



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/05.06.20.54-TDI

DINÂMICAS DE REGENERAÇÃO FLORESTAL NA MATA ATLÂNTICA: INTEGRAÇÃO DE DADOS MULTI-SENSORES E MEDIDAS DE CAMPO

Marcelo Cardoso da Silva Bandoria

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelas Dras. Laura de Simone
Borma, Liana Oighenstein
Anderson, aprovada em 30 de
abril de 2020.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/42EKG7L>

INPE
São José dos Campos
2020

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA N° 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/05.06.20.54-TDI

DINÂMICAS DE REGENERAÇÃO FLORESTAL NA MATA ATLÂNTICA: INTEGRAÇÃO DE DADOS MULTI-SENSORES E MEDIDAS DE CAMPO

Marcelo Cardoso da Silva Bandoria

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelas Dras. Laura de Simone
Borma, Liana Oighenstein
Anderson, aprovada em 30 de
abril de 2020.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/42EKG7L>

INPE
São José dos Campos
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Bandoria, Marcelo Cardoso da Silva.

B223d Dinâmicas de regeneração florestal na Mata Atlântica: integração de dados multi-sensores e medidas de campo / Marcelo Cardoso da Silva Bandoria. – São José dos Campos : INPE, 2020. xxviii + 181 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/05.06.20.54-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.

Orientadoras : Dras. Laura de Simone Borma, Liana Oighenstein Anderson.

1. Sentinel-2 MSI. 2. Landsat TM, ETM+ e OLI. 3. Sensoriamento remoto multiespectral. 4. DAP. 5. IAF. I.Título.

CDU 528.8:630*23



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Serviço de Pós-Graduação - SEPGR
Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto

DEFESA FINAL DE DISSERTAÇÃO DE MARCELO CARDOSO DA SILVA BANDORIA

No dia 30 de abril de 2020, as 09h, por videoconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Sensoriamento Remoto. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca Examinadora e revisão final pelo(s) orientador(es).

Novo Título: "DINÂMICAS DE REGENERAÇÃO FLORESTAL NA MATA ATLÂNTICA: INTEGRAÇÃO DE DADOS MULTI-SENSORES E MEDIDAS DE CAMPO"

Eu, Lênio Soares Galvão, como Presidente da Banca Examinadora, assino esta ATA em nome de todos os membros.

Membros da Banca

Dr. Lenio Soares Galvão - Presidente INPE
Dra. Laura de Simone Borma - Orientador(a) INPE
Dra. Liana Oighenstein Anderson - Orientador(a) CEMADEN
Dr. Mauro Brum Monteiro Junior - Convidado(a) Univ. of Arizona



Documento assinado eletronicamente por **Lênio Soares Galvão, Pesquisador**, em 22/09/2020, às 11:04 (horário oficial de Brasília), com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **5889096** e o código CRC **0C691F57**.

À toda comunidade pobre da zona Sul.

Racionais Mc's

AGRADECIMENTOS

À toda minha família, sobretudo a minha mãe Maria do Socorro Cardoso da Silva e meu tio José Nael Bandoria, pela educação e amor incondicionais.

Às minhas orientadoras Dra. Laura De Simone Borma (CCST/INPE) e Dra. Liana Oighenstein Anderson (CEMADEM), pela oportunidade, ensinamentos, amizade, correções e pelo tempo gasto no apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

À toda a equipe do Laboratório de Ecohidrologia (LabEcoh/CCST-INPE) em nome da Dra. Laura De Simone Borma.

Ao Departamento de Sensoriamento Remoto (DSR) pelo apoio dos colegas pesquisadores e alunos da minha turma (2018-2019).

Ao Sr. Roberto Braga proprietário da área de estudo pela parceria, apoio e disponibilização da sua propriedade para pesquisas ambientais.

A Fundação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelo recurso da bolsa de mestrado, nº 88882.330692/2019-01, referente ao período de março de 2018 a março de 2020 do Programa CAPES – PROEX (Programa de Excelência Acadêmica), sem a qual esse trabalho não teria sido possível de ser realizado.

Ao projeto CAPES-ANA pelo suporte de recursos que possibilitaram as campanhas de campo à Estação Experimental Solo Planta Atmosfera de São Francisco Xavier (EESPA-SFX).

RESUMO

Desmatamento e degradação florestal são processos que impactam diretamente os estoques de carbono, biodiversidade, reservas hídricas e o clima, promovendo ampla perda de serviços ecossistêmicos. Na convenção de Paris, o Brasil assumiu ratificado através da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), de restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas até 2030. Grande parte dessas ações devem se dar no bioma Mata Atlântica e metodologias baseadas em imagens satelitais contribuirão para o monitoramento e verificação do acordo. Apesar dos grandes avanços técnicos sobre metodologias de mapeamento de desmatamento, a detecção dos diferentes graus de regeneração florestal, são ainda incipientes. Nesse sentido, o presente trabalho teve por objetivos identificar, por meio de inventários de campo (resolução CONAMA no 1 de 1994) e sensoriamento remoto orbital as diferentes idades de fragmentos de Mata Atlântica na Estação Experimental Solo Planta Atmosfera de São Francisco Xavier (EESPA-SFX), localizada no município de São José dos Campos, SP, administrada pelo Laboratório de Ecohidrologia (LabEcoh/CCST-INPE). Através de produtos de sistemas sensores multiespectrais (Landsat TM; ETM +; OLI) analisou-se mudanças temporais (1984-2019) e investigou-se processos em escala média-pequena (Sentinel-2 A e B MSI) (2019) sobre parcelas em regeneração da vegetação da Mata Atlântica. A metodologia baseou-se em Índices de Vegetação simples e ajustados (NDVI, EVI e SAVI) e frações espectrais (vegetação, solo e sombra) obtidas pelo Modelo Linear de Mistura Espectral. Foram associadas medidas de SR e dados de campo, de crescimento de tronco, Índice de Área foliar e produção de serrapilheira, obtidos em 2019 na área (EESPA-SFX). Os resultados apontam que as metodologias combinadas de SR e levantamento *in situ* permitiram identificar as idades aproximadas de três áreas em diferentes estágios de regeneração, a saber, Ri (regeneração inicial) com cerca de 7 anos, Rm (regeneração intermediária) com cerca de 20 anos e, Ra (regeneração avançada), com > 40 anos. A análise interanual, EVI e SAVI do Landsat mostraram diferenças significativas ($p < 0,05$) entre essas áreas. Através da reamostragem simples e iteração de 10000 vezes, o discernimento alcançou 95% de credibilidade. Esse resultado sugere que os dados Landsat foram sensíveis na detecção de processos de regeneração florestal em paisagens heterogêneas, na escala do presente trabalho. Foram selecionadas um conjunto de imagens Sentinel-2 MSI sobre o ano de 2019 e extraídos os IVs, ajustada uma biblioteca espectral para as áreas estudadas e extraídas as frações espectrais de cada parcela, que foram comparados aos resultados das medidas de campo. Na análise intra-anual, o NDVI do Sentinel-2 se mostrou mais sensível para detecção dos diferentes estágios ($p < 0,05$). A variável incremento acumulado explicou o EVI em 17% para Rm e o NDVI em 34% para Ra. A variável IAF explicou o EVI em 21% para Rm, o NDVI em 20% para Rm e o SAVI em 18% para Rm. Em relação às frações espectrais a parcela P apresentou separabilidade em todas as frações. Destacamos que a fração solo apenas não separou as parcelas Ri e Ra. Em termos de características e evolução dos processos nos 3 estágios sucessionais as medidas de tronco apontam que a taxa de crescimento da regeneração inicial é maior em relação às outras parcelas. A Biomassa Acima do Solo (BAS) calculada foi maior na Ra em relação aos outros estágios, e apresentou diferença entre Rm e Ra. Ainda sob reamostragem simples, as variáveis Índice de Área Foliar (IAF) e serrapilheira diferenciam as parcelas Ri e Ra, sob 95% de credibilidade. Verificou-se sincronidade

entre as variáveis de incremento acumulado e IAF sobre a parcela Ri, o que sugere sincronismo entre crescimento de tronco e folhas sobre a área. O cruzamento com dados de campo apontou que na parcela Ri, a BAS e incremento acumulado, explicam respectivamente 22% da variação da fração sombra, o IAF e a serrapilheira, explicam respectivamente 22% e 17% a fração solo (valor-p < 0,05). Já na parcela Rm a BAS e IAF, explicaram respectivamente 18% e 23% da variação das frações solo e sombra (valor-p < 0,05), o incremento acumulado e serrapilheira não apresentaram valores significativos para nenhuma fração espectral. Na parcela Ra o incremento acumulado e IAF, explicam respectivamente 76% e 13% as frações solo e vegetação (valor-p < 0,05), IVs e frações sob intervalo de credibilidade de 95%. Em linhas gerais, esse estudo mostrou que, apesar das limitações, foi possível driblar o desafio de associar medidas por SR e medidas *in situ* em fragmentos de florestas em diferentes estágios de regeneração e usar SR orbital, por meio de IVs – tanto do Landsat quanto do Sentinel-2, quando tratamentos apropriados são aplicados. Conclui-se que os dados derivados do satélite Sentinel-2 apresentam o potencial para serem utilizados para verificação do crescimento de florestas secundárias, e podem ser utilizados para caracterização das diferentes idades e estruturas destas florestas.

Palavras-chave: Sentinel-2 MSI. Landsat TM, ETM+ e OLI. Sensoriamento remoto multiespectral. DAP. IAF. Serrapilheira. Regeneração da Mata Atlântica.

DYNAMICS OF FOREST REGENERATION IN THE ATLANTIC FOREST: INTEGRATION OF MULTI-SENSOR DATA AND FIELD MEASUREMENTS

ABSTRACT

Deforestation and forest degradation are processes that directly impact carbon stocks, biodiversity, water reserves and the climate, promoting a wide loss of ecosystem services. At the Paris Convention, Brazil was ratified through the Nationally Determined Contribution (NDC), to restore and reforest 12 million hectares of forests by 2030. Most of these actions should take place in the Atlantic Forest biome and methodologies based on satellite images will contribute to monitoring and verification of the agreement. Despite major technical advances in deforestation mapping methodologies, the detection of different degrees of forest regeneration is still incipient. In this sense, the objective of the present work was to identify, by means of field inventories (CONAMA resolution 1 of 1994) and remote orbital sensing, the different ages of fragments of the Atlantic Forest in the Experimental Soil Atmosphere Station of São Francisco Xavier (EESPA- SFX), located in the city of São José dos Campos, SP, managed by the Ecohydrology Laboratory (LabEcoh / CCST-INPE). Through multispectral sensor system products (Landsat TM; ETM +; OLI), temporal changes (1984-2019) were analyzed and processes were investigated on a small-medium scale (Sentinel-2 A and B MSI) (2019) on regenerating parcels in Atlantic Forest vegetation. The methodology was based on simple and adjusted Vegetation Indices (NDVI, EVI and SAVI) and spectral fractions (vegetation, soil and shade) obtained by the Linear Spectral Mixture Model. Remote sensing measurements and field data, stem growth, leaf area index and litter production, obtained in 2019 in the (EESPA-SFX) were associated. The results show that the combined methodologies of SR and in situ survey allowed to identify the approximate ages of three areas in different stages of regeneration, namely, Ri (initial regeneration) with about 7 years, Rm (intermediate regeneration) with about 20 years and, Ra (advanced regeneration), > 40 years. Landsat's interannual analysis, EVI and SAVI showed significant differences (p-value <0.05) between these areas. Through simple resampling in 10000 interactions, the confidence reached 95% credibility. This result suggests that the Landsat data were sensitive in the detection of forest regeneration processes in heterogeneous landscapes, on the scale of the present work. A set of Sentinel-2 MSI images for the year 2019 were selected, obtained by Google Earth Engine (GEE) and the IVs were extracted, a spectral library was adjusted for the studied areas and the spectral fractions of each plot were extracted, which were compared results of field measurements. In the intra-annual analysis, the Sentinel-2 NDVI was more sensitive for detecting the different stages (p-value <0.05). The accumulated increment variable explained EVI in 17% for Rm and NDVI in 34% for Ra. The LAI variable explained EVI in 21% for Rm, NDVI in 20% for Rm and SAVI in 18% for Rm. In relation to spectral fractions, the P portion presented description in all fractions. We emphasize that the soil fraction did not separate the Ri and Ra plots. In terms of characteristics and evolution of the processes in the 3 successional stages, the accumulated wood growth measures indicate that the growth rate of the initial regeneration is higher in relation to the other plots. The Above Ground Biomass (AGB) calculated was higher in Ra compared to the other stages, and showed a

difference between Rm and Ra. Still under simple resampling, the Leaf Area Index (LAI) and litter variables differentiate the Ri and Ra plots, under 95% credibility. There was synchronicity between the accumulated increment and LAI variables on the Ri plot, which suggests synchrony between trunk and leaf growth over the area. The crossing with field data showed that in the Ri plot, the AGB and accumulated increment, respectively explain 22% of the variation of the shadow fraction, the LAI and the litter, respectively explain 22% and 17% of the soil fraction (p-value <0.05). In the Rm plot, AGB and LAI explained 18% and 23%, respectively, of the variation of soil and shade fractions (p-value <0.05), the accumulated wood growth and litter did not show significant values for any spectral fraction. In the Ra plot, the accumulated wood growth and LAI, respectively, account for 76% and 13% of the soil and vegetation fractions (p-value <0.05), IVs and fractions under a 95% credibility interval. In general, this study showed that, despite the limitations, it was possible to circumvent the challenge of associating measures by SR and measures in situ in forest fragments in different stages of regeneration and using orbital SR, through IVs - both from Landsat and of Sentinel-2, when appropriate treatments are applied. It is concluded that the data derived from the Sentinel-2 satellite have the potential to be used to verify the growth of secondary forests, and can be used to characterize the different ages and structures of these forests.

Keywords: Sentinel-2 MSI. Landsat TM, ETM + and OLI. Multispectral remote sensing. DBH. LAI. Litter. Regeneration of the Atlantic Forest.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 1.1 – Organograma estrutural da dinâmica entre as perguntas, objetivos específicos, métodos, e produtos da presente dissertação. As caixas em bege representam dados de SR, em verde dados de campo e azul as análises principais.	9
Figura 2.1 – Organograma do modelo conceitual adotado. As etapas são: (a) entendimento do contexto de florestas, (b) busca de técnicas e modelos que consigam detectar o processo de recuperação e (c) desafio em recuperar ambientes degradados e a recuperação de florestas.....	23
Figura 3.1 – Área de estudo, inserida na Área de Proteção de São Francisco Xavier (APA-SFX), município de São José dos Campos - SP. Imagem do sensor MSI do satélite Sentinel-2A de 11 de julho de 2019; composição colorida RGB e resolução espacial de 10 m. A Figura foi elaborada com dados: IBGE (2017), Map Biomas (2018) e ESA (2019). As áreas em verde escuro representam a paisagem em processo de regeneração de Mata Atlântica inseridas num contexto de uso da terra com a presença de mosaicos de agricultura e pastagem.	28
Figura 3.2 – Localização das parcelas de interesse na área de estudo. A imagem Sentinel-2B de 03 de novembro de 2019, composição colorida RGB e resolução espacial de 10 m. Figura elaborada com dados: IBGE (2017) e ESA (2019).	29
Figura 3.3 –Área de pasto, estágio zero de regeneração, delimitada na parcela em laranja.	30
Figura 3.4 – Estágio inicial de regeneração, parcela delimitada pela linha em amarelo. Imagem gerada por VANT, em 12 junho de 2019 por WRI Brasil, resolução espacial de 2,5 cm.	31
Figura 3.5 – Estágio intermediário de regeneração, imagem gerada por VANT, em 12 junho de 2019 por WRI Brasil, resolução espacial de 2,4 cm.	32
Figura 3.6 – Estágio avançado de regeneração, imagem gerada por VANT, em 12 junho de 2019 por WRI Brasil, resolução espacial de 5 cm.	33
Figura 3.7 – Variabilidade da precipitação acumulada média anual da área de estudo ao longo do tempo. Em cinza claro a série CHIRPS e em cinza escuro a série ANA-SFX.41	

Figura 3.8 – Regressão linear entre a precipitação média mensal da área de estudo ao longo do tempo. Série maior do CHIRPS validada em 90% em relação aos dados disponíveis da estação ANA-SFX (n = 227).	41
Figura 3.9 – Estação meteorológica.	42
Figura 3.10 – Gráfico de temperatura do ar e precipitação para o período de fevereiro a dezembro de 2019.....	43
Figura 3.11 – Fita dendrométrica de banda metálica usada para medir o crescimento do tronco, distribuída em 60 indivíduos que foram monitorados durante o período de 2019	44
Figura 3.12 – Imagem do sensor do equipamento utilizado em campo para obtenção do índice de área foliar (IAF). Nesta fotografia é mostrado o cuidado com o posicionamento do sensor em relação ao nivelamento e direção geográfica.....	45
Figura 3.13 - Coletor de serrapilheira.....	47
Figura 3.14 – Organograma da metodologia adotada para a presente dissertação. Cada etapa metodológica refere-se a um dos objetivos específicos (OE) propostos. As caixas em amarelo representam os dados de SER, as verdes os dados de campo e a cor cinza representa os métodos.....	50
Figura 3.15 – Delimitação das parcelas do estágio de regeneração inicial (Ri) realizado pelo uso de um filtro de 3x3 pixels (a), destacando a área total em cor ciano (b) e os ajustes para delimitação final (c).	51
Figura 3.16 – Delimitação das parcelas do estágio de regeneração intermediário (Rm) realizado pelo uso de um filtro de 3x3 pixels (a), destacando a área total em cor ciano (b) e os ajustes para delimitação final (c).....	52
Figura 3.17 – Delimitação das parcelas do estágio de regeneração avançada (Ra) realizado pelo uso de um filtro de 3x3 pixels (a), destacando a área total em cor ciano (b) e os ajustes para delimitação final (c).	53
Figura 3.18 – Variação dos IVs ao longo do tempo analisado por imagens da série Landsat. Vemos também a precipitação acumulada anual.	57
Figura 3.19 – A coleção de imagens representa o processo de análise da evolução da regeneração florestal da área de estudos feita através da série de imagens Landsat. Essa figura apresenta 4 imagens, sendo (a) composição colorida verdadeira (RGB), (b) composição colorida falsa cor destacando a vegetação no infravermelho próximo, (c)	

índice de vegetação por diferença normalizada e (d) índice de vegetação melhorado. Elencamos os meses que representam o período seco para análise do processo de regeneração.....	58
Figura 3.20 – Comportamento espectral de cada conjunto de bibliotecas espectrais (m1, m2 e m3).....	65
Figura 4.1 – Série temporal dos valores médios máximos e desvio padrão dos índices de vegetação NDVI e EVI obtidos pela série Landsat sobre a parcela Ri, destacando a mudança de padrão entre dois períodos.....	73
Figura 4.2 – Série temporal dos valores médios máximos do índices de vegetação NDVI e EVI obtidos pela série Landsat sobre a parcela Rm, destacando o período da mudança de padrão temporal testado.	75
Figura 4.3 – Série temporal dos valores médios máximos do índices de vegetação NDVI e EVI obtidos pela série Landsat sobre a parcela Ra.....	76
Figura 4.4 – Gráfico de anomalia obtido das médias mensais e média anual dos dados de precipitação (CHIRPS) e das médias mensais e anuais de temperatura da superfície (NCEP/NCAR). Essa anomalia é calculada sobre a série subtraída pela média temporal que foi de 95 mm. A análise do gráfico destaca a variabilidade das variáveis em torno do valor médio de cada série. São destacados os períodos seco em vermelho e chuvoso em azul, além da linha preta pontilhada que representa a anomalia média anual.	79
Figura 4.5 – Série temporal longa (todos os pixels) dos IVs e dados médios de precipitação (período seco e úmido), extraídos das parcelas em regeneração inicial (Ri).80	
Figura 4.6 – Série temporal longa (todos os pixels) dos IVs e dados médios de precipitação (período seco e úmido), extraídos das parcelas em regeneração intermediária (Rm).....	81
Figura 4.7 – Série temporal longa (todos os pixels) dos IVs e dados médios de precipitação (período seco e úmido), extraídos das parcelas em regeneração avançada (Ra).	82
Figura 4.8 – Gráfico de dispersão entre IVs da série Landsat em relação a variáveis climatológicas de precipitação e temperatura.....	83
Figura 4.9 – Gráfico de regressão linear entre as variáveis climáticas e os IVs da série Landsat. As áreas sombreadas indicam um intervalo de credibilidade de 95%.	85

Figura 4.10 – Gráfico da decomposição da série Landsat em uma escala mensal, mostrando padrões de tendência e sazonalidade de cada parcela em regeneração, destacando desde o ano de 2012.....	87
Figura 4.11 – Gráfico de densidade de distribuição dos valores dos IVs de cada área para cada iteração feita no processo de reamostragem.....	88
Figura 4.12 – Gráfico de diferenças de médias entre cada estágio de regeneração (Ri, Rm e Ra) para os três índices de vegetação estudados – EVI, NDVI e SAVI, considerando um intervalo de credibilidade de 95%.	89
Figura 4.13 – Gráfico de decomposição de diferença entre médias entre as estações seca e chuvosa entre as parcelas.....	90
Figura 4.14 – Gráfico de correlação cruzada (Pearson) sobre os diferentes tempos de resposta dos IVs em relação a precipitação.	91
Figura 4.15 – Gráfico da série temporal dos IVs obtidos das imagens Sentinel-2, que busca expressar a flutuação dos IV ao longo do tempo para cada parcela em relação ao regime de chuvas acumulado por mês obtido na área.	98
Figura 4.16 – Gráfico de densidade de distribuição da média dos IVs de cada área para a iteração feita no processo de reamostragem. Aponta diferenças entre médias das áreas.99	99
Figura 4.17 – Gráfico de diferença de médias entre cada parcela em relação aos IVs. Quando uma possibilidade dessa diferença é igual a zero, considera-se que não há evidências para considerar uma diferença significativa entre as áreas, considerando um intervalo de credibilidade de 95%.	100
Figura 4.18 – Gráfico de correlação cruzada (Pearson) entre os IVs obtidos da coleção de imagens Sentinel-2 em relação a precipitação do período analisado.	101
Figura 4.19 – Gráfico de regressão linear entre variáveis climáticas e IVs da série Sentinel. As áreas sombreadas indicam um intervalo de credibilidade de 95%.....	102
Figura 4.20 – Gráfico da série temporal do incremento acumulado de grupo de indivíduos amostrados que buscam representar o comportamento de cada área. Podemos observar que a diversidade entre as mesmas difere pouco em relação a quantidade de espécies.	103
Figura 4.21 – Gráfico de densidade de distribuição da média dos dados de campo (originais). A distribuição dos valores do IAF apresentou maior separabilidade entre as parcelas, não sendo observado entre as outras variáveis.	104

Figura 4.22 – Gráfico de densidade de distribuição da média dos dados de campo de cada área para uma iteração de 10000 vezes feita no processo de reamostragem. Dessa forma os resultados apontam diferenças entre médias que separam melhor as parcelas.	105
Figura 4.23 – Gráfico de diferença de médias entre cada parcela em relação as variáveis de campo, considerando um intervalo de credibilidade de 95%.	106
Figura 4.24 – Gráfico de correlação cruzada (Pearson) entre variáveis de campo (Incremento acumulado, IAF e serrapilheira) e variáveis meteorológicas (precipitação e temperatura) em relação às parcelas de diferentes estágios de regeneração.	107
Figura 4.25 – Resultados da aplicação do MLME baseados no método 1 (SOUZA et al., 2005; BULLOCK et al., 2018) utilizado como referência de biblioteca espectral e suas respectivas frações: a) <i>Green vegetation</i> (GV), vegetação verde e/ou viva, b) <i>Non-photosynthetic vegetation</i> (NPV), vegetação não fotossinteticamente ativa, c) Solo e d) Sombra, aplicado às imagens Sentinel-2.	109
Figura 4.26 – Coleção de gráficos que representam os resultados no método 1 (SOUZA et al., 2005; BULLOCK et al., 2018) utilizado frações: a) vegetação, b) Solo e c) Sombra, testados nas imagens Sentinel-2, referentes ao ano de 2019.	110
Figura 4.27 – Coleção de gráficos que representam os resultados obtidos com o método 3 (BANDORIA, 2020) ajustados espectralmente as frações: a) vegetação, b) Solo e c) Sombra, às imagens Sentinel-2, referentes ao ano de 2019.	111
Figura 4.28 – Gráfico de correlação cruzada (Pearson) entre os valores das frações espectrais obtidos da coleção de imagens Sentinel-2 em relação a precipitação do período analisado (2019).	112
Figura 4.29 – Gráfico de regressão linear entre variáveis climáticas e valores de frações espectrais obtidos da série Sentinel-2. As áreas sombreadas indicam um intervalo de credibilidade de 95%.	113
Figura 4.30 – Gráfico da série temporal de BAS (Mg/ha) nas três parcelas em diferentes estágios de regeneração. Podemos verificar que a Ri entre outubro e novembro apresentou um aumento significativo em relação a BAS da parcela Rm.	114
Figura 4.31 – Gráfico de regressão linear entre variáveis de campo e IVs obtidos do Sentinel-2 MSI.	116
Figura 4.32 – Diferença de médias entre cada parcela em relação às frações espectrais. Quando uma possibilidade dessa diferença é igual a zero, considera-se que não há	

evidências para considerar uma diferença significativa entre as áreas, considerando um intervalo de credibilidade de 95%	117
Figura 4.33 – Regressão linear entre variáveis de campo e frações obtidos pelo método 3 (BANDORIA, 2020) das imagens Sentinel-2.	118
Figura A.1 – Trecho do código comentado que foi utilizado no <i>script</i> do GEE para realizar a filtragem de nuvens e sombra de nuvens na extração dos índices nas imagens da série Landsat.	157
Figura A.2 – Trecho de código comentado com os três métodos e seus respectivos valores espectrais que foram utilizados no Google Earth Engine (GEE) na presente dissertação	158
Figura B1 – A primeira imagem analisada foi do ano de 1987, obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, como referência inicial de análise do processo de regeneração da área de estudo.	161
Figura B2 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 1989.	162
Figura B3 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 1991.	163
Figura B4 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 1992.	164
Figura B5 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 1998.	165
Figura B6 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 1999.	166
Figura B7 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2001.	167
Figura B8 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2002.	168
Figura B9 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2003.	169
Figura B10 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2004.	170

Figura B11 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2005.	171
Figura B12 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2006.	172
Figura B13 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2007.	173
Figura B14 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2009.	174
Figura B15 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2010.	175
Figura B16 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2013.	176
Figura B17 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 8, sensor OLI, referente ao ano de 2014.....	177
Figura B18 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 8, sensor OLI, referente ao ano de 2016.....	178
Figura B19 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 8, sensor OLI, referente ao ano de 2018.....	179
Figura B20 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 8, sensor OLI, referente ao ano de 2019.....	180

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1 – Características dos dados utilizados, divididos entre dados de sensoriamento remoto e dados de campo.	34
Tabela 3.2 – Coletânea de imagens Sentinel-2 obtidas na plataforma <i>Copernicus Open Access Hub</i> (ESA, 2019), observa-se que para cobrir toda a área de estudo foram utilizadas duas imagens, quando disponíveis, por data.	36
Tabela 3.3 – Características das imagens do sensor MSI da plataforma Sentinel-2 e as bandas utilizadas para o desenvolvimento da presente dissertação.....	37
Tabela 3.4 – Características das imagens dos sensores utilizados da série Landsat que foram utilizadas para o desenvolvimento da presente dissertação.	38
Tabela 3.5 – Descrição dos critérios utilizados pela resolução CONAMA n°1 de 31 de janeiro de 1994, para diferenciar cada estágio de regeneração da Mata Atlântica no Estado de São Paulo.	48
Tabela 3.6 – Critérios utilizados para análise dos estágios em regeneração segundo critérios descritivos qualitativo-quantitativos.....	49
Tabela 3.7 – Média dos valores espectrais de cada fração, solo, vegetação e água/sombra, obtidos da coleção de imagens Sentinel-2.....	64
Tabela 3.8 – Referências das bibliotecas espectrais e dos métodos do MLME desenvolvidos para a série Landsat e testados no trabalho. Tais referências foram base de apoio para a adaptação do método (m3) para as imagens Sentinel-2 utilizadas na presente dissertação.	65
Tabela 4.1 – A Tabela mostra os parâmetros obtidos do resultado do teste t, que apresentou p-valor significativo para os IVs, apontando que as médias testadas foram diferentes.	73
Tabela 4.2 – A Tabela mostra os parâmetros obtidos do resultado do teste t, que apresentou p-valor significativo para o NDVI, apontando que as médias testadas foram diferentes.	74
Tabela 4.3 – A Tabela mostra os parâmetros obtidos do resultado do teste t, que apresentou p-valor significativo para o NDVI.	76

Tabela 4.4 – Resultados da caracterização das idades das parcelas em comparativo entre informações obtidas por entrevista com o atual proprietário e os resultados obtidos pela análise apresentada neste estudo.....	77
Tabela 4.5 – Descritores Quantitativos.....	92
Tabela 4.6 – Descritores Qualitativos.....	94
Tabela 4.7 – Relação de espécies e famílias identificadas em cada parcela.	95
Tabela 4.8 – Espécies dominantes em cada parcela de regeneração, sua ocorrência em quantidade e característica de endemismo e origem.	96
Tabela 4.9 – Correlação de Pearson das variáveis obtidas em campo com relação aos IVs obtidos pelo Sentinel-2 e seus respectivos coeficientes de correlação e valores-p.	120
Tabela 4.10 – Correlação de Pearson entre as variáveis obtidas em campo e as frações espectrais obtidas pelo Sentinel-2 e seus respectivos coeficientes de correlação e valores-p.	121
Tabela A1 – Características do sensor MSI do Sentinel-2.....	159
Tabela A2 – Características dos sensores da série Landsat (5-TM , 7-ETM + e 8-OLI).160	

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APA	Área de Proteção Ambiental
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
BAS	Biomassa Acima do Solo
CAP	Circunferência a Altura do Peito
CCD	<i>Cold Cloud Duration</i>
CCST	Centro de Ciência do Sistema Terrestre
CFMASK	<i>Code based on the Function of Mask</i>
CHIRPS	<i>Climate Hazards group Infrared with Stations</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COP	Conferência das Partes
DAP	Diâmetro a Altura do Peito
ESA	<i>European Space Agency</i>
EESPA	Estação Experimental Solo-Planta-Atmosfera
ENVI	<i>Environment for Visualizing Images</i>
ETM +	<i>Enhanced Thematic Mapper plus</i>
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
FBDS	Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável
GEE	<i>Google Earth Engine</i>
GSD	<i>Ground Sample Distance</i>
IAF	Índice de Área Foliar
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
iNDC	<i>intended Nationally Determined Contribution</i>
IVs	Índices de Vegetação
JRC	<i>Joint Research Centre</i>
LANDSAT	<i>Land Remote Sensing Satellite</i>
LEDAPS	<i>Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System</i>
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
MDS	Modelos Digitais de Superfície
MLME	Modelo Linear de Mistura Espectral
MODIS	<i>Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer</i>

MSI	<i>MultiSpectral Instrument</i>
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Center for Environmental Prediction</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
ONU	Organizações das Nações Unidas
PRODES	Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite
PSA	Pagamento por Serviços Ambientais
PVC	Policloreto de Vinila
RADAR	<i>Radio Detection And Ranging</i>
RPPN	Reserva Particular do Patrimônio Natural
ROI	<i>Region of Interest</i>
SfM	<i>Structure for Motion</i>
SFX	São Francisco Xavier
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SLC	<i>Scan Line Correction</i>
SNAP	<i>Sentinel Application Platform</i>
SONAR	<i>Sound Navigation and Ranging</i>
SPG	Serviço de Pós-Graduação
SR	Sensoriamento Remoto
SID	Serviço de Informação e Documentação
TM	<i>Thematic Mapper</i>
TDI	Teses e Dissertações Internas
UE	União Europeia
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
WRI	<i>World Resources Institute</i>
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	7
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1 Colapso dos sistemas sócio ecológicos em processo de resiliência	10
2.1.1 Desmatamento histórico da Mata Atlântica.....	12
2.1.2 Transformação florestal e detecção remota	12
2.1.3 Importância ambiental da Mata Atlântica e sua recuperação	13
2.2 Detecção da vegetação por sensoriamento remoto	14
2.2.1 Conceitos interdisciplinares.....	14
2.2.2 Limitações intrínsecas ao uso do SR	15
2.3 Florestas secundárias.....	17
2.3.1 Regeneração e florestas secundárias.....	17
2.3.2 Abordagens em campo	18
2.3.3 Sensoriamento remoto aplicado à investigação sobre regeneração florestal.....	19
2.3.3.1 Índices de vegetação.....	20
2.4 Modelo Linear de Mistura Espectral - MLME.....	21
2.5 Modelo conceitual	22
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Área de estudo.....	27
3.2 Conjunto de dados e pré-processamento.....	33
3.2.1 Dados de sensoriamento remoto.....	35
3.2.1.1 Sentinel-2.....	35
3.2.1.2Pré-processamento das imagens Sentinel-2.....	35
3.2.1.3 Imagens da série Landsat.....	37
3.2.1.4 Pré-processamento das imagens Landsat	39
3.2.1.5 Temperatura de superfície	39
3.2.1.6 Precipitação.....	40
3.2.2 Dados de campo.....	42
3.2.2.1 Estação meteorológica	42

3.2.2.2 Dados de crescimento das árvores.....	43
3.2.2.3 Índice de área foliar	44
3.2.2.4 Serrapilheira.....	46
3.2.2.5 Inventário florestal <i>adaptado</i>	47
3.3 Métodos.....	49
3.3.1 Desenho amostral	50
3.3.1.1 Sensoriamento remoto	50
3.3.1.2 Campo.....	53
3.3.2 Índices de vegetação.....	54
3.3.3 Caracterização das idades dos estágios de regeneração pela série Landsat e dados de precipitação (Objetivo Específico-1).....	56
3.3.4 Caracterização dos estágios de regeneração florestal sucessional pela resolução nº1 CONAMA (Objetivo Específico-2).....	59
3.3.5 Medidas em campo: IAF, crescimento de árvores e serrapilheira (Objetivo Específico-4).....	61
3.3.5.1 Índice de Área Foliar (IAF).....	61
3.3.5.2 Crescimento de árvores – medidas dendrométricas	62
3.3.5.3 Serrapilheira.....	62
3.3.6 Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) (Objetivo Específico-5).....	63
3.3.7 Biomassa Acima do Solo (BAS) em cada estágio de regeneração (Objetivo Específico-6).....	65
3.3.8 Análises e testes estatísticos (Objetivo Específico-7)	66
3.3.8.1 Análise interanual	67
3.3.8.1.1 Efeitos climáticos na cobertura de vegetação.....	67
3.3.8.2 Análise intra-anual.....	68
3.3.8.2.1 Análise dos dados de campo.....	69
3.3.8.2.2 Análise da BAS no processo de regeneração	70
3.3.8.2.3 Análise biofísica sobre as parcelas por meio dos IVs, MLME e comparações com os dados de campo	70
4 RESULTADOS	72
4.1 Análise interanual.....	72

4.1.1 Caracterização temporal das parcelas em regeneração obtida através das imagens da série Landsat (OE-1).....	72
4.1.2 Influência do clima sobre as paisagens.....	77
4.2 Análise intra-anual	92
4.2.1 Caracterização dos estágios sucessionais da vegetação sobre as parcelas com base na resolução nº1 CONAMA de 1994 (OE-2).....	92
4.2.1.1 Análise quantitativa	92
4.2.1.2 Análise qualitativa	93
4.2.2 Análise da relação de dominância das espécies em cada parcela.....	94
4.2.3 Análise da cobertura de vegetação por IVs – Sentinel-2 (OE - 3)	97
4.2.4 Medidas em campo: crescimento de árvores, IAF e serrapilheira (OE-4)	103
4.2.5 Frações espectrais (MLME) (OE-5)	108
4.2.6 A BAS em cada estágio de regeneração sucessional (OE-6)	114
4.2.7 Correlações entre dados de campo e Sentinel-2 (OE-7).....	115
5 DISCUSSÃO	122
5.1 Qual a contribuição do uso de dados da série Landsat e Sentinel-2 para a detecção e caracterização de regeneração florestal?	122
5.1.1As informações obtidas pelo Sentinel-2 MSI são mais sensíveis à detecção sobre o processo de regeneração?	125
5.2 Qual é a importância do processo de regeneração florestal para o clima?.....	128
5.3 Qual a importância dos dados de campo para o entendimento do processo de regeneração florestal detectados por sensoriamento remoto (SR)?.....	129
5.4 Qual é o ritmo de crescimento da floresta em regeneração sucessional?.....	132
5.5 Qual a importância das novas ferramentas de processamento e sua interação com dados de ‘recentes’ sistemas sensores?	133
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	135
6.1 Trabalhos futuros.....	138
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139
APÊNDICE A - INFORMAÇÕES SUPLEMENTARES	157
APÊNDICE B - SEQUÊNCIA DE FIGURAS PRODUZIDAS POR MEIO DAS IMAGENS DA SÉRIE LANDSAT	161
APÊNDICE C - DETALHES SOBRE A OBTENÇÃO DAS IMAGENS VANT	181

1 INTRODUÇÃO

A transição paradigmática ambiental do século XX para o XXI se expressa no descompasso entre a busca por ações pontuais e aumento das expectativas da sociedade acerca das mudanças ambientais. Tais expectativas restam expressas em diversos relatórios de instituições reconhecidas por um grande número de países, a exemplo das questões discutidas sobre a mudança climática (IPCC, 2019).

No desenvolvimento da sociedade moderna ocorrem mudanças sociais e ambientais como reflexo dos diferentes estágios de desenvolvimento econômico de cada país inseridos cada qual de forma desigual no processo de globalização. As respostas a tais mudanças ocorrem em função dos diferentes níveis de amadurecimento do meio técnico-científico-informacional (SANTOS, 1996) e sua capacidade de utilizar tais conhecimentos. Esse descompasso é percebido pela incorporação desigual de um novo *modus operandi* na economia-política e no modo de vida de cada sociedade.

Ao longo dos séculos XIX e XX observamos, via de regra, o uso não sustentável de recursos naturais como forma de impulsionar o desenvolvimento econômico. Na transição do século XX para o século XXI, tais práticas se associam (ou se complementam) ao conceito de sustentabilidade, em crescente ascensão da agenda internacional, evidenciada pela ordem ambiental internacional (RIBEIRO, 2001) que tem como marco a Conferência de Estocolmo ocorrida em 1972. Desde então diversos Acordos e Tratados foram promovidos, visando o estabelecimento de critérios e limites a serem seguidos para nortear o chamado desenvolvimento sustentável. Inicialmente percebida nas escalas nacionais e internacionais, como a necessidade de impor limites ao trânsito de recursos naturais e materiais (fauna, flora, resíduos). A exemplo das Convenções de Viena (1969) e o Protocolo de Montreal (1985), discussão continuada na Conferência das Partes, em inglês *Conference of Parties* (COP-21, 2015), organizado pela Organização das Nações Unidas (ONU), o principal fórum de debate. Desta sequência de conferências, saiu o Acordo de Paris (2015), aprovado por 195 Estados Nacionais, ou também os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) em que o Brasil é signatário de ambos (MMA, 2020).

Até 2018 foram estabelecidos acordos entre nações acerca das ações a serem tomadas, e o Brasil assumiu algumas metas, a saber: i) a restauração de 12 milhões de hectares de florestas e implementação de cinco milhões de hectares de sistemas com integração entre lavoura, pecuária e floresta até 2030, ii) a recuperação de mais de cinco milhões de pastagens degradadas até 2020 e iii) a extinção do desmatamento ilegal (MMA, 2020). Estas metas, denominadas de Contribuição Nacionalmente Determinada, original em inglês - *intended Nationally Determined Contribution* (iNDC), da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, original em inglês *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), se propõem reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 37 % até 2025 e 43 % até 2030, ambos abaixo do nível de emissão de 2005 (2.043 milhões de tCO₂eq) (MMA, 2019).

O Brasil ocupa uma área de cerca de 8.511.000 km² que foi categorizada por Aziz Ab'Sáber (1970, 2010) em seis domínios morfoclimáticos e áreas de transição, a saber: Amazônico, Cerrados, Caatingas, Araucárias, Pradarias e Mares de Morros, este último que se situa na zona costeira atlântica brasileira, onde predomina o relevo de mares de morros e alguns chapadões florestados e a presença da Mata Atlântica, região que abriga cerca de 60% da população do país (IBGE, 2010).

A Mata Atlântica está entre os biomas brasileiros altamente degradados. As estimativas sugerem que ainda reste cerca de 11,4 % a 16% ou em estudos mais recentes 28% da sua cobertura vegetal original no período de levantamento (RIBEIRO et al., 2009; REZENDE, et al., 2018). Destacam-se, como forças motrizes deste, a ocupação histórica pelos processos de desmatamento e a forte pressão agrícola e urbana (LIMA et al., 2016). Atualmente, predominam na região matas secundárias oriundas de processos espontâneos de regeneração, principalmente sobre áreas com relevo de difícil acesso em unidades de conservação criadas pelos órgãos de governo (ROSS, 2009). A queda expressiva da taxa de desmatamento tropical nas últimas décadas, de 16 milhões de hectares/ano na década de 1990, para 13 milhões de hectares/ano no período de 2000-2010 (FAO, 2010) pode evidenciar uma tendência de recuperação florestal.

O projeto “Recuperação de Serviços de Clima e Biodiversidade no Corredor Sudeste da Mata Atlântica Brasileira” - Conexão Mata Atlântica, financiado com recursos do Fundo Mundial para o Ambiente, original em inglês *Global Environment Facility* (GEF), tem se

concentrado na recuperação de fragmentos e corredores ecológicos deste bioma. Tendo em vista que o projeto se desenvolve no bioma Mata Atlântica, onde a maior parte dos fragmentos florestais estão localizados em propriedade particular, houve a necessidade de acessar as estratégias de preservação por meio dos Pagamento por Serviços Ambientais (PSAs). No Estado de São Paulo o responsável pela gestão do programa é o Sistema Ambiental Paulista, por meio da Fundação Florestal e da Coordenadoria de Biodiversidade e Recursos Naturais da Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Esta Secretaria tem gerenciado o uso de recursos voltados para a recuperação de florestas, inclusive em São Francisco Xavier região alvo dessa pesquisa, por meio de PSAs (SERVIÇOS AMBIENTAIS, 2019).

A despeito do elevado grau de degradação, a Mata Atlântica, abriga um importante reservatório de biodiversidade, pela quantidade de espécies endêmicas existentes, motivo pelo qual é considerada um “Hot Spot” da Biodiversidade, além de que esse bioma possui enorme potencial para os serviços ecossistêmicos diversos essenciais à população ao seu entorno (MEA, 2005).

No entanto, justamente por estar localizada em região altamente habitada e antropizada, é que tem sido realçada a importância da recuperação dos seus ecossistemas e respectivos serviços ambientais. No âmbito dos serviços ecossistêmicos, sabe-se que a floresta influencia o clima em diferentes escalas. Na escala local, a floresta exerce influência no microclima e na formação de chuvas (SPRACKLEN et al., 2015). Na escala global, a floresta exerce influência sobre o clima, principalmente por meio da retenção de estoques de carbono (ARAGÃO et al., 2014), além de contribuir para sua remoção em áreas onde ocorre o crescimento de florestas secundárias. Cerca de 55% dos estoques totais de carbono das florestas estão armazenados na biomassa viva, nos restos vegetais em decomposição, na serapilheira e nos solos dos trópicos (PAN et al., 2011). Grande parte dos projetos com financiamento internacional, em geral, focam em atividades de sequestro de carbono. Estudos acerca do entendimento do processo sucessional de regeneração florestal e sua importância para o estoque de carbono na atmosfera (CHAZDON et al., 2016) tem exigido o desenvolvimento de técnicas de mensuração sobre os diferentes tipos de paisagens, tanto em campo como por técnicas alternativas para conseguir ampliar em diferentes escalas de compreensão do fenômeno.

A regeneração de florestas tropicais ocorre pelo processo de sucessão secundária, em diversos níveis, desde o nível de comunidade até o de ecossistema. O processo sucessional ocorre por uma progressão de estágios, caracterizados por um enriquecimento de espécies, que aumentam gradualmente a complexidade estrutural e funcional do ambiente e tem sido abordada por estudos em cronossequência de sucessão (CHAZDON, 2012). Esses estudos acerca do entendimento do processo sucessional de regeneração florestal e sua importância para o estoque de carbono em diferentes ecossistemas (CHAZDON et al., 2016) tem exigido o desenvolvimento de técnicas de mensuração sobre os diferentes tipos de paisagens, tanto em campo como por técnicas alternativas para conseguir ampliar em diferentes escalas a compreensão do fenômeno.

A investigação científica sobre a complexa diversidade da cobertura de vegetação terrestre e fenômenos de regeneração envolve alto custo na obtenção de dados medidos em campo, razão pela qual o levantamento das características biofísicas dos diversos biomas em diversas escalas se torna limitado, sobretudo pela necessidade de comparar fenômenos em diversas escalas. Essa limitação pode ser atendida por técnicas/ferramentas e dados de Sensoriamento Remoto (SR), que juntamente com a ciência de Sistemas da Informação Geográfica (SIG), Cartografia e a Ciência de Dados, tem sido essencial para apoiar estudos sobre o mundo físico, biológico e social (JENSEN, 2014).

Ao longo do avanço tecnológico o SR tem desenvolvido diversas técnicas, que envolvem o uso de dados obtidos por sensores com características de resolução espacial, espectral, radiométrica e temporal, e nível de aquisição orbital (plataformas espaciais), aéreo (aeronaves e helicópteros) e terrestre (torres e sistemas radiométricos de campo). Diferentes tipos de sensores foram desenvolvidos para atender necessidades específicas e basicamente podem ser classificados em: sensores ópticos que utilizam a fonte solar de radiação eletromagnética, sensores termais que usam a Terra como fonte de radiação e o sensor RADAR de abertura sintética, que se utiliza de uma fonte de radiação eletromagnética artificial (MENESES et al., 2012). Um tipo de tecnologia que tem sido empregada é o uso do LIDAR, outro tipo de SR ativo que emite um feixe de laser em direção a superfície e consegue interagir com os alvos, onde parte da intensidade do sinal é refletida, esse sinal de retorno permite estimar informações a respeito dos alvos da superfície, no caso da vegetação, possibilita estimar a estrutura de uma floresta (SILVA

JUNIOR, 2018). Entretanto, LIDAR ainda é uma tecnologia restrita e de elevado custo, isso reforça a importância de sensores do tipo multiespectrais, como é o caso da série Landsat (TM, ETM+ e OLI) e do Sentinel-2 (MSI) que cobrem áreas que ainda não disponibilizam de dados de sensores ativos.

Os sensores imageadores multiespectrais são instrumentos eletro-ópticos capazes de obter múltiplas imagens simultâneas da superfície, desde o comprimento da luz visível azul, até a região termal (MENESES et al., 2012). Apesar do grande desenvolvimento das linhas de pesquisa em SR aplicado a vegetação identificam-se algumas limitações, sobretudo aquelas que ocorrem no universo eletro-óptico relativo aos fatores de saturação em áreas de florestas densas, apesar disso, os índices de vegetação têm sido amplamente desenvolvidos e utilizados para superar algumas das limitações apontadas.

Os índices de vegetação (IV) são produzidos por meio da operação entre regiões espectrais do vermelho e infravermelho e são amplamente utilizados para detectar o comportamento biofísico da cobertura vegetal com o uso de parâmetros tais como a biomassa e o índice de área foliar (IAF) (PONZONI et al., 2012). Um dos IVs mais utilizados em estudos de florestas é o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada, em inglês *Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI (ROUSE et al., 1973; TUCKER, 1979). O NDVI é amplamente utilizado devido sua capacidade de expressar o comportamento espectral da fenologia do dossel em um intervalo de reflectância que pode ser empregado para diferenciar agrupamentos e a variação temporal da mesma (CORDEIRO et al., 2017; DUTRA; SHIMABUKURO; ESCADA, 2018). O Índice de Vegetação melhorado, em inglês *Enhanced Vegetation Index* - EVI (HUETE et al., 2002), foi ajustado para diminuir limitações de efeito de saturação, ou seja, permite reduzir ruídos oriundos da atmosfera, que ocorrem no NDVI, e tem sido utilizado em diversos estudos para detectar a variação da fenologia de dosséis florestais (SILVA et al., 2013; GONSAMO; CHEN, 2014). Assim, os IVs são aplicados no universo do SR óptico para analisar a vegetação sob diversas abordagens (ATZBERGER et al., 2014) e estimar de forma indireta outras variáveis biofísicas na superfície, como por exemplo a Biomassa Acima do Solo (BAS) (WATZLAWICK et al., 2009).

Apesar da utilização dos IVs para descreverem o comportamento biofísico da cobertura vegetal, ainda existem desafios de contornar limitações como algumas mencionadas

anteriormente. Uma alternativa quando possível é associar aos dados de SR a dados obtidos em campo, seja para caracterizar paisagens ou quantificar variações biofísicas. Nos últimos anos muitos estudos buscaram atender as demandas da recuperação de ambientes degradados (VIEIRA et al., 2003; PONZONI; REZENDE, 2004; CINTRA, 2007; WANG et al., 2019). Em estudos florestais o principal desafio tem sido detectar com precisão a degradação, os diferentes estágios sucessionais e a definição de parâmetros biofísicos em imagens de sensoriamento remoto multiespectral (PONZONI, 2002; REZENDE, 2004; GALVÃO et al., 2015), principalmente em imagens da série Landsat, pois existe a limitação da resolução espacial intrínseca neste procedimento.

Uma técnica que tem apresentado bons resultados para a detecção de degradação florestal (SANTOS et al., 2019; BULLOCK; WOODCOCK; OLOFSSON, 2020) refere-se ao Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) (SHIMABUKURO; SMITH, 1991; CARVALHO JÚNIOR et al., 2003; PONZONI; REZENDE, 2004; SHIMABUKURO et al., 2017). Esta técnica baseia-se na caracterização da resposta espectral de alvos puros, ou Endmembers, ou seja, na organização de uma biblioteca de referências espectrais sobre os alvos estudados, próxima da curva teórica esperada para determinado alvo. Com isso é possível calcular, com base em regressões lineares, a proporção sub-pixel de cada elemento modelado. E assim, extrair informações fenológicas que permitem avaliar e quantificar as frações espectrais analisadas sobre a superfície (SHIMABUKURO et al., 2017, 2019).

Considerando o contexto dessa linha de pesquisa que aplica o SR aos estudos sobre a vegetação apresentados anteriormente, esta pesquisa visou responder às perguntas:

1 – Os índices de vegetação obtidos em imagens da série temporal Landsat podem detectar alterações fenológicas que possibilita caracterizar idades de áreas com diferentes estágios em regeneração florestal na Mata Atlântica?

2 – As imagens e Índices de Vegetação, além das frações derivadas do Modelo Linear de Mistura Espectral, extraídas dos sensores MSI do Sentinel-2A e 2B são suficientemente sensíveis para caracterizar e diferenciar as áreas com diferentes estágios de regeneração florestal na Mata Atlântica?

3 – Como é a sincronicidade entre o crescimento de folhas, troncos, regime de precipitação e variação (mensal e anual) de temperatura nos diferentes estágios de regeneração florestal na Mata Atlântica?

4 – Qual é a dinâmica de assimilação de carbono em cada parcela, obtido por medidas em campo de Biomassa Acima do Solo (BAS), em cada estágio de regeneração estudado?

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa foi investigar o processo de regeneração florestal da Mata Atlântica. Para isso duas estratégias de análise foram utilizadas. A primeira foi uma abordagem interanual que utilizou-se de imagens da Série Landsat (TM, ETM+ e OLI) buscando caracterizar temporalmente as idades de áreas em processo de regeneração florestal, delimitando com isso a área de interesse em relação aos estágios de regeneração. A segunda foi através de dados obtidos em campo, e imagens derivadas dos sistemas sensores *MultiSpectral Instrument* (MSI) abordo dos satélites Sentinel-2 (S2A) e (S2B), a fim de estabelecer uma metodologia que permita quantificar parâmetros biofísicos da vegetação para caracterizar o complexo mosaico de paisagens e estruturas sucessionais de florestas da Mata Atlântica. Para isso, foram realizadas análises de um conjunto de dados de campo coletados intensivamente durante todo o ano de 2019 e os dados de SR, para diferentes fragmentos do bioma Mata Atlântica, na escala de parcelas inseridas na Área de Proteção Ambiental de São Francisco Xavier (APA-SFX). Portanto, esta dissertação têm como objetivos específicos analisar a relação entre dados de estrutura florestal em diferentes estágios sucessionais, testando algumas métricas obtidas em campo, e oriundas de dados Sentinel-2 (S2A) e (S2B), a fim de avaliar de forma multi-escalar o processo de regeneração florestal e a possibilidade de diferenciar fragmentos da Mata Atlântica em diferentes estágios de regeneração.

Para atingir o objetivo geral e responder às perguntas propostas, foram organizados os Objetivos Específicos (OE):

OE-1: Caracterizar biofísicamente e delimitar as áreas de interesse sobre estágios de regeneração florestal por meio de IV extraídos da série Landsat e dados de temperatura e precipitação;

OE-2: Caracterizar por meio de um inventário florestal simplificado, os diferentes estágios de regeneração florestal sucessional de acordo com o sistema de classificação base determinada na resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº1 de 31 de janeiro de 1994, criada para diferenciar cada estágio de regeneração da Mata Atlântica no Estado de São Paulo;

OE-3: Por meio das imagens Sentinel-2 MSI, IVs e frações do MLME, caracterizar os diferentes estágios sucessionais de regeneração nas parcelas da Mata Atlântica;

OE-4: Obter as medidas em campo do IAF, do crescimento de árvores pelo Diâmetro a Altura do Peito (DAP), de serrapilheira, como representativas dos diferentes ritmos de regeneração da floresta e sua estrutura, além de medidas meteorológicas, como precipitação e temperatura;

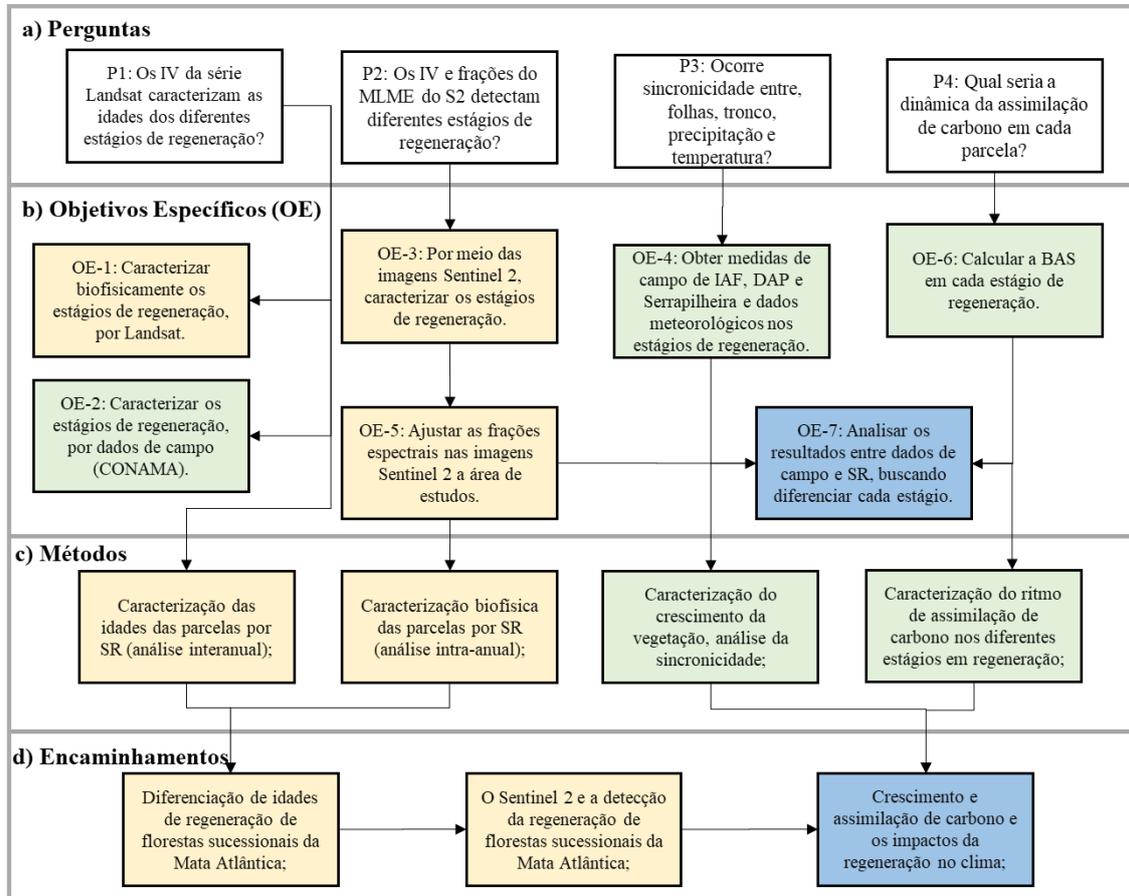
OE-5: Definir, por meio do uso do MLME, os componentes espectrais (Endmembers) sobre um conjunto de imagens Sentinel-2 sem nuvens, para obter os valores das frações de vegetação, solo e sombra, ajustadas à área de estudo;

OE-6: Calcular a Biomassa Acima do Solo (BAS) usando dados de incremento diamétrico de árvores que ocorrem nos diferentes estágios de regeneração;

OE-7: Analisar os resultados de crescimento de florestas, medidas do IAF, serrapilheira, medidas meteorológicas, índices de vegetação, e frações espectrais obtidos pelo conjunto de imagens Sentinel-2, buscando diferenciar os estágios sucessionais de regeneração, comparando o desempenho dos dados da série Landsat com o desempenho do S2 MSI.

A Figura 1.1 ilustra o organograma com a estrutura lógica entre as perguntas levantadas no presente trabalho, os objetivos específicos (OE's) desenvolvidos por meio dos métodos e as respectivas relações entre os mesmos.

Figura 1.1 – Organograma estrutural da dinâmica entre as perguntas, objetivos específicos, métodos, e produtos da presente dissertação. As caixas em bege representam dados de SR, em verde dados de campo e azul as análises principais.



Fonte: Produção do Autor.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo está estruturado da seguinte forma: na Seção 2.1 são apresentados conceitos referentes ao colapso ambiental, destacando a importância dos sistemas florestais, e sua relação com as concepções histórico-sociais de impacto, resiliência e recuperação de ambientes degradados, na Seção 2.1.1 são apresentadas resumidamente os principais causadores do processo histórico de desmatamento da Mata Atlântica, na Seção 2.1.2 destacamos a importância e os levantamentos de dados de SR e o mapeamento dos remanescentes florestais do bioma, na Seção 2.1.3 são apontados a importância ambiental e econômica e a relação com os esforços de proteção do mesmo.

A partir da Seção 2.2 é feita uma revisão dos principais conceitos utilizados do sensoriamento remoto aplicado aos estudos da vegetação. Na Seção 2.2.1 são apontados conceitos interdisciplinares utilizados na investigação do tema, na Seção 2.2.2 destacamos algumas limitações intrínsecas ao uso do SR óptico da vegetação.

A partir da Seção 2.3 inserimos no contexto o conceito de Florestas secundárias. Na Seção 2.3.1 destacamos a importância da regeneração de florestas secundárias, na Seção 2.3.2 são apresentadas algumas abordagens investigativas de campo sobre a mesma, na Seção 2.3.3 potenciais aplicações em estudos de florestas secundárias por SR a importância de estudarmos estes ambientes em regeneração no contexto do SR, na Seção 2.3.3.1 destacamos algumas técnicas que são comumente utilizados, tais como os IVs. É apontado uma metodologia complementar utilizada no trabalho na Seção 2.4 que é o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) e por fim, na Seção 2.5 é feito uma síntese por meio de um esquema do modelo conceitual utilizado onde são destacadas as relações metodológicas, os principais conceitos e os desafios da linha de pesquisa adotada pelo trabalho.

2.1 Colapso dos sistemas sócio ecológicos em processo de resiliência

A concepção de Sistemas Sócio Ecológicos está intimamente ligada à ideia de que a humanidade depende dos ambientes naturais (FISCHER et al., 2015). O desmatamento representa parte desse colapso. Sua origem está historicamente associada aos diferentes

modelos econômicos adotados ao longo da história de ocupação e uso da terra, produto da interação entre a sociedade e natureza, constituída por arranjos multifatoriais, mas predominantemente pela disputa por território, tido como garantia de sobrevivência e uso econômico.

O mais recente modelo de desenvolvimento econômico, imprime um ritmo acelerado de transformação da natureza sem precedentes na história da humanidade, que tem caminhado majoritariamente para um possível Colapso dos Sistemas Sócio Ecológicos (CUMMING; PETERSON, 2017). A degradação nos diversos ambientes naturais terrestres, apontam para a discussão sobre os limites dos espaços naturais, ou seja, para a capacidade de resiliência e conseqüentemente a necessária mudança do modo de vida atual (CALDERÓN-CONTRERAS; WHITE, 2020). Têm surgido diversas propostas de mudanças do modo de vida atual percebido por ações de organizações independentes, centros de pesquisas, que representam forças políticas de forma muito variável em cada país. Em síntese, a mudança acelerada da transformação da natureza é inversamente proporcional ao desenvolvimento da consciência social dos limites materiais. Apesar disso, percebemos que existem ações de recuperação ambiental que são estruturadas pela consciência sobre a finitude dos recursos naturais, e conseqüentemente por uma mudança de comportamento. Entender esse processo exige repensar concepções, ideias e ações, sobretudo buscar soluções para as conseqüências já adquiridas e novas possibilidades práticas. Portanto, é necessário associar as demandas da sociedade atual com a busca por novos conhecimentos, chamada de ciência sustentável.

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS-ONU) são resultados da articulação da sociedade, do acúmulo de debates e dos delineamentos estratégicos que abrem novos caminhos para mudanças essenciais na sociedade em diversas escalas. Mesmo com suas limitações e críticas, são produtos de investigações sobre questões ambientais, estas essenciais para o futuro das sociedades e economias, e por conseqüência a busca pela melhoria de vida, sobretudo de países em desenvolvimento (ONU, 2015). Na 21ª Conferência das Partes (UNFCCC, sigla em inglês, *Framework Convention on Climate Change*) para Convenção-Quadro sobre Mudança do Clima, o Acordo de Paris estabeleceu metas mundiais entre 195 países, dentre eles o Brasil estabeleceu ações e respostas às ameaças de mudanças do clima global em busca da redução de impactos de tais mudanças no contexto do desenvolvimento sustentável (COP, 2015). A declaração

do Brasil frente a esse acordo foi de estabelecer uma contribuição nacionalmente determinada (iNDC sigla em inglês, *intended Nationally Determined Contribution*) no que se refere a redução da emissão de gases do efeito estufa (GEE), contribuição que foi aprovada no congresso brasileiro em 12 de setembro de 2012 tornando-se compromisso oficial do Estado e já citada anteriormente. O estudo sobre o processo de recuperação de ambientes degradados e especificamente de ambientes florestais direcionou a investigação da presente dissertação.

2.1.1 Desmatamento histórico da Mata Atlântica

O crescimento urbano brasileiro concentrou-se na região litorânea, e o aumento da densidade populacional, somados à dinâmica econômica desenvolvida durante os últimos cinco séculos, transformaram paisagens florestais contínuas em paisagens degradadas, que recentemente são resquícios de florestas fragmentadas, matas em processo sucessional de regeneração natural (GUISLON et al., 2017; WAGNER et al., 2020). A prática de retirada da vegetação madura, desde os tempos da Colônia, passando pelo Império e as diversas fases da República, resultou no quadro de degradação ambiental generalizado com o qual nos deparamos hoje. Esse estado de degradação pode ser entendido como as transformações da natureza frente aos impactos decorrentes de mudanças no uso e ocupação da terra pouco planejadas. Por exemplo, a exploração de madeira para uso energético, retirada de enormes áreas de florestas para pastagens, implementação de espaços de cultivo agrícolas e silviculturais, com foco em monoculturas como é o caso do plantio de eucalipto para a indústria de papel e celulose são atividades que aumentam muito a fragmentação da paisagem. Assim, a paisagem atual revela-se em poucos espaços em áreas de reflorestamento controlado e o predomínio de fragmentos isolados remanescentes ao longo desse processo (JOLY et al., 2014; REZENDE et al., 2015; LIMA et al., 2016).

2.1.2 Transformação florestal e detecção remota

O bioma da Mata Atlântica originalmente ocupava uma área de aproximadamente 1,3 milhão de quilômetros quadrados, desde o Rio Grande do Norte até o Rio Grande do Sul. Isso corresponde à grande parte da costa litorânea do continente sul americano,

abrangendo cerca de 17 Estados do território brasileiro. No entanto, restam hoje, apenas 11 % a 28% da sua cobertura vegetal original, valor que varia conforme muda a metodologia e o tipo de resolução utilizada no mapeamento. Por exemplo, restam de 11 a 16% segundo Ribeiro e colaboradores (2009), 28% segundo o mapeamento da Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável (FBDS), confirmado por Rezende e colaboradores (2018), 12,42% da área de matas bem preservadas (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INPE, 2018), e 12% a 17% de matas em melhor estado de conservação, 24% a 26% de cobertura florestal e 27% a 29% de vegetação nativa (MapBiomass, 2019).

2.1.3 Importância ambiental da Mata Atlântica e sua recuperação

A Mata Atlântica é composta por formações florestais nativas de Floresta Ombrófila Densa, Floresta Ombrófila Mista, ou também denominada de Mata de Araucárias, Floresta Ombrófila Aberta, Floresta Estacional Semidecidual e Floresta Estacional Decidual (IBGE, 2012). Diversos ecossistemas estão associados a este bioma, tais como manguezais, vegetação de restingas, campos de altitude, brejos interioranos e encaves florestais do Nordeste, além de manchas de cerrado distribuídas em algumas regiões. Apesar do desflorestamento, estima-se que ainda existam cerca de 20 mil espécies vegetais, que correspondem a aproximadamente 35% de espécies existentes no Brasil, incluindo diversas espécies endêmicas e ameaçadas de extinção. Em relação à fauna, o bioma abriga aproximadamente 850 espécies de aves, 370 de anfíbios, 200 de répteis, 270 de mamíferos e 350 de peixes (MMA, 2020).

A busca pela conservação dos remanescentes de Mata Atlântica e a recuperação de vegetação nativa tem sido o foco das áreas protegidas por lei, como as Unidade de Conservação (SNUC – Lei nº 9.985/2000) e Terras Indígenas (Estatuto do Índio – Lei nº 6001/1973), além de Áreas de Preservação Permanente e Reserva Legal (Código Florestal – Lei nº 12.651/2012). O bioma também é protegido pela Lei nº 11.428/2006, conhecida como Lei da Mata Atlântica, regulamentada pelo Decreto nº 6.660/2008. Essa proteção comparada ao processo histórico mencionado é recente e está associada a uma preocupação maior com os serviços ecossistêmicos ambientais fornecidos pelos diversos ecossistemas – i.e., serviços ecossistêmicos.

Segundo o *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005) denominam-se de serviços ecossistêmicos (SE's) os “benefícios que os ecossistemas fornecem para apoiar o bem-estar humano”. Os SEs mais evidentes são aqueles ligados à produção, regulação e abastecimento de água, regulação e equilíbrio climáticos, proteção de encostas e atenuação, fertilidade e produção do solo, produção de alimentos, madeira, óleos e remédios, além de proporcionar paisagens cênicas com alta biodiversidade e preservar um patrimônio histórico e cultural imenso. Na prática, ações de preservação começam a surgir com investimentos em diversos projetos para a Mata Atlântica. Os desafios que estão presentes no horizonte mais próximo parte da necessidade de recuperar as florestas, pois sem isso todos os outros objetivos são secundários e conseqüentemente são dependentes da recuperação do bioma como um todo (MARTINI et al., 2007).

2.2 Detecção da vegetação por sensoriamento remoto

2.2.1 Conceitos interdisciplinares

As técnicas de sensoriamento remoto (SR) aplicadas ao estudo da vegetação partem do princípio que a interação físico-química da radiação eletromagnética com a vegetação, ocorre em diferentes comprimentos de onda, e expressam as características relativas a cada tipo de alvo. A interação da radiação com alvos vegetais pode ocorrer por meio de três fenômenos: absorção, reflexão e transmissão (NOVO, 2010). A análise conjunta desses fenômenos é denominada de estudo do *comportamento espectral da vegetação*. O processo de absorção da radiação eletromagnética na folha ocorre por meio dos pigmentos fotossintetizantes como as clorofilas, xantofilas e carotenos, e é conhecido como fotossíntese. Essa absorção ocorre especificamente na região do visível que corresponde os intervalos de 0,4 μm a 0,72 μm do espectro eletromagnético (PONZONI et al., 2012).

A vegetação, assim como todos os objetos na natureza, apresenta uma característica espectral que é obtida fisicamente através do cálculo de fatores que relacionam a intensidade da radiação refletida pela intensidade da radiação incidente em uma dada região espectral. Essa propriedade determina o *fator de reflectância* (ρ), que é bidirecional devido a existência de geometrias envolvidas entre a fonte de radiação e o alvo, e ocorrer em diferentes comprimentos de onda (ρ_λ). O ρ , serve para avaliar as propriedades de

reflexão da radiação por parte de um objeto ou superfície, portanto, é um parâmetro fundamental no estudo do SR aplicado a vegetação (TEILLET et al., 1997).

No estudo da vegetação, a análise da componente reflexão, que é a parte da radiação refletida e espalhada na planta é uma função da interação da luz com o mesófilo do vegetal. Essa interação ocorre predominantemente na região do infravermelho próximo (0,72 μm a 1,1 μm). Porém na região do infravermelho médio (1,1 μm a 3,2 μm), a quantidade de água líquida presente também nas estruturas da vegetação reduz a reflectância. Isso ocorre devido a absorção de luz nos comprimentos de onda de 1,1 μm , 1,45 μm , 1,95 μm e 2,7 μm do espectro eletromagnético. Portanto, nessa região, conforme diminui a umidade presente na folha, inversamente ocorre aumento do fator de reflectância (PONZONI et al., 2012; JENSEN, 2014).

2.2.2 Limitações intrínsecas ao uso do SR

Uma das limitações mais importantes em estudos florestais por meio do SR óptico diz respeito ao conhecido efeito de saturação da reflectância. Tal efeito é decorrente do aumento da quantidade de camadas de folhas, como ocorre em uma cobertura florestal, e resulta na diminuição da reflectância na região do visível e infravermelho médio e no aumento da reflectância na região do infravermelho próximo (PONZONI et al., 2012). No dossel de uma floresta, a radiação interage diversas vezes com as camadas da vegetação que atravessa o perfil vertical da floresta até diminuir sua intensidade de absorção e de reflexão. Isso produz como consequência uma mudança da reflectância que é chamado de ponto de saturação. Uma parte significativa dos estudos tem-se utilizado dos índices de vegetação (IVs). Tais índices são calculados a partir de imagens do vermelho e infravermelho próximo devido à interação entre a capacidade da clorofila em absorver a radiação visível (400 – 700 nm) e do mesófilo foliar a radiação infravermelha (700 – 1100 nm), além de reduzirem os efeitos da saturação apontados anteriormente (JENSEN, 2009). Entende-se que em dosséis florestais, com o aumento da densidade gera-se o aumento e diminuição da reflectância na região do infravermelho próximo e na região do vermelho, respectivamente. Em dosséis menos densos ocorre maior efeito da reflectância da camada inferior do dossel e das sombras o que aponta para uma variação da reflectância que deve ser considerado em estudos dessa natureza.

O Índice de Área Foliar (IAF) é um índice biofísico definido pela razão entre a área foliar de uma vegetação por unidade de área utilizada por esta vegetação (PONZONI et al., 2012) e através do mesmo podemos verificar o aumento da densidade dos dosséis e pode ser um indicativo do fator de saturação aos diferentes IVs utilizados em estudos florestais.

Outro fator que pode ser considerado limitante ao uso do SR em estudos florestais está relacionado a influência da orientação espacial e/ou geométrica dos elementos que contém o dossel, ou seja a posição das folhas e arranjo espacial das mesmas, assim como os efeitos que isso pode acarretar em relação a reflectância nas diversas regiões do espectro eletromagnético. Normalmente esse fator é mais perceptível em coberturas de vegetação com dosséis heterogêneos (PONZONI et al., 2012). Uma outra questão importante diz respeito à relação entre a geometria de visada (ângulo zenital) e a geometria de iluminação. Estas relações emergem da geometria entre o sensor-alvo-sol, influenciando a reflectância das imagens satelitais (GALVÃO et al., 2009).

Os efeitos da variação da topografia sobre produtos de SR em estudos da vegetação têm sido investigados, sobretudo aqueles que afetam o levantamento da Biomassa Acima do Solo (BAS) em diferentes padrões de paisagens na floresta tropical Atlântica (MAGALHÃES et al., 2014). A variação topográfica influencia no aspecto visual das imagens, dificultando o uso qualitativo como o mapeamento e o uso quantitativo biofísico (MOREIRA et al., 2016; PONZONI, 2016). Mesmo em áreas de cobertura vegetal homogênea, os efeitos da topografia podem influenciar na obtenção de estimativas/métricas quantitativas, como índices de vegetação podendo comprometer análises biofísicas (OLIVEIRA et al., 2019). Diferentes métodos de correção topográfica foram propostos na literatura, entre os quais se destacam os métodos "correção-C" e "correção SCS+C". Estes métodos têm como característica principal o uso do parâmetro C, obtido pelo cosseno do ângulo de incidência solar, variação espectral e variação do ângulo solar entre a posição relativa entre sensor-alvo (TEILLET et al., 1982). A maior parte das correções topográficas fazem uso dos parâmetros dos ângulos de elevação solar, ângulo azimutal e declividade, obtidos a partir de modelos digitais de elevação. Além disso, para correções bem ajustadas, é necessário que os modelos digitais de elevação e as imagens espectrais estejam registrados e tenham sido gerados por sensores com mesma resolução espacial. Não faz parte do escopo deste trabalho discutir todos os métodos. Todavia, mais detalhes sobre os diferentes métodos de correção topográfica foram

apresentados no trabalho de Hantson e Chuvico (2011). Ainda, os métodos de correção topográfica que apresentam melhores resultados são classificados como não lambertianos, já que possuem parâmetros que variam para cada banda espectral (como o método correção C e correção SCS +C) e que devem ser estimados a partir de áreas com cobertura homogênea (GOSLEE, 2012). Nesta pesquisa, devido a inexistência de dados de Modelo Digital de Elevação (MDE) com a mesma resolução espacial dos demais dados, optou-se por não realizar as correções topográficas.

Outros fatores que interferem nos estudos da vegetação por SR são aqueles oriundos das variações de temperatura da superfície, da precipitação e radiação. Em resumo, qualquer interferência que exista entre o alvo estudado, neste caso a vegetação, e qualquer mudança que ocorra no trajeto da radiação entre o sensor-alvo-sensor pode causar alguma interferência na medida e, portanto, devem ser levados em consideração no uso dos dados gerados por SR (PONZONI et al., 2012).

Por fim, considera-se como paradigma qualitativo-quantitativo intrínseco ao uso de dados de SR aplicadas ao estudo da vegetação, aqueles relacionados ao uso limitado dos produtos de SR em abordagens qualitativas da natureza, sobretudo pelo aumento de disponibilidade de imagens nos últimos anos aplicadas apenas ao mapeamento, processo em transição pelo aumento da apropriação de dados de SR para quantificar processos biofísicos da natureza.

2.3 Florestas secundárias

2.3.1 Regeneração e florestas secundárias

A importância ecológica de compreender o funcionamento das Florestas secundárias consiste em determinar o impacto da regeneração em aumentar o reservatório de carbono (CHAZDON et al., 2016) e a possibilidade de retornar à diversidade de espécies florestais (EDWARDS et al., 2017). Além disso, florestas tem um papel significativo nos ciclos hidrológicos e biogeoquímicos da paisagem que necessitam serem avaliados também em florestas secundárias. O crescimento diferenciado da biomassa acima do solo em cada estágio proporciona a fixação de carbono da atmosfera e possibilita o acúmulo de nutrientes necessários para o próximo ciclo de rotação de culturas. Caso não sofram distúrbios, cortes, queimadas, uso agrícola ou desmatamento, tais florestas secundárias

acabarão por restabelecer estoques de carbono e as propriedades de ciclagem de nutrientes das florestas maduras facilitando a manutenção de diversos Serviços Ecossistêmicos (CHAZDON, 2013, 2016).

2.3.2 Abordagens em campo

A caracterização do ‘estado’ da regeneração em florestas secundárias tropicais e o levantamento de padrões de recuperação em diferentes estágios sucessionais tem sido amplamente investigado por meio de amostragem em parcelas permanentes em campo (REZENDE et al., 2015). As parcelas são recortes de áreas controladas no território, que buscam representar espacialmente uma amostragem do ambiente estudado. Esse procedimento tem sido feito de duas formas: por meio de parcelas fixas monitoras a longo prazo, ou por parcelas distintas em cronosequência, ambas representando os estágios sucessionais (MACHADO et al., 2005). O primeiro caso exige um acompanhamento de longo prazo em uma área controlada, condições essas que tornam esse método na prática bem limitado, tais como parques florestais e áreas de reservas ambientais do tipo de preservação integral. O outro método empregado, é o de cronosequência que não exige um acompanhamento de longo prazo e na prática pode ser menos oneroso. Ambos levantamentos produzem dados sobre o crescimento de árvores, obtidas por medidas do Diâmetro da Altura do Peito (DAP), que possibilitam obter valores de área basal e realizar estimativas da biomassa vegetal por meio de equações alométrica (WOORTMANN, 2010).

Também são comumente realizadas medidas da altura de indivíduos, além de análises de atributos florístico-estruturais, dentre outros, e estas informações têm sido base para diversos estudos, como o de análise de paisagens degradadas (LEDO, 2015; NĚMEC, 2015). Uma questão comum a ambas é o fato de que esses levantamentos em campo são limitados a uma série de fatores, tais como recursos econômicos, equipamentos, pessoal especializado, necessidade de manutenção constante, quais na prática apresentam muitos obstáculos. Alternativas para estes obstáculos são metodologias que em conjunto com levantamentos em campo utilizam dados de sensoriamento remoto a fim de levantar informações sobre a vegetação (BAUER et al., 1994; SILVA et al., 2004; TOKOLA et al., 2012; PANTOJA, 2017)

Estudos de SR baseando-se em dados adquiridos via sensores têm sido utilizados para a caracterização da vegetação e diversos aspectos de mudança de sua cobertura, seu processo de regeneração, diferenciamento temporal das idades, a produção de mapeamentos, levantamento de distúrbios de longo e curto prazo e de Biomassa Acima do Solo (BAS), dentre outros (SILVA et al., 2016; WAGNER et al., 2020).

2.3.3 Sensoriamento remoto aplicado à investigação sobre regeneração florestal

O sensoriamento remoto do tipo multiespectral, classicamente utiliza sensores passivos da série Landsat, e mais recentemente por sucessores como o Sentinel-2 (MSI), sendo esse último mais recentemente testado em estudos florestais (KORHONEN et al., 2017; DAI et al., 2018).

As imagens dos sensores *Multispectral Instrument* (MSI) obtidas dos satélites Sentinel-2 S2A e S2B, foram desenvolvidas para observação da terra, vegetação e água, oriundas do “*Programa Europeu de Observação da Terra Copernicus: observando nosso planeta por um mundo mais seguro*” da Agência Espacial Europeia (ESA - *European Space Agency*), programa de observação da Terra da União Europeia (UE). A plataforma Sentinel-2 possui radiômetros espectrais voltados ao largo espectro em 13 bandas do visível ao infravermelho distante. Os satélites S2A lançado desde 2015 e S2B desde 2017, possuem bandas espectrais com resolução espacial de 10m, 20m e 60m. Em conjunto os satélites operam com um tempo de revisita de até 5 dias nas áreas próximas ao equador e possuem semelhanças se comparados com os dos dados da série Landsat (ESA, 2020).

O uso aplicado a vegetação tem sido feito também com o SR do tipo hiperespectral, que tem possibilitado detectar diferenças entre os estágios de regeneração em florestas sucessionais, mais especificamente nos estágios intermediários e de difícil detecção. Este desafio tem sido apresentado como um obstáculo em estudos aplicados em florestas tropicais (GALVÃO et al., 2009). A diferenciação de tais estágios, seja em ambientes de regeneração natural, ou regeneração mediada, em ambientes urbanos ou rurais, tem sido realizada por meio de processos de classificação supervisionada em paisagens da floresta tropical Atlântica (REGO et al., 2003; CINTRA, 2007) ou por de interpretação visual (SILVA et al., 2004). Ao longo do tempo esse suporte tem apoiado o processo de mapeamento da superfície, com por exemplo a realização de mapeamentos de florestas

secundárias na Amazônia e o discernimento dos diferentes estágios por meio de índices de vegetação e bandas espectrais (VIEIRA et al., 2003; ESPÍRITO-SANTO et al., 2005), além de mapeamento de distúrbios florestais (WANG et al., 2019).

O método de mapeamento por meio de classificação supervisionada depende da precisão das informações levantadas sobre o alvo mapeado. Atingir essa precisão por meio de imagens de SR multi-hiperespectral tem sido desafiador, pois o maior ou menor grau de detalhes está associado ao tipo de sensor utilizado e as características da paisagem (LU et al., 2003). Abaixo apresentam-se as descrições das duas técnicas utilizadas nesta dissertação: índices de vegetação e o modelo linear de mistura espectral.

Outras abordagens, buscam agrupar diferentes sensores, ou seja, de tecnologias distintas de SR, e tem sido empregada nos estudos sobre vegetação de forma comparativa, destacando-se o caráter complementar, objetivando gerar melhores resultados daqueles obtidos por estudos restritos a apenas um tipo de sensor (ALMEIDA et al., 2019). Entretanto, na prática isso ainda é limitado, pois o uso de produtos de alta resolução espacial (WAGNER et al., 2018), ou de dados obtidos por LIDAR (CARREIRAS et al., 2017), envolvem levantamentos de alto custo e, portanto, ainda são limitados. Apesar das limitações apresentadas, existe uma grande gama de dados livres e sem custos, como dados do satélite Sentinel-2, podendo-se usufruir de novas tecnologias de processamento, como aqueles que utilizam ferramenta de SIG e dados nas nuvens, como o Google Earth Engine (GEE). Nesta pesquisa de Mestrado, buscou-se esse arcabouço analítico para seu desenvolvimento, sendo tanto o dado Sentinel, quanto o processamento em nuvem, inovações e tecnologias recentemente disponibilizadas.

2.3.3.1 Índices de vegetação

Por definição os IVs são formulações matemáticas desenvolvidas a partir de dados espectrais obtidos por sensores remotos. Estes índices baseiam-se principalmente na região espectral do vermelho e infra-vermelho próximo, pois são regiões do espectro onde há maior absorção da radiação eletromagnética por meio das clorofilas e pigmentos acessórios, e da reflectância devido a estrutura foliar. Além disso, nessa região do espectro há menor influência dos efeitos da atmosfera.

Os IVs têm sido amplamente utilizados como ferramenta analítica acerca de estudos sobre a cobertura da vegetação e foram desenvolvidos para minimizarem os efeitos de iluminação da cena, declividade da superfície e geometria de aquisição, fatores que influenciam nos valores de reflectância da vegetação e diminuem o poder analítico biofísico do SR (PONZONI et al., 2012).

Os IVs tem sido ferramentas importantes no monitoramento da vegetação em abordagens da dinâmica temporal e o vigor da vegetação, pois apoiam a detecção de atividades sazonais e fenológicas, quantificar as mudanças da cobertura do dossel e, portanto, permitem avaliações e estimativas em termos de parâmetros como área foliar, fitomassa, percentagem de cobertura do solo e atividade fotossintética (MIDDINTI et al., 2017). A análise sobre a transformação de ambientes florestais, realizada por meio de IVs, é associada a resposta espectral que os mesmos evidenciam, através do pico de verde, associada a mudança fisiológica das folhas, e sua resposta aos períodos seco e chuvoso (GAO et al., 2019; GONÇALVES et al., 2020). Os IVs podem ser classificados em três tipos: os simples ou intrínsecos, como por exemplo o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (original em inglês *Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) Rouse et al. (1973), os ajustados a linha de solo, como o Índice de Vegetação Ajustado para o Solo (original em inglês *Soil Adjusted Vegetation Index* - SAVI) Huete (1988) e os atmosféricamente corrigidos, como o Índice de Vegetação Melhorado (original em inglês *Enhanced Vegetation Index* - EVI) Huete et al. (1997) e Justice et al. (1998).

2.4 Modelo Linear de Mistura Espectral - MLME

As informações espectrais são produtos do registro da radiância espectral refletida da superfície aos sensores nos diversos satélites. As mesmas são disponibilizadas por imagens em pixel (*picture element*), elemento de resolução das imagens, que varia de tamanho em cada sistema sensor. Tais elementos da imagem expressam informações dos objetos registrados da superfície pelos sensores, sobretudo aquelas tomadas do ambiente natural, que mostram basicamente uma mistura de solo, vegetação, rochas e água. Portanto, na prática as informações obtidas de imagens devem levar em consideração que a mesma apresentará uma contribuição de todos os objetos contidos dentro de um pixel. Em outras palavras, a análise na escala sub-pixel é viável, desde que se identifique pixels

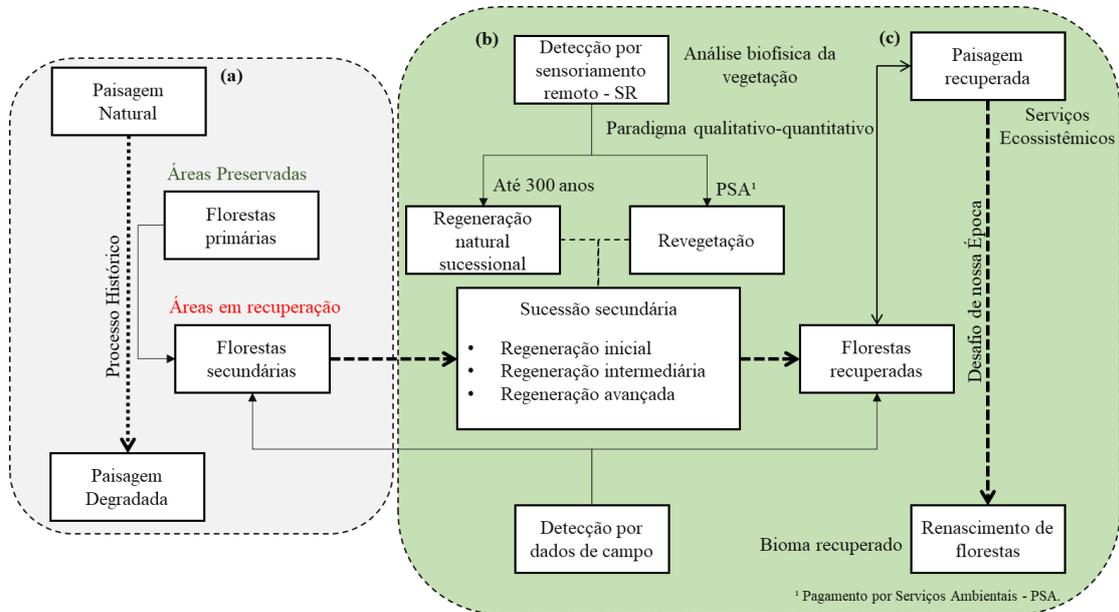
com resposta pura, ou seja, próxima da curva teórica esperada para determinado alvo. Para isso, é necessário modelar matematicamente a contribuição de cada elemento que contribui para a resposta final da reflectância de um pixel nos diferentes comprimentos de ondas. Assim, para realizar este tipo de abordagem, foram desenvolvidos modelos matemáticos de ajustes lineares como por exemplo o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) (SHIMABUKURO; SMITH, 1991; PONZONI et al., 2012; SHIMABUKURO et al., 2017, 2019).

2.5 Modelo conceitual

Para a presente dissertação, considera-se como Mata Atlântica um conjunto de formações florestais, campos naturais, restingas, manguezais e outros tipos de vegetação (CAMPANILI; SCHAFFER, 2010). Entende-se como Floresta um conjunto de plantas lenhosas, com quatro estratos bem definidos (herbáceo, arbustivo, arbóreo baixo e arbóreo), caracterizadas pelo adensamento de árvores altas, com redução da quantidade de luz que chega ao solo (IBGE, 2012).

A Figura 2.1 mostra o modelo conceitual adotado para a presente dissertação. Foram considerados três momentos para as florestas: (a) Floresta em processo de transformação ao longo do tempo; (b) busca por técnicas e modelos que detectem o processo de regeneração por análise biofísica; e (c) o desafio em recuperar os ambientes degradados e obter florestas recuperadas e, portanto, paisagens restauradas.

Figura 2.1 – Organograma do modelo conceitual adotado. As etapas são: (a) entendimento do contexto de florestas, (b) busca de técnicas e modelos que consigam detectar o processo de recuperação e (c) desafio em recuperar ambientes degradados e a recuperação de florestas.



Fonte: Produção do Autor.

Paisagens naturais ou sistemas ambientais pouco transformados são definidos aqui como áreas que sofreram pouco ou nenhuma modificação antrópica ao longo do tempo, ou seja, são ambientes que apresentaram baixa intensidade de transformação da cobertura vegetal natural por intervenções das atividades produtivas como pecuária extensiva, agricultura de subsistência, pesca, extrativismo mineral e vegetal. No contexto da Mata Atlântica isso representaria cerca de 7,26% de remanescentes bem conservados (CAMPANILI; SCHAFFER, 2010) dos 11% a 28% da sua cobertura vegetal original (RIBEIRO et al., 2009; REZENDE, et al., 2018).

A definição de Florestas maduras pode ser feita de no mínimo duas formas: a primeira seria de um conjunto de espécies arbóreas, com quatro estratos bem definidos (herbáceo, arbustivo, arvoreta/arbóreo baixo e arbóreo), caracterizadas pelo adensamento de árvores altas que ocupavam a paisagem terrestre antes da transformação humana, ou seja, uma situação ideal. Já a segunda forma seriam as paisagens de florestas em processo de regeneração que foram iniciados a mais de 200 anos atrás, florestas que podem ser tidas

como primárias, devido possuir características de uma paisagem com alta biodiversidade, se comparada ao atual contexto de predominância de florestas secundárias.

Considerando o processo histórico e a ocupação humana na Mata Atlântica, podemos dizer que esse ambiente ideal foi modificado várias vezes pelos avanços e recuos das atividades econômicas que transformaram o ambiente de várias formas nos últimos cinco séculos na região. O processo de degradação ambiental é aqui entendido como as mudanças artificiais imprimidas na paisagem natural pela perturbação humana, reduzindo as condições e características de um ambiente e gerando desequilíbrio entre os diferentes subsistemas que compõem uma paisagem natural (SÁNCHEZ, 2013). Florestas degradadas são frequentemente áreas que possuem baixa biomassa, pouca produtividade ecológica, variável fragmentação e reduzida cobertura de dossel (CHAZDON, 2016).

Paisagens degradadas ou sistemas ambientais intensamente transformados pelas atividades humanas são definidos aqui como áreas que por meio das práticas econômicas, evidenciaram a retirada de coberturas vegetais naturais ao longo do tempo, que parcial ou totalmente foram transformadas em campos de pastagens cultivadas, campos de agricultura e silvicultura com maior adensamento populacional e urbano. É o caso da floresta tropical atlântica, que ao longo de toda a região litorânea brasileira vem sofrendo com avanço da urbanização e de práticas antrópicas em sua área sendo transformada em áreas degradadas desde a ocupação territorial portuguesa dos séculos XV-XVI (ROSS, 2009). O oposto são áreas em processo de preservação, que podem ocorrer naturalmente ou por intervenção humana.

Florestas secundárias são aqui entendidas como aquelas espécies arbóreas, com quatro estratos bem definidos (herbáceo, arbustivo, arvoreta/arbóreo baixo e arbóreo), caracterizadas pelo adensamento de árvores que podem ter diversidade de altura em sua distribuição de dossel, mas que sofreram impactos de sua retirada total ou parcial e estão em diferentes estágios de regeneração.

A Regeneração natural é um fenômeno definido como o processo de sucessão natural em que florestas secundárias, de forma geral, uma dada comunidade vegetal é progressivamente substituída por outra ao longo do tempo (CHAZDON, 2016).

Sucessão natural é definido como o desenvolvimento previsível, unidirecional e progressivo de uma comunidade vegetal, convergindo para um estado de clímax, sendo a

unidade principal da vegetação em equilíbrio com o ambiente, capaz de se autoperpetuar e tendo a propriedade de um organismo (CHAZDON, 2016). Atualmente é considerado um processo que segue múltiplas trajetórias, em equilíbrio dinâmico. Não existe momento específico em que a floresta alcance um estado de estabilidade ou clímax, pois frequentemente ocorrem distúrbios, mesmo durante estágios tardios de sucessão (CHAZDON, 2016). Os estágios de regeneração sucessional são definidos e caracterizados para a presente dissertação, referentes a Mata Atlântica no Estado de São Paulo, conforme resolução CONAMA nº1 de 1994.

A revegetação de florestas na Mata Atlântica têm sido mediada por ações que possuem projetos bem delimitados e estruturados, por meio de recursos no contexto do PSA, criando uma nova cultura de reflorestamento, com vistas a recuperação ambiental, principalmente dos Serviços Ecossistêmicos associados (GUEDES et al., 2011).

Por Serviços Ecossistêmicos (SE), segundo o *Millennium Ecosystem Assessment* (MEA), Avaliação Ecossistêmica do Milênio, entende-se “benefícios que os ecossistemas fornecem para apoiar o bem-estar humano”. Existem quatro tipos de classificação de SE: a) Provisão ou abastecimento: água, alimentos, madeira para combustível, fibras, bioquímicos e recursos energéticos; b) Regulação: Climática, de doenças, biológica, de danos naturais, regulação e purificação da água e polinização; c) Suporte: formação de solo, produção de oxigênio, ciclagem de nutrientes e produção primária e d) Culturais: ecoturismo e recreação, espiritual e religioso, estético e inspiração, educacional, senso de localização e cultural, direta ou indiretamente dependentes de ambientes recuperados (MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT PROGRAM, 2005).

Considera-se como Floresta recuperada quando há um acúmulo de diversos fatores dentro de um sistema ambiental que se regenera ao longo do tempo e vai adquirindo condições e características de estabelecer um clímax, um reequilíbrio entre fauna, flora, solo e aumentando, portanto, a biodiversidade do seu meio. Diante das mudanças climáticas atuais, esse processo representa um aumento significativo da assimilação de carbono da atmosfera, portanto do estoque de C, gerando consequências que atenderiam as demandas sócio-políticas atuais.

O Renascimento de florestas representa o paradigma de nossa época e é fator fundamental para que o Bioma seja recuperado e na era do desmatamento, esse processo precisa ser

estudado e de apoio de diversas ciências e técnicas, como os conhecimentos do SR aplicados à vegetação, parte deles presentes nesta dissertação, possibilitando realizar o levantamento de informações biofísicas quantitativas dos ambientes em regeneração, associados a dados de campo, podendo gerar informações aos tomadores de decisão.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

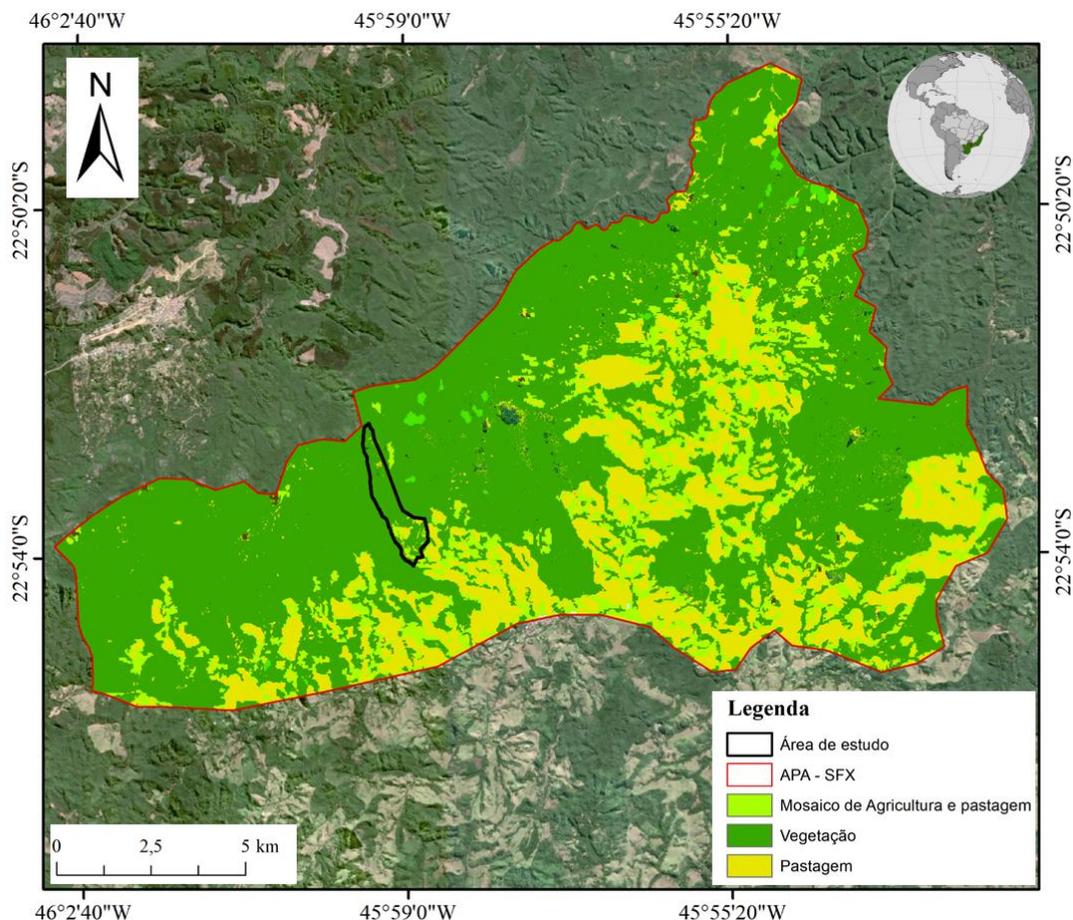
3.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada no distrito de São Francisco Xavier pertencente ao município de São José dos Campos/SP. A área da propriedade denominada Fazenda da Serra é 112 ha (delineamento em preto) e está inserida na área da Área de Proteção Ambiental de São Francisco Xavier (APA-SFX). A área possui 11.339 ha (IBGE, 2010) (delineamento em vermelho) (Figura 3.1). Segundo o Atlas de Remanescentes Florestais da Mata Atlântica, disponibilizado em escalas de 1:100.000 e 1:250.000, e gerado por imagens Landsat de 30m, há ocorrências de remanescentes florestais da Mata Atlântica caracterizando a paisagem da área com a presença de formação florestal (Floresta Ombrófila Densa, conhecida como Floresta Tropical Pluvial e de Floresta Ombrófila Mista, conhecida como Floresta de Araucária) (HIROTA et al., 2018).

Segundo a classificação climática de Köppen o clima da região é caracterizado como Aw (tropical com estação seca no inverno). A distribuição média das temperaturas oscila durante o ano entre 14° à 24°C na região sudeste. A precipitação média anual acumulada na região é de aproximadamente 1500 e 2000 mm (CAVALVANTI et al., 2009).

Os planaltos e Serras do atlântico leste-sudeste (ROSS, 2011) possuem modelado dominante de topos convexos, elevada densidade de canais de drenagem e vales profundos. Há o destaque em seu embasamento de rochas metamórficas (quartzito), que imprimem um relevo conhecido como mares de morros (AB'SÁBER, 1970). A importância desta área em termos hidrológicos reside no fato de estar localizada em área de recarga da represa do Jaguari, que além de fornecer água para parte importante do vale do Paraíba do sul, hoje apresenta um sistema de transposição que fornece água para o sistema Cantareira (CAVALCANTI et al., 2016).

Figura 3.1 – Área de estudo, inserida na Área de Proteção de São Francisco Xavier (APA-SFX), município de São José dos Campos - SP. Imagem do sensor MSI do satélite Sentinel-2A de 11 de julho de 2019; composição colorida RGB e resolução espacial de 10 m. A Figura foi elaborada com dados: IBGE (2017), Map Biomas (2018) e ESA (2019). As áreas em verde escuro representam a paisagem em processo de regeneração de Mata Atlântica inseridas num contexto de uso da terra com a presença de mosaicos de agricultura e pastagem.

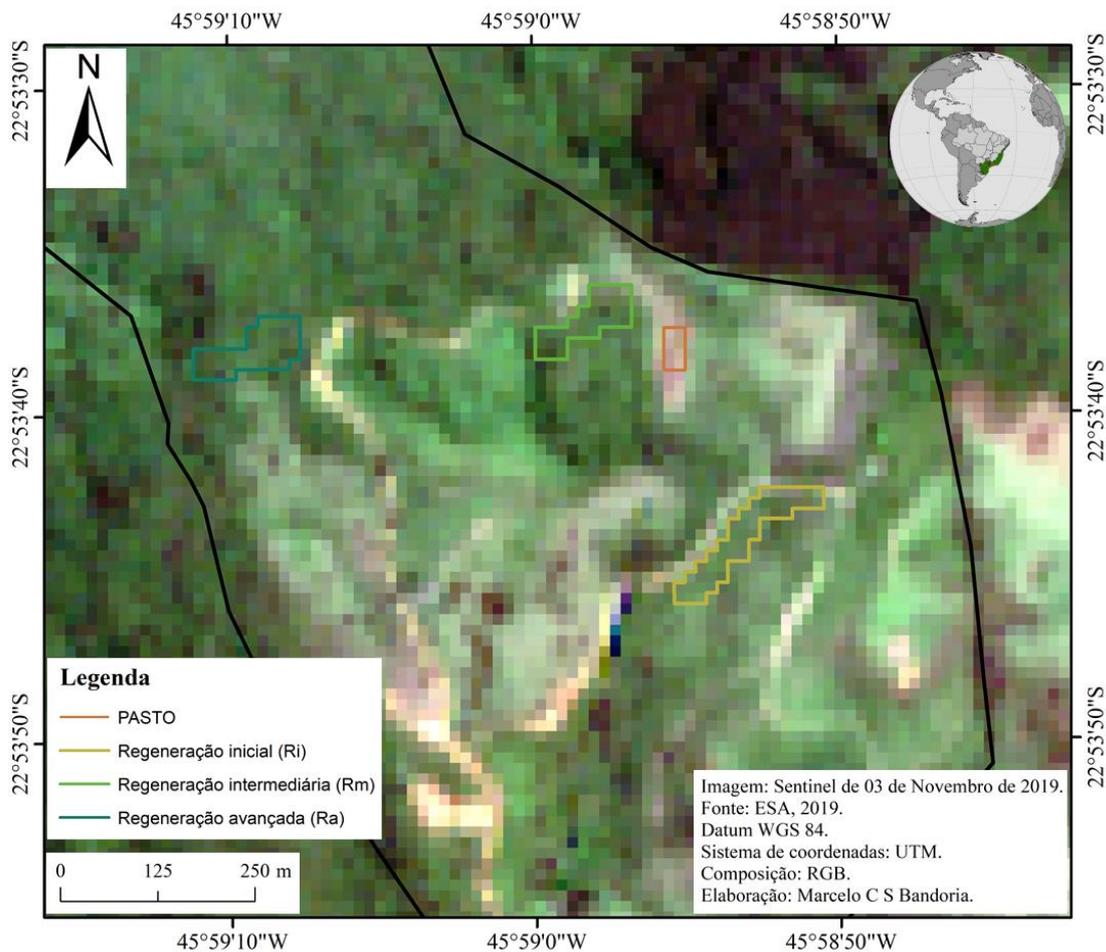


Fonte: Produção do Autor.

No desenvolvimento do estudo foram selecionadas três parcelas de campo dentro da propriedade, para uma investigação dos estágios de regeneração sucessional florestal (Figura 3.2). Historicamente (1985-2018) o uso e cobertura da terra na região teve a presença de florestas remanescentes em transição com monocultura florestal de pinus e eucalipto, pastagem e mosaico de agricultura e pastagem (MapBiomas, 2019). Segundo o atual proprietário, o histórico de uso da área estudada até a década de 70 estava voltado para produção de carvão, comprovados por apresentar resquícios de fornos de carvão espalhados na propriedade. Entre os anos 80 e 90 houve predominantemente o plantio de

pinus e eucaliptos. Após a década de 90 a propriedade passou por um processo de revegetação assistida e natural, sob controle do atual proprietário que implementou o reflorestamento em diversas partes.

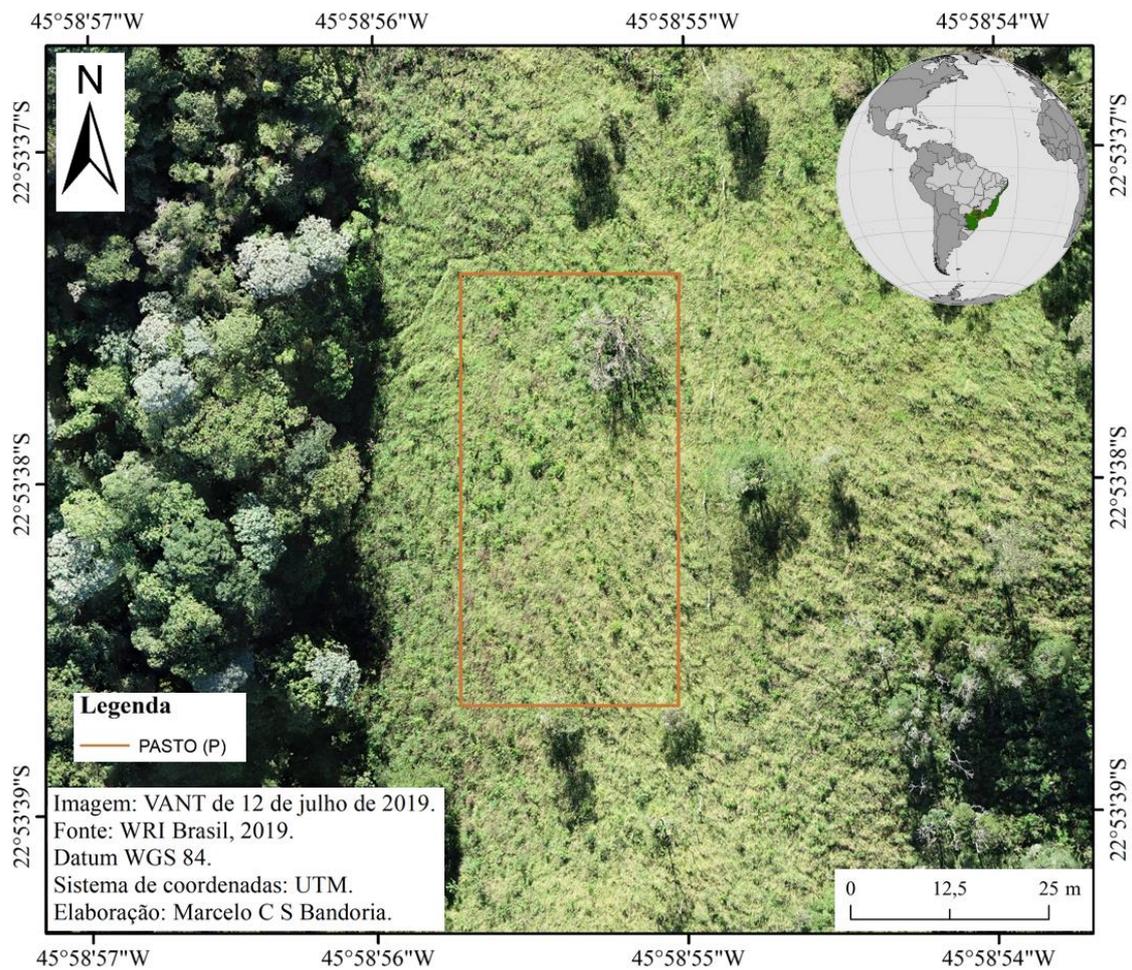
Figura 3.2 – Localização das parcelas de interesse na área de estudo. A imagem Sentinel-2B de 03 de novembro de 2019, composição colorida RGB e resolução espacial de 10 m. Figura elaborada com dados: IBGE (2017) e ESA (2019).



Fonte: Produção do Autor.

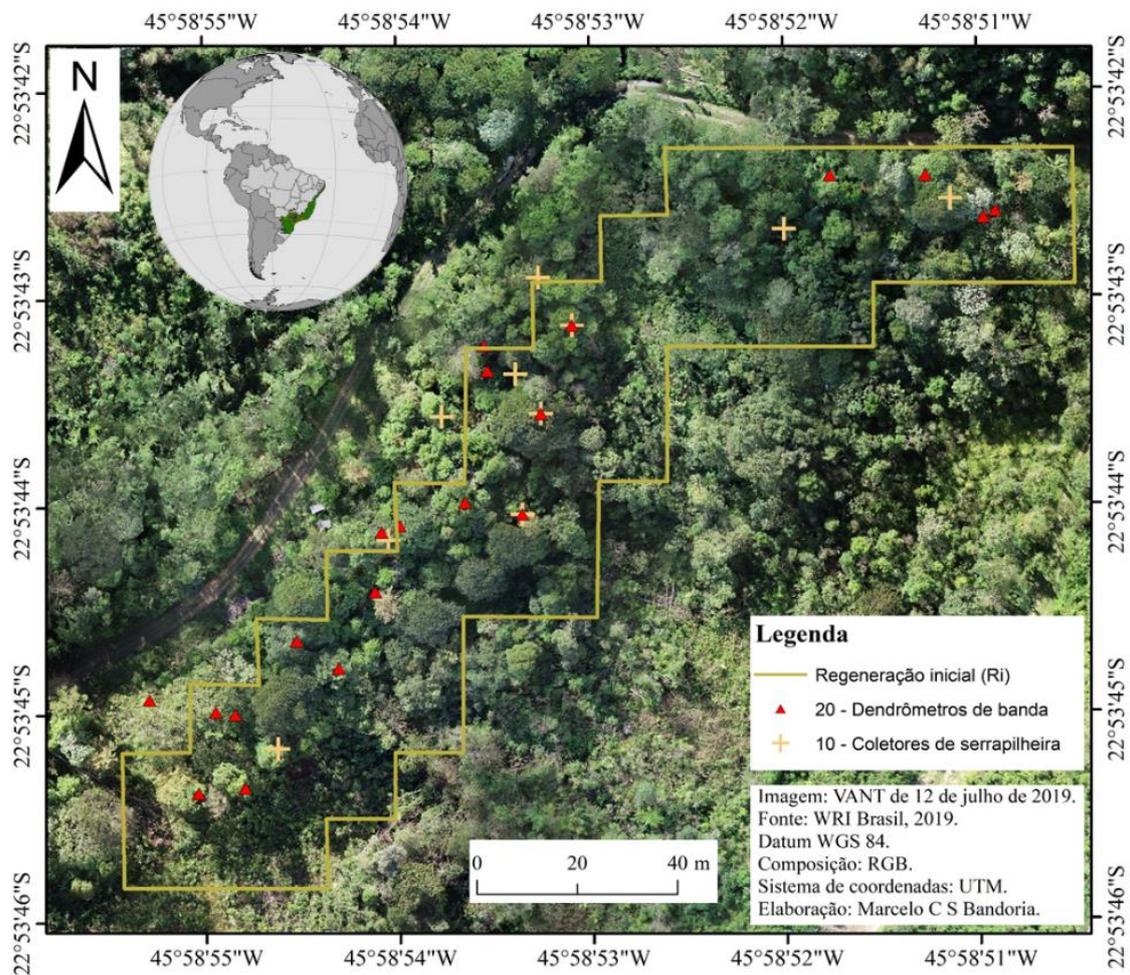
A parcela de pasto (P), considerada como estágio de regeneração zero, possui 80 m² (Figura 3.3), a parcela de regeneração inicial (Ri) possui 450 m² (Figura 3.4), a parcela de regeneração intermediária (Rm) possui 310 m² (Figura 3.5) e a parcela de regeneração avançada (Ra) possui 370 m² e faz parte da Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) Alto do Deco (Figura 3.6).

Figura 3.3 –Área de pasto, estágio zero de regeneração, delimitada na parcela em laranja.



Fonte: Adaptado de WRI Brasil (2019).

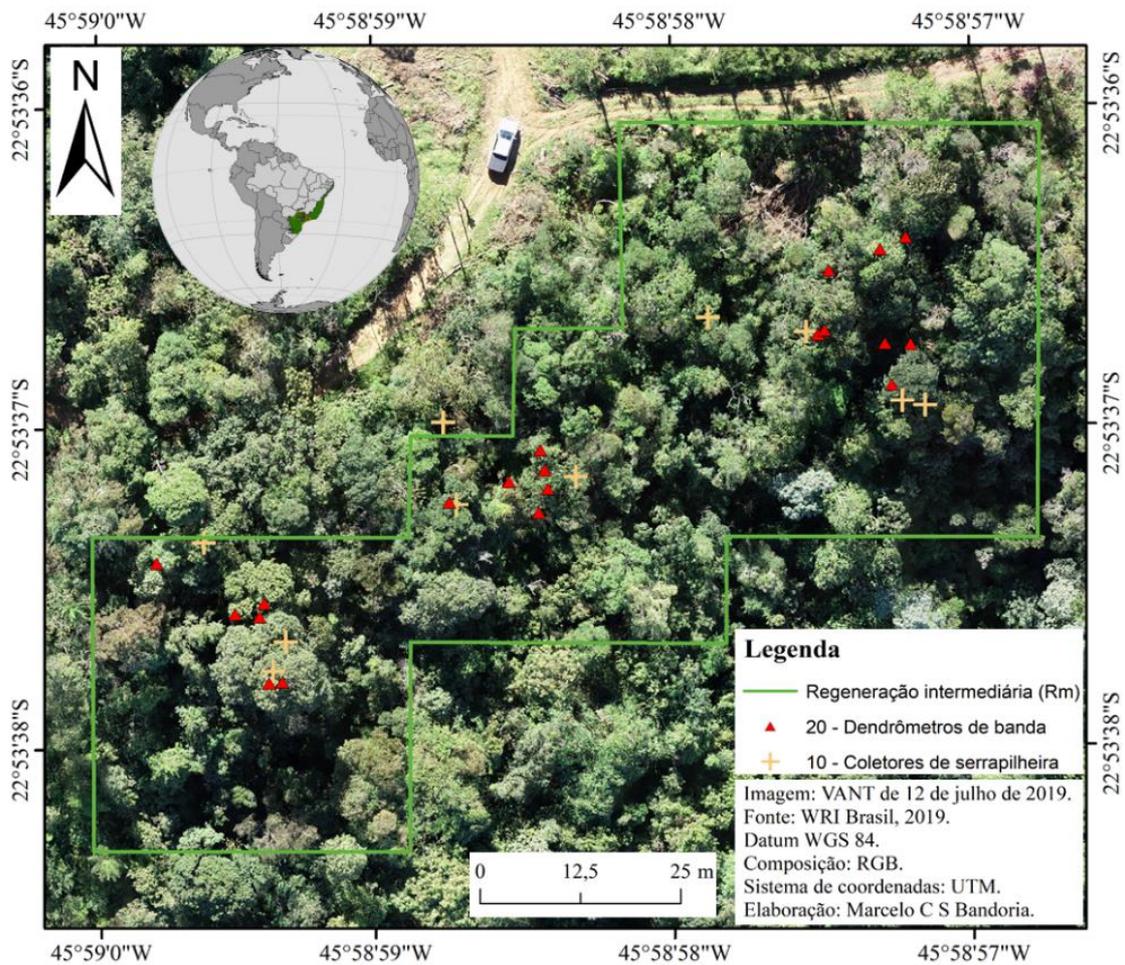
Figura 3.4 – Estágio inicial de regeneração, parcela delimitada pela linha em amarelo. Imagem gerada por VANT, em 12 junho de 2019 por WRI Brasil, resolução espacial de 2,5 cm.



Fonte: Adaptado de WRI Brasil (2019).

A Figura 3.5 representa a área que possui vegetação em estágio intermediário de regeneração, delimitada pela linha verde.

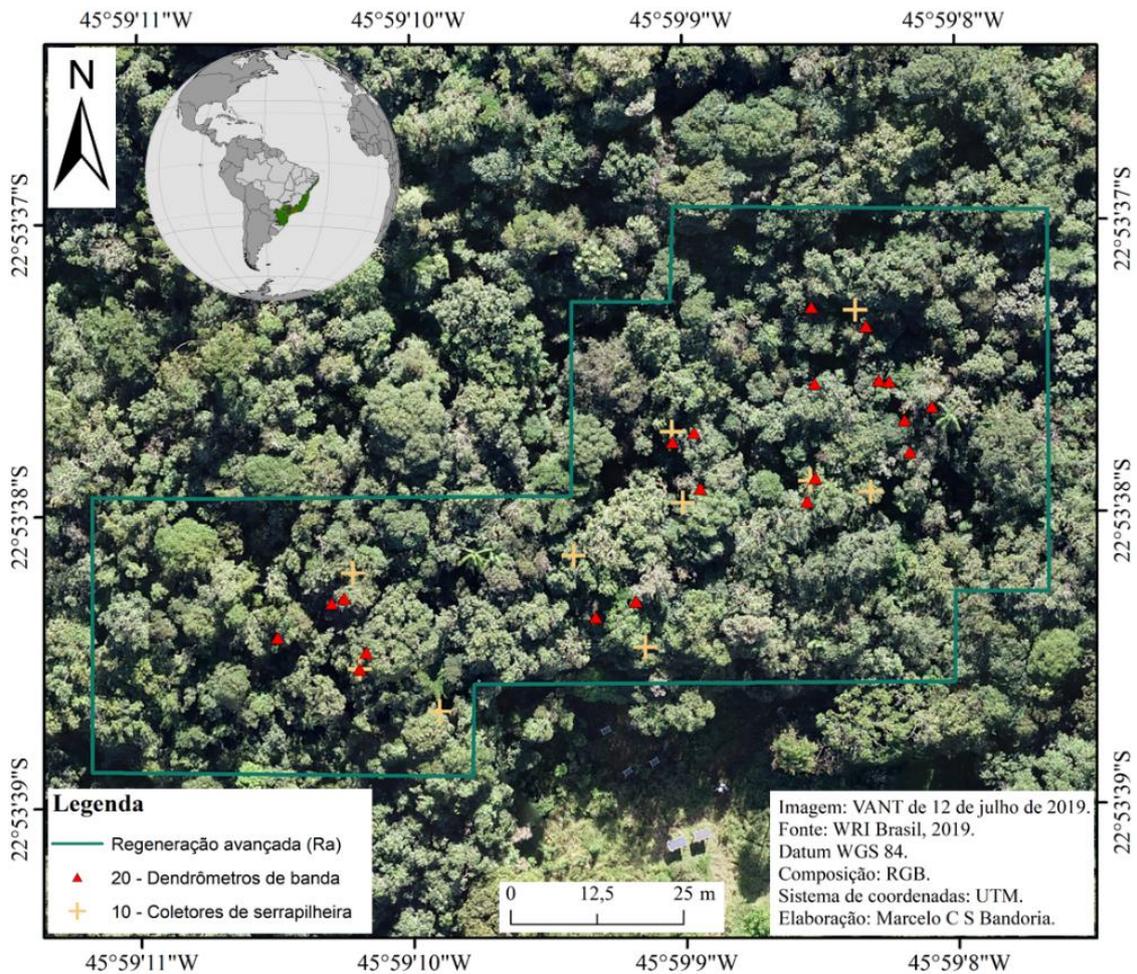
Figura 3.5 – Estágio intermediário de regeneração, imagem gerada por VANT, em 12 junho de 2019 por WRI Brasil, resolução espacial de 2,4 cm.



Fonte: Adaptado de WRI Brasil (2019).

A imagem da Figura 3.6 representa a área que possui avançado estágio regeneração, a parcela está delimitada pela linha azul, a mesma faz parte da Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) “Alto do Deco” localizada na Fazenda da Serra com 62 ha.

Figura 3.6 – Estágio avançado de regeneração, imagem gerada por VANT, em 12 junho de 2019 por WRI Brasil, resolução espacial de 5 cm.



Fonte: Adaptado de WRI Brasil (2019).

3.2 Conjunto de dados e pré-processamento

Durante a pesquisa foram utilizados 10 conjuntos de dados, divididos entre dados de sensoriamento remoto e dados de campo (Tabela 3.1). Apresenta-se abaixo um breve resumo dos dados e na seção 3.2.1 são apresentados os detalhamentos dos dados utilizados.

Tabela 3.1 – Características dos dados utilizados, divididos entre dados de sensoriamento remoto e dados de campo.

Fontes	Nome dos dados	Características	Período/frequência
SR	Imagens Sentinel 2	MSI (138 / 23KLQ e KMQ)	2019 / mensal
	Imagens Série Landsat	TM, ETM + e OLI (219/76)	1984 - 2019 / mensal
	Temperatura (NCEP/NCAR)	Reanálise de dados de 1948 até hoje	6hs / mensal
	Precipitação (CHIRPS)	Dados interpolados de alta resolução	dia / mensal
	Imagens de VANT	Sensor RGB , Phantom 4 Pro	12 de junho de 2019
Campo	Precipitação	HOBO-ONSET, RX3002	diário / mensal
	Temperatura	Sensor S-THB-M002	diário / mensal
	Medidas Dendrometros de banda	20 fitas tipo EMS - DB20 / parcela	quinzenal / mensal
	IAF	LAI2200C, LI-COR	quinzenal / mensal
		15 pontos / subparcelas	
	Serrapilheira	10 Coletores / parcela	quinzenal / mensal
	Inventário florestal adaptado	Res nº 1. CONAMA.	2018 - 2019

Fonte: Produção do Autor.

a) Dados de sensoriamento remoto:

(1) imagens Sentinel-2 (ESA, 2019); (2) imagens da série Landsat (USGS, 2019); (3) temperatura de superfície (NCEP/NCAR, 2019); (4) precipitação (CHIRPS, 2019); (5) imagens de VANT (WRI Brasil, 2019).

b) Dados de campo:

(6) precipitação e temperatura de estação meteorológica instalada na propriedade e do sistema de Informações Hidrológicas da ANA – Agência Nacional de Águas (Estação: 022050); (7) crescimento dendrométrico; (8) índice de área foliar; (9) queda de serrapilheira; e (10) inventário florestal adaptado.

O conjunto dos dados de campo foram obtidos pelo grupo de pesquisas do Laboratório de Ecohidrologia do Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST – INPE) e medidos na Estação Experimental Solo-Planta-Atmosfera em São Francisco Xavier (EESPA-SFX) sob responsabilidade da pesquisadora Dra. Laura De Simone Borma/INPE. Com exceção dos dados de precipitação e temperatura e parcialmente o dado base do inventário adaptado, todos os outros foram coletados pelo autor durante o ano de 2019. Os recursos do projeto CAPES-ANA (processo número 2180/2017) foram utilizados parcialmente na implementação dos equipamentos e de total custeio do trabalho de campo. O equipamento

LAI-COR foi obtido pelo projeto NEXUS, fomento FAPESP (processo número 17/22269-2), sob responsabilidade do pesquisador Dr. Jean Pierre Henry Balbaud Ometto (CCST-INPE).

3.2.1 Dados de sensoriamento remoto

3.2.1.1 Sentinel-2

Os dados Sentinel-2 foram utilizados para extração dos índices biofísicos da vegetação, a partir das bandas de 10 m: B2-Azul, B3-Verde, B4-Vermelho, B8-Infravermelho próximo e das bandas B11 e B12 infravermelho curto-médio 1 e 2 de 20 m, foram obtidos os índices de vegetação NDVI, EVI e SAVI e ajustados para obter frações espectrais do MLME, detalhados nas seções 3.4.2 e 3.4.6 respectivamente na metodologia. As bandas de maior resolução espacial (10m) compreendidas entre o espectro do visível e infravermelho próximo, e (20m) infravermelho curto-médio, possibilitaram melhor detalhamento das parcelas estudadas (Tabela 3.3).

3.2.1.2 Pré-processamento das imagens Sentinel-2

Para obter os valores biofísicos das imagens Sentinel-2, foi realizado o pré-processamento descrito abaixo.

Por meio da plataforma *Copernicus Open Access Hub* (ESA, 2019), foram selecionadas e feito o *download* das imagens Sentinel-2 S2A e S2B, com nível de correção 2A (S2-MSI-2A) em reflectância de superfície para o ano de 2019. A seleção das imagens foi realizada por análise visual com o critério de ausência de nuvens sobre a área de estudo, na escala da APA-SFX. Para atender o trabalho foram selecionadas 28 imagens para cobrir toda a APA, sendo 15 imagens sobre as parcelas, sob tais condições para a área de interesse (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 – Coletânea de imagens Sentinel-2 obtidas na plataforma *Copernicus Open Access Hub* (ESA, 2019), observa-se que para cobrir toda a área de estudo foram utilizadas duas imagens, quando disponíveis, por data.

Cenas do sensor MSI	Satélite	Dia	Mês	Ano	Talhão	Ângulo zenital Solar (°)
1	2B	7	Janeiro	2019	T23KLQ	26.06
2	2A	1	Fevereiro	2019	T23KLQ	28.88
3	2A	1	Fevereiro	2019	T23KMQ	28.00
4	2A	22	Abril	2019	T23KLQ	43.74
5	2A	22	Abril	2019	T23KMQ	43.19
6	2B	27	Abril	2019	T23KLQ	44.93
7	2B	27	Abril	2019	T23KMQ	44.41
8	2A	22	Maio	2019	T23KLQ	50.28
9	2A	22	Maio	2019	T23KMQ	49.82
10	2B	27	Maio	2019	T23KLQ	51.11
11	2B	27	Maio	2019	T23KMQ	50.63
12	2A	11	Junho	2019	T23KLQ	52.94
13	2A	11	Junho	2019	T23KMQ	52.50
14	2B	26	Junho	2019	T23KMQ	53.09
15	2A	11	Julho	2019	T23KLQ	52.82
16	2A	11	Julho	2019	T23KMQ	52.34
17	2A	31	Julho	2019	T23KLQ	49.74
18	2A	31	Julho	2019	T23KMQ	49.23
19	2A	30	Agosto	2019	T23KLQ	41.50
20	2A	30	Agosto	2019	T23KMQ	40.91
21	2A	9	Setembro	2019	T23KLQ	38.15
22	2A	9	Setembro	2019	T23KMQ	37.53
23	2B	4	Outubro	2019	T23KLQ	29.75
24	2B	4	Outubro	2019	T23KMQ	29.03
25	2B	14	Outubro	2019	T23KLQ	26.83
26	2B	14	Outubro	2019	T23KMQ	26.07
27	2B	3	Novembro	2019	T23KLQ	22.80
28	2B	3	Novembro	2019	T23KMQ	21.95

Fonte: Produção do Autor.

Estas imagens foram utilizadas para estruturação de uma coleção de dados contendo apenas as bandas de interesse (B2, B3, B4, B8, B11 e B12), conforme características da Tabela 3.3 (para mais detalhes ver a Tabela A1 em Informações Suplementares). Em seguida, utilizando o sistema de informações geográficas da ESA (*Sentinel Application Platform - SNAP*), as bandas espectrais foram exportadas para o formato TIF.

Tabela 3.3 – Características das imagens do sensor MSI da plataforma Sentinel-2 e as bandas utilizadas para o desenvolvimento da presente dissertação.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada	Resolução Radiométrica
MSI (Multispectral Instrument)	(B2) - Azul	490 μm	10 m	10 dias	290 km	12 bits
	(B3) - Verde	560 μm				
	(B4) - Vermelho	665 μm				
	(B8) - Infravermelho Próximo (NIR)	842 μm				
	(B11) - SWIR 1	1610 μm	20 m			
	(B12) - SWIR 2	2190 μm				

Fonte: Produção do Autor.

A etapa seguinte consistiu na verificação da precisão do registro geográfico das imagens S2 e foi realizada por verificação comparada a imagens de alta resolução georreferenciadas no mesmo sistema de projeção, obtidas por meio do software de código aberto SAS Planet. Através de inspeção visual entre os dados de altíssima resolução e as imagens Sentinel-2, por meio do cruzamento de diversos pontos de controle estabelecidos por referências fixas na superfície como por exemplo, campos de futebol, grandes cruzamentos e feições significativas distribuídos nas imagens sobrepostas, foi possível estabelecer na prática que o registro das imagens Sentinel-2 estavam adequados sem deslocamentos significativos que afetassem o uso empregado neste estudo.

Esse procedimento foi realizado no Sistema de Informação Geográfica (SIG) *Environment for Visualizing Images* (ENVI) versão 5.3 do programa. Após essas verificações em todas as imagens, estas foram inseridas por *upload* no GEE. Finalmente, este conjunto de dados foi processado para a extração dos valores biofísicos analisados nesta pesquisa.

3.2.1.3 Imagens da série Landsat

As imagens da série Landsat foram utilizadas para caracterizar temporalmente as parcelas e suas respectivas idades de regeneração. Os sensores utilizados da série Landsat foram: i) *Thematic Mapper* (TM) do Landsat 5 no período de 1984 à 1999; ii) *Enhanced Thematic Mapper plus* (ETM+) do Landsat 7 no período de 1999 à 2012, considerando que no intervalo de 2003 até 2013 existe a ocorrência de defeitos no *scanner* corretor de

linhas *Scan Line Correction* (SLC) nas imagens do mesmo; iii) *Operational Land Imager* (OLI) do Landsat 8 de 2013 a 2019, ambos da órbita 219 e ponto 76 (Tabela 3.4) (USGS, 2020).

As imagens da série Landsat estão disponíveis na base de dados do GEE em reflectância de superfície para a extração dos valores dos IVs de forma automatizada. Utilizaram-se os dados para realizar análise tanto, por pixel, quanto por média de cada área.

Para apoiar as análises biofísicas de caracterização das idades das parcelas foram selecionadas 20 cenas da série, sem nuvens em reflectância de superfície, disponíveis entre 1984 e 2019 representativas do período seco, compreendido entre os meses de junho a setembro. As características das imagens de cada satélite da série podem ser observadas a seguir na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Características das imagens dos sensores utilizados da série Landsat que foram utilizadas para o desenvolvimento da presente dissertação.

Sensores	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Faixa Imageada	Resolução Radiométrica
TM (Thematic Mapper)	(B1) - Azul	0,45 - 0,52 μm	30 m	16 dias	185 km	8 bits
	(B2) - Verde	0,50 - 0,60 μm				
	(B3) - Vermelho	0,63 - 0,69 μm				
	(B4) - Infravermelho Próximo (NIR)	0,76 - 0,90 μm				
ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)	(B1) - Azul	0,45 - 0,52 μm				
	(B2) - Verde	0,50 - 0,60 μm				
	(B3) - Vermelho	0,63 - 0,69 μm				
	(B4) - Infravermelho Próximo (NIR)	0,76 - 0,90 μm				
OLI (Operational Land Imager)	(B2) - Azul	0,45 - 0,51 μm				16 bits
	(B3) - Verde	0,53 - 0,59 μm				
	(B4) - Vermelho	0,64 - 0,67 μm				
	(B5) - Infravermelho Próximo (NIR)	0,85 - 0,88 μm				

Fonte: Produção do Autor.

As bandas azul, verde, vermelho e infravermelho próximo, para os satélites Landsat 5 e 7, e 8, foram utilizadas para realizar operações para a obtenção dos índices de vegetação NDVI, EVI e SAVI (Equações 2, 3 e 4, abaixo) e composições cores verdadeira e falsa

cor destacando a vegetação ao longo do tempo na caracterização das idades das parcelas. Detalhamentos sobre estes procedimentos estão descritos nas Seções 3.4.2 e 3.4.3 respectivamente na metodologia.

3.2.1.4 Pré-processamento das imagens Landsat

A metodologia de correção atmosférica das imagens da série foi feita pelos algoritmos a seguir: para o Landsat 5 e 7 foi utilizado o *Landsat Ecosystem Disturbance Adaptive Processing System* (LEDAPS, versão 3.2.1) (SCHMIDT, 2013), para o Landsat 8 o algoritmo *Land Surface Reflectance Code* (LaSRC, versão 1.4.1), desenvolvidos pela *United States Geological Survey* (USGS) em coleção e disponíveis no banco de dados da GEE. Além do controle de correção atmosférica as imagens das coleções da série Landsat também possuem um nível de qualidade (T1), que atendem aos requisitos de qualidade geométricos e radiométricos e são processadas por controle de qualidade de pixels e recebem filtros de nuvem, sombra e água, através do uso do algoritmo implementado em linguagem de programação C conhecido como *Code based on the function of Mask* (CFMASK) (FOGA et al., 2017). Portanto, as imagens são disponibilizadas em coleções em reflectância de superfície, com uma qualidade de processamento que atende as necessidades do usuário na base de dados do catálogo do Google Earth Engine (CLAVERIE et al., 2015; VERMOTE et al., 2016).

3.2.1.5 Temperatura de superfície

Os dados de temperatura de superfície foram obtidos na base de coleções do Google Earth Engine (GEE) e são oriundos do Projeto de Reanálise, feitos em conjunto entre o *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), Centros Nacionais de Previsão Ambiental e o *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), Centro Nacional de Pesquisa Atmosférica. A metodologia do conjunto dos dados busca apresentar uma sequência histórica sobre o estado da atmosfera e novas análises do estado da atmosfera atual. O projeto usa um sistema de análise e previsão de última geração para realizar a assimilação de dados desde 1948 até o presente (KALNAY et al., 1996). Possuem resolução temporal de 6 horas e espacial de 2.5 graus.

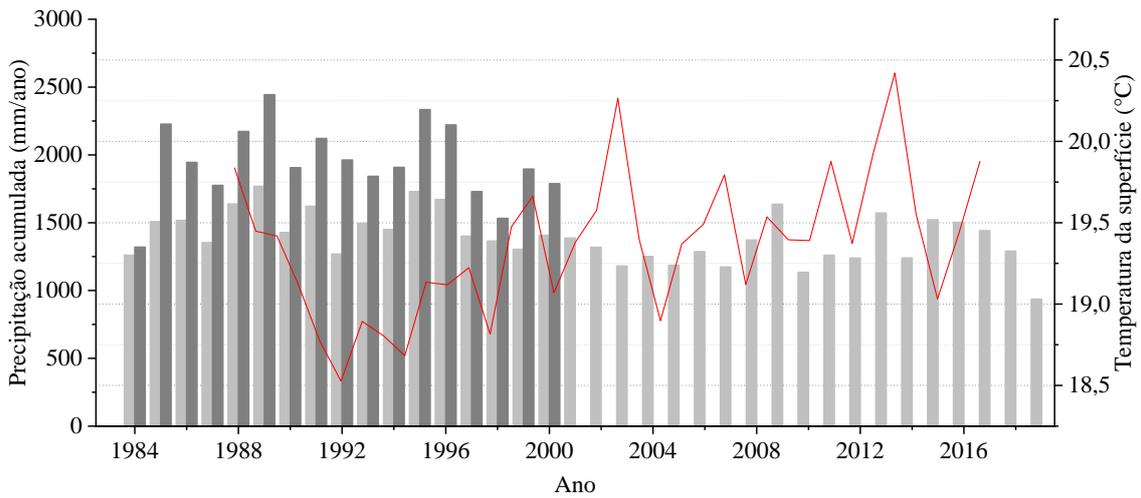
Essa série temporal de temperatura de superfície foi utilizada para apoiar a caracterização dos diferentes estágios de regeneração subsidiar análises do entendimento de como eles respondem a sazonalidade do dado meteorológico, juntamente com os dados da série Landsat, sobre a área de estudo em São Francisco Xavier.

3.2.1.6 Precipitação

Os dados de precipitação foram obtidos na base de coleções do Google Earth Engine (GEE) oriundos da estação *Climate Hazards Group Infrared with Stations* (CHIRPS, versão 2.0), desenvolvido para apoiar a agência dos Estados Unidos na Rede Internacional de Sistemas de Aviso Prévio contra a Fome. A metodologia do conjunto dos dados foi construída por técnicas de interpolação “inteligente” e alta resolução de longos períodos de estimativas de precipitação registrado com base no infravermelho de duração do *Cold Cloud Duration* (CCD), que incorporam imagens de satélites com resolução de 0.05 graus, aproximadamente de 5 km (FUNK et al., 2015).

O intervalo temporal dos dados de precipitação disponibilizado é de 1981 até o presente e os dados possuem resolução temporal de 6 dias. Essa série de precipitação foi utilizada para apoiar a caracterização dos diferentes estágios de regeneração subsidiar análises do entendimento de como a eles respondem a sazonalidade do dado meteorológico, juntamente com os dados da série Landsat, sobre a área de estudo em São Francisco Xavier. Para apoiar esse conjunto de dados de precipitação, foram acrescentados os dados disponíveis pela Agência Nacional de Águas em São Francisco Xavier (ANA-SFX), durante o período compreendido entre 1984 a 2000. A fim de validar os dados CHIRPS foi realizado uma regressão linear com os dados da ANA Figura 3.8. A temperatura média da superfície da região, extraída da área de estudo por valores médios anuais, obtida por dados de reanálise (NCEP/NCAR), é representada no gráfico da Figura 3.7 pela linha vermelha.

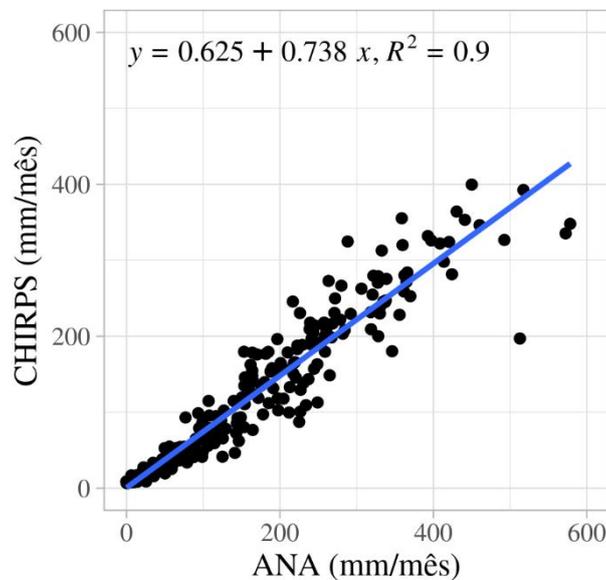
Figura 3.7 – Variabilidade da precipitação acumulada média anual da área de estudo ao longo do tempo. Em cinza claro a série CHIRPS e em cinza escuro a série ANA-SFX.



Fonte: Produção do Autor.

A comparação entre a série de precipitação acumulada anual CHIRPS e ANA evidencia uma superestimativa do primeiro em relação ao segundo, eventos de chuva mais altas são exagerados pelo dados CHIRPS, isso foi verificado em estudos na Amazônia (ANDERSON et al., 2018). Na análise dos dados referente a área de estudo, podemos constatar que a série maior do CHIRPS é validada em 90% em relação aos dados disponíveis da estação ANA-SFX (Figura 3.8).

Figura 3.8 – Regressão linear entre a precipitação média mensal da área de estudo ao longo do tempo. Série maior do CHIRPS validada em 90% em relação aos dados disponíveis da estação ANA-SFX (n = 227).



Fonte: Produção do Autor.

3.2.2 Dados de campo

3.2.2.1 Estação meteorológica

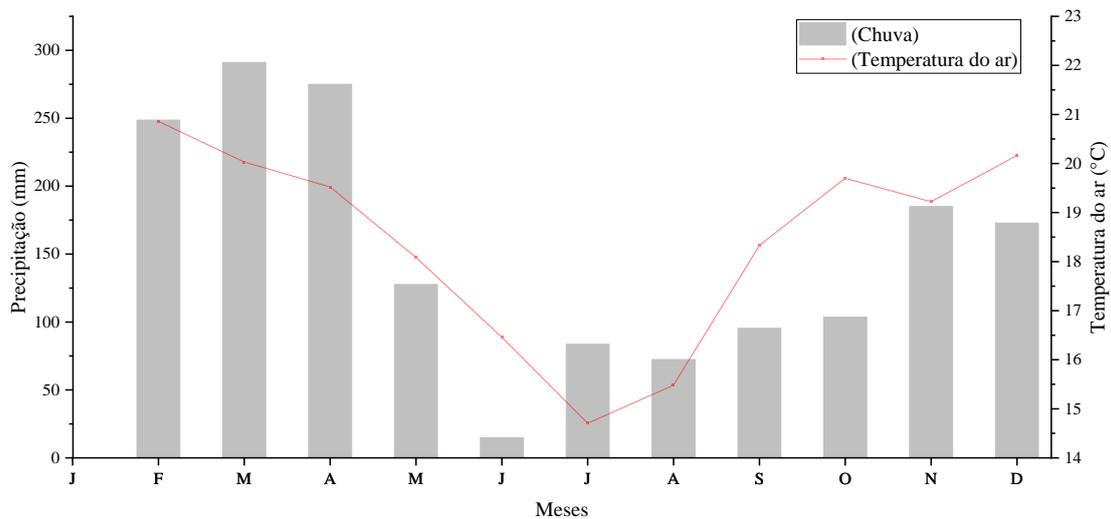
Os dados de precipitação e temperatura do local foram obtidos por médias mensais a partir de fevereiro de 2019, coletadas na estação meteorológica automática (marca HOBO-ONSET, modelo RX3002) instalada próxima à sede da propriedade onde está localizado a área de estudo (Figura 3.9). A metodologia de coleta dos dados foi realizada a cada início de mês, para isso utilizou-se do programa HOBOWare. O intervalo temporal de medidas foi a cada 5 minutos, e as mesmas tiveram início dia 23 de janeiro até o presente momento. Os dados de precipitação e temperatura foram utilizados para apoiar a interpretação acerca dos fatores de interferência ambiental sobre os diferentes índices biofísicos analisados em cada paisagem em regeneração (Figura 3.10).

Figura 3.9 – Estação meteorológica.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 3.10 – Gráfico de temperatura do ar e precipitação para o período de fevereiro a dezembro de 2019.



Fonte: Produção do Autor.

A partir da análise dos dados utilizados no gráfico da Figura 3.7 e da série de precipitação média mensal entre os anos de 1981 e 2001 disponíveis nos dados da estação ANA-SFX, para a região de estudo, definiu-se o período chuvoso correspondendo aos meses outubro à março com 1517 mm (76,5% do total) e o período seco entre os meses de abril à setembro com 466 mm (23,4% do total).

3.2.2.2 Dados de crescimento das árvores

Foram distribuídos nas áreas um total de 60 dendrômetros de banda manuais do modelo EMS-DB20. São compostos cada um por uma fita dendrométrica (banda dendrométrica) metálica que expande com o crescimento do tronco. Foram alocados em 20 unidades por estágio de regeneração (Figura 3.11).

Figura 3.11 – Fita dendrométrica de banda metálica usada para medir o crescimento do tronco, distribuída em 60 indivíduos que foram monitorados durante o período de 2019.



Fonte: Produção do Autor.

O critério de escolha das árvores monitoradas foi a necessidade de estabelecer correlações com dados ópticos orbitais. Portanto, as árvores com Diâmetro a Altura do Peito (DAP) ≥ 10 cm e altura acima da média no dossel, foram selecionadas. Os dendrômetros de banda possibilitaram aferir a variação da Circunferência a Altura do Peito (CAP), possibilitando identificar o crescimento do tronco. As coletas de dados foram feitas quinzenalmente, compreendendo o final do mês de maio até dezembro de 2019. A identificação do crescimento foi realizada através da verificação visual da variação da escala da fita metálica em mm.

3.2.2.3 Índice de área foliar

O índice de área foliar (IAF) foi medido por meio do equipamento LAI-2200C Plant Canopy Analyzer, da LI-COR. As medidas foram realizadas uma vez ao mês, durante o período de maio a dezembro de 2019. O instrumento é composto duas hastes que acompanham os dois sensores portáteis sendo necessários ajustes durante o dia do ano e horário da medida, ajustados para detectar em (A) e/ou (B), representando as frações

acima (*Above*) e abaixo (*Bellow*) do dossel florestal medido. As informações são armazenadas no console que compõe o equipamento (Figura 3.12).

Figura 3.12 – Imagem do sensor do equipamento utilizado em campo para obtenção do índice de área foliar (IAF). Nesta fotografia é mostrado o cuidado com o posicionamento do sensor em relação ao nivelamento e direção geográfica.



Fonte: Produção do Autor.

O resultado final do IAF é sensível às condições do momento em que as medidas são realizadas, portanto as características do tempo e a posição em relação a radiação incidente. Quanto maior for a uniformidade das condições atmosféricas o momento da medida melhor será a estimativa do índice. Por exemplo, a condição de céu nublado com nuvens distribuídas uniformemente no momento do entardecer, correspondem a uma situação excelente. Já medidas tomadas com sol a pino, quando associadas a nuvens não uniformes, expressam um momento de maior possibilidade de radiação solar direta sobre o sensor, o que representa uma situação inadequada. Portanto, conforme variam as condições da radiação e da uniformidade atmosférica no momento das medidas os cuidados com o procedimento de correção de espalhamento aumentam.

A área total estimada de IAF pelo equipamento é calculada conforme a Equação 3.1. Para tanto foi considerado que a altura (h) média dos alvos foi de 15 metros, o valor correspondente ao tamanho de abertura do *view cap* (difusor de abertura controlada) (f)

de 45° é tabelado (0,125), portanto temos que a área estimada nestas condições é de aproximadamente 88 m².

$$A = f * \pi * h^2 \quad (3.1)$$

Sendo que (A) corresponde a área estimada pela medida, que depende do ângulo de abertura do *view cap* representado pela letra (f) e da altura média das árvores medidas, representado por (h).

Cada área de regeneração florestal representa uma parcela no presente estudo, e cada uma possui 3 sub-parcelas de 10m², foram nessas sub-parcelas que foram realizadas as medidas com o equipamento para obtenção do IAF.

3.2.2.4 Serrapilheira

A coleta de serrapilheira foi realizada quinzenalmente entre junho de 2019 a dezembro de 2019, visando monitorar a variação sazonal da abscisão foliar e sua correlação com a produção de folhas novas estimado pelos índices de vegetação (IVs). Para a medida de serrapilheira foram instalados 10 coletores por cada parcela estudada, de regeneração inicial, intermediária e avançada, do tipo *bag* distribuídos nas 3 parcelas de forma aleatória, mas que buscava associar seus respectivos resultados as árvores monitoradas por dendrômetro de banda. Os coletores foram construídos com tela de nylon de 2 mm, formando uma bolsa de 15 cm de profundidade para o acúmulo da serrapilheira, possuindo 1,2 m de altura acima do solo e área de 0,25 m² (50x50cm) (Figura 3.13) (MULER, 2018).

Figura 3.13 - Coletor de serrapilheira.



Fonte: Produção do Autor.

3.2.2.5 Inventário florestal *adaptado*

O CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA), na resolução nº 1, de 31 de janeiro de 1994 (MMA, 2012), estabeleceu a definição e hierarquia de diferentes classes de vegetação e seus respectivos estágios de regeneração sucessional para o Estado de São Paulo diferenciando vegetação secundária em seus estágios: inicial, médio e avançado de regeneração. Os parâmetros definidos nesta resolução para essa divisão são concisos, levando em consideração a estrutura (DAP, altura e área basal) e composição florística (presença de espécies indicadoras) (BRASIL, 1994) (Tabela 3.5). Essa classificação tem sido presente na literatura por pesquisadores da área de sensoriamento remoto (CINTRA, 2007).

Tabela 3.5 – Descrição dos critérios utilizados pela resolução CONAMA nº1 de 31 de janeiro de 1994, para diferenciar cada estágio de regeneração da Mata Atlântica no Estado de São Paulo.

Estágio inicial	Estágio médio	Estágio avançado
a) Fisionomia herbácea / arbustiva de porte baixo, com cobertura vegetal variando de fechada a aberta;	a) fisionomia arbórea e / ou arbustiva predominando sobre a herbácea, diferenciados;	a) fisionomia arbórea, dominante sobre as demais formando um dossel fechado e relativamente uniforme o porte, podendo apresentar árvores emergentes;
b) espécies lenhosas com distribuição diamétrica de pequena amplitude;	b) cobertura arbórea, variando de aberta a fechada, com a ocorrência eventual de indivíduos emergentes;	b) espécies emergentes, ocorrendo com diferentes graus de intensidade;
c) Epífitas, se existentes, são representadas principalmente por Líquens, briófitas e pteridófitas, com baixa diversidade;	c) distribuição diamétrica apresentando amplitude moderada, com predomínio de pequenos diâmetros;	c) copas superiores horizontalmente amplas;
d) trepadeiras, se presentes geralmente herbáceas;	d) Epífitas aparecendo com maior número de indivíduos e espécies em relação ao estágio inicial, sendo mais abundantes na floresta ombrófila;	d) distribuição diamétrica de grande amplitude;
e) serapilheira, quando existente, forma uma camada pouco decomposta, contínua ou não;	e) Trepadeiras, quando presente, variando de espessura de acordo com as estações do ano e a localização;	e) Epífitas, presentes em grande número de espécies e com grande abundância;
f) diversidade biológica variável com poucas espécies arbóreas ou arborescentes, podendo apresentar plântulas de espécies características de outros estágios;	f) serapilheira presente, variando de espessura de acordo com as estações do ano e a localização;	f) trepadeiras, geralmente lenhosas, sendo mais abundantes e ricas em espécies na floresta estacional;
g) espécies pioneiras abundantes;	g) diversidade biológica significativa;	g) serapilheira abundante;
h) ausência de sub-bosque.	h) sub-bosque presente.	h) diversidade biológica muito grande devido à complexidade estrutural;
		i) estratos herbáceo, arbustivo e um notadamente arbóreo;
		j) florestas neste estágio podem apresentar fisionomia semelhante à vegetação primária;
		k) sub-bosques normalmente menos expressivo do que no estágio médio;
		l) dependendo da formação florestal pode haver espécies dominantes.

Fonte: CONAMA (1994).

Baseando-se na caracterização da resolução CONAMA nº1 de 1994, definiram-se os critérios utilizados nessa pesquisa para a elaboração de um inventário simplificado de campo.

A metodologia utilizada nessa caracterização buscou diferenciar os estágios de regeneração (i.e., inicial, médio e avançado) através da comparação e análise de descritores quantitativos e qualitativos da vegetação (Tabela 3.6), adaptado conforme as diretrizes da resolução nº1 do CONAMA (Tabela 3.5).

Tabela 3.6 – Critérios utilizados para análise dos estágios em regeneração segundo critérios descritivos qualitativo-quantitativos.

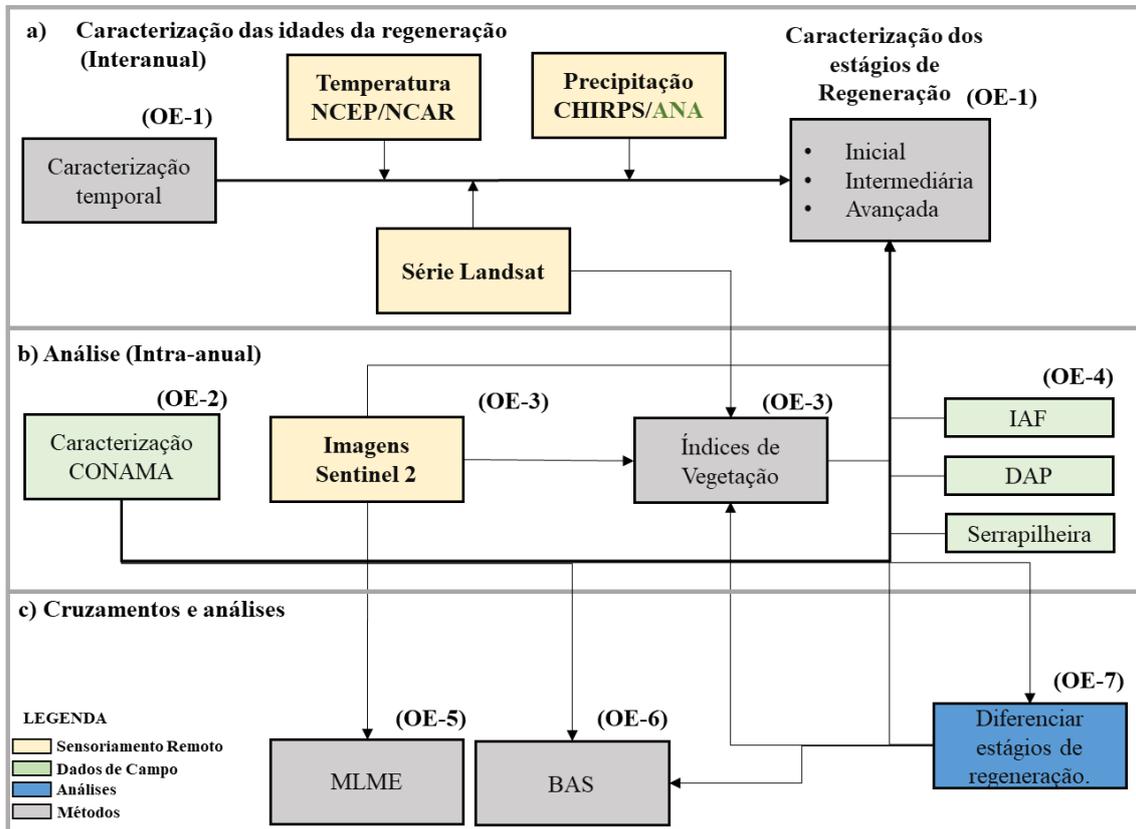
Descritores qualitativos	Descritores quantitativos
Fitofisionomia (Arbustiva / Herbáceo / Arbóreo);	Indivíduos amostrados (n);
Serrapilheira (Presente ou não);	Área amostrada (m ²);
Dossel (Homogêneo / Heterogêneo) - presença ou não de emergentes;	Área basal total (m ² /ha);
Sub-bosque (Presente ou não);	DBH médio (cm);
Epífitas; Trepadeiras; (Presentes ou não) Gramínias.	Maior DBH (cm);
	Coeficiente de variação do DBH (%);
	Altura média (m);
	Maior altura (m);
	Coeficiente de variação da altura (%);
	Troncos múltiplos (%);
	Densidade total (n° de indivíduos/ha);

Fonte: Adaptado de CONAMA (1994).

3.3 Métodos

Os métodos da pesquisa foram estruturados com base nos objetivos específicos (OE) e é resumida na Figura 3.14. O detalhamento de cada etapa é apresentado a seguir.

Figura 3.14 – Organograma da metodologia adotada para a presente dissertação. Cada etapa metodológica refere-se a um dos objetivos específicos (OE) propostos. As caixas em amarelo representam os dados de SER, as verdes os dados de campo e a cor cinza representa os métodos.



Fonte: Produção do Autor.

3.3.1 Desenho amostral

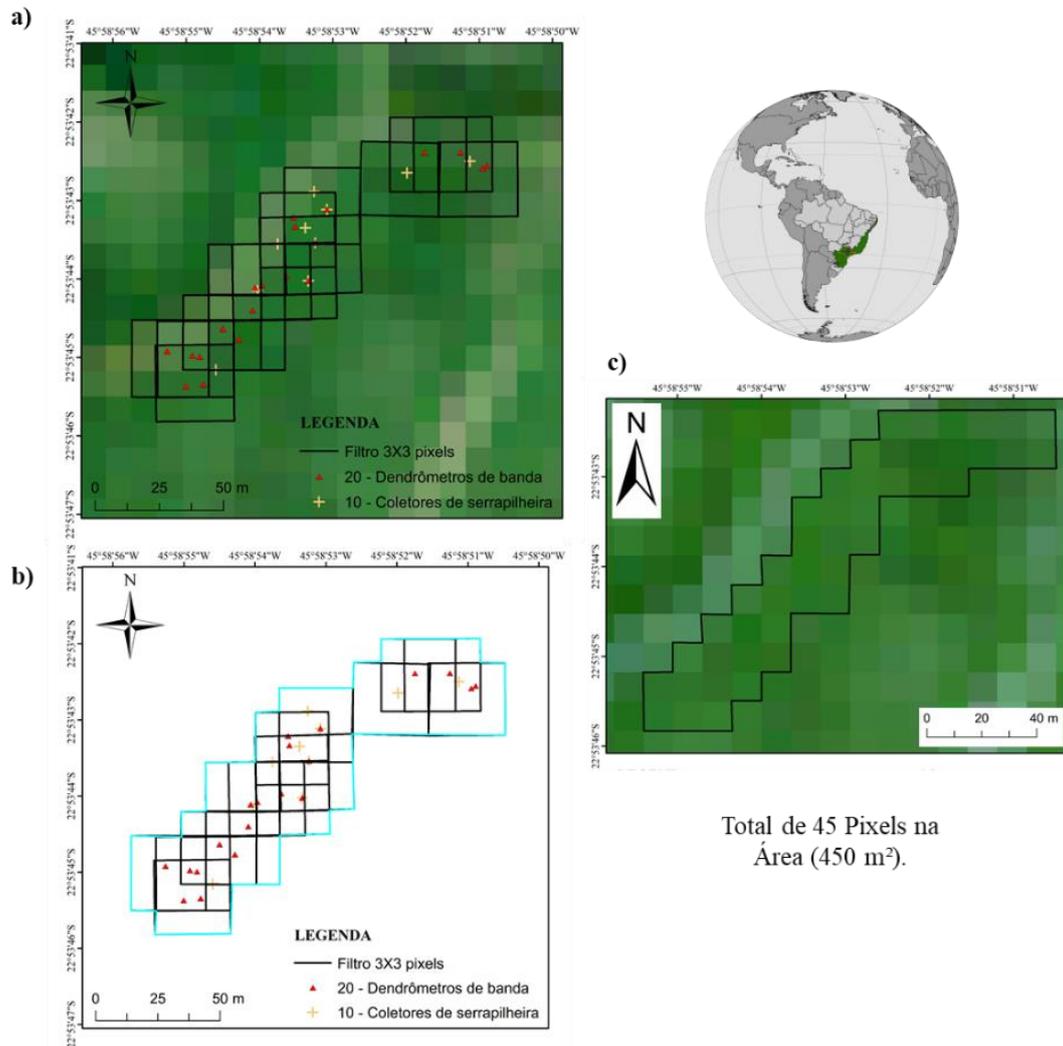
3.3.1.1 Sensoriamento remoto

Visando realizar a caracterização das áreas nos diferentes estágios de regeneração, foi definida a metodologia descrita abaixo.

Em cada área estudada foi delimitada uma região de interesse, do inglês *Region of Interest* – (ROI), que foram consideradas para a extração e análise comparativa por meio de dados orbitais, seja pela série Landsat ou Sentinel-2. As mesmas tiveram como referência o tamanho de 10 m² referente à resolução espacial do produto Sentinel-2 obtido de uma imagem sem a presença de nuvens. O critério de delimitação foi o uso de filtros de 3x3 pixels, com o pixel central localizado nas árvores monitoradas por dendrômetros de banda e nos coletores de serrapilheira. A área total delimitada em cor ciano, foi ajustada

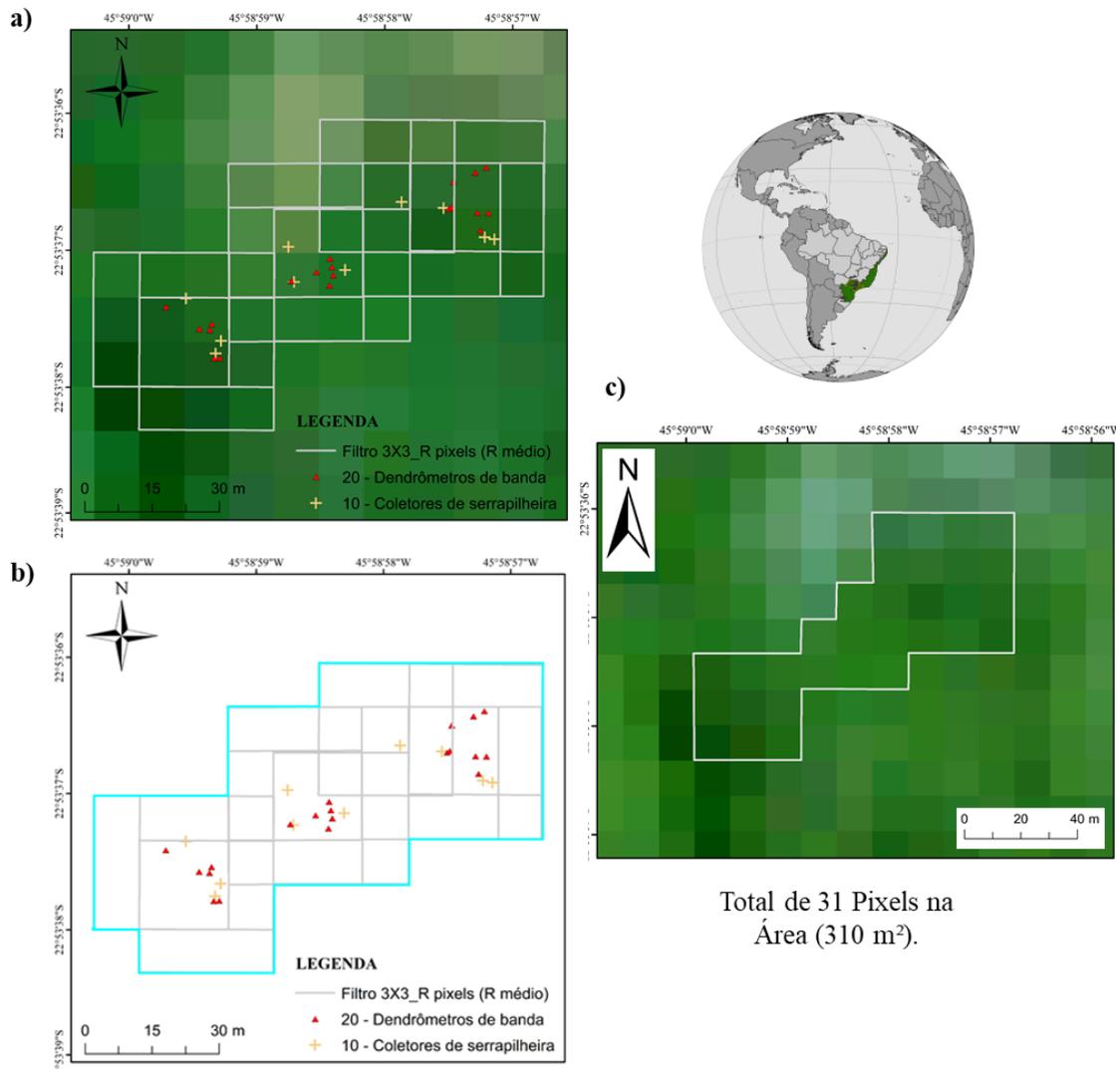
considerando que alguns pixels tiveram que ser eliminados a fim de evitar o efeito de borda delimitado pelas parcelas (Figuras 3.15, 3.16 e 3.17).

Figura 3.15 – Delimitação das parcelas do estágio de regeneração inicial (Ri) realizado pelo uso de um filtro de 3x3 pixels (a), destacando a área total em cor ciano (b) e os ajustes para delimitação final (c).



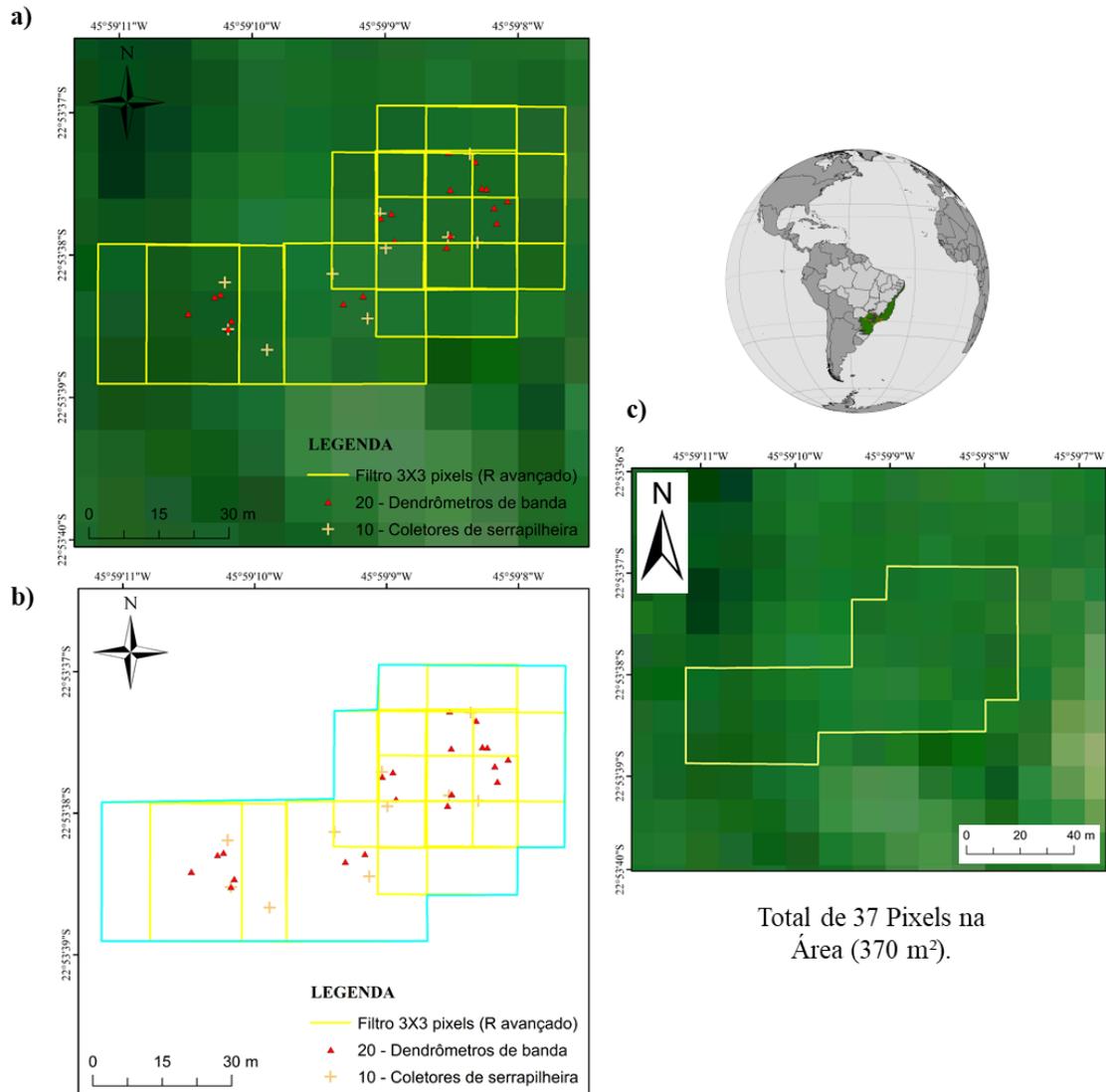
Fonte: Produção do Autor.

Figura 3.16 – Delimitação das parcelas do estágio de regeneração intermediário (Rm) realizado pelo uso de um filtro de 3x3 pixels (a), destacando a área total em cor ciano (b) e os ajustes para delimitação final (c).



Fonte: Produção do Autor.

Figura 3.17 – Delimitação das parcelas do estágio de regeneração avançada (Ra) realizado pelo uso de um filtro de 3x3 pixels (a), destacando a área total em cor ciano (b) e os ajustes para delimitação final (c).



Fonte: Produção do Autor.

3.3.1.2 Campo

No âmbito do projeto CAPES-ANA a implementação da estação experimental solo-planta-atmosfera em São Francisco Xavier teve início em meados de 2018 e a instalação dos instrumentos em campo teve início em janeiro de 2019, sendo responsabilidade do Laboratório de Ecohidrologia do Centro de Ciência do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – CCST/INPE. A área para implantação da estação foi

selecionada através da parceria estabelecida entre a coordenadora do projeto e pesquisadora responsável pelo Laboratório Dra. Laura De Simone Borma e o proprietário da Fazenda da Serra, que vem participando dos programas de PSA (Pagamento por serviços ambientais) da Prefeitura e do Estado. Através desse acordo o proprietário disponibilizou áreas em sua propriedade para estudos de recuperação dos serviços ecossistêmicos da Mata Atlântica, em particular àqueles que se referem aos serviços de regulação hídrica. Pode-se considerar essa propriedade como sendo uma amostra da realidade do processo de recuperação que ocorre na região, no que se refere à recuperação e regeneração da vegetação natural, visto que ela contempla áreas de floresta em diferentes estágios de regeneração.

Para instalação dos instrumentos e caracterização da vegetação em cada estágio de regeneração foram delimitadas as parcelas (Ri, Rm e Ra), e 3 sub-parcelas com 100 m² cada (10 m x 10m). Nas sub-parcelas foi feito um levantamento detalhado da vegetação, que foram catalogados e identificados, no âmbito do projeto CAPES-ANA. Atualmente, a instrumentação compreende uma série de instrumentos, mas para este trabalho destacamos a estação meteorológica convencional (marca HOBO-ONSET, modelo RX3002) instalada próxima à sede da propriedade obtendo dados desde final de janeiro de 2019 e 60 dendrômetros de banda (manuais), que foram distribuídas 20 unidades para cada parcela analisada. O critério de distribuição foi a escolha de árvores com DAP (Diâmetro na Altura do Peito) ≥ 10 cm, e que tivessem altura acima da média na paisagem. Também em cada parcela, foram feitas medidas quinzenais em campo desde maio de 2019 do índice de área foliar (LI-COR, modelo LAI-2200 C). Além disso, foram instalados 30 coletores de serrapilheira distribuídos 10 em cada área, associados às árvores com dendrômetros de banda. Todo esse desenho amostral levou em consideração a necessidade de generalizar os valores das medidas de campo para cada parcela para comparação com dados de imagens de satélite.

3.3.2 Índices de vegetação

Visando caracterizar temporalmente as variáveis biofísicas de cada um dos estágios de regeneração, foi definida a metodologia descrita abaixo.

O *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), índice de Vegetação da Diferença Normalizada, conhecido desde a década de 70, é obtido pela normalização da razão e diferença simples de bandas do vermelho e infravermelho próximo, para intervalos de -1 a +1, ou seja, é a razão entre a diferença das reflectâncias das bandas no infravermelho próximo e no vermelho do visível e pela soma dessas mesmas reflectividades como exposto na Equação 3.2 (ROUSE et al., 1973).

$$NDVI = \frac{\rho_{iv} - \rho_v}{\rho_{iv} + \rho_v} \quad (3.2)$$

Lê-se: ρ_v é a banda do infravermelho e ρ_{iv} é a banda do infravermelho próximo.

O *Enhanced Vegetation Index* (EVI), índice de vegetação melhorado foi desenvolvido para aperfeiçoar o sinal da vegetação, melhorando a sensibilidade de sua detecção em regiões com maiores densidades de biomassa, reduzindo as influências do sinal do solo. O EVI pode ser calculado através da Equação 3.3 (JUSTICE et al., 1998):

$$EVI = 2,5 * \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + (6 * \rho_{RED} - 7,5 * \rho_{Blue}) + 1} \quad (3.3)$$

Lê-se: L é fator de ajuste para o solo; e C1 e C2 são coeficientes de ajuste para o efeito de aerossóis da atmosfera. Os valores dos coeficientes adotados pelo algoritmo do EVI são: L = 1, C1 = 6, C2 = 7,5 e o fator de ganho G = 2,5, aplicados sobre as bandas: (BLUE – Azul), (RED – vermelho) e (NIR - Infravermelho próximo) (HUETE et al., 1997; JUSTICE et al., 1998; PONZONI et al., 2012).

O *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), índice de vegetação ajustado para o solo foi desenvolvido para aperfeiçoar o sinal da vegetação em relação a diferentes níveis de cobertura vegetal. Tal índice possibilita inserir uma constante “L” que tem a função de minimizar o efeito do solo no resultado final do índice. Além do monitoramento da vegetação reduz as influências do sinal do solo. O SAVI pode ser calculado através da Equação 3.4 (HUETE et al., 1998):

$$SAVI = 1,5 * \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + 0,5} \quad (3.4)$$

Lê-se: L é fator de ajuste para o solo. Os valores dos coeficientes adotados pelo algoritmo do SAVI são: L = 0,5, aplicados sobre as bandas: (RED – vermelho) e (NIR - Infravermelho próximo) (HUETE et al., 1997; PONZONI et al., 2012), o fator de 0,5 é

recomendado por (HUETE, 1988) para minimizar o efeito do solo em densidades médias de vegetação e foi aplicado para as três áreas na extração dos valores das imagens.

Os valores obtidos dos índices de vegetação buscam expressar o crescimento e vigor foliar e foram obtidos pelas imagens de sensoriamento remoto, em reflectância de superfície, buscando analisar a sazonalidade do vigor da cobertura do dossel da floresta em seus diferentes estágios.

A plataforma de processamento geoespacial baseada em nuvem Google Earth Engine (GEE), foi utilizada para processar os dados orbitais através da linguagem JavaScript, e permite visualizar, manipular e extrair informações diversas. As coleções utilizadas na plataforma da série Landsat foram Landsat 5, 7 e 8, ambas em Reflectância de Superfície (*Surface Reflectance Tier 1*), encontradas nas coleções do GEE. Em todas essas coleções foram aplicadas funções de filtragem de nuvens e sombra. Utilizou-se os sinalizadores que indicam uma condição clara para melhorar a filtragem (*bit_mask*), através da banda qualidade de pixels (*pixel_qa*), gerados a partir do algoritmo CFMASK, conforme código comentado utilizado e descrito na Figura A.1 (Apêndice A - Informações suplementares) na presente dissertação.

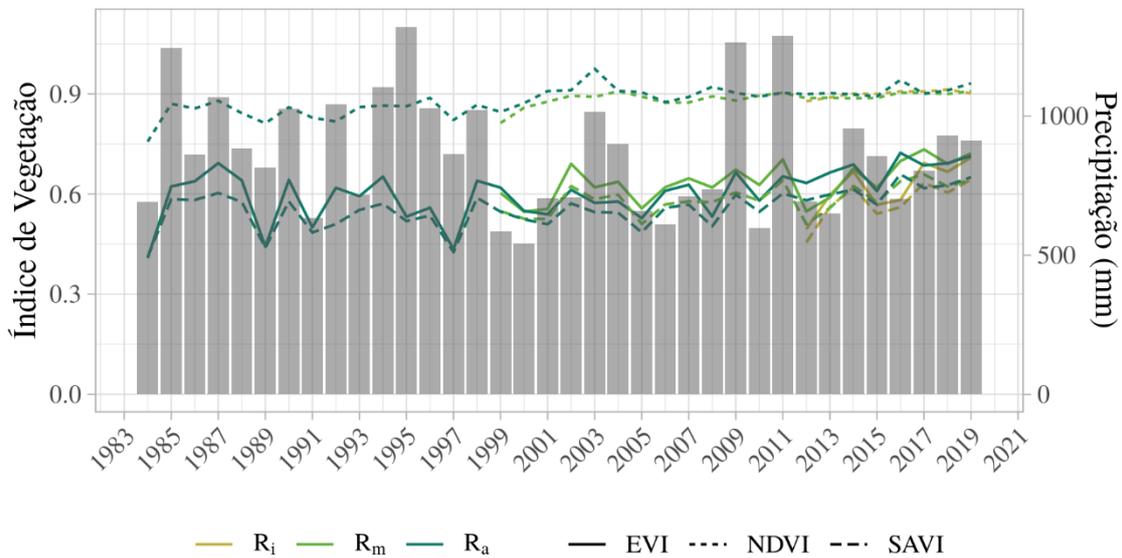
3.3.3 Caracterização das idades dos estágios de regeneração pela série Landsat e dados de precipitação (Objetivo Específico-1)

Visando realizar a caracterização das parcelas em relação a idade da regeneração, foi definida a metodologia descrita abaixo.

A série Landsat foi utilizada para extrair a média dos valores dos índices de vegetação (NDVI, EVI e SAVI) para os diferentes estágios delimitados espacialmente e ao longo do tempo. Através da análise desses valores buscou-se detectar o tempo zero de crescimento no dossel das diferentes coberturas florestais para cada parcela estudada, visando caracterizar o período da regeneração natural, ou seja, a idade das parcelas e informações acerca da mudança na cobertura das áreas (Figura 3.18). Através de índices normalizados foi possível ajustar as diferenças de sensibilidade espectrais entre os sensores de cada satélite e compará-los entre si. No gráfico da mesma figura verificamos que ao longo do tempo ocorre uma mudança de padrão dos IVs e seu do regime de

precipitação, o que possibilitou detectar mudanças nas paisagens ao longo do tempo e apoiou a identificação das idades de cada parcela.

Figura 3.18 – Variação dos IVs ao longo do tempo analisado por imagens da série Landsat. Vemos também a precipitação acumulada anual.

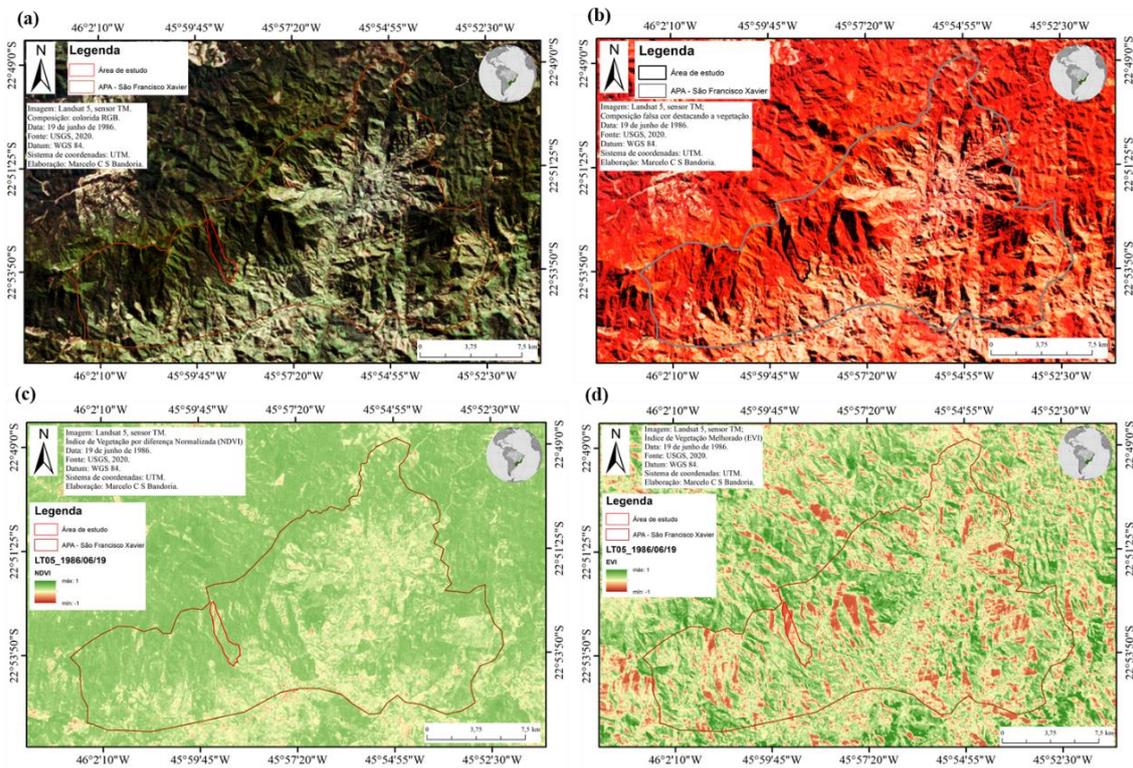


Fonte: Produção do Autor.

A partir da análise do gráfico detectou-se os anos em que a vegetação passou por alguma mudança, seja de variação sazonal, seja por alguma mudança brusca no padrão o que poderia indicar alguma diminuição da cobertura de folhas, ou variação de corte e/ou desmatamento da vegetação. As imagens da série Landsat foram utilizadas para apoiar essa verificação visual e deram suporte para essa análise (Figura 3.19). Essa figura representa um exemplo da análise realizada, sendo que o restante das imagens em sequência temporal da série, podem ser observadas nas coleções de imagens que se encontram no Apêndice B (Informações Suplementares) no final da presente dissertação. Visando caracterizar a idade aproximada de cada estágio de regeneração, verificou-se ano por ano as imagens disponíveis da série e as mudanças ao longo do tempo referentes a vegetação das parcelas estudadas. Observando as imagens na escala da APA-SFX na Figura 3.19 podemos apontar que a situação da vegetação em junho de 1986, segundo as informações biofísicas que foram retiradas da imagem do sensor TM, sobre a área da

propriedade estudada, onde se encontram as parcelas, era bem preservada. Já na região de seu entorno verificamos que havia solo exposto nesta data de aquisição da imagem. O uso do solo nas áreas mais planas é destacado nas imagens c e d, e seus respectivos índices com valores baixos, o que evidenciam a menor densidade de vegetação na região.

Figura 3.19 – A coleção de imagens representa o processo de análise da evolução da regeneração florestal da área de estudos feita através da série de imagens Landsat. Essa figura apresenta 4 imagens, sendo (a) composição colorida verdadeira (RGB), (b) composição colorida falsa cor destacando a vegetação no infravermelho próximo, (c) índice de vegetação por diferença normalizada e (d) índice de vegetação melhorado. Elencamos os meses que representam o período seco para análise do processo de regeneração.



Fonte: Produção do Autor.

A análise visual da sequência de imagens apresentou algumas limitações devido a diferença de equalização entre as mesmas. Isso foi parcialmente contornado pelo realce do tipo *Porcentagem de clipe*, que aplica uma extensão linear aos valores da radiometria da imagem excluindo-se os mais altos e mais baixos no intervalo dinâmico disponível dos dados. Com o intuito de preservar os valores originais dos pixels na análise espectral e

melhorar a visualização das imagens foi associado ao realce uma reamostragem radiométrica que atribui os valores dos pixels pelos valores dos vizinhos mais próximo. Verificou-se ainda outra limitação quanto os valores do EVI. O destaque nos valores de reflectância, tanto para altas densidades foliares quanto para a sombra em diversos pontos da área dificultou a interpretação das mudanças temporais. O NDVI, por outro lado, se demonstrou mais adequado para tal análise por não gerar alterações como as observadas no EVI, possibilitando, portanto, melhor qualidade visual para a verificação das idades das parcelas. A sequência de imagens utilizadas nesta análise se encontra na sessão de Informações Suplementares (Apêndice B) na presente dissertação.

3.3.4 Caracterização dos estágios de regeneração florestal sucessional pela resolução nº1 CONAMA (Objetivo Específico-2)

A caracterização dos diferentes estágios de regeneração, quanto aos descritores quantitativos, foi definida utilizando a metodologia descrita a seguir.

Em primeiro lugar verificou-se a quantidade de indivíduos (n) e a área amostrada (m^2). Com os valores medidos da circunferência a altura do peito (CAP) calcularam-se os valores do diâmetro a altura do peito (DAP) (Equação 3.5), ambos em (cm), para todos os indivíduos em cada área, destacando os maiores diâmetros e os valores médios.

$$DAP = \frac{CAP}{\pi} \quad (3.5)$$

Lê-se: o DAP foi obtido pelo CAP , ambas medidas em cm, e o valor de π equivale a 3,1416.

A partir dos valores de DAP obtidos, calculou-se a área seccional à altura do peito (g), visando verificar o volume das árvores e de seu povoamento pela Equação 3.6.

$$g = \frac{\pi \cdot DAP^2}{40.000} \quad (3.6)$$

Lê-se: g equivale a área seccional que é obtida pelo DAP elevado ao quadrado e pela divisão pelo fator de ajuste da unidade para metros.

Com base nesses dados de g e DAP foi calculada a área basal total (ABtotal) (m^2/ha) total para cada parcela, e seus respectivos coeficientes de variação (%) (Equação 3.7).

$$AB = \sum g \quad (3.7)$$

Lê-se: a área basal AB que foi calculada a partir da somatória das áreas seccionais obtidas à altura do peito.

Através dos valores de altura dos indivíduos foi verificado a maior altura e média (m), e seu respectivo coeficiente de variação (CV) (%) (Equação 3.8).

$$CV = \frac{\sigma}{DAP(m\u00e9dio)} * 100 \quad (3.8)$$

Lê-se: σ é o desvio padrão calculado em relação ao valor médio, seja do DAP ou da altura analisados.

Foram analisamos a presença de troncos múltiplos (%) para cada área e por fim foi calculada a densidade total dos indivíduos (dt) (Equação 3.9).

$$dt = \frac{n^{\circ} \text{ de indivíduos}}{\text{hectare}} \quad (3.9)$$

A caracterização dos diferentes estágios de regeneração, quanto os descritores qualitativos, foi definida utilizando a metodologia descrita abaixo.

Em primeiro lugar verificou-se as diferenças de fitofisionomia de cada área, sua distribuição e relação de dominância/tamanho, divididas entre arbustiva, herbácea e arbórea. Foram medidas as quantidades de serrapilheira para cada área, coletados quinzenalmente, o que evidencia qualitativamente a presença ou não da mesma. Também foram verificadas as diferenças de homogeneidades de dossel, destacando a presença ou não de emergentes e sub-bosques. Também foi realizado um levantamento da presença de epífitas, trepadeiras e gramíneas, fatores que apoiam a caracterização da regeneração.

Por fim, após identificação das espécies, realizada no Instituto de Botânica do Estado de São Paulo, sobre os 20 indivíduos amostrados e distribuídos aleatoriamente nas parcelas (Ri, Rm e Ra, foi feita uma análise da dominância com base na literatura sobre de espécies arbóreas, que também apoiou na caracterização dos estágios de regeneração.

3.3.5 Medidas em campo: IAF, crescimento de árvores e serrapilheira (Objetivo Específico-4)

3.3.5.1 Índice de Área Foliar (IAF)

Toda metodologia de campo desenvolvida para obter o IAF foi baseada em protocolos utilizados de forma adaptada para o estudo de florestas (DE WASSEIGE et al., 2003). As medidas do índice de área foliar (IAF) foram realizadas nas áreas em diferentes processos de regeneração florestal, inicial, intermediário e avançado, descritas detalhadamente a seguir.

Este estudo buscou a realização de manter o padrão de realizar as medidas durante o período da manhã, sob condições atmosféricas de radiação uniforme e sem chuva, para que os valores de correção de espalhamento fossem adequados para a calibração dos valores do IAF. No entanto, nem sempre estas condições foram ideais e, portanto, algumas vezes não foi possível obter medidas, seja devido a mudanças de tempo ou outras variáveis de campo não controladas pela pesquisa. Além dessas condições do ambiente foram padronizