with 3D point clouds obtained by FAD-RPA in restored Atlantic Forest areas. These areas were grouped according to the restoration method: RAM (active restoration), RAR (active restoration intercropped with eucalyptus) and RPA (passive restoration). A total of 1,797 tree individuals were inventoried, distributed in 59 species and 26 families. Among the three restoration models, RAR presented the highest values of NA, H, AB and AGB. The areas under restoration that presented the highest floristic similarity (55%) were RAR and RPA. The numerical model of the terrain overestimated the elevation values of the terrain, with RMSE 1.5 m (3%) and a bias of -0.7 m, (1.3%). On the other hand, the dominant height values of the trees of the plots were underestimated by 1 m (bias of 11.7%), with an error of 2.3 m (RMSE of 25.8%). It was possible to characterize and differentiate (group) the restoration systems analyzed with the height and coverage metrics of the FAD-RPA point cloud. The adjusted regression model showed good performance, with R^2 values of 0.84 and RMSE of 11.1 Mg.ha⁻¹ (39.2%). In the validation, R^2 was 0.75 and the RMSE at the plot level was 13.0 Mg.ha⁻¹ (46%). We can conclude that, despite overestimating the elevation values of the terrain and, consequently, underestimating the heights of the trees, the FAD-RPA data can be used to characterize the different restoration systems analyzed and to estimate the AGB values with satisfactory accuracy.

Keywords: Drone. Remotely piloted aircraft. Above-ground biomass. Northeast of Brazil. Sergipe.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Métricas tradicionais extraídas de valores normalizados de alturas derivadas de fotogrametria aérea digital (FAD).....	27
Tabela 2. Resumo das informações dendrométricas das parcelas inventariadas, sendo 30 localizadas na Fazenda Rio Fundo e 10 no Campus Rural da UFS.....	31
Tabela 3. Composição florística e parâmetros fitossociológicos das espécies amostradas em área de restauração ativa (RAM) no município de Itaporanga D’Ajuda, Sergipe, Brasil, 2022.	34
Tabela 4. Composição florística e parâmetros fitossociológicos das espécies amostradas das espécies amostradas em área de restauração ativa (RAR) no município de Itaporanga D’Ajuda, Sergipe, Brasil, 2022.	35
Tabela 5. Composição florística e parâmetros fitossociológicos das espécies amostradas das espécies amostradas em área de restauração passiva (RPA) no município de Itaporanga D’Ajuda, Sergipe, Brasil, 2022.....	36
Tabela 6. Composição florística e parâmetros fitossociológicos das espécies amostradas das espécies amostradas em área de floresta secundária inicial (REF) no município de São Cristóvão, Sergipe, Brasil, 2022.....	37
Tabela 7. Valores de Biomassa acima do solo total para cada uma das parcelas de inventário.	39
Tabela 8. Informações fitossociológicas, valores dendrométricas e de biomassa acima do solo médios, resumidos para cada um dos sistemas de restauração e de referência analisados.	40
Tabela 9. Métricas derivadas da nuvem de pontos 3D FAD-RPA que mais explicam as duas primeiras componentes principais.	44
Tabela 10. Estatística da correlação das variáveis explicativas.	47
Tabela 11 - Resultados das estimativas de mínimos quadrados ordinários para o modelo de AGB derivado das métricas da FAD-RPA.	47

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Mapa de localização das parcelas alocadas na Fazenda Rio Fundo, Itaporanga d’Ajuda e no Campus Rural da Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil. RAM = Restauração Ativa; RAR = Restauração Ativa consorciada com eucalipto; RPA = Restauração Passiva.18
- Figura 2.** Campanha de inventário de campo nas parcelas alocadas na Fazenda Rio Fundo, Itaporanga d’Ajuda e no Campus Rural da Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil. .21
- Figura 3.** Equipamentos utilizados para a obtenção dos dados de sensoriamento remoto via RPA: (A) drone multi-rotor; (B) receptor móvel para coleta de coordenadas em tempo real; (C) estação rover, a qual consiste numa base fixa que recebe e armazena as informações transmitidas pelo receptor móvel.26
- Figura 4 -** Exemplo de métricas tradicionais baseadas na altura das nuvens de pontos 3D obtidas por fotogrametria aérea digital (FAD) com imagens coletadas com aeronave remotamente pilotada (RPA).27
- Figura 5 -** Localização das parcelas e dos diferentes sistemas de restauração da Fazenda Rio Fundo (Esquerda) e de referência do Campus Rural da UFS (Direita) analisados no estudo. RAM = Restauração ativa com monitoramento; RAR = Restauração ativa sem monitoramento; RPA = Restauração Passiva; REF = Floresta de Referência.33
- Figura 6.** Dendrograma da similaridade florística de Jaccard (SJ) comparando as três áreas restauradas e a floresta secundária em fragmentos de Mata Atlântica localizados nos Municípios de Itaporanga D’Ajuda e de São Cristóvão, Sergipe, Brasil, 2022. RAM = Restauração ativa com monitoramento. RAR = Restauração ativa sem monitoramento; RPA = Restauração Passiva; REF = Floresta de referência.38
- Figura 7.** Modelos Digitais do Terreno (MDTs) obtidos por FAD-RPA e as 40 parcelas inventariadas nas duas áreas de estudo, (A) Fazenda Rio Fundo e (B) Campus Rural da UFS. RAM = Restauração ativa com monitoramento; RAR = Restauração ativa sem monitoramento; RPA = Restauração Passiva; REF = Floresta de referência.42
- Figura 8.** Gráficos de dispersão entre os (A) 75 valores de elevação do terreno coletados em campo com o RTK e os valores de elevação do MDT derivado da FAD-RPA e (B) os valores de altura dominante das árvores das parcelas (40) de campo e os valores de percentil 99% da altura estimadas pela nuvem de pontos normalizada FAD-RPA. RAM = Restauração ativa com monitoramento; RAR = Restauração ativa sem monitoramento; RPA = Restauração Passiva; REF = Floresta de referência.43
- Figura 9.** Biplot da ACP ordenando e mostrando a contribuição das métricas derivadas da altura e da cobertura da vegetação derivadas da nuvem de pontos 3D FAD-RPA, além da distribuição das parcelas dos diferentes sistemas de restauração e da área de referência analisada.45
- Figura 10.** Biplot da ACP ordenando as métricas derivadas da altura e da cobertura da vegetação derivadas da nuvem de pontos 3D FAD-RPA e agrupando os diferentes sistemas de restauração e a área de referência analisados no estudo.46
- Figura 11.** Valores estimados em campo *versus* valores previstos pelas métricas tradicionais derivadas de Hmed = altura média e de Hmáx = altura máxima. No gráfico de dispersão (A), a linha diagonal representa $x = y$. O histograma (B) mostra a distribuição dos valores de RMSE obtidos nas 1000 repetições no procedimento de validação cruzada. AGB = biomassa acima do solo; RMSE = raiz quadrada do erro quadrático médio.48

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Sigla	Português	Inglês
AA	Análise de agrupamentos	
RPA	Aeronave remotamente pilotada	Remotely-Piloted Aircraft
AGB	Biomassa acima do solo	Above-ground biomass
2D	Duas dimensões	
3D	Três dimensões	
CAP	Circunferência à altura do peito	
DAP	Diâmetro à altura do peito	
FAD	Fotogrametria aérea digital	Digital aerial photogrammetry
g cm ⁻³	Grama por centímetro cúbico	
GNSS	Sistema global de navegação por satélite	Global Navigation Satellite System
H	Altura total do fuste (m)	
ha	Hectare	
IBDF	Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal	
IFT	Inventário Florestal Tradicional	
INPE	Instituto Nacional de Estudos Espaciais	
IPCC	Painel intergovernamental sobre mudanças climáticas	Intergovernmental Panel on Climate Change
Kg	Quilogramas	
LiDAR	Deteção e alcance da luz	Light Detection and Ranging
M	Metro	
Mg ha ⁻¹	Megagrama por hectare	
Nm	Nanômetro	
°C	Graus Celsius	
ODS	Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável	
ONU	Organização das Nações Unidas	
PCA	Análise de componentes principais	Principal component analysis
PRAD	Plano Recuperação de Áreas Degradadas	
RAD	Recuperação de Áreas Degradadas	
RAM	Restauração ativa	
RAR	Restauração ativa consorciada com eucalipto	
REF	Floresta de referência	

RGB	Bandas espectrais (vermelho, verde e azul)	Red, Green and Blue
RPA	Restauração passiva	
RTK	Cinemática em tempo real	Real Time Kinematic
SR	Sensoriamento remoto	
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos	
TLS	Varredura a laser terrestre	Terrestrial Laser Scanning
UTM	Universal Transversa de Mercator	

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	3
2.1.	Objetivo geral.....	3
2.2.	Objetivos específicos.....	3
3.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
3.1.	Restauração ecológica da Mata Atlântica.....	4
3.2.	Composição da estrutura florestal.....	7
3.3.	Métodos de restauração ecológica.....	9
3.4.	Sensoriamento remoto no estudo da restauração ecológica.....	12
3.5.	Fotogrametria.....	14
3.6.	Uso de dados tridimensionais para caracterizar a estrutura vertical e a cobertura e estimar agb de áreas restauradas.....	15
4.	METODOLOGIA.....	18
4.1.	Área de estudo.....	18
4.2.	Sistemas de restauração e área de referência.....	19
4.3.	Inventário florestal.....	20
4.4.	Caracterização estrutural da vegetação.....	21
4.4.1.	Composição florística.....	21
4.4.2.	Fitossociologia.....	22
4.5.	Estimativa de biomassa acima do solo.....	23
4.6.	Fotogrametria Aérea Digital (FAD).....	24
4.6.1.	Aquisição das fotografias aéreas.....	24
4.6.2.	Processamento fotogramétrico.....	25
4.6.3.	Avaliação da fotogrametria aérea digital.....	28
4.7.	Caracterização da estrutura vertical e da cobertura florestal por FAD-RPA.....	29

4.7.1. Ajuste e validação do modelo de biomassa.....	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
5.1. Composição florística e fitossociológica	31
5.2. Caracterização de AGB por parcela.....	38
5.3. Validação da FAD-RPA	41
5.4. Caracterização da estrutura vertical e da cobertura da vegetação por FAD-RPA.....	43
6. CONCLUSÃO.....	49
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
REFERÊNCIAS.....	50

1. INTRODUÇÃO

Pode-se afirmar que a perda de florestas tropicais, no que tange às mudanças nos usos da terra, é um dos maiores problemas do planeta, pois essas áreas são detentoras de grande parte da diversidade de organismos vivos, cobrem cerca de 15% da terra firme do mundo e contêm cerca de 25% do carbono existente na biosfera terrestre (REIS NETO et al., 2017).

Além disso, essas florestas desempenham diversas funções essenciais para a vida na Terra, mas que devido às pressões antrópicas estão sofrendo grandes desequilíbrios, tais como: exploração predatória dos recursos naturais, práticas de agropecuária não sustentáveis, expansão urbana desordenadas, consumo excessivo de produtos fabricados com obsolescência planejada, fatores estes que contribuem para geração de lixo, poluição, contaminação e surgimento de microplásticos (SANTOS, 2023; SILVA, 2023).

Felizmente, iniciativas e esforços globais têm sido aplicados para a restauração de florestas: os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), as Metas de Biodiversidade de Aichi, a meta de Neutralidade da Degradação da Terra (LDN), o Acordo de Paris sobre Mudanças Climáticas, o Desafio de Bonn, dentre outros. Necessário faz-se mencionar também a Lei nº 11.428/2006 (Lei da Mata Atlântica), a qual regulamenta a proteção e a utilização da biodiversidade e dos recursos dessa floresta, além de prever multa e recuperação de toda área desmatada sem autorização a partir de 1993 (BRASIL, 2006).

Somando-se à importância das legislações e das iniciativas de restauração, enfatiza-se neste estudo o uso das tecnologias para monitoramento contínuo da dinâmica espaço-temporal dos remanescentes florestais, uma vez que as observações de séries temporais permitem visualizar e entender as alterações no uso da terra e, conseqüentemente, a tomada de decisões assertivas.

Numa visão mais abrangente, a restauração ecológica considera não só aspectos ecológicos, que tratam do restabelecimento da biodiversidade e dos processos ecológicos nos ecossistemas, mas também aspectos econômicos e sociais relacionados à restauração (SILVA; LEITE; BIM et al. 2021).

Outro fator importante para avaliar o êxito e tornar possível fazer inferências assertivas acerca da restauração é agregar dados e informações dos diferentes aspectos de caracterização da vegetação: composição florística, fitossociologia, estrutura vertical e horizontal. Isso porque estudar essas características em conjunto proporcionam maior

conhecimento sobre a diversidade de um local e as descrições estruturais das comunidades vegetais explicitam seu valor de conservação e geram melhor compreensão para as ações de manejo de um local (VELAZCO et al., 2015).

É sabido que as tecnologias passam por constantes aprimoramentos e, no setor florestal, têm-se utilizado diferentes técnicas de sensoriamento remoto as quais permitem obter um grande volume de dados, em diferentes escalas temporais, e com melhor resolução, nitidez, rapidez e confiabilidade.

Portanto, o presente estudo é relevante para o fornecimento de dados acerca da biomassa acima do solo e, conseqüentemente, o potencial estoque de carbono na Floresta Atlântica a fim de fomentar práticas de restauração ecológica, essenciais para a manutenção dos serviços ecossistêmicos, promoção da qualidade de vida das populações e busca pelo equilíbrio socioeconômico e financeiro, de forma local e globalizada.

Ademais, percebe-se que há carência de estudos acerca do sequestro de carbono em áreas reflorestadas, principalmente na Mata Atlântica do Nordeste do Brasil. Pesquisas demonstram que apesar da importância de avaliar o sucesso e fornecer orientação sobre como investir recursos escassos, o monitoramento é inconsistente ou ausente (RUIZ-JAEN, AIDE, 2005; MELO et al., 2013; ZAHAWI et al., 2015), em parte devido ao alto custo de tecnologias como o LiDAR, principalmente quando o levantamento é realizado em grandes áreas ou quando há necessidade de diferentes mapeamentos em um curto período de tempo (ZAHAWI et al., 2015; ALMEIDA et al., 2021). Por sua vez, Neves (2021) aponta resultados promissores com o uso de FAD-ARP e sugere a utilização de maiores áreas de florestas sobrevoadas por ARP de forma a obter maior variação na biomassa florestal acima do solo com o objetivo de aumentar o poder preditivo do modelo.

Apesar dos estudos descritos acima, reduzidos ainda são aqueles que utilizaram FAD-RPA para caracterizar a estrutura vertical e estimar a AGB em áreas restauradas da Mata Atlântica no Brasil. Sendo assim, nota-se que o levantamento de dados contínuos acerca da biomassa acima do solo e do estoque de carbono é extremamente importante e que precisa ser quantificado com o escopo de implementar projetos e programas, a exemplo da Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais, instituída pela Lei nº 14.119/2021. Neste sentido, buscando preencher estas lacunas, questiona-se: A que ponto o uso de RPA é efetivo e viável para estimação de biomassa acima do solo nas áreas restauradas de Mata Atlântica?

Logo, propõe-se com este projeto realizar o levantamento de dados remotos acerca da biomassa acima do solo, com uso de RPA em áreas restauradas da Mata Atlântica. Para tanto, objetiva-se estimar a AGB de três áreas restauradas por diferentes métodos de restauração ecológica e uma área de floresta secundária inicial para servir de base comparativa. Assume-se a hipótese de que há viabilidade técnica-financeira no uso FAD-RPA para o monitoramento da AGB em projetos de restauração florestal da Mata Atlântica, e, conseqüentemente, e do estoque de carbono, fomentando um sistema de monitoramento eficaz que visa a contribuir na tomada de decisões de planejadores e gestores ambientais.

2. OBJETIVOS

2.1. *Objetivo geral*

Caracterizar a estrutura vertical e a cobertura dos diferentes modelos de restauração em domínio da Mata Atlântica do Nordeste por meio de fotogrametria aérea digital (FAD) obtidas por imagens coletadas por aeronave remotamente pilotada (RPA).

2.2. *Objetivos específicos*

- 2.2.1.** Avaliar a composição florística e fitossociológica de áreas restauradas por diferentes métodos;
- 2.2.2.** Caracterizar a estrutura vertical e a cobertura dos diferentes modelos de restauração a partir de métricas com base nas alturas derivadas da nuvem de pontos 3D FAD-RPA;
- 2.2.3.** Estimar a biomassa acima do solo (AGB) a partir de métricas tradicionais baseadas na altura da nuvem de pontos 3D obtidas por FAD-RPA com finalidade de monitoramento de áreas em restauração na Mata Atlântica do Nordeste.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA DA MATA ATLÂNTICA

As florestas são fonte de recursos naturais, as quais propiciam a manutenção do equilíbrio ambiental e o bem-estar humano. No Brasil, conforme Lei nº 11.428/2006, o Bioma Mata Atlântica é constituído pela Floresta Atlântica e seus ecossistemas associados, os quais desde a colonização do Brasil vêm sendo reduzidos e fragmentados ao ponto de provocar alterações nos ciclos biogeoquímicos, aceleração nos processos de mudanças climáticas, extinção de espécies da fauna e da flora, surgimento de doenças zoonóticas, dentre outros impactos negativos (REIS NETO et al., 2017; BRANCALION et al., 2020; BATISTA, 2022).

Consoante o § 4º do Art. 225 da Constituição de 1988, a Mata Atlântica é classificada como patrimônio nacional (BRASIL, 1988). Isso significa que o uso dos seus recursos naturais deve ser feito na forma da lei visando a preservação do meio ambiente. Entretanto, segundo o relatório da SOS Mata Atlântica (2021), o bioma apresenta 12,4% de sua cobertura vegetal original e encontra-se como *hotspot* mundial, o que significa que, florestas tropicais que abrigam fauna e flora biodiversas, inclusive espécies endêmicas, estão sob ameaça de extinção devido às pressões antrópicas.

O bioma Mata Atlântica está presente em 17 estados do Brasil, sendo importante ressaltar que mais de 145 milhões de pessoas vivem nesta região, o que corresponde a 72% da população brasileira (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA, 2021). Possui diversas formações florestais: Floresta Ombrófila Densa; Floresta Ombrófila Mista, também denominada de Mata de Araucárias; Floresta Ombrófila Aberta; Floresta Estacional Semidecidual; e Floresta Estacional Decidual. Além dos ecossistemas associados, como manguezais, vegetações de restingas, campos de altitude, brejos interioranos e encaves florestais do Nordeste (BRASIL, 2006; BITTENCOURT JUNIOR, 2021).

Segundo dados do MapBiomas (2023), de 2019 até o primeiro trimestre de 2023, o bioma Mata Atlântica perdeu 97.131,9 ha, sendo 2021 e 2022 os anos mais intensos, com perdas de 30.499 ha e 30.314,01 ha, respectivamente. Como consequência, ocupa a primeira posição dentre os biomas do Brasil mais desmatados, seguido pelos biomas Caatinga (1.045,9 ha), Cerrado (788,9 ha) e Pampa (106,7 ha). Considerando o mesmo espaço temporal, somente o estado de Sergipe perdeu 2.559,6 ha de Mata Atlântica.

Entretanto, acordos e metas têm sido estabelecidos, a exemplo dos Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS), os quais abordam os principais desafios de desenvolvimento enfrentados por pessoas no Brasil e no mundo, e são um apelo global à ação para acabar com a pobreza, proteger o meio ambiente e o clima e garantir que as pessoas, em todos os lugares, possam desfrutar de paz e de prosperidade (ONU, 2022).

Dentre os 17 ODS listados na agenda 2030, dois deles convergem com a presente pesquisa: ODS 15 – vida terrestre e ODS 13 – ações contra as mudanças climáticas. Sendo que o ODS 15 visa proteger, restaurar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, travar e reverter a degradação dos solos e travar a perda da biodiversidade; e o ODS 13, adotar medidas urgentes para combater as alterações climáticas e os seus impactos (ONU, 2022).

Notadamente alterações ambientais afetam negativamente os ecossistemas naturais, o que acarreta exploração predatória de recursos, alteração de habitats, perda da biodiversidade, introdução de espécies exóticas nos ecossistemas, aumento de patógenos, aumento de tóxicos ambientais, e aceleração das mudanças climáticas (CHIVIAN; BERNSTEIN, 2008 citado por ALHO, 2012).

Diante das alterações intensas, provocadas pelo ser humano, alguns serviços ecossistêmicos perdem sua capacidade natural de regeneração. E, alguns dos recursos naturais renováveis finitos, como a água, um elemento essencial à vida, tornam-se raros ou até mesmo escassos. Este processo histórico de degradação da Mata Atlântica o coloca como um dos biomas prioritários no mundo para ser restaurado, considerando a conservação da rica biodiversidade e o combate às mudanças climáticas (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INPE, 2021).

Cabe definir e diferenciar os conceitos de serviços ecossistêmicos e ambientais: de acordo com a Lei nº 14.119/2021, os serviços ecossistêmicos são benefícios relevantes para a sociedade gerados pelos ecossistemas, em termos de manutenção, recuperação ou melhoria das condições ambientais, sendo classificado em quatro modalidades: serviços de provisão, de suporte, culturais, e de regulação; os serviços ambientais são atividades individuais ou coletivas que favorecem a manutenção, a recuperação ou a melhoria dos serviços ecossistêmicos (BRASIL, 2021).

Dessa maneira, como forma de atenuar e resgatar algumas das funções dos ecossistemas, o ser humano pode realizar serviços ambientais, ou seja, a ação do homem sobre a natureza, em que esse pode utilizar diversas técnicas, para recompor ou enriquecer

determinada área florestal. Em razão disso, a restauração ecológica ativa é classificada como serviço ambiental de fundamental importância.

Sendo assim, pode-se utilizar estratégias que visam à conservação dos ecossistemas, a citar os instrumentos de gestão que possibilitam a redução do desmatamento, como o pagamento por serviços ambientais, o qual consiste na transação de natureza voluntária, mediante a qual um pagador de serviços ambientais transfere a um provedor desses serviços recursos financeiros ou outra forma de remuneração, nas condições acertadas, respeitadas as disposições legais e regulamentares pela Lei nº 14.119/2021 (BRASIL, 2021).

Dentre as modalidades de pagamento por serviços ambientais, há os títulos verdes ou *green bonds*, que são definidos como instrumentos financeiros, certificados por terceiros, em que as empresas podem emitir títulos verdes para levantar capital para financiar seus valiosos investimentos. Além disso, os títulos verdes são desenvolvidos com os objetivos específicos de melhorar o bem-estar social e os impactos ambientais, como a redução das emissões de gás carbônico (CO₂) e a prevenção da poluição (TANG; ZHANG, 2020).

Os países tropicais que enfrentam taxas crescentes de perda florestal devem incluir a fiscalização ambiental e o controle dentro de sua lista de atividades essenciais (BRANCALION et al., 2020). Os mesmos autores fazem diversas recomendações políticas, que consideram imprescindíveis para coibir o desmatamento e evitar problemas à saúde humana, a citar: i) Focar nos meios de subsistência em comunidades rurais e terras indígenas, considerando que são grupos sociais mais vulnerabilizados; ii) Incentivar estratégias para impulsionar os mercados legais de madeira e cadeias de suprimentos, de modo a criar obstáculos à extração ilegal de madeira; e iii) Utilizar inovações, como o sensoriamento remoto, para rastrear os desmatamentos e os incêndios de forma rápida a fim de salvaguardar as florestas tropicais e o seu povo.

A partir da análise estrutural da vegetação, pode-se definir as técnicas de manejo mais adequadas para determinada região, uma vez que essa análise informa a composição horizontal e vertical da floresta, quali-quantitativamente, permitindo assim intervenções na sua estrutura com intensidades que não comprometam sua sobrevivência futura (CORAIOLA, 1997).

Essa análise é feita mediante estudos de monitoramento da dinâmica espaço-temporal do uso da terra, em que, a partir de modelos matemáticos, estatísticos,

computacionais e por sensoriamento remoto, são obtidas as estimativas de biomassa e de carbono. Verifica-se, então, que o monitoramento da vegetação é uma etapa essencial para avaliar o sucesso da restauração, tanto no que se refere à avaliação dos métodos usados, como para inferir se a área em restauração está seguindo uma trajetória ecológica desejada (RODRIGES et al., 2013).

Portanto, é fundamental injetar recursos por meio de mecanismos como o pagamento por serviços ambientais, o qual pode fortalecer a cadeia econômica de restauração em municípios degradados – desde a produção e comercialização de insumos até a execução da restauração no campo – estimulando a geração de empregos e impulsionando a economia local, ao mesmo tempo em que restauram a vegetação (REZENDE et al., 2018). E, para isso, é possível utilizar diferentes métodos de restauração florestal: ativa, mista ou passiva. Além dessa intervenção prática, deve-se monitorar e controlar o andamento da restauração, neste sentido, é preciso avaliar o custo-benefício das técnicas disponíveis, que de maneira geral, são o inventário florestal tradicional e o aprimorado, foco do presente estudo.

3.2. COMPOSIÇÃO DA ESTRUTURA FLORESTAL

A vegetação é um elemento estruturante fundamental das paisagens. Não só domina, pela sua biomassa, a maioria dos ecossistemas terrestres, como constitui o habitat das populações animais e a sede da maioria das atividades produtivas e culturais humanas. É também o elemento que melhor integra a resposta biológica de uma paisagem aos fatores dos meios, físico, biológico e antrópico (CAPELO, 2003).

O estudo da vegetação compreende vários aspectos, e, dentre eles, aborda-se os parâmetros da estrutura. As comunidades vegetais representam tipologias reconhecidas por sua composição florística e sua estrutura, associadas às suas relações interespecíficas com o meio ambiente (FREITAS; MAGALHÃES, 2012). A estrutura da floresta é uma característica essencial da biodiversidade que agrega informações para múltiplas variáveis, tais como composição de espécies arbóreas e sua estrutura horizontal e vertical (CHIRICI et al., 2012).

A estrutura horizontal, refere-se à abundância: representa o espaço ocupado pelas plantas, como área basal, densidade e cobertura de copa (projetada). A estrutura vertical está relacionada ao tamanho da árvore: diâmetro e altura da árvore. A composição trata-se de uma categorização de plantas, como espécies, formas de crescimento ou outra

distinção funcional (CÁCERES, LEGENDRE, ELE, 2013; CÁCERES et al., 2019).

Ademais dos conceitos anteriores, é importante abordar a definição de florística e fitossociologia, em virtude de o estudo desses atributos proporcionarem conhecimento sobre a diversidade de um local e descrições estruturais das comunidades vegetais, explicitando seu valor de conservação, e constituindo-se como ferramenta para as ações de manejo (VELAZCO et al., 2015).

Assim sendo, a composição florística implica na produção de uma lista completa com o nome das espécies presentes na área de estudo sem atribuir-lhes qualquer diferença ecológica. Todas as espécies têm o mesmo peso e o pesquisador está interessado nos grupos presentes, isto é, se algum táxon ocorre com grande quantidade de táxons inferiores (muitas espécies de um mesmo gênero ou família) ou se um táxon muito comum em outras comunidades está ausente na área estudada (RODAL; SAMPAIO; FIGUEIREDO, 2013).

Enquanto a fitossociologia de uma floresta, sucintamente, resulta das características e combinações entre as quantidades em que cada espécie ocorre por unidade de área (densidade), da maneira como estas espécies se distribuem na área (frequência) e do espaço que cada uma ocupa no terreno (dominância) (BARROS, 1980; LAMPRECHT, 1990; FREITAS; MAGALHÃES, 2012).

As informações obtidas em levantamentos da estrutura e da composição florística de comunidades vegetais servem de base para a proteção e a recuperação destas formações (FREITAS; MAGALHÃES, 2012). No entanto, em muitas pesquisas, a estrutura da floresta e a composição de espécies são estudados e analisados separadamente (LEE et al. 2002; FANG et al. 2012), não sendo suficientemente precisas quando as comunidades são descritas usando apenas a composição de espécies, sendo as características como o tamanho de seus organismos de fundamental importância para entender a organização da comunidade (CÁCERES, LEGENDRE, ELE, 2013).

A tarefa de reconhecer estratos de árvores na floresta é um dos principais elementos do estudo da estrutura vertical (SANQUETTA, 1995). A partir de seus estudos, o autor conclui que a variável altura descreve bem a estratificação vertical e que a avaliação da estrutura vertical é importante e de grande valia para o manejo.

O estudo da cobertura florestal, devido aos benefícios de técnicas cada vez mais avançadas na geração de nuvens de pontos baseadas em imagens, permite avaliar mudanças na cobertura florestal com alto grau de automação para grandes áreas, mesmo

em escala nacional (WANG; GINZLER; WASER, 2015). Para Moreira (2023) o monitoramento das mudanças na cobertura vegetal ao longo do tempo também é uma aplicação relevante, possibilitando acompanhar a evolução de programas de regeneração, bem como alterações na composição e estrutura da vegetação. Ademais, essas análises auxiliam no zoneamento ambiental, ajudando identificar as coberturas e seus potenciais usos.

3.3. MÉTODOS DE RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA

A formação de florestas dá-se pelo processo de sucessão ecológica. De acordo com Margalef (1986), a sucessão consiste na ocupação de espaços “novos” e no desenvolvimento paulatino dos ecossistemas, sendo um fenômeno fundamental em ecologia, além de permitir entender como funciona o marco ecológico de toda evolução. As espécies que tem crescimento rápido e altas taxas de dispersão são aquelas que predominam nas fases iniciais da sucessão, já as espécies que apresentam menor capacidade de dispersão e crescimento lento tornam-se dominantes nas fases finais da sucessão (MIRANDA, 2009).

O processo de sucessão ecológica pode ocorrer de forma natural, uma vez que, segundo Odum (1983) envolve mudanças na estrutura de espécies e nos processos da comunidade ao longo do tempo resultante da modificação do ambiente físico pela comunidade e de interações de competição e coexistência em nível de população; ou, de forma antrópica, a partir dos métodos de restauração. Em decorrência da constante atuação antrópica sobre o meio ambiente, as florestas são reduzidas a fragmentos florestais. Esses ecossistemas fortemente fragilizados estão tendo menos recursos disponíveis e, assim, demoram mais tempo para se regenerar; e os fragmentos menores e mais isolados, muitas vezes, diminuem abruptamente sua capacidade de regeneração.

Por esse motivo, as florestas estão constantemente passando pelo processo de sucessão ecológica, em que partem de um estágio mais perturbado, um estágio inicial com predominância de espécies pioneiras, em direção a um estágio mais equilibrado, ou avançado, as florestas clímax, que apresentam espécies características dos estádios mais avançadas da sucessão (LIMA, 2019).

Essas mudanças na vegetação, conforme Mueller-Dombois & Ellenberg (1974), podem ser classificadas em três tipos básicos, decorrentes da natureza do distúrbio, do momento de sua ocorrência e das mudanças provocadas pela própria vegetação:

mudanças ficológicas, sucessão primária e sucessão secundária.

As mudanças ficológicas são feitas pelas algas, as quais desempenham um papel ecológico importante como produtoras primárias dos ecossistemas onde ocorrem, sendo, provavelmente, responsáveis por mais de 50% do total da produção primária de todo o planeta. A sucessão primária ocorre quando a sucessão tem início numa área que ainda não foi anteriormente ocupada por uma comunidade, como um campo de lava (ODUM, 1983). Já a sucessão secundária ocorre se o desenvolvimento da comunidade se processa numa área da qual foi eliminada uma outra comunidade – caso de um campo lavrado ou de uma floresta derrubada. A sucessão secundária é geralmente mais rápida, porque pelo menos alguns organismos estão presentes (MUELLER-DOMBOIS & ELLENBERG, 1974; ODUM, 1983; LIMA, 2019).

A sucessão secundária pode ser iniciada pelo próprio ecossistema ou pela atividade antrópica. Dá-se, então, o nome de restauração ecológica, a qual consiste no processo de auxiliar o restabelecimento de um ecossistema que foi degradado, danificado ou destruído (SER, 2004). Possui três princípios: ecológico, socioeconômico e gestão de projetos. Ações e práticas em um determinado princípio têm reflexo direto ou indireto nos demais e, conseqüentemente, no processo de restauração ecológica. Dessa forma, entende-se que, embora o objetivo primário da restauração seja ecológico, ele não se sustenta na prática, sem uma abordagem conjunta dos aspectos socioeconômicos e de gestão, que possibilitam transformar métodos e conceitos de ecologia da restauração em projetos de restauração ecológica bem-sucedidos no campo (RODRIGUES et al., 2013). Brancalion et al. (2016) descreve os conceitos dos métodos de restauração combinado ao diagnóstico de restauração:

Restauração ativa: Plantios de mudas (1666 mudas/ha, espaçamento de 3 m × 2 m) ou semeadura direta de várias espécies arbóreas nativas (>50 espécies) cobrindo toda a área, igualmente dividida em espécies de crescimento rápido e de copa larga, e espécies de crescimento lento e/ou dossel estreito. Indica-se quando o potencial de restauração autogênica apresenta-se nulo ou muito limitado (locais ocupados por agricultura mecanizada ou pastagens com nenhuma ou pouquíssimas mudas em regeneração espontânea ou árvores nativas isoladas);

Restauração mista: Estímulo à regeneração de indivíduos arbóreos e arbustos nativos por meio do controle manual ou químico de gramíneas invasoras e restauração ativa de manchas não cobertas por mudas em regeneração espontânea ou árvores nativas

isoladas. Indica-se quando o potencial de restauração autogênica é intermediário (áreas abandonadas ou pastagens com distribuição irregular de áreas cobertas e não cobertas por mudas em regeneração espontânea ou árvores nativas isoladas).

Restauração passiva: Isolamento do local de distúrbios mediados pelo homem e, quando necessário, incentivo à regeneração de indivíduos de árvores e arbustos nativos por controle manual ou químico de gramíneas invasoras. Plantios de enriquecimento com espécies arbóreas de final de sucessão em florestas regeneradoras de baixa diversidade também foram incluídos nesta categoria. Indica-se nos casos em que o potencial é razoável (mudas em regeneração espontânea ou árvores nativas isoladas cobrindo a maior parte do local).

Geralmente, são listadas espécies nativas da região a ser restaurada no PRAD. No entanto, a depender da finalidade da restauração, do histórico da área, e, dos aspectos ambientais e socioeconômicos pode ser necessário/ viável, consorciar espécies nativas com espécies de valor comercial, inclusive espécies exóticas.

Denomina-se espécie nativa aquela que ocorre naturalmente em um dado local, devendo sua presença na área à sua própria capacidade dispersiva e competência ecológica. Espécie exótica é aquela que não ocorreria naturalmente em uma dada região geográfica sem o transporte humano, intencional ou acidental, para a nova região (MORO et al., 2012).

Dentre as etapas da restauração ecológica cabe destacar o monitoramento florestal, sendo essa uma etapa essencial para avaliar o sucesso da restauração, tanto no que se refere à avaliação dos métodos usados, como para inferir se a área em restauração está seguindo uma trajetória ecológica desejada (RODRIGUES, 2013). Percebe-se que, o monitoramento é imprescindível para gerar dados e informações com intuito de fomentar o planejamento e a gestão ambiental visando produzir instrumentos educativos e financeiros, com a colaboração dos setores público, privado e organizações não governamentais, os quais deverão ser aplicados colaborativamente em prol da efetividade da restauração florestal.

Apesar de a princípio ter sido feita a escolha do método mais adequado segundo os critérios de diagnóstico da restauração, há diversos outros fatores que interferem no sucesso da restauração: usos intensivos anteriores do solo, problemas com seleção de espécies, qualidade de sementes e plântulas, degradação do solo, competição com espécies invasoras, falhas na manutenção e distúrbios naturais (BRANCALION et al.,

2016). Logo, ao constatar a imprevisibilidade e a mutabilidade do resultado da restauração, independentemente do método escolhido, faz-se necessário o estudo contínuo da dinâmica da floresta a partir das diferentes perspectivas e ferramentas disponíveis para que seja conhecido o maior número de efeitos decorrentes das múltiplas variáveis da natureza e da intervenção humana. O monitoramento da vegetação com uso de tecnologias como RAP, vem demonstrando confiabilidade e eficiência para diversas finalidades, tais como a caracterização da estrutura vertical e da cobertura e estimação de biomassa, como é o caso do presente estudo; caracterização de fitofisionomias (MOREIRA, 2023), dentre outros.

3.4. *SENSORIAMENTO REMOTO NO ESTUDO DA RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA*

Para a manutenção dos valores ecológicos que ainda existem, bem como a identificação de estratégias de recuperação de áreas degradadas, é preciso realizar pesquisas que visem identificar e compreender as relações ecológicas dentro dos diferentes estágios sucessionais das florestas (CABRAL et al., 2023). Os profissionais, incluindo planejadores e gestores ambientais, são usuários de dados de inventário florestal e, à medida que os usos e as aplicações para dados de inventário e estimativas aumentam, também aumenta o número de variáveis que requerem observação ou medição (MCROBERTS; TOMPPPO, 2007).

Tradicionalmente, os inventários de campo são baseados em parcelas amostrais, que, apesar de fornecer informações valiosas, são trabalhosas, caras e espacialmente limitadas. Sendo assim, observa-se que os executores de inventários florestais têm recursos limitados para alcançar um resultado – estimativas dendrométricas confiáveis da altura, volume e biomassa das florestas. São ajustados, portanto, a partir de amostras, modelos matemáticos que sintetizam a relação entre variáveis dendrométricas e que posteriormente são empregados para estimar variáveis de interesse a partir daquelas medidas com maior facilidade e menor custo (MOSER; OLIVEIRA, 2017).

O advento dos dados de baixo custo, amplamente disponíveis e coletados remotamente têm sido a base para muitas das importantes melhorias tecnológicas recentes. Dados coletados remotamente não só contribuíram para aumentar a velocidade, a eficiência de custos, a precisão e a pontualidade associada aos estoques, mas facilitaram a construção de mapas de atributos florestais com resoluções espaciais e exatidão que não

eram viáveis mesmo há alguns anos (MCROBERTS; TOMPPPO, 2007). De modo geral, entende-se como sensoriamento remoto (SR) a coleta de dados de um objeto ou alvos à distância (ROSA, 2009). A obtenção de informações a partir do sensoriamento remoto varia de acordo com a plataforma de detecção (em solo, aerotransportada ou em satélite) e o princípio físico de coleta de dados.

As primeiras iniciativas para o monitoramento sistemático da cobertura vegetal datam do início da década de 80, quando o Instituto Nacional de Estudos Espaciais (INPE) juntamente com o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF), realizaram uma avaliação dos desmatamentos ocorridos na Floresta Amazônica (FERREIRA, FERREIRA, FERREIRA, 2008). E, sua evolução é fruto de um esforço multidisciplinar que envolve avanços na física, na físico-química, na química, nas biociências, nas geociências, na computação, na mecânica etc. (FIGUEIREDO, 2005).

Diante desse progresso, podemos agrupar o SR da seguinte maneira: SR 2D (espectral) e SR 3D (digital). O SR 2D coleta os dados a partir de sensores a bordo de satélites (faixa óptica na luz do visível do espectro eletromagnético, 700 a 400 nm), podendo ser – sensores ativos, emitem a própria energia, ou, passivos, utiliza a luz do sol – ou de radares, (faixa das micro-ondas, 1 mm a 1 m, sendo um sensor ativo) e têm como produtos as imagens. Enquanto o SR 3D utiliza câmeras digitais acopladas às aeronaves (tripuladas ou não tripuladas) e gera fotografias aéreas digitais. A escolha entre SR 2D ou 3D ou a combinação de ambos deve considerar a finalidade do estudo, a escala cartográfica, e os recursos financeiros disponíveis, dentre outros fatores específicos de cada pesquisa/área (NEVES, 2021).

Muitos trabalhos têm utilizado o laser terrestre (TLS), que possui nuvens de pontos de alta densidade. No entanto, o TLS possui uma limitação espacial para aplicação: precisa ser transportado manualmente para chegar à área de interesse. LiDAR-RPA tem grande potencial para medir biomassa, pois fornece dados de nuvem de pontos de densidade muito mais alta em comparação com sistemas de aeronaves (CORTE et al., 2020).

Apesar do exposto, verifica-se que o LiDAR apresenta alto custo, e como alternativa, nos últimos anos, observa-se um crescimento no uso de RPAs, devido, tanto à redução nos custos de aquisição, de manutenção e de operação de aeronaves; quanto à melhora na qualidade da obtenção dos dados, ao aumento da capacidade de armazenamento dos dados e aos avanços dos softwares de processamento digital das

fotografias aéreas obtidas por aeronave remotamente pilotada (FAD-RPA).

3.5. FOTOGRAMETRIA

A fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia que permite obter informações precisas sobre objetos do meio ambiente em que se realiza registro, medições e interpretações de imagens fotográficas e de padrões de energia eletromagnética (ASP,1966). A palavra fotogrametria tem origem etimológica grega, e deriva dos radicais photon (luz), graphos (escrita) e metron (medições) (MOREIRA, 2023).

Há duas grandes áreas na fotogrametria: interpretativa e métrica. A fotogrametria interpretativa objetiva principalmente o reconhecimento e identificação de objetos e o julgamento do seu significado, a partir de uma análise sistemática e cuidadosa de fotografias, e utiliza técnicas como foto-leitura, foto-análise e foto-dedução.

É possível determinar, em razão de técnicas e processos, a fotogrametria métrica a partir de: distâncias, ângulos, áreas, volumes, elevações, tamanhos e formas de objetos; e gerar produtos e subprodutos, tais como: cartas planimétricas e altimétricas, mosaicos, ortofotos etc. O intervalo de tempo de exposições feitas na câmara fotográfica transportada pelo avião é ajustado de tal maneira que cada ponto da superfície da Terra é fotografado mais de uma vez em diferentes posições (TEMBA, 2000).

Esse procedimento denomina-se sobreposição de imagens e faz-se necessário para compor o mosaico (CASSEMIRO; PINTO, 2014), sendo a sobreposição o elo entre as várias fotos sequenciais feitas pelo drone na hora de unir o mapa. Os dados de GPS juntamente com as fotos do drone registram as informações de posicionamento e altitude em todas as fotos. A sobreposição viabiliza detectar os pontos em comum entre as fotos anterior e seguinte, e, assim, permite que o algoritmo de processamento triangular a informação contida nesses pontos possam “amarrar” as fotos em um ortomosaico (mapa composto por várias ortofotos unidas). A falta de sobreposição de imagens pode gerar problemas, como a quebra do ortomosaico em blocos e a falta de acurácia em projetos que utilizam pontos de controle, que consistem em marcações em solo, indicadas pelo pesquisador/piloto, por meio de coordenadas colhidas com um GPS de alta precisão e servem como referência para os sistemas de correção de posicionamento geográfico (MAPPA, 2023).

Após a coleta dos dados com a RPA procede-se à fase do processamento de imagens, a qual permite a reprodução da área mapeada, em forma de modelos digitais, de

onde se pode realizar a medição de áreas, ângulos e distâncias. Os produtos obtidos são o ortomosaico, modelo digital de superfície (MDS), modelo digital de terreno (MDT), curvas de nível e índices de vegetação (HORUS AERONAVES, 2019 apud ZIECH, 2021).

Dessa maneira passamos a trabalhar com a fotogrametria digital, que de acordo com Heipke (1995), consiste numa tecnologia de informação que permite, a partir das imagens digitais planas (2D) obtidas gerar informações geométricas, radiométricas e de semântica sobre objetos no universo tridimensional (3D).

Segue-se então à fase de pós-processamento, em que são aplicados algoritmos específicos que permitem realizar análises aprofundadas sobre os produtos obtidos da fase do processamento. É o momento que as possibilidades de aplicação mais se expandem e dependerá também do conhecimento do operador. Entre os produtos obtidos da fase do pós-processamento, encontra-se a altimetria, identificação de ervas daninhas, linhas e falhas de plantas, contagem de plantas, análise de biomassa, análise de cobertura (HORUS AERONAVES, 2019; MAPPA, 2020 apud ZIECH, 2021).

Konecny (1985) faz uma classificação do desenvolvimento da fotografia aérea, com base na teoria econômica de Kondratjew, classificando-a em 4 ciclos: Fotogrametria plana (1850 - 1900); Fotogrametria analógica (1900 - 1960); Fotogrametria analítica (1960 - 1980); e Fotogrametria digital (1980 até os dias atuais).

Em 1911, Cesare Tardivo adapta as técnicas de fotogrametria terrestre para a fotogrametria aérea (GUERRA e PILOT, 2000; SILVA, 2015; MELO et al., 2021). A fotogrametria aérea digital tem se desenvolvido rapidamente a partir de 1990, incorporando avanços da ciência da computação, como correspondência de imagens e reconhecimento de padrões (MOREIRA, 2023).

Para descrever estas novas tecnologias de aquisição e observação da Terra, Evelyn Pruitt e Walter Bailey assinalaram o termo sensoriamento remoto, em substituição ao termo aerofotografia e aerofotogrametria (NASA, 1999; REICHHARDT, 2006; SCHOTT, 2007; MELO et al., 2021).

3.6. USO DE DADOS TRIDIMENSIONAIS PARA CARACTERIZAR A ESTRUTURA VERTICAL E A COBERTURA E ESTIMAR AGB DE ÁREAS RESTAURADAS

FAD-RPA está sendo utilizada para obter dados remotos acerca da AGB e alguns

estudos demonstram sua confiabilidade. Almeida et al. (2021), apresentam resultados que indicam que os produtos derivados da aerofotogrametria digital, produzidos sem o suporte de dados auxiliares, podem ser utilizados para a calibração de modelos úteis para estimativa de AGB e de outras variáveis florestais de interesse em fragmentos florestais secundários da Mata Atlântica, apoiando a implementação e monitoramento de projetos REDD+. Cabral et al. (2023) dizem que para garantir que o ecossistema esteja ecologicamente equilibrado, é necessário conhecer as características de cada tipo de ambiente, a fim de identificar estratégias para manter, preservar ou recuperar condições saudáveis.

Almeida et al. (2020) afirmam que a estimativa de biomassa acima do solo (AGB) desempenha um papel crucial no manejo florestal e na emissão de carbono, especialmente para os países em desenvolvimento que desejam abordar projetos do programa redução de emissões por desmatamento e degradação de florestas (REDD+).

Tanto as tecnologias passivas quanto ativas de sensoriamento remoto podem fornecer informações espacialmente explícitas de AGB usando um número limitado de amostras de campo, reduzindo assim o custo orçamentário substancial dos estoques de campo (MACAVE et al., 2022). Muitas das inovações recentes envolveram dados detectados remotamente relacionados às técnicas de estimativa estatística (MCROBERTS; TOMPPÖ, 2007).

O mercado de créditos de carbono tem se mostrado vantajoso, tanto para a proteção ambiental quanto para os interesses econômicos de acionistas (TANG; ZHANG, 2020), uma vez que para gerenciar a compra e a venda dos títulos é imprescindível identificar os níveis de carbono estocado numa floresta.

Essa estimativa é feita mediante estudos de monitoramento, em que, combinando modelos matemáticos, estatísticos, computacionais e dados por sensoriamento remoto, permitem as estimar biomassa e carbono. Verifica-se, então, que o monitoramento é uma etapa essencial para avaliar o sucesso da restauração, tanto no que se refere à avaliação dos métodos usados, como para inferir se a área em restauração está seguindo uma trajetória ecológica desejada (RODRIGES et al., 2013).

A biomassa florestal corresponde à quantidade, em massa, verde ou seca, do material vegetal vivo disponível (MARTINELLI et al., 1994). O IPCC (2006) classifica a biomassa florestal da seguinte maneira: biomassa acima do solo (composta pela copa e fuste do componente arbóreo/arbustivo); e, biomassa abaixo do solo, apresentando

compartimentos, como o solo, a serrapilheira e a necromassa. Guimarães (2020), em sua pesquisa, agrupa a biomassa nos seguintes compartimentos: regeneração natural, herbáceas, vegetação rasteira (árvores e arbustos), necromassa lenhosa (cascas e ramos com diâmetro > 2,5 cm) e serrapilheira (galhos com diâmetro < 2 cm e todo material morto como miscelânea de folhas, flores, frutos, sementes e biomassa de insetos).

Faz-se necessário compreender que, mais importante que agrupar os compartimentos, os estudos devem levar em conta o conjunto de compartimentos da biomassa florestal para fazer as devidas comparações de estoque de biomassa e carbono, evitando tendenciar as informações. Assim como realizado na pesquisa de José (2023), em que obteve valores médios do estoque de carbono dos diferentes compartimentos da biomassa florestal da Mata Atlântica: árvore, serrapilheira, necromassa e solo. Assim, pode identificar qual compartimento possui maiores reservas de biomassa. Nesta pesquisa, será considerada a biomassa acima do solo, considerando a copa e o fuste dos indivíduos arbóreos/ arbustivos.

Destaca-se que bons resultados estão sendo vistos com dados de SR 3D. Cabral (2022) demonstrou em sua pesquisa que o FAD-RAP é um método tecnicamente eficaz e economicamente acessível para a estimativa dos atributos florestais, em especial para a classificação do estágio sucessional da vegetação, sendo mais econômico que o LiDAR e o método de inventário tradicional (IFT).

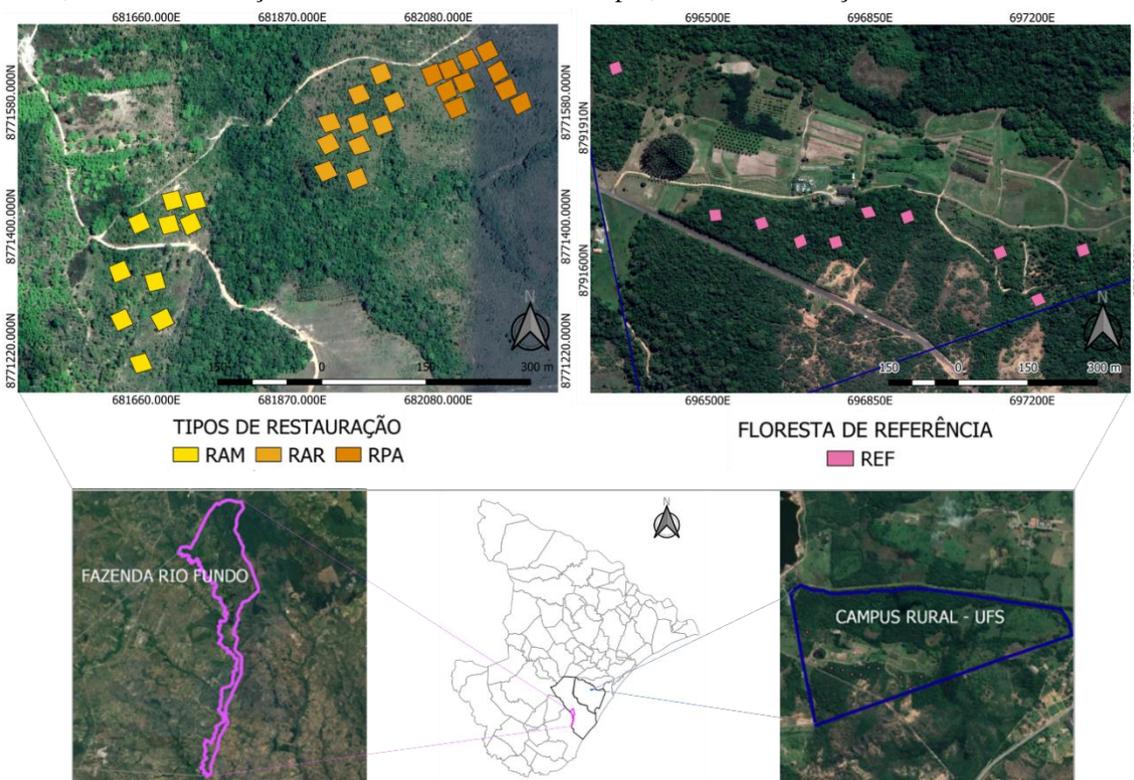
Neves (2021), encontrou valores próximos dos dados obtidos por FAD e IFT, e afirma que na ausência de dados de inventário, é possível utilizar dados orbitais multiespectrais derivados de FAD-RPA como referência para a calibração de modelos de estimativa de AGB.

4. METODOLOGIA

4.1. Área de estudo

O trabalho foi realizado em diferentes arranjos/sistemas de restauração, localizados na Fazenda Rio Fundo, em Itaporanga D'Ajuda e em cinco diferentes fragmentos de vegetação tropical secundária de Mata Atlântica, localizados no Campus Rural da Universidade Federal de Sergipe (UFS), no município de São Cristóvão (**Figura 1**).

Figura 1. Mapa de localização das parcelas alocadas na Fazenda Rio Fundo, Itaporanga d'Ajuda e no Campus Rural da Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil. RAM = Restauração Ativa; RAR = Restauração Ativa consorciada com eucalipto; RPA = Restauração Passiva.



Elaboração: Milena Viviane Vieira de Almeida, 2022. Fontes: Dados primários: coletas com RTK e Dados secundários: Atlas digital SRH, 2017. Datum: SIRGAS 2000, Zona 24S.

A Fazenda Rio Fundo está localizada nas coordenadas aproximadas de 11°06'30" latitude Sul e 37°19'60" e longitude Oeste. A área analisada, cerca de 38,63 ha, refere-se à área de compensação ambiental, decorrente do desmatamento, sem a devida licença, de vegetação nativa para plantio comercial de eucalipto. Os principais tipos de solo que ocorrem na bacia do Rio Fundo são: argissolos, gleissolos, espodosolos e latossolos. O relevo está representado, basicamente, pelos seguintes domínios morfológicos: tabuleiro costeiro, planície litorânea e relevos dissecados em colinas e

interflúvios tabulares, (FONTES, 2010), sendo a altitude média em torno de 38 m.

O Campus Rural da UFS está localizado na coordenada central aproximada de 10°55' de latitude Sul e 37°11' de longitude Oeste, sendo que essa área abriga floresta Atlântica e campos abertos destinados a estudos experimentais. O solo predominante é classificado como argissolo vermelho-amarelo (EMBRAPA, 1999) e o relevo é suave, com valores de altitude variando entre 14 e 57 m e declividade média de 6% (ALMEIDA et al., 2021).

A vegetação nativa de ambas as áreas, corresponde à floresta estacional semidecidual (Mata Atlântica), que apresenta temperatura média anual de aproximadamente 24,8°C, com baixa amplitude térmica (cerca de 3,4°C). O clima local é megatérmico subúmido úmido, apresentando bons índices pluviométricos no outono e inverno (julho e agosto) e meses mais secos (dezembro a fevereiro) no verão (FONTES, 2010).

4.2. Sistemas de restauração e área de referência

No estudo, foram considerados três sistemas de restauração: (i) ativa (RAM), (ii) ativa consorciada com espécies do gênero eucalyptus (RAR) e, (iii) passiva (RPA). Faça chamada da figura da distribuição das áreas...

No sistema RAM foi realizado o corte raso (retirada 100%) de eucalipto e o plantio de espécies arbóreas nativas, com espaçamento de 4 x 4. No arranjo RAR, foi realizada a exploração seletiva das espécies de eucalyptus (desbaste em torno de 50%) e plantio de espécies arbóreas nativas no espaçamento 4 x 4. Já no sistema RPA, foi realizada a exploração seletiva do eucalipto (desbaste em torno de 50%), mas não houve plantio de espécies arbóreas nativas.

Consta no Projeto de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD) que foram plantadas, dentre outras, as seguintes espécies nativas do bioma Mata Atlântica: ingá (*Inga uruguensis*), amescla (*Protium heptaphyllum*), embiruçu (*Pseudobombax grandiflorum*), embaúba (*Cecropia pachystachya*) e murici (*Byrsonima crassifolia*).

Os fragmentos (cinco) tropicais secundários do campus rural da UFS foram considerados como referência (REF). As principais espécies existentes são: louro (*Cordia trichotoma*), camboatá (*Cupania vernalis* Cambess), murici (*Byrsonima verbascifolia*), pau de leite (*Himatanthus obovatus*) e amescla (*Protium heptaphyllum*).

4.3. *Inventário florestal*

O inventário de campo foi realizado no período de dezembro de 2021 a junho de 2022, utilizando um processo de amostragem sistemática com parcelas de área fixa. Quarenta parcelas quadradas permanentes com dimensões aproximadas de 25 x 25 m (~ 0,062 ha) foram alocadas, sendo 30 nos arranjos de restauração e 10 na floresta de referência. Das 40 parcelas, 10 correspondem às áreas de restauração ativa em que foram colhidas as rebrotas de eucaliptos (RAM); 10 correspondem às áreas de restauração ativa em que as rebrotas de eucaliptos permaneceram (RAR); 10 correspondem às áreas de restauração passiva (RPA) e 10 são áreas compostas por remanescentes de Floresta Atlântica (REF). A localização dessas parcelas foi previamente planejada para cobrir toda a variação de biomassa existente nas áreas analisadas.

Os quatro vértices das parcelas da Fazenda Rio Fundo foram georreferenciados (UTM-24S, SIRGAS 2000) com um receptor GNSS Trimble RTK R6 (www.trimble.com), resultando em um erro horizontal médio (X e Y) de 0,02 m. Os quatro vértices das parcelas do Campus Rural foram georreferenciados (UTM-24S, SIRGAS 2000) com um receptor GNSS RTK modelo FOIF A60 (www.foif.com), resultando em um erro horizontal médio (X e Y) de 0,92 m. Nas parcelas de referência onde não foi possível usar o modo RTK, as coordenadas dos vértices foram coletadas com GNSS no modo diferencial pós-processado. O tempo de coleta das coordenadas de cada vértice no modo diferencial foi de cinco minutos.

A circunferência à altura do peito (CAP) do fuste (tronco) de cada árvore da parcela foi obtida com fita métrica na altura de 1,30 m acima do nível do solo. Nas parcelas, todos os indivíduos acima de 15 cm de CAP foram medidos. Os valores de altura total (H) das árvores foram coletados com vara graduada (telescópica) de 10 m. As árvores maiores que 10 m foram estimadas visualmente pelo operador previamente treinado (**Figura 2**).

Figura 2. Campanha de inventário de campo nas parcelas alocadas na Fazenda Rio Fundo, Itaporanga d’Ajuda e no Campus Rural da Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, Brasil.



Para a identificação das espécies foram feitas coletas botânicas, as quais posteriormente foram identificadas por meio de literatura, além do auxílio de um parobotânico. As espécies não identificadas em campo, foram identificadas por comparação no herbário da Universidade Federal de Sergipe.

4.4. Caracterização estrutural da vegetação

4.4.1. Composição florística

A composição florística corresponde ao estudo das espécies amostradas ou ocorrentes na área de estudo e pode ser analisada a partir de índices de diversidade, de espécies e de famílias botânicas levantadas na vegetação (SOUZA; SOARES, 2013). Neste estudo, foi utilizado o índice de similaridade de Jaccard (SJ), que consiste numa estatística usada para mensurar a similaridade e a diversidade de conjuntos de amostras, e calculado pela seguinte equação:

$$SJ_{ij} = \frac{c}{a + b - c} \quad (1)$$

Em que:

a = número de espécies ocorrentes na parcela/comunidade 1;

b = número de espécies ocorrentes na parcela/comunidade 2;

c = número de espécies comuns às duas parcelas ou comunidades.

4.4.2. Fitossociologia

A fitossociologia busca compreender a estrutura da floresta por meio do levantamento de dados e informações quali-quantitativos das formações florestais. Assim, para realizar a análise fitossociológica das áreas estudadas, foram estimados os parâmetros fitossociológicos absolutos e relativos de densidade, frequência, dominância e índice de valor de importância, de cada espécie florestal, categorizada por tratamento, além da estimativa do parâmetro volumétrico (área basal), utilizando o programa de planilhas eletrônicas Microsoft Excel 2016. Para estimar os parâmetros fitossociológicos foram utilizadas as seguintes fórmulas descritas por Mueller-Dombois; Ellenberg (1974):

FREQUÊNCIA:

$$FA_i = \left(\frac{u_i}{u_t} \right) \times 100 \quad (2)$$

$$FR_i = \left(\frac{FA_i}{\sum_{i=1}^P FA_i} \right) \times 100 \quad (3)$$

Sendo,

FA_i = frequência absoluta da i -ésima espécie da comunidade vegetal;

FR_i = frequência relativa da i -ésima espécie da comunidade vegetal;

u_i = número de unidades amostrais em que a i -ésima espécie ocorre;

u_t = número total de unidades amostrais;

P = número de espécies amostradas.

DENSIDADE:

$$DA_i = \left(\frac{n_i}{A} \right) \quad (4)$$

$$DR_i = \left(\frac{DA_i}{DT} \right) \times 100 \quad (5)$$

Sendo,

DA_i = densidade absoluta da i -ésima espécie da comunidade vegetal (em m²/hectare);

DR_i = densidade relativa da i -ésima espécie da comunidade vegetal;

n_i = número de indivíduos da i -ésima espécie na amostragem;

n_t = número total de indivíduos amostrados;

A = área total amostrada, em hectare.

DOMINÂNCIA:

$$DoA_i = \left(\frac{AB_i}{A} \right) \quad (6)$$

$$DoR_i = \left(\frac{DoA_i}{DoT} \right) \times 100 \quad (7)$$

Sendo,

DoA_i = dominância absoluta da i -ésima espécie da comunidade vegetal (em número de indivíduos/ha);

DoR_i = dominância relativa da i -ésima espécie da comunidade vegetal, em porcentagem;

AB_i = área basal da i -ésima espécie da comunidade vegetal, em m², na área amostrada;

A = área amostrada, em hectare.

VALOR DE IMPORTÂNCIA:

$$V_i = FR_i + DR_i + DoR_i \quad (8)$$

$$V_i (\%) = \frac{FR_i + DR_i + DoR_i}{3} \quad \text{ou} \quad V_i (\%) = \frac{V_i}{3} \quad (9)$$

4.5. Estimativa de biomassa acima do solo

O valor de biomassa acima do solo (M) de cada árvore viva ($M_{\text{árvore}}$, kg) foi estimado usando a equação alométrica geral para floresta tropical (Equação 8),

desenvolvida por Chave et al. (2005) com base nas medições de circunferência à altura do peito (CAP), altura total (H) e densidade da madeira (ρ). A densidade da madeira (ρ), em nível de espécie ou de família, foi tabelada conforme os valores experimentais obtidos por Chave et al. (2006). Para espécies com densidade de madeira que não foram registradas/identificadas, foi calculada a média por parcela. Para a altura (H) foi considerada a altura total dos indivíduos arbóreos, a qual refere-se à distância da base do fuste até o topo da copa. A CAP (1,30 m) das árvores foi medida, dentro da classe de circunferência (≥ 15 cm), conforme especificado no protocolo de monitoramento da Mata Atlântica (RODRIGUES, 2013). Para o cálculo, a CAP foi transformada em diâmetro (DAP) e, só então, gerados os valores de biomassa/árvore:

$$M_{\text{árvore}} = \exp [- 2,997 + \log (\rho DAP^2 H)] \quad (10)$$

Onde:

$M_{\text{árvore}}$ = biomassa seca acima do solo da árvore (kg);

ρ = densidade da madeira (g cm^{-3});

CAP = circunferência à altura do peito (cm);

DAP = diâmetro à altura do peito (cm);

H = altura total da árvore (m).

Ao final, a biomassa de cada árvore da parcela foi agregada e o valor dividido pela respectiva área da parcela, resultando na biomassa total da parcela por hectare (Mg ha^{-1}).

4.6. Fotogrametria Aérea Digital (FAD)

4.6.1. Aquisição das fotografias aéreas

As fotografias aéreas de alta resolução espacial ($\sim 0,04$ m) foram adquiridas, para todas as áreas de estudo, por um sensor CMOS 1" (20 megapixels) acoplado a uma plataforma multirotor DJI Phantom 4 PRO (SZ DJI Technology Co., Ltd., Shenzhen, China) (**Figura 3A**). As imagens multiespectrais RGB foram coletadas durante o

inventário florestal, em boas condições, com tempo ensolarado e velocidade do vento inferior a 10 m s^{-1} . A altitude do voo foi definida para 120 metros acima do nível do solo e sobreposição frontal de 75% e lateral de 70%. Foram realizados dois voos, um em cada área de estudo, dia 13 de junho de 2022 no Campus Rural da UFS e dia 14 de junho de 2022 na fazenda Rio Fundo. Ao todo, foram registradas 252 imagens (no formato .jpg) para a área do Campus Rural e 170 para a Fazenda Rio Fundo.

4.6.2. Processamento fotogramétrico

O processamento das imagens foi realizado separadamente, de acordo com cada área de estudo. As etapas a seguir foram realizadas isoladamente, considerando o total de fotos registradas para cada área de estudo.

As imagens adquiridas pela câmera a bordo da RPA foram processadas no software *Agisoft Metashape Professional Edition 1.1.0* (AGISOFT, 2023) conforme descrito no trabalho de Almeida et al. (2020). Esse software de fotogrametria utiliza um conjunto de algoritmos de visão computacional Structure from Motion (SfM) e algoritmos de correspondência estéreo fotogramétrica para reconstrução 3D de imagens sobrepostas (IGLHAUT et al., 2019).

Durante o processo de alinhamento das fotos, 20 pontos de controle do terreno foram utilizados e 10 pontos de checagem (**Figura 3**) para a área da Fazenda Rio Fundo. Já na área do Campus Rural, foram utilizados 10 pontos de controle do terreno e cinco de checagem. Os pontos foram materializados em campo com o auxílio de “gabaritos” de plástico na cor vermelha, com 0,40 m de diâmetro (**Figura 3B**). Os pontos foram distribuídos aleatoriamente no interior de cada área de estudo, considerando os dois polígonos de voo planejados previamente. Todos os 45 pontos foram coletados com o receptor GNSS Trimble RTK R6 (www.trimble.com) (**Figura 3C**), resultando em um erro horizontal médio (X e Y) de 0,01 m, considerando ambas áreas de estudo. Vale destacar que todos os pontos foram materializados em áreas desprovidas de vegetação (estradas, aceiros e solos agrícolas em preparo), permitindo, assim, a visualização dos mesmos durante o processo de alinhamento (**Figura 3B**). No final do processamento, os valores da RMSE dos pontos de checagem foram de 0,04 (horizontal) e 0,11 (vertical) metro, 0,08 (horizontal) e 0,25 (vertical) metros nas áreas da Fazenda Rio Fundo e no Campus Rural da UFS.

Figura 3. Equipamentos utilizados para a obtenção dos dados de sensoriamento remoto via RPA: (A) drone multi-rotor; (B) receptor móvel para coleta de coordenadas em tempo real; (C) estação rover, a qual consiste numa base fixa que recebe e armazena as informações transmitidas pelo receptor móvel.



O alinhamento da imagem foi realizado com acurácia alta (*accuracy high*), com seleção de par de referência, o número de pontos principais (key points) iguais a 40.000,00 e pontos de amarração (tie points) iguais a 4.000,00. Para a construção de nuvens densa de pontos foram definidos qualidade média (*quality médium*) e modo de filtragem suave (*filtering mode mild*).

Os Modelos Digitais do Terreno (MDTs) foram criados a partir da nuvem de pontos 3D, aplicando o algoritmo *Adaptive Triangulated Irregular Network* (TIN) desenvolvido por Axelsson (2019), implementado no *Agisoft Metashape*. Nesta etapa, os pontos representativos do terreno da nuvem de pontos 3D são classificados e posteriormente interpolados. Ao final do processo, a nuvem de pontos 3D FAD foi exportada no formato de arquivo (“.las”) e o MDT no formato raster (“.tif”) com resolução espacial de 0,50 m.

4.4.1 Métricas FAD-RPA derivadas da nuvem de pontos

Métricas tradicionais de altura e métricas que representam a cobertura do dossel foram estimadas a partir da nuvem de pontos normalizada 3D FAD-RAP para descrever a estrutura de cada parcela (**Figura 4**). O valor de corte de altura de 1,5 m foi utilizado como limite para separar os pontos que representam o solo e a vegetação do sub-bosque daqueles associados às árvores de interesse ($DAP \geq 5$ cm). As métricas de altura do dossel incluíram estatísticas básicas de distribuição (média, modo, variância, máximo, percentis, etc) pontos acima de um limite de altura especificado para o número total de pontos.

Todas as métricas foram extraídas no software *FUSION/LDV 4.40* (MCGAUGHEY, 2018) e estão descritas em **Tabela 1**.

Figura 4 - Exemplo de métricas tradicionais baseadas na altura das nuvens de pontos 3D obtidas por fotogrametria aérea digital (FAD) com imagens coletadas com aeronave remotamente pilotada (RPA).



Tabela 1. Métricas tradicionais extraídas de valores normalizados de alturas derivadas de fotogrametria aérea digital (FAD).

Tipo de métrica	Nome	Descrição
i) Altura	$H_{\text{mín}}$	Altura mínima
	$H_{\text{máx}}$	Altura máxima
	H_{med}	Altura média
	H_{mod}	Altura da moda
	H_{CV}	Coefficiente de variação
	H_{SD}	Desvio padrão
	H_V	Variância
	H_{Que}	Distância interquartil
	H_{skew}	Assimetria
	H_{curt}	Curtose
	$(H_{01}, H_{05}, H_{10}, H_{20}, H_{25}, H_{30}, H_{40}, H_{50}, H_{60}, H_{70}, H_{75}, H_{80}, H_{90}, H_{95}, H_{99})$	Valores percentuais (1°, 5°, 10°, 20°, 25°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 75°, 80°, 90°, 95°, 99°)
	$H_{SQRT\text{média } SQ}$	Média generalizada para a 2ª potência
	$H_{CURT\text{média } cubo}$	Média generalizada para a 3ª potência

	HAAD	Desvio absoluto médio
	$HMAD_{mediana}$	Mediana dos desvios absolutos em relação à mediana geral
	$HMAD_{mod}$	Moda dos desvios absolutos do modo geral
	L_{H1}, H_{L2}, H_{L3} e H_{L4}	Momentos lineares
	HL_{skew}	Assimetria do momento L
	HL_{curt}	Curtose em L-momento
	CRR	Canopy Relief Ratio ($H_{média} - H_{mín}$) / ($H_{máx} - H_{mín}$)
ii) Cobertura do dossel	CCH	número de pontos acima de 3,0 m
	$CCH_{média}$	número de pontos acima da altura média
	CCH_{mod}	número de pontos acima da altura da moda
	$CC\%3_{metros}$	número de pontos acima de 3,0 m/total # de pontos $\times 100$
	$CC\%H_{média}$	número de pontos acima da altura média/total # de pontos $\times 100$
	$CC\%H_{mod}$	número de pontos acima da altura da moda/total # de pontos $\times 100$

4.6.3. Avaliação da fotogrametria aérea digital

A acurácia dos MDTs gerados foi avaliada de duas formas. Primeiro, pela comparação direta dos valores de elevação extraídos dos DTMs obtidos por FAD-RPA com os valores de elevação estimados em campo com receptor GNSS Trimble RTK R6 (www.trimble.com). Nesta etapa, foram utilizados os valores de elevação de alguns vértices de cada uma das parcelas de inventário, totalizando 50 pontos na fazenda Rio Fundo e 25 pontos no Campus Rural da UFS. Em segundo lugar, foram comparados os valores de altura dominante das árvores (H_{dom}) de cada parcela com os valores do percentil 99 extraídos das nuvens de pontos 3D FAD-RPA normalizadas para cada parcela. Após recorte das nuvens de pontos para cada parcela de inventário, as mesmas

foram normalizadas a partir da subtração do MDT, ou seja, os valores de elevação foram transformados em altura. A H_{dom} foi estimada pela média das 25 árvores mais altas da parcela, exceto nas parcelas 23 e 29 da restauração passiva (RPA), as quais tinham um número pequeno de árvores, sendo a H_{dom} estimada pela média das 10 maiores árvores.

A avaliação da acurácia foi verificada por meio do erro sistemático, estimando o Viés (Equações 1 e 2) e do erro total, estimado pelo RMSE (Equações 3 e 4), todos em valores absolutos e porcentagem. Toda análise foi realizada na linguagem de programação R Core Team (2021).

$$\text{Viés(absoluto)} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_{obs} - \sum_{i=1}^n Y_{est}}{n} \quad (11)$$

$$\text{Viés (\%)} = \frac{\text{Viés(abs)}}{Y_{med}} * 100 \quad (12)$$

$$\text{RMSE (absoluto)} = \sqrt{\frac{(\sum_{i=1}^n Y_{obs} - \sum_{i=1}^n Y_{est})^2}{n}} \quad (13)$$

$$\text{RMSE(\%)} = \frac{\text{RMSE (abs)}}{Y_{med}} * 100 \quad (14)$$

Em que:

Y_{obs} = variável observada;

Y_{est} = variável estimada;

Y_{med} = valor médio da variável observada;

n = número de amostras.

4.7. Caracterização da estrutura vertical e da cobertura florestal por FAD-RPA

A caracterização da estrutura vertical e da cobertura florestal foi realizada a partir da estatística multivariada, mediante a análise de componentes principais (PCA) (VICINI, 2005). Foram consideradas as métricas da **Tabela 1**, exceto as métricas de altura relacionadas aos percentis, as médias generalizadas, desvios absolutos e momentos

lineares. A eliminação dessas métricas ocorreu por dois principais motivos: (i) a alta correlação entre elas, como por exemplo nos percentis, e, conseqüentemente, (ii) facilitar a interpretação e discussão dos resultados.

Inicialmente, as métricas foram normalizadas, a matriz de covariância estimada e os autovetores da matriz estimados. Em seguida, a dimensionalidade dos dados foi reduzida, concentrando as informações mais significativas nas duas primeiras componentes (C1 e C2) estimadas. Na sequência, foram determinadas as variáveis com maior influência na formação de cada componente. Toda análise PCA ocorreu na plataforma R utilizando o pacote *FactoMineR* (LÊ; JOSSE; HUSSON, 2008). Os gráficos *biplot* foram gerados com o pacote *factoextra* (KASSAMBARA; MUNDT, 2020).

4.7.1. Ajuste e validação do modelo de biomassa

Modelos de regressão múltipla foram utilizados (mínimos quadrados ordinários) para estimar a biomassa, tendo como variáveis explicativas as métricas tradicionais derivadas das alturas da nuvem de pontos FAD-RPA. Foi utilizada a linguagem de programação R Core Team (2021) e o pacote *leaps* (MILLER TLBOFCBA, 2020) nesta fase da pesquisa.

Todas as combinações de variáveis foram testadas usando log, raiz quadrada e dados não transformados para a biomassa. Inicialmente, selecionamos o número de variáveis do modelo, definido pelo menor valor de critério de informação do critério de informação bayesiana (BIC) e no coeficiente de determinação (R^2).

Em seguida, a partir dos cinco melhores modelos candidatos, selecionamos o que não apresentou multicolinearidade entre as variáveis preditoras e o menor erro quadrático médio (RMSE) de ajuste e validação cruzada ($RMSE_{VC}$). A validação cruzada foi usada para avaliar a capacidade preditiva dos modelos selecionados, usando 1.000 divisões aleatórias do conjunto de dados em dados de treinamento (80%) e validação (20%).

A multicolinearidade foi analisada pelo fator de inflação de variância (VIF), desconsiderando modelos com valores de VIF das preditoras com valores maiores que 10. A validação cruzada foi realizada de forma independente, com 1000 repetições em 20% da amostra.

Finalmente, o modelo foi analisado, considerando os gráficos de diagnóstico do modelo, a interpretação dos coeficientes e dos testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e a

homocedasticidade (Bartlett) dos resíduos. Importante destacar que, no momento do ajuste do modelo, consideramos as diferentes fontes de incerteza na estimativa da biomassa de referência (campo) de cada parcela, conforme descrito na seção 4.5.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. *Composição florística e fitossociológica*

Foram inventariados 1.797 indivíduos arbóreos, distribuídos em 59 espécies, e 26 famílias, em uma área total amostrada de 25.000 m² (2,5 ha), sendo o maior número de indivíduos/parcela encontrados na área de REF (NI = 99) e o menor na RPA (NI = 12) (**Tabela 2**). Na **Figura 5**, pode-se observar a distribuição das parcelas inventariadas, de acordo com seu sistema de restauração e a área de referência (REF). Ao nível de parcela, os valores de altura total média dos indivíduos variou entre 6,52 e 11,5 m, na parcela 24 (sistema RPA#3) e na parcela 36 (REF#5). Apesar de apresentar um valor mais elevado, as alturas das árvores da floresta de referência podem ser consideradas baixas (< 11,5 m), quando comparados com outras áreas de referência da mesma fitofisionomia. Os maiores valores médios de DAP por parcela também foram observados nas florestas de referência, resultado semelhante ao observado em outros estudos. Os maiores valores de AB também foram observados nas parcelas de referência, com exceção da parcela 19 (RAR#8), cujo valor de AB foi 16,12 (m².ha⁻¹). Esse elevado valor, pode estar associado com as características topográficas da parcela, estando localizada em uma região de baixada, próximo ao leito de um curso d'água superficial (**Figura 5**).

Tabela 2. Resumo das informações dendrométricas das parcelas inventariadas, sendo 30 localizadas na Fazenda Rio Fundo e 10 no Campus Rural da UFS.

Parcela	Código	NI	DAP (cm)	H (m)	AB (m ² .ha ⁻¹)
1	RAM#0	56	9,64	6,61	9,90
2	RAM#1	31	7,20	6,86	6,77
3	RAM#2	18	9,70	5,8	4,72
4	RAM#3	36	7,94	6,38	5,43
5	RAM#4	20	8,23	4,79	2,84
6	RAM#5	35	7,79	5,12	4,05
7	RAM#6	26	6,65	4,65	2,02
8	RAM#7	37	7,28	6,05	3,67

9	RAM#8	25	7,38	5,25	3,23
10	RAM#9	29	7,95	6,34	3,72
11	RAR#0	81	7,70	8,03	8,33
12	RAR#1	32	7,45	6,12	3,87
13	RAR#2	37	6,95	6,04	3,21
14	RAR#3	53	7,46	6,63	5,73
15	RAR#4	43	7,00	5,55	3,45
16	RAR#5	60	7,86	7,23	7,18
17	RAR#6	33	7,88	7,31	4,71
18	RAR#7	43	7,77	6,42	7,36
19	RAR#8	63	8,84	10,62	16,12
20	RPA#9	47	7,38	7,49	6,01
21	RPA#0	24	8,06	6,78	2,92
22	RPA#1	45	8,27	6,84	4,93
23	RPA#2	17	6,34	5,15	1,22
24	RPA# 3	27	6,52	6,09	1,77
25	RPA#4	48	6,55	6,43	3,18
26	RPA#5	28	8,11	8,99	3,12
27	RPA#6	39	6,75	5,11	2,79
28	RPA#7	20	7,59	6,83	2,64
29	RPA#8	12	10,34	8,88	2,66
30	RPA#9	27	6,96	7,47	3,26
31	REF#0	58	7,31	6,68	7,00
32	REF#1	44	7,14	5,2	4,73
33	REF#2	82	10,19	10,63	17,20
34	REF#3	91	9,43	7,95	16,82
35	REF#4	68	11,08	10,03	18,26
36	REF#5	66	11,5	9,15	18,27
37	REF#6	99	10,23	8,1	17,69
38	REF#7	47	6,91	5,65	3,75
39	REF#8	85	7,90	7,91	8,84
40	REF#9	65	10,29	8,5	13,01

NI = Número total de indivíduos amostrados/parcela; DAP = Diâmetro à altura do peito; H = altura; AB = Área Basal; RAM = Restauração ativa com monitoramento; RAR = Restauração ativa sem monitoramento; RPA = Restauração Passiva; REF = Floresta de referência.

Figura 5 - Localização das parcelas e dos diferentes sistemas de restauração da Fazenda Rio Fundo (Esquerda) e de referência do Campus Rural da UFS (Direita) analisados no estudo. RAM = Restauração ativa com monitoramento; RAR = Restauração ativa sem monitoramento; RPA = Restauração Passiva; REF = Floresta de Referência.



Nas **Tabelas 3, 4 e 5** observa-se que a espécie sambaíba (*Curatella americana* L.) aparece em todas as áreas em restauração com um número elevado de indivíduos. Já na área da floresta secundária (REF), observa-se que sua presença não é comum, o que demonstra que as áreas restauradas ainda não apresentam características similares à floresta secundária, uma vez que se observa a predominância de espécies pioneiras, como a sambaíba. Ademais, verificou-se também a predominância da espécie exótica (eucalipto), classificada do grupo ecológico das pioneiras, justificada pelos maiores índices de valores de importância, como observado na área RPA (**Tabela 5**): sambaíba (28,81%) e eucalipto (48,86%).

Tabela 3. Composição florística e parâmetros fitossociológicos das espécies amostradas em área de restauração ativa (RAM) no município de Itaporanga D'Ajuda, Sergipe, Brasil, 2022.

Nome científico	Nome vulgar	GE	NI	NP	DA	FA	AB	DoA	DR	DoR	FR	IVI	IVI(%)
<i>Anadenanthera colubrina</i>	angico-branco	SI	20	5	32,29	50,0	0,1624	0,26	6,39	5,62	5,00	17,01	5,67
<i>Centrorobium robustum</i>	araribá	ST	14	1	22,60	10,0	0,1857	0,30	4,47	6,43	1,00	11,90	3,97
<i>Eritroxylum deciduum</i>	arco-de-pipa	SI	2	2	3,23	20,0	0,0056	0,01	0,64	0,19	2,00	2,83	0,94
<i>Swartzia apetala</i> Raddi	arruda-vermelha	ST	8	2	12,91	20,0	0,0617	0,10	2,56	2,14	2,00	6,69	2,23
<i>Bambusa vulgaris</i>	bambu	P	19	4	30,67	40,0	0,1798	0,29	6,07	6,22	4,00	16,29	5,43
<i>Philodendron bipinnatifidum</i>	banana-do-mato	P	2	2	3,23	20,0	0,0049	0,01	0,64	0,17	2,00	2,81	0,94
<i>Strypnodendron pulcherrinum</i>	barbatimão	P	6	3	9,69	30,0	0,0425	0,07	1,92	1,47	3,00	6,39	2,13
<i>Eschweilera ovata</i>	biriba-branca	CL	5	1	8,07	10,0	0,0534	0,09	1,60	1,85	1,00	4,45	1,48
<i>Cupania vernalis</i> Cambess	camboatá	CL	11	6	17,76	60,0	0,0286	0,05	3,51	0,99	6,00	10,50	3,50
<i>Cupania oblongifolia</i>	camboatá-folha-larga	SI	2	2	3,23	20,0	0,0048	0,01	0,64	0,16	2,00	2,80	0,93
<i>Cecropia pachystachya</i> Trécul	embaúba	P	17	6	27,44	60,0	0,2988	0,48	5,43	10,35	6,00	21,78	7,26
<i>Eriotheca pubescens</i>	embiruçu	SI	5	3	8,07	30,0	0,0257	0,04	1,60	0,89	3,00	5,49	1,83
<i>Eucalyptus urophylla</i>	eucalipto	P	10	8	16,14	80,0	0,3128	0,50	3,19	10,83	8,00	22,03	7,34
<i>Psidium guajava</i>	goiaba	P	1	1	1,61	10,0	0,0024	0,00	0,32	0,08	1,00	1,40	0,47
<i>Inga laurina</i>	ingá-caixão	P	2	1	3,23	10,0	0,0295	0,05	0,64	1,02	1,00	2,66	0,89
<i>Inga marginata</i>	ingá-mirim	P	1	1	1,61	10,0	0,0062	0,01	0,32	0,22	1,00	1,54	0,51
<i>Inga vera</i>	ingá-verdadeiro	SI	1	1	1,61	10,0	0,0019	0,00	0,32	0,07	1,00	1,39	0,46
<i>Miconia cinnamomifolia</i>	jacatirão	P	3	2	4,84	20,0	0,0178	0,03	0,96	0,62	2,00	3,57	1,19
<i>Guapira opposita</i>	joão-mole	SI	1	1	1,61	10,0	0,0024	0,00	0,32	0,08	1,00	1,40	0,47
<i>Didymopanax morototoni</i>	morototó	P	1	1	1,61	10,0	0,0026	0,00	0,32	0,09	1,00	1,41	0,47
<i>Erythrina velutina</i>	mulungu	P	2	1	3,23	10,0	0,0161	0,03	0,64	0,56	1,00	2,20	0,73
<i>Byrsonima sericea</i>	murici	SI	11	5	17,76	50,0	0,1615	0,26	3,51	5,59	5,00	14,11	4,70
<i>Myrcia selloi</i> (Spreng).N.Silveira	murta-do-campo	ST	2	2	3,23	20,0	0,0090	0,01	0,64	0,31	2,00	2,95	0,98
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	mutambo	P	13	4	20,99	40,0	0,1098	0,18	4,15	3,80	4,00	11,95	3,98
<i>Tapirira guianensis</i>	pau pombo	P	9	4	14,53	40,0	0,0857	0,14	2,88	2,97	4,00	9,84	3,28
<i>Vismia brasiliensis</i>	pau-de-lacre	P	1	1	1,61	10,0	0,0043	0,01	0,32	0,15	1,00	1,47	0,49
<i>Himatanthus bracteatus</i>	pau-de-leite	SI	11	1	17,76	10,0	0,0339	0,05	3,51	1,17	1,00	5,69	1,90
<i>Apeiba tibourbou</i> Aubl.	pente-de-macaco	P	12	2	19,37	20,0	0,0947	0,15	3,83	3,28	2,00	9,11	3,04
<i>Tibouchina granulosa</i>	quaresmeira	P	2	1	3,23	10,0	0,0058	0,01	0,64	0,20	1,00	1,84	0,61
<i>Mimosa caesalpinifolia</i> Benth.	sabiá	P	7	2	11,30	20,0	0,0332	0,05	2,24	1,15	2,00	5,39	1,80
<i>Sapindus saponaria</i>	sabonete-de-macaco	P	16	4	25,83	40,0	0,1408	0,23	5,11	4,87	4,00	13,99	4,66
<i>Curatella americana</i> L.	sambaíba	P	75	10	121,07	100,0	0,5482	0,88	23,96	18,98	10,00	52,94	17,65
<i>Samanea tubulosa</i> Benth.	sete-cascas	P	4	1	6,46	10,0	0,0513	0,08	1,28	1,78	1,00	4,05	1,35
<i>Pterodum emarginatus</i>	sucupira	ST	7	5	11,30	50,0	0,1056	0,17	2,24	3,66	5,00	10,89	3,63
<i>Aegiphila klotzchiana</i> Cham.	tamanqueiro	P	10	4	16,14	40,0	0,0593	0,10	3,19	2,05	4,00	9,25	3,08
TOTAL			313	10	505	1000	2,89	4,66	100	100	100	300	100

GE = Grupo Ecológico, sendo Pioneira (P), Secundária Inicial (SI), Secundária Tardia (ST) e Clímax (CL); NI = Número total de indivíduos amostrados; NI* = Não Identificado; NP = Número de indivíduos amostrados na parcela; DA = Densidade Absoluta; DR = Densidade Relativa; DoA = Dominância Absoluta; DoR = Dominância Relativa; FA = Frequência Absoluta; FR = Frequência Relativa; IVI = Índice de Valor de Importância; IVI (%) = Índice de Valor de Importância percentual.

Na RAM foram inventariadas 35 espécies, na RAR, 22 espécies e na RPA, 11 espécies. A REF que é a área de referência, ou seja, o ideal é que as restaurações ecológicas alcancem a estrutura e diversidade de espécies de REF, que apresenta 29 espécies, sendo a RAM a única restauração que atingiu um número de espécies similar à REF (Tabelas 3, 4, 5 e 6).

Tabela 4. Composição florística e parâmetros fitossociológicos das espécies amostradas das espécies amostradas em área de restauração ativa (RAR) no município de Itaporanga D'Ajuda, Sergipe, Brasil, 2022.

Nome científico	Nome vulgar	GE	NI	NP	DA	FA	AB	DoA	DR	DoR	FR	IVI	IVI(%)
<i>Andira legalis</i>	andira	SI	1	1	1,63	10,0	0,0018	0,00	0,20	0,05	1,33	1,58	0,53
<i>Andira nitida</i> Mart. ex Benth.	angelim-amargoso	SI	1	1	1,63	10,0	0,0065	0,01	0,20	0,16	1,33	1,70	0,57
<i>Anadenanthera colubrina</i>	angico-branco	SI	6	4	9,76	40,0	0,0544	0,09	1,22	1,34	5,33	7,90	2,63
<i>Centrorobium robustum</i>	araribá	ST	1	1	1,63	10,0	0,0033	0,01	0,20	0,08	1,33	1,62	0,54
<i>Annona crassiflora</i>	araticum	P	23	7	37,42	70,0	0,0696	0,11	4,68	1,72	9,33	15,74	5,25
<i>Swartzia apetala</i> Raddi	arruda-vermelha	ST	5	5	8,14	50,0	0,0105	0,02	1,02	0,26	6,67	7,94	2,65
<i>Cupania vernalis</i> Cambess	camboatá	CL	6	3	9,76	30,0	0,0189	0,03	1,22	0,47	4,00	5,69	1,90
<i>Cecropia pachystachya</i> Trécul	embaúba	P	1	1	1,63	10,0	0,0164	0,03	0,20	0,41	1,33	1,94	0,65
<i>Eriotheca pubescens</i>	embirucu	SI	14	6	22,78	60,0	0,0677	0,11	2,85	1,67	8,00	12,52	4,17
<i>Eucalyptus urophylla</i>	eucalipto	P	253	10	411,66	100,0	2,9758	4,84	51,53	73,52	13,33	138,38	46,13
<i>Coccoloba mollis</i> Casar.	folha-de-lobo	SI	1	1	1,63	10,0	0,0027	0,00	0,20	0,07	1,33	1,60	0,53
<i>Inga edulis</i>	ingá-de-metro	CL	1	1	1,63	10,0	0,0044	0,01	0,20	0,11	1,33	1,64	0,55
<i>Tabebuia insignis</i>	ipê-branco	P	2	2	3,25	20,0	0,0091	0,01	0,41	0,22	2,67	3,30	1,10
<i>Swartzia macrostachya</i> Benth.	jacarandá-branco	CL	2	1	3,25	10,0	0,0081	0,01	0,41	0,20	1,33	1,94	0,65
<i>Byrsonima sericea</i>	murici	SI	80	10	130,17	100,0	0,2837	0,46	16,29	7,01	13,33	36,64	12,21
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	mutambo	P	2	2	3,25	20,0	0,0261	0,04	0,41	0,64	2,67	3,72	1,24
<i>Tapirira guianensis</i>	pau pombo	P	10	2	16,27	20,0	0,0588	0,10	2,04	1,45	2,67	6,15	2,05
<i>Himatanthus bracteatus</i>	pau-de-leite	SI	3	3	4,88	30,0	0,0084	0,01	0,61	0,21	4,00	4,82	1,61
<i>Mimosa caesalpinifolia</i> Benth.	sabiá	P	7	1	11,39	10,0	0,0870	0,14	1,43	2,15	1,33	4,91	1,64
<i>Sapindus saponaria</i>	sabonete-de-macaco	P	1	1	1,63	10,0	0,0023	0,00	0,20	0,06	1,33	1,59	0,53
<i>Curatella americana</i> L.	sambaíba	P	67	10	109,02	100,0	0,3227	0,53	13,65	7,97	13,33	34,95	11,65
<i>Aegiphila klotzchiana</i> Cham.	tamanqueiro	P	4	2	6,51	20,0	0,0096	0,02	0,81	0,24	2,67	3,72	1,24
TOTAL			491	10	799	750	4,05	6,59	100	100	100	300	100

GE = Grupo Ecológico, sendo Pioneira (P), Secundária Inicial (SI), Secundária Tardia (ST) e Clímax (CL); NI = Número total de indivíduos amostrados; NI* = Não Identificado; NP = Número de indivíduos amostrados na parcela; DA = Densidade Absoluta; DR = Densidade Relativa; DoA = Dominância Absoluta; DoR = Dominância Relativa; FA = Frequência Absoluta; FR = Frequência Relativa; IVI = Índice de Valor de Importância; IVI (%) = Índice de Valor de Importância percentual.

Em uma restauração de pastagem degradada com cinco anos na Mata Atlântica, Silva et al. (2021) observaram 39 espécies. Em uma restauração ecológica com 40 anos de implantada na Mata Atlântica estacional semidecidual, Miranda Neto et al. (2012) observaram 112 espécies. Em uma restauração ecológica com 11 anos localizado na mesma tipologia florestal e região do presente estudo, Meira et al. (2020) observaram 22 espécies florestais, resultado similar a RAR, porém inferior à RAM (Tabelas 3 e 4).

Tabela 5. Composição florística e parâmetros fitossociológicos das espécies amostradas das espécies amostradas em área de restauração passiva (RPA) no município de Itaporanga D’Ajuda, Sergipe, Brasil, 2022.

Nome científico	Nome vulgar	GE	NI	NP	DA	FA	AB	DoA	DR	DoR	FR	IVI	IVI(%)
<i>Andira nitida</i> Mart. ex Benth.	angelim-amargoso	SI	1	1	1,60	10,0	0,0036	0,01	0,35	0,20	2,56	3,12	1,04
<i>Eritroxylum deciduum</i>	arco-de-pipa	SI	1	1	1,60	10,0	0,0020	0,00	0,35	0,11	2,56	3,03	1,01
<i>Swartzia apetala</i> Raddi	arruda-vermelha	ST	1	1	1,60	10,0	0,0022	0,00	0,35	0,12	2,56	3,03	1,01
<i>Cecropia pachystachya</i> Trécul	embaúba	P	4	2	6,39	20,0	0,0124	0,02	1,39	0,70	5,13	7,22	2,41
<i>Eriotheca pubescens</i>	embiruçu	SI	8	6	12,78	60,0	0,0290	0,05	2,79	1,63	15,38	19,80	6,60
<i>Eucalyptus urophylla</i>	eucalipto	P	154	10	246,11	100,0	1,1990	1,92	53,66	67,29	25,64	146,59	48,86
<i>Byrsonima sericea</i>	murici	SI	9	4	14,38	40,0	0,0319	0,05	3,14	1,79	10,26	15,18	5,06
<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	mutambo	P	5	2	7,99	20,0	0,0310	0,05	1,74	1,74	5,13	8,61	2,87
<i>Mimosa caesalpinifolia</i> Benth.	sabiá	P	2	1	3,20	10,0	0,0129	0,02	0,70	0,72	2,56	3,98	1,33
<i>Curatella americana</i> L.	sambaíba	P	101	10	161,41	100,0	0,4561	0,73	35,19	25,59	25,64	86,43	28,81
<i>Samanea tubulosa</i> Benth.	sete-casas	P	1	1	1,60	10,0	0,0018	0,00	0,35	0,10	2,56	3,01	1,00
TOTAL			287	10	459	390	1,78	2,85	100	100	100	300	100

GE = Grupo Ecológico, sendo Pioneira (P), Secundária Inicial (SI), Secundária Tardia (ST) e Clímax (CL); NI = Número total de indivíduos amostrados; NI* = Não Identificado; NP = Número de indivíduos amostrados na parcela; DA = Densidade Absoluta; DR = Densidade Relativa; DoA = Dominância Absoluta; DoR = Dominância Relativa; FA = Frequência Absoluta; FR = Frequência Relativa; IVI = Índice de Valor de Importância; IVI (%) = Índice de Valor de Importância percentual.

Observa-se que na REF, Floresta nativa de referência (**Tabela 6**), apresenta características entre o início e um estágio médio da sucessão, devido a maior dominância de espécies secundárias iniciais, a exemplo do louro (*Cordia trichotoma*) apresentando DoR = 13,696 e IVI = 10%, e a presença de espécies secundárias e clímax, em menor proporção, como o camboatá com IVI = 4,61, murici com IVI = 7,85, pindaíba com IVI = 3,73 e sucupira com IVI = 5,16.

Tabela 6. Composição florística e parâmetros fitossociológicos das espécies amostradas das espécies amostradas em área de floresta secundária inicial (REF) no município de São Cristóvão, Sergipe, Brasil, 2022.

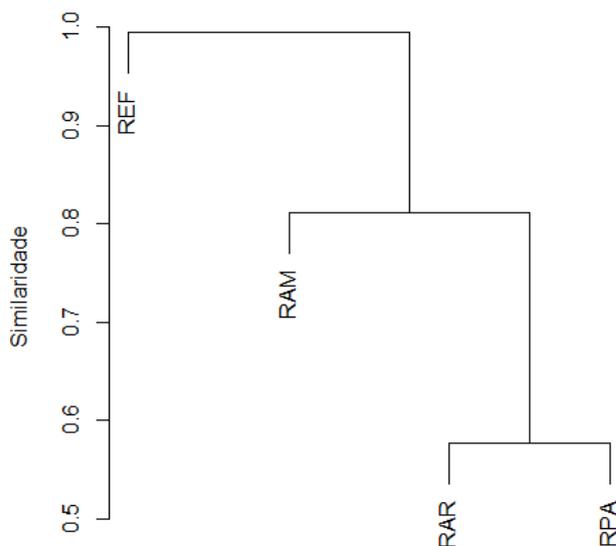
Nome científico	Nome vulgar	GE	NI	NP	DA	FA	AB	DoA	DR	DoR	FR	IVI	IVI(%)
<i>Protium heptaphyllum</i>	amescla	SI	41	7	65,80	70,00	0,3436	0,55	5,81	4,40	6,14	16,34	5,45
<i>Anadenanthera colubrina</i>	angico-branco	SI	5	2	8,02	20,00	0,0757	0,12	0,71	0,97	1,75	3,43	1,14
<i>Psidium cattleianum</i>	araçá	ST	3	1	4,81	10,00	0,0063	0,01	0,42	0,08	0,88	1,38	0,46
<i>Annona crassiflora</i>	araticum	P	1	1	1,60	10,00	0,0072	0,01	0,14	0,09	0,88	1,11	0,37
<i>Rollinia mucosa</i>	biriba	SI	26	3	41,73	30,00	0,2418	0,39	3,68	3,09	2,63	9,41	3,14
<i>Eschweilera ovata</i>	biriba-branca	P	34	7	54,57	70,00	0,3147	0,51	4,82	4,03	6,14	14,98	4,99
<i>Tabernaemontana laeta</i>	café-do-mato	ST	3	1	4,81	10,00	0,0153	0,02	0,42	0,20	0,88	1,50	0,50
<i>Cupania vernalis</i> Cambess	camboatá	CL	37	7	59,38	70,00	0,1911	0,31	5,24	2,44	6,14	13,83	4,61
<i>Plathymeria foliolosa</i>	candeia	SI	15	3	24,07	30,00	0,0833	0,13	2,12	1,07	2,63	5,82	1,94
<i>Cecropia pachystachya</i> Trécul	embaúba	P	1	1	1,60	10,00	0,0126	0,02	0,14	0,16	0,88	1,18	0,39
<i>Eriotheca pubescens</i>	embiruçu	SI	3	2	4,81	20,00	0,0092	0,01	0,42	0,12	1,75	2,30	0,77
<i>Ficus organensis</i>	folha miúda	P	5	2	8,02	20,00	0,1445	0,23	0,71	1,85	1,75	4,31	1,44
<i>Campomanesia xanthocarpa</i>	guabiraba	CL	9	3	14,44	30,00	0,0543	0,09	1,27	0,70	2,63	4,60	1,53
<i>Inga edulis</i>	ingá-de-metro	CL	2	2	3,21	20,00	0,0493	0,08	0,28	0,63	1,75	2,67	0,89
<i>Guapira opposita</i>	joão-mole	SI	16	4	25,68	40,00	0,1905	0,31	2,27	2,44	3,51	8,21	2,74
<i>Cordia trichotoma</i>	louro	P	78	6	125,19	60,00	1,0704	1,72	11,05	13,70	5,26	30,01	10,00
<i>Manilkara huberi</i>	massaranduba	ST	1	1	1,60	10,00	0,0054	0,01	0,14	0,07	0,88	1,09	0,36
<i>Schefflera morototoni</i>	matataúba	P	4	3	6,42	30,00	0,0292	0,05	0,57	0,37	2,63	3,57	1,19
<i>Cordia leucocephala</i>	moleque duro	P	5	2	8,02	20,00	0,0953	0,15	0,71	1,22	1,75	3,68	1,23
<i>Byrsonima verbascifolia</i>	murici	ST	48	9	77,04	90,00	0,6921	1,11	6,80	8,86	7,89	23,55	7,85
<i>Myrtus communis</i>	murta	SI	2	1	3,21	10,00	0,0108	0,02	0,28	0,14	0,88	1,30	0,43
NI*	NI*	NI*	228	10	365,93	100,00	2,1932	3,52	32,29	28,06	8,77	69,13	23,04
<i>Tapirira marchandii</i>	pau pombo	P	31	7	49,75	70,00	0,7204	1,16	4,39	9,22	6,14	19,75	6,58
<i>Himatanthus obovatus</i>	pau-de-leite	P	44	8	70,62	80,00	0,4897	0,79	6,23	6,27	7,02	19,52	6,51
<i>Aspidosperma polyneuron</i>	peroba	ST	4	4	6,42	40,00	0,0855	0,14	0,57	1,09	3,51	5,17	1,72
<i>Duguetia lanceolata</i>	pindaíba	ST	29	5	46,54	50,00	0,2099	0,34	4,11	2,69	4,39	11,18	3,73
<i>Myrsine coriacea</i>	pororoca	P	6	2	9,63	20,00	0,0422	0,07	0,85	0,54	1,75	3,14	1,05
<i>Curatella americana</i> L.	sambaíba	P	2	2	3,21	20,00	0,0241	0,04	0,28	0,31	1,75	2,35	0,78
<i>Pterodon emarginatus</i>	sucupira	ST	23	8	36,91	80,00	0,4077	0,65	3,26	5,22	7,02	15,49	5,16
TOTAL			706	10	1133	1140	7,81	12,54	100	100	100	300	100

GE = Grupo Ecológico, sendo Pioneira (P), Secundária Inicial (SI), Secundária Tardia (ST) e Clímax (CL); NI = Número total de indivíduos amostrados; NI* = Não Identificado; NP = Número de indivíduos amostrados na parcela; DA = Densidade Absoluta; DR = Densidade Relativa; DoA = Dominância Absoluta; DoR = Dominância Relativa; FA = Frequência Absoluta; FR = Frequência Relativa; IVI = Índice de Valor de Importância; IVI (%) = Índice de Valor de Importância percentual.

As florestas de restauração apresentam uma lacuna de recuperação global de 34% para características estruturais e 22% para diversidade (ROMANELLI et al., 2022). Em seu estudo, o autor observou que essa lacuna de recuperação diminuiu com o aumento da idade de restauração para a estrutura, mas não para as características de diversidade. Também abordou diferentes abordagens de restauração (ativa e passiva), tanto para características de estrutura quanto de diversidade, e encontrou resultados que sugeriram que ambos os tipos de ação de restauração podem levar a um aumento na recuperação da biodiversidade.

As áreas RAR e RPA apresentam similaridade florística de 55% (Figura 6). Observa-se que, dentre as 11 espécies encontradas em RPA (Tabela 4), apenas três não aparecem em RAR (Tabela 3): arco-de-pipa (*Eritroxylum deciduum*), embiruçu (*Eriotheca pubescens*) e sete-cascas (*Samanea tubulosa* Benth). A área RAM foi a restauração ecológica mais similar à REF, com 18% de similaridade florística. Enquanto a similaridade florística de RAM com RAR e RPA foi de 22% (Figura 6).

Figura 6. Dendrograma da similaridade florística de Jaccard (SJ) comparando as três áreas restauradas e a floresta secundária em fragmentos de Mata Atlântica localizados nos Municípios de Itaporanga D’Ajuda e de São Cristóvão, Sergipe, Brasil, 2022. RAM = Restauração ativa com monitoramento. RAR = Restauração ativa sem monitoramento; RPA = Restauração Passiva; REF = Floresta de referência.



Elaboração: Milena Viviane Vieira de Almeida, 2022. Programa R versão 4.1.1 e *RStudio* (R CORE TEAM, 2021).

5.2. Caracterização de AGB por parcela

Foram mensurados 1.797 indivíduos arbóreos em todas as 40 parcelas de inventário. Integrando esses indivíduos para suas respectivas parcelas, os valores de AGB variaram entre 3,30 e 104,11 Mg. ha⁻¹ (**Tabela 7**), sendo o valor médio de aproximadamente 28,26 Mg. ha⁻¹. Cabe destacar que o maior valor (104,11 Mg. ha⁻¹) de AGB foi observado na parcela da RAR de número 19 (RAR#08), e não em uma das parcelas de referência do Campus Rural da UFS. Tal resultado está atrelado à presença de indivíduos (NI = 253) bem desenvolvidos do gênero *Eucalyptus* nesta parcela. No entanto, o maior valor médio de AGB (54,74 Mg. ha⁻¹) foi encontrada nas de referência (**Tabela 8**), o que demonstra coerência, uma vez que as árvores estão bem desenvolvidas.

Tabela 7. Valores de Biomassa acima do solo total para cada uma das parcelas de inventário.

Parcela	Código	AGB (Mg.ha⁻¹)
1	RAM#0	32,90
2	RAM#1	14,47
3	RAM#2	20,98
4	RAM#3	17,04
5	RAM#4	6,68
6	RAM#5	9,74
7	RAM#6	5,10
8	RAM#7	9,49
9	RAM#8	8,70
10	RAM#9	12,22
11	RAR#0	37,56
12	RAR#1	12,75
13	RAR#2	11,83
14	RAR#3	23,85
15	RAR#4	11,30
16	RAR#5	36,25
17	RAR#6	24,28
18	RAR#7	39,00
19	RAR#8	104,11
20	RPA#9	26,97
21	RPA#0	11,82
22	RPA#1	19,51
23	RPA#2	3,30
24	RPA# 3	6,01
25	RPA#4	12,10
26	RPA#5	18,02
27	RPA#6	7,91
28	RPA#7	10,21
29	RPA#8	14,70
30	RPA#9	14,12
31	REF#0	17,22
32	REF#1	12,68
33	REF#2	92,39
34	REF#3	71,34
35	REF#4	88,27
36	REF#5	97,75
37	REF#6	72,47
38	REF#7	8,45
39	REF#8	31,91
40	REF#9	55,01

A restauração ativa consorciada com eucalipto (RAR) apresentou os maiores valores de NA, H, AB e AGB (**Tabela 8**) dentre as restaurações ecológicas RAM e RPA, porém esses valores foram inferiores à floresta de referência (REF). De acordo com Brancalion et al. (2019), isso acontece em decorrência do rápido crescimento do eucalipto, em seu estudo obteve valores de biomassa acima do solo em plantios mistos (nativas consorciadas com eucalipto) nove vezes maior do que em plantios compostos apenas com espécies nativas.

Tabela 8. Informações fitossociológicas, valores dendrométricas e de biomassa acima do solo médios, resumidos para cada um dos sistemas de restauração e de referência analisados.

Atributo	Tipo de Restauração			Floresta natural
	RAM	RAR	RPA	REF
NA (0.625 ha ⁻¹)	313	491	287	706
NE (0.625 ha ⁻¹)	35	22	11	29
DAP (cm)	7,97	7,63	7,55	9,20
H (m)	5,78	7,14	6,86	7,98
AB (m ² .ha ⁻¹)	4,63	6,59	2,84	12,55
AGB (Mg.ha ⁻¹)	13,73	32,79	11,77	54,74

NA = Número de árvores/tratamento; NE = Número de espécies/tratamento; DAP = Diâmetro à altura do peito; AB = Área Basal; AGB = Biomassa acima do solo; RAM = Restauração ativa com monitoramento; RAR = Restauração ativa sem monitoramento; RPA = Restauração Passiva; REF = Floresta de referência.

Os valores de AGB das restaurações RAM, RAR e RPA podem ser considerados baixos quando comparados com Azevedo et al. (2018) que observaram um valor médio de 72,24 Mg.ha⁻¹ em uma restauração ecológica com 7 anos em domínio de Mata Atlântica. Meira et al. (2020) observaram uma AGB de 21,13 Mg.ha⁻¹ em uma área de restauração ecológica com espécies nativas na mesma tipologia e região, sendo superior à RAM e RPA. Diniz et al. (2015) avaliando uma floresta estacional semidecidual em estágio médio de sucessão na Mata Atlântica, observaram uma AGB de 44,3 Mg. ha⁻¹, sendo superior aos valores de RAM, RAR e RPA, porém, inferior à REF (**Tabela 8**).

Deve-se observar que a restauração RAR apresenta o maior número de indivíduos de eucalipto, com 253 indivíduos, o que favorece maior NA, H, AB e AGB, já que estes indivíduos de eucalipto são remanescentes plantados antes de 2013, estando, portanto, com melhor desenvolvimento em altura e diâmetro. A maior diversidade de espécies representada pelo número de espécies nativas em RAM não influenciou em maior NA, H, AB e AGB em relação a RAR e RPA. Na restauração ecológica dos ecossistemas, o

aumento da diversidade está sempre associado ao aumento da produtividade (e consequente estoque de carbono e biomassa), que está entre as funções mais importantes do ecossistema (ROSA; MARQUES, 2022).

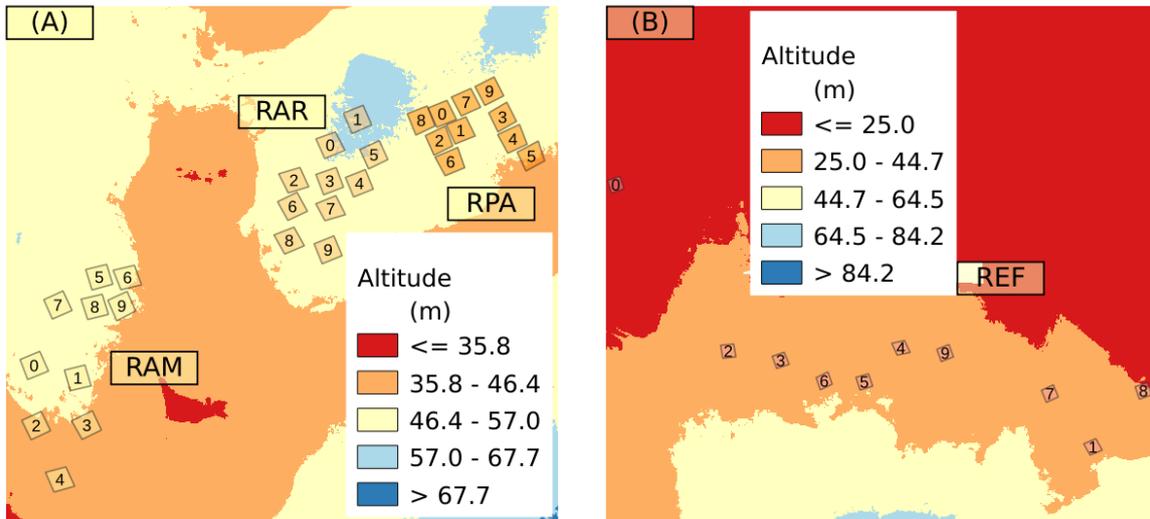
Ao longo da sucessão ecológica, ocorre o incremento de biomassa em florestas tropicais em função do aumento na diversidade de espécies de estágios sucessionais mais avançados, que apresenta maior volume e longo ciclo de vida, consequentemente abriga um maior estoque de biomassa e carbono (CHAZDON, 2012). O paradigma ecológico dessa associação é que a biodiversidade ecossistêmica está positivamente relacionada tanto às funções quanto aos serviços ecossistêmicos. No entanto, as relações biodiversidade e funções e serviços dos ecossistemas variam espacial e temporalmente, o que torna a compreensão dessas relações relevante e importante para ações práticas de restauração (ROSA; MARQUES, 2022).

Portanto, observa-se a necessidade de avaliações por um período maior dos parâmetros fitossociológicos das restaurações (RAM, RAR e RPA) para que possa confirmar se uma maior diversidade de espécies irá resultar em maior biomassa acima do solo. Ou seja, se restaurações ecológicas no bioma Mata Atlântica brasileira devem priorizar maior diversidade de espécies florestais quando o objetivo da restauração seja obter maior volume de AGB.

5.3. *Validação da FAD-RPA*

Na **Figura 7**, pode-se verificar os Modelos Digitais de Elevação (MDTs) gerados por FAD-RPA, além das 40 parcelas de inventário. Ambas as áreas apresentam um relevo com baixa variação altimétrica, com valores de altitude abaixo de 100 m. Na Fazenda Rio Fundo, as parcelas estão localizadas entre as elevações 36 e 67 metros, aproximadamente. Já no Campus Rural, as parcelas de inventário variaram entre 25 e 45 metros, aproximadamente.

Figura 7. Modelos Digitais do Terreno (MDTs) obtidos por FAD-RPA e as 40 parcelas inventariadas nas duas áreas de estudo, (A) Fazenda Rio Fundo e (B) Campus Rural da UFS. RAM = Restauração ativa com monitoramento; RAR = Restauração ativa sem monitoramento; RPA = Restauração Passiva; REF = Floresta de referência.

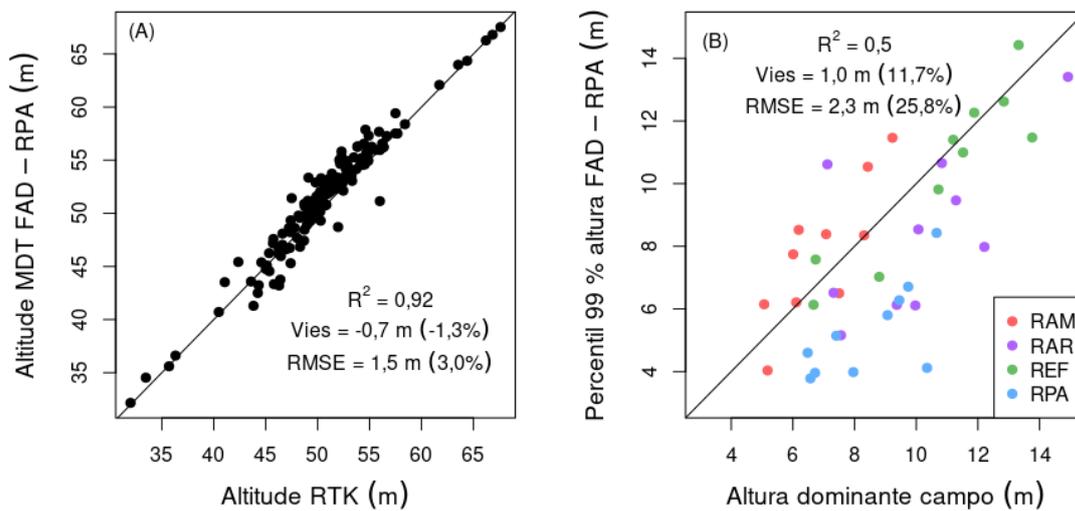


A **Figura 8** apresenta os valores, estimados em campo e pela FAD-RPA, de altitude do terreno (A) e de altura dominante das árvores (B). Assim como observado em outros estudos que utilizaram FAD-RPA em áreas com floresta tropical secundária (ALMEIDA et al., 2020 CABRAL et al., 2023), pode-se observar uma leve superestimação (viés de -0,7 m, 1,3%) da altitude do terreno (**Figura 8A**), com um erro total de 3% (1,5 m). Resultado esperado, uma vez que a FAD-RPA, normalmente, superestima os valores de altitude do terreno por não conseguir penetrar o dossel da floresta (GOODBODY et al., 2017; PANAGIOTIDIS, et al., 2017; KACHAMBA, et al., 2016), sendo uma desvantagem, quando comparado com dados coletados pela tecnologia *LiDAR*. Cabe destacar também, que a superestimação das altitudes, pode estar relacionada como método de classificação de pontos representativos no terreno na nuvem de pontos 3D.

Conseqüentemente, com a superestimação dos valores de altitude do terreno, foi observado uma subestimação dos valores de altura dominante das árvores (**Figura 8B**), com valores de Viés de 1,0 m (11,7%) e um RMSE de 25,8%, ou seja, aproximadamente 2,3 m. Pode-se notar uma baixa/média correlação ($R^2 = 0,5$) entre os valores de altura dominante estimados no campo com os valores de percentil 99% da altura da nuvem de pontos normalizada. Além da baixa correlação, o desempenho também foi inferior ao observado em outros estudos com vegetação semelhante a que foi analisada em nosso estudo (ALMEIDA et al., 2020). Utilizando FAD-RPA, Cabral et al. (2023), encontraram

um RMSE de aproximadamente 1,8 m (15%) na estimativa da altura dominante de parcelas com florestas tropicais secundárias localizadas no norte do Estado do Espírito Santo.

Figura 8. Gráficos de dispersão entre os (A) 75 valores de elevação do terreno coletados em campo com o RTK e os valores de elevação do MDT derivado da FAD-RPA e (B) os valores de altura dominante das árvores das parcelas (40) de campo e os valores de percentil 99% da altura estimadas pela nuvem de pontos normalizada FAD-RPA. RAM = Restauração ativa com monitoramento; RAR = Restauração ativa sem monitoramento; RPA = Restauração Passiva; REF = Floresta de referência.



Vale destacar que, a subestimativa das alturas dominantes se concentraram nos sistemas de restauração RAR e RPA (**Figura 8B**), com bom desempenho para o sistema RAM e as parcelas de referência do Campus Rural da UFS. Possivelmente, o melhor desempenho pode estar relacionado com a ocorrência de estradas vicinais próximas e ao redor dessas áreas e presença de clareiras (**Figura 5**, apresentada na Seção 5.1). A subestimativa das alturas dominantes nestes dois sistemas, pode também estar relacionada como método de classificação de pontos representativos no terreno na nuvem de pontos 3D.

5.4. Caracterização da estrutura vertical e da cobertura da vegetação por FAD-RPA

A análise de componentes principais (ACP) é uma das técnicas de estatística multivariada mais utilizadas em diversas áreas da ciência. Em nosso estudo, a ACP nos permitiu visualizar a existência de diferenças nas métricas de altura e de cobertura da

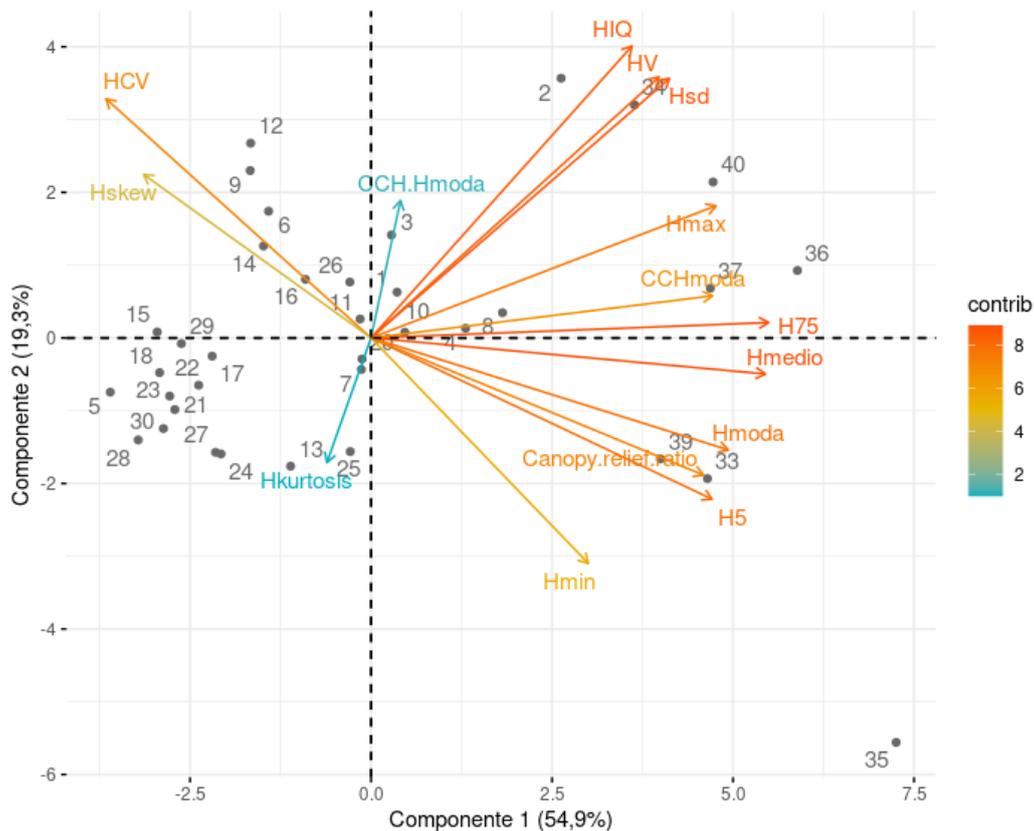
vegetação derivadas da FAD-RPA dos diferentes sistemas de restauração e de referência analisados. Além disso, nos permitiu classificar as amostras de cada sistema em grupos homogêneos, de acordo com as métricas de altura e de cobertura da nuvem de pontos 3D FAD-RPA.

As duas primeiras componentes (54,97% da C1 + 19,30% da C2) conseguiram explicar mais de 70% (74,27%) da variação dos valores das métricas FAD-RPA analisadas (**Figura 9**). As quatro primeiras métricas que mais explicam a primeira componente estão relacionadas com a altura média/alta da floresta (**Tabela e Figura 9**), a altura relativa ao percentil 75%, as alturas médias e mediano e as alturas máximas das árvores da parcela. Todas se correlacionando positivamente com a componente. Apenas uma métrica de cobertura está fortemente (0,855) correlacionada com a primeira componente, a métrica que representa o número de pontos acima da altura da moda (CCH_{moda}). Já as medidas de dispersão assimetria e coeficiente de variação, estão correlacionadas negativamente com a primeira componente. Já as três primeiras métricas que mais explicam ($r > 0,646$) a segunda componente estão relacionadas com medidas de dispersão, os valores de amplitude interquartil, variância e o coeficiente de variação (H_{IQ} , H_v e H_{sd}). Também correlacionadas positivamente com a componente. A métrica de cobertura representativa da % do número de pontos acima da altura média dividida pelo total do número da parcela explica apenas 34% dessa componente (**Tabela e Figura 9**).

Tabela 9. Métricas derivadas da nuvem de pontos 3D FAD-RPA que mais explicam as duas primeiras componentes principais.

Primeira componente (C1)			Segunda componente (C2)		
Métrica	Tipo	Correlação(r)	Métrica	Tipo	Correlação (r)
H_{75}	Altura	0,995	H_{IQ}	Altura	0,727
$H_{média}$	Altura	0,987	H_v	Altura	0,650
H_{moda}	Altura	0,894	H_{sd}	Altura	0,646
$H_{máx}$	Altura	0,864	H_{CV}	Altura	0,595
CCH_{moda}	Cobertura	0,855	H_{skew}	Altura	0,407
H_5	Altura	0,854	$CCH_{\%moda}$	Cobertura	0,342
CCR	Altura	0,832	$H_{máx}$	Altura	0,329
H_{sd}	Altura	0,747	CCR	Altura	0,342
H_v	Altura	0,721	H_5	Altura	0,402
H_{IQ}	Altura	0,653	$H_{mín}$	Altura	0,562
$H_{mín}$	Altura	0,544			
H_{skew}	Altura	-0,569			
H_{CV}	Altura	-0,663			

Figura 9. Biplot da ACP ordenando e mostrando a contribuição das métricas derivadas da altura e da cobertura da vegetação derivadas da nuvem de pontos 3D FAD-RPA, além da distribuição das parcelas dos diferentes sistemas de restauração e da área de referência analisada.



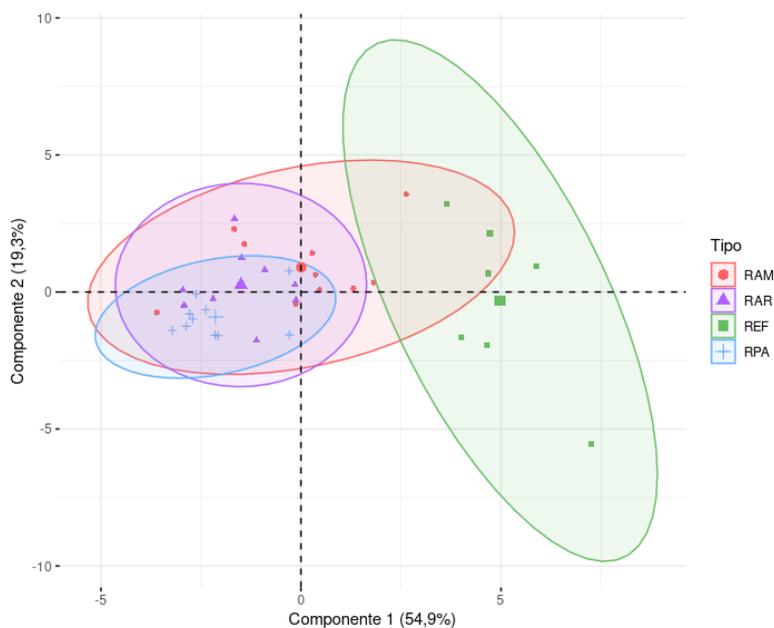
A **Figura 10** mostra o biplot da análise de componentes principais ordenando as métricas derivadas da altura e da cobertura da vegetação derivadas da nuvem de pontos 3D FAD-RPA e agrupando os diferentes sistemas de restauração e a área de referência analisados no estudo. Podemos perceber que as parcelas de referência foram agrupadas, estando mais distantes das áreas de restauração, assim como observado no índice de similaridade florística de Jaccard (**Figura 6**). Também semelhante ao observado no índice de similaridade, as parcelas de restauração foram agrupadas, estando a RPA contida dentro da RAR (sistemas semelhantes, em termos de métricas FAD-RPA) e ambas inseridas no contexto do sistema RAM. Importante também destacar a leve sobreposição entre os grupos formados pelas parcelas RAM e de REF, assim como observado anteriormente no índice de similaridade.

Nota-se também que as parcelas de referência estão concentradas próximas do eixo da primeira componente, evidenciando que estas parcelas possuem uma estrutura

vertical caracterizada por árvores presentes nos extratos mais altos (H_{75} e $H_{máx}$) e médios ($H_{médio}$ e H_{moda}) da floresta, sendo formadas por um subbosque menos denso. Também podemos inferir que essas parcelas puderam ser caracterizadas pela métrica de cobertura que representa o número de pontos acima da altura da moda (CCH_{moda}), pois é a quinta métrica que mais explica a C1.

Os biplots das **Figuras 9 e 10**, nos permitem verificar que as parcelas de restauração (principalmente a passiva) foram agrupadas, em função da forte influência das métricas (medidas) de dispersão, representadas pela assimetria (H_{skew}) e o coeficiente de variação (H_{CV}). Estas medidas de dispersão estão correlacionadas negativamente com as primeira componente (**Tabela 9**), sendo ordenadas do lado esquerdo da C1 e sobrepostas nos grupos da restauração. Isso nos permite dizer, que as parcelas de restauração são caracterizadas, verticalmente, por um perfil vertical mais simétrico, ou seja, possuem indivíduos arbóreos distribuídos ao longo de toda altura da floresta. Em termos práticos, significa dizer que estas florestas possuem subbosque bem definido.

Figura 10. Biplot da ACP ordenando as métricas derivadas da altura e da cobertura da vegetação derivadas da nuvem de pontos 3D FAD-RPA e agrupando os diferentes sistemas de restauração e a área de referência analisados no estudo.



5.4.1. Ajuste e validação do modelo de biomassa acima do solo

As diferentes transformações da AGB não melhoraram a correlação entre as variáveis explicativas (**Tabela 10**), sendo assim, os modelos foram ajustados com dados não transformados.

Tabela 10. Estatística da correlação das variáveis explicativas.

AGB	Correlação	
	Mínimo	Máximo
Original	-0,43	0,80
Raíz quadrada	-0,41	0,78
Logarítmo	-0,37	0,76
AGB ²	-0,43	0,77
AGB ⁻¹	-0,62	0,23

Verifica-se que o melhor ajuste estatístico foi encontrado no modelo composto por cinco variáveis explicativas, em que β são os parâmetros estimados do modelo e ξ_i o erro aleatório, sendo, portanto, o modelo selecionado: $AGB = \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5 + \xi_i \sim N(0, \sigma)$. O modelo de AGB selecionado e a estatística do modelo estão descritos na **Tabela 11**. Todas as métricas do modelo foram significativas ($p < 0,05$) e não apresentaram multicolinearidade ($VIF < 10$). A normalidade dos resíduos foram verificado pelo teste de shapiro-wilk.

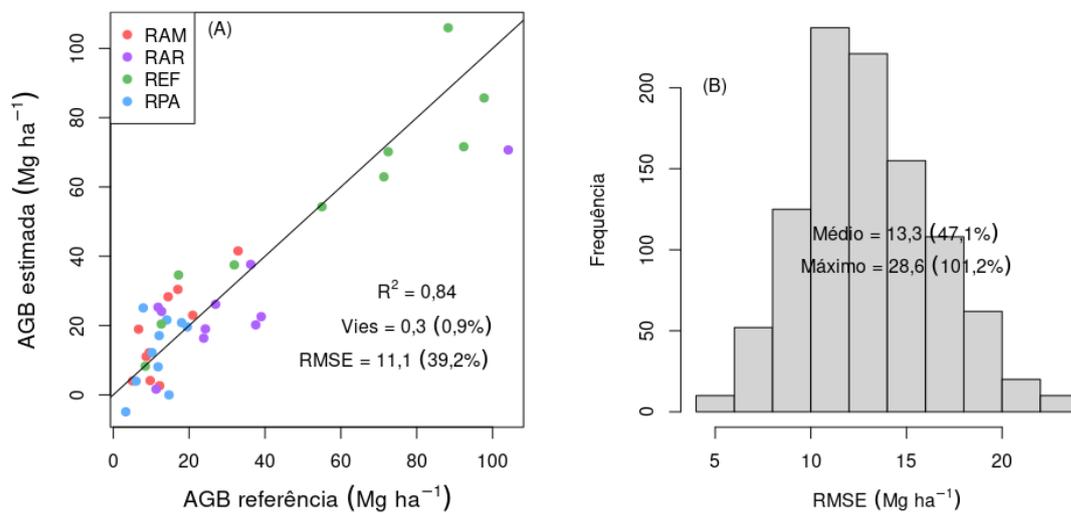
Tabela 11 - Resultados das estimativas de mínimos quadrados ordinários para o modelo de AGB derivado das métricas da FAD-RPA.

Modelo	AGB = $\beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5 + \xi_i \sim N(0, \sigma)$				
Variáveis	Parâmetro	Estimado	Erro padrão	t-valor	p-valor
Intercepto	β_0	-3,152e ⁺¹	2,470e ⁺¹	-1,276	0,2106*
H _{mode}	β_1	1,745e ⁺¹	1,856e ⁺⁰	9,399	5,57e ⁻¹¹ ***
Canopy relief ratio	β_2	-2,018e ⁺²	4,338e ⁺¹	-4,652	4,83e ⁻⁵ ***
CCH% H _{média}	β_3	1,915e ⁺⁰	7,442e ⁻¹	2,573	0,0146 *
CCH _{média}	β_4	-4,548e ⁻⁴	9,907e ⁻⁵	-4,590	5,80e ⁻⁵ ***
CCH _{moda}	β_5	3,703e ⁻⁴	7,872e ⁻⁵	4,705	4,13e ⁻⁵ ***

Significância: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

A análise gráfica da correlação entre os valores de AGB observadas e AGB estimadas e a distribuição dos erros percentuais dos dados de ajuste, na regressão, são apresentadas na **Figura 11**. O modelo ajustado para estimar AGB apresentou bom desempenho, com R^2 de 0,84 e RMSE ao nível de parcela de $11,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ (39,2%) no momento do ajuste. Na validação o R^2 foi de 0,75 e RMSE ao nível de parcela de $13,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ (46%).

Figura 11. Valores estimados em campo *versus* valores previstos pelas métricas tradicionais derivadas de Hmed = altura média e de Hmáx = altura máxima. No gráfico de dispersão (A), a linha diagonal representa $x = y$. O histograma (B) mostra a distribuição dos valores de RMSE obtidos nas 1000 repetições no procedimento de validação cruzada. AGB = biomassa acima do solo; RMSE = raiz quadrada do erro quadrático médio.



Almeida et al. (2020) estimaram a AGB a partir das métricas tradicionais combinadas às transformadas de Fourier, obtendo alto desempenho, com R^2 de 0,93 e RMSE, ao nível de parcela, de $9,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ (22,5%). Segundo esses autores, o resultado sugere que os modelos ótimos para a predição de biomassa incluem uma combinação de métricas que capturam a estrutura vertical com métricas que descrevem a cobertura do dossel.

6. CONCLUSÃO

Esta pesquisa demonstra que a caracterização estrutural vertical e de cobertura da vegetação para a quantificação de biomassa acima do solo, em áreas de restauração, com uso de FAD-RPA, desde que observadas as limitações da técnica, possui metodologia reproduzível, escalável, apresenta confiabilidade na obtenção dos dados e contribui para os estudos ambientais, gerando, conseqüentemente, impactos positivos à sociedade.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os diferentes métodos de restauração ecológica empregados tem se mostrado uma ferramenta que subsidia, a partir dos diferentes contextos e objetivos, a recuperação florestal. Deve-se observar, portanto, além dos aspectos ecológicos e ambientais, os aspectos socioeconômicos.

A utilização do sensoriamento remoto tem demonstrado uma série de vantagens, desde o custo-benefício para o usuário até a confiabilidade dos dados obtidos, sendo a FAD-RPA um instrumento eficaz para monitorar áreas restauradas, o qual permite estimar AGB e caracterizar a estrutura vertical e da cobertura florestal.

Verifica-se que, no presente estudo não houve grandes limitações ao utilizar a FAD-RPA para monitorar os sistemas de restauração, uma vez que os pontos de controle foram colocados estrategicamente em áreas com vegetação mais rala, e, de modo geral, a vegetação não era densa o suficiente para impedir a penetração da luz nos estratos mais baixos da floresta, o que poderia dificultar que a câmera capturasse informações detalhadas.

A metodologia de análise multivariada permite a observação de diversos fatores, os quais formam um conjunto único de informações para cada sistema de restauração, e que, apesar das peculiaridades, podem ser visualizadas as convergências e divergências. Observa-se que esta técnica permite a interpretação de fenômenos os quais poderiam não ser observados de forma isolada, além de causar o mínimo de perda de dados, se comparada à análise univariada, por exemplo. Entretanto, sugere-se que o conjunto de dados seja selecionado de forma criteriosa para obter resultados coerentes aos objetivos do estudo. A partir dessas investigações, pode-se fazer escolhas direcionadas para a realização de intervenções nas áreas que se encontram em processo de restauração.

REFERÊNCIAS

AGISOFT, L. L. C. **Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition**, version 2.0. LLC Agisoft: St. Petersburg, Russia, 2023.

AGUIAR NETTO, A. O. et al. **Cenário dos corpos d'água na sub-bacia hidrográfica do rio Poxim - Sergipe, na zona urbana, e suas relações ambientais e antrópicas**. In: Simpósio brasileiro de Recursos Hídricos, 17., 2007, São Paulo. (Simpósio) São Paulo: 2007. p.119.

ALHO, C. J. R. Importância da biodiversidade para a saúde humana: uma perspectiva ecológica. **Dossiê Sustentabilidade**, Estud. av. v. 26 ed. 74, 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-40142012000100011>> Acesso em: 15 abril 2023.

ALMEIDA, A. et al. Estimating Structure and Biomass of a Secondary Atlantic Forest in Brazil Using Fourier Transforms of Vertical Profiles Derived from UAV Photogrammetry Point Clouds. **Remote sensing**, v. 12, 2020. p. Disponível em <<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/21/3560/htm>> Acesso em: 07 outubro 2021.

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. **Orientações para usuários de drones**. ASCOM - Assessoria de Comunicação Social. Brasília: ANAC, 2017. <Disponível em: <https://bit.ly/40ag988>> Acesso em: 24 jun 2023.

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial: RBAC-E nº 94. Requisitos Gerais para Aeronaves Não Tripuladas de Uso Civil**. Resolução nº 649, 2021.

ASP – AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY. **Manual of Photogrammetry**, 1966, 1220p.

AZEVEDO, A. D. et al. Estoque de carbono em áreas de restauração florestal da Mata Atlântica. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 48, n. 2, p. 183-194, abr/jun, 2018.

BANDEIRA, S. R. V. **Regressão espacial e avaliação de terrenos: um estudo de caso para a cidade de Fortaleza-CE**. Dissertação (Mestrado em Economia). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. 67 p.

BATISTA, V. A. B. **Da colonização a contemporaneidade – a exploração da mata atlântica: uma análise da exploração econômica e uma proposta de minimização dos impactos ambientais pelo ecoturismo**. Dissertação (mestrado em Ecologia Humana e Problemas Sociais Contemporâneos) – Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2022. 150p.

BRANCALION, P. H. S. et al. Equilibrando custos econômicos e resultados ecológicos da restauração passiva e ativa em paisagens agrícolas: o caso do Brasil. **Biotropica**, v. 48, ed. 6, 2016, p. 856-867. Disponível em <<https://doi.org.ez20.periodicos.capes.gov.br/10.1111/btp.12383>> Acesso em: 10 julho 2023.

BRASIL. Lei nº 14.119, 13 de janeiro de 2021. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2021. Disponível em < <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.119-de-13-de-janeiro-de-2021-298899394>> Acesso em: 23 set 2021.

BRASIL. Constituição (1988). Capítulo VI – Do Meio Ambiente, Art. 225. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicaocompilado.htm> Acesso em: 07 out 2021.

CABRAL, R. P. Mapping of the Successional Stage of a Secondary Forest Using Point Clouds Derived from UAV Photogrammetry. **Remote sensing**, v. 15, ed. 2, jan. 2023, Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/rs15020509>> Acesso em: 20 jan 2023.

CAPELO, J. Conceitos e métodos da fitossociologia: formulação contemporânea e métodos numéricos de análise da vegetação. Lisboa: Estação Florestal Nacional: **Sociedade Portuguesa de Ciências Florestais**, D.L. 2003. 107 p.

CARDOSO-LEITE, E. et al. Recovery of richness, biomass and density in atlantic rainforest areas after clearcutting. **Revista Árvore** (online), v. 40, p. 499-508, 2016.

CASSEMIRO, G. H. M. PINTO, H. B. **Composição e processamento de imagens aéreas de alta-resolução obtidas com drone**. (Monografia). Universidade de Brasília (UnB), Brasília, DF, 2014, 80 p.

CHAVE, J. et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global change biology**, v. 20, p. 3177-3190.

CHAVE, J. et al. Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species. **Ecological Society of America**, v. 16, dezembro 2006.

CHAVE, J. et al. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia**, v. 145, 1 ed., agosto de 2005, p. 87-99.

CHAZDON, R. Regeneração de florestas tropicais. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Ciências Naturais, v.7, n.3, p.195-218, 2012.

CORAIOLA, M. **Caracterização estrutural de uma floresta estacional semidecidual localizada no município de Cássia – MG**. Dissertação (mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997. 216 p.

CORTE, A. P. D. Measuring Individual Tree Diameter and Height Using GatorEye High-Density UAV-Lidar in an Integrated Crop-Livestock-Forest System. **Remote sensing**, v. 12. Disponível em <<https://www.mdpi.com/2072-4292/12/5/863>> Acesso em: 22 março 2023.

DANDOIS, J.P.; ELLIS, E.C. Remote Sensing of Vegetation Structure Using Computer Vision. **Remote Sensing**, 2010, 2, p. 1157–1176. Disponível em: < <https://doi.org/10.3390/rs2041157>> Acesso em: 31 maio 2023.

DINIZ, A. R. et al. Biomassa, estoques de carbono e de nutrientes em estágios sucessionais da Floresta Atlântica, RJ. **Agrária**, Recife (online), v. 10, p. 443-451, 2015.

FERREIRA, L. G., FERREIRA, N. C., FERREIRA, M. E. Sensoriamento remoto da vegetação: evolução e estado da arte. *Acta Scientiarum Biological Sciences*, Maringá, v.30, n.4, p.379-390, 2008. Disponível em: <<https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciBiolSci/article/view/5868/5868>> Acesso em: 30 abril 2023.

FONTES, J. A. C. **Caracterização geoambiental da sub-bacia do Rio Fundo**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2010. 145 p. Disponível em <<https://ri.ufs.br/simple-search?query=Caracteriza%C3%A7%C3%A3o+geoambiental+da+sub-bacia+do+Rio+Fundo>> Acesso em: 01 out 2021.

FREITAS, W. K.; MAGALHÃES, L. M. S. Métodos e Parâmetros para Estudo da Vegetação com Ênfase no Estrato Arbóreo. **Floresta e Ambiente**, v. 19, ed. 4, dez. 2012. p. 520-540. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2012.054>> Acesso em: 14 out 2022.

Fundação SOS Mata Atlântica; INPE. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica: período 2019/2020**, relatório técnico. São Paulo: Fundação SOS Mata Atlântica, 2021. 73p. Disponível em: <https://cms.sosma.org.br/wp-content/uploads/2021/05/SOSMA_Atlas-da-Mata-Atlantica_2019-2020.pdf> Acesso em: 27 set 2021.

GASPAR, R. O et al. Análise fitossociológica e do estoque de carbono no estrato arbóreo de um fragmento de floresta estacional semidecidual. **Ciência Florestal**, UFSM impresso), v. 24, p. 313-324, 2014.

GOODBODY, T. R. H. et al. Unmanned Aerial Systems for Precision Forest Inventory Purposes: A Review and Case **Study. For. Chron.** 2017, 93, p. 71–81. Disponível em <<https://pubs.cif-ifc.org/doi/10.5558/tfc2017-012> > Acesso em: 29 ago 2023.

GUIMARÃES, L. E. **Biomassa da vegetação arbórea, rasteira e necromassa em formações florestais e savânica em Goiás**. (Tese) Doutorado em Agronomia da Universidade Federal de Goiás. Goiânia, GO, 2020. 116 p.

HEIPKE, C. State-of-the-art of digital photogrammetric workstations for topographic. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 61, n. 01, Ottawa, Canadá, 1995.

IBRAHIN, F. I. D. **Introdução ao geoprocessamento ambiental**. 1 ed. São Paulo: Érica, 2014. 128 p.

IGLHAUT, J. et al. Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a review. **Current Forestry Reports**, v. 5, n. 3, p. 155-168, jul. 2019.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: agriculture, forestry and other land use**. Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), v.4, 2006.

JOSÉ, M. B. **Viabilidade econômica e ecológica dos modelos sucessionais de restauração florestal nos serviços ambientais na Mata Atlântica brasileira**. Dissertação. (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) UFS, São Cristóvão, SE, 2023.

KACHAMBA, D. et al. Biomass Estimation Using 3D Data from Unmanned Aerial Vehicle Imagery in a Tropical Woodland. **Remote Sens**. 2016, 8, p. 968. Disponível em <<https://www.mdpi.com/2072-4292/8/11/968>> Acesso em: 29 ago 2023.

LIMA, F. V. S. **Sucessão ecológica após a fabricação de carvão vegetal no maciço da Pedra Branca, Brasil**. (Dissertação) Universidade de Lisboa, Portugal, 2019.

MACAVE, O. A. et al. Modelling Aboveground Biomass of Miombo Woodlands in Niassa Special Reserve, Northern Mozambique. **Forests**, v. 13. Disponível em <<https://www.mdpi.com/1999-4907/13/2/311>> Acesso em 04 out 2022.

MAPPA (MAKING MAPS EASY). **Sobreposição de imagens: por que ela é importante?** Disponível em <<https://mappa.ag/blog/sobreposicao-de-imagens-por-que-ela-e-importante/>> Acesso em 20 ago 2023.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. - 8. ed. - São Paulo: Atlas 2017.

MARGALEF, R. Sucesión y evolución: su proyección biogeográfica. **Paleontología y Evolución**, v. 20, p. 7-26, 1986.

MCGAUGHEY, R. J. **FUSION/LDV: Software para Análise e Visualização de Dados LiDAR**; Versão 4.40; Serviço Florestal do Departamento de Agricultura dos EUA, Pacific Northwest Research Station, Universidade de Washington: Seattle, WA, EUA, 2018; Disponível em: <<http://forsys.cfr.washington.edu/fusion/fusionlatest.html>> Acesso em: 18 ago 2022.

MCROBERTS, R. E.; TOMPPO, E. O. Suporte de sensoriamento remoto para inventários florestais nacionais. **Remote Sensing Environment**. 2007, v. 110, ed. 4, p. 412-419. Disponível em <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425707001721>> Acesso em: 04 out 2022.

MEIRA, A. C. S.; MELLO, A. A.; SANQUETTA, C. R.; FERREIRA, R. A. Estimativas de biomassa e carbono em área de Mata Atlântica, implantada por meio de reflorestamento misto. **Biofix Scientific Journal**, v. 5, p. 130, 2020.

MELO et al. Evolução da observação da terra por Sensoriamento Remoto. **Revista brasileira de sensoriamento remoto**, v.2, n.2. 002-024, 2021. Disponível em: <45_253_1_PB-libre.pdf (d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net)> Acesso em: 21 ago 2023.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.; BAPTISTA, G. M. M. **Reflectância dos materiais terrestres: análise e interpretação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

MIRANDA NETO, A.; MARTINS, S. V.; SILVA, Ke de Almeida; GLERIANI, J. M. Florística e estrutura do estrato arbustivo-arbóreo de uma floresta restaurada com 40 anos, Viçosa, MG. **Revista Árvore** (impresso), v. 36, p. 869-878, 2012.

MILLER TLboFcbA. **_leaps: Regression Subset Selection_**. R package version 3.1, 2020 Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=leaps>>.

MORO, M. F. et al. Alienígenas na sala: o que fazer com espécies exóticas em trabalhos de taxonomia, florística e fitossociologia? **Acta Botanica Brasilica**, v. 26, ed. 4, 2012, p. 991–999. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/S0102-33062012000400029>> Acesso em 16 ago 2023.

MOSER, P.; OLIVEIRA, L. Z. **Regressão linear aplicada à dendrometria: uma introdução e iniciação à linguagem R**. Blumenau: Edifurb, 2017. 152 p.

MUELLER-DOMBOIS, D; ELLENBERG, H. **Aims and methods of vegetation ecology**. New York: John Wiley & Sons; 1974.

OLIVEIRA, J.P.; Ellis, E.C. **Sensoriamento Remoto da Estrutura da Vegetação Usando Visão Computacional**. 2010, 2, p. 1157–1176.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Objetivos de desenvolvimento sustentável**. 2023. Disponível em < <https://brasil.un.org/>> Acesso em 22 fev 2023.

PANAGIOTIDIS, D. et al. Tree Height and Crown Diameter from High-Resolution UAV Imagery. *Int. J. Remote Sens.* 2017, 38, p. 2392–2410. Disponível em <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2016.1264028>> Acesso em: 29 ago 2023.

R Core Team (2021). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: < <https://www.R-project.org/>>.

REIS NETO, A. F.; SILVA, L. J. A.; ARAÚJO, M. S. B. Mata atlântica pernambucana: argumentos jurídicos para implementação da R.E.D.D. **Veredas do Direito** – Direito Ambiental e Desenvolvimento Sustentável. Belo Horizonte, v.14, n.30, p.143-168, 2017. Disponível em < revista.domhelder.edu.br/index.php/veredas/article/view/1023> Acesso em 23 abril 2023.

RODAL, M. J. N., SAMPAIO, E. V. S. B., FIGUEIREDO, M. A. (Orgs). **Manual sobre métodos de estudo florístico e fitossociológico: ecossistema caatinga**. Brasília: Sociedade Botânica do Brasil - SBB. 2013.

RODRIGES, R. R. et al. **Protocolo de monitoramento para programas e projetos de restauração florestal**. Pacto pela restauração da Mata Atlântica: São Paulo, 2013. 61 p. Disponível em: <<https://www.pactomataatlantica.org.br/wp-content/uploads/2021/05/protocolo-de-monitoramento-pt.pdf>> Acesso em: 23 set 2021.

ROSA, C. M.; MARQUES, M. C. M. How are biodiversity and carbon stock recovered during tropical forest restoration? Supporting the ecological paradigms and political context involved. **Journal for nature conservation**, v. 65, p. 126115, 2022.

ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto**. Editora da UFU, ed. 7, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2009.

ROUSSEL, J. R. et al. LidR: an r package for analysis of airborne laser scanning (ALS) data. **Remote Sensing Of Environment**, v. 251, p. 112061, dez. 2020.

SANTOS, A. A. **Ocorrência e impactos de microplásticos no litoral sergipano: uma abordagem socioambiental**. Dissertação (mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2023, 139p.

SANTOS, W. A. **Mapeamento e Estimação de Biomassa dos Remanescentes Florestais da Bacia Hidrográfica Do Rio Poxim, SE**. Dissertação (mestrado em Recursos Hídricos). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2020. 56 p.

SANQUETTA, C. R. Análise da estrutura vertical de florestas através do diagrama h-M. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 55-67, 1995.

SER – SOCIETY FOR ECOLOGICAL RESTORATION. Traduzido por Efraim Rodrigues. Fundamentos de Restauração Ecológica. **Science & Policy Working Group**. v.2, 2004. Disponível em <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.lerf.eco.br/img/publicacoes/2004_12%20Fundamentos%20de%20Restauracao.pdf > Acesso em 23 abr 2023.

SILVA, F. A. M.; LEITE, G. S.; Bim, O.B. Florística e fitossociologia de áreas de restauração com diferentes históricos de uso. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 41, p. 1-14, 2021.

SILVA, R. T. B. **A obsolescência planejada no fomento do consumo (in)sustentável**. Dissertação (mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2023, 101p.

SOUZA, A. L.; SOARES, C. P. B. **Florestas nativas: estrutura, dinâmica e manejo**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2013.

TANG, D. Y.; ZHANG, Y. Do shareholders benefit from green bonds? **Journal of Corporate Finance**, v.61, abril de 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jcorpfin.2018.12.001>> Acesso em: 23 set 2021.

TEMBA, P. **Fundamentos da fotogrametria**. Departamento de Cartografia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), 2000.

VELAZCO, S. J. E., et al. Florística e Fitossociologia de uma Floresta Estacional Semidecidual, Reserva Privada Osununú-Misiones, Argentina. **Floresta e Ambiente**, v. 22, ed. 1, jan – mar, 2015. Disponível em <<https://doi.org/10.1590/2179-8087.038513>> Acesso em 16 ago 2023.

WALLACE, L., et al. Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. **Forests**, v.7 n.3, p. 62-78. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/f7030062>> Acesso em: 31 maio 2023.

WANG, Z. GINZLER, C. WASER, L. T. Um novo método para avaliar mudanças de cobertura florestal de curto prazo baseado em modelos digitais de superfície a partir de nuvens de pontos baseadas em imagens. **For. Int. J. For.** 2015, p. 429 - 440. Disponível em <<https://doi.org/10.1093/forestry/cpv012>> Acesso em 21 ago 2023.

ZAHAWI, R. A. et al. Using lightweight unmanned aerial vehicles to monitor tropical forest recovery. **Biological Conservation**. v.186, jun 2015, p. 287-295. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2015.03.031>> Acesso em: 22 set 2021.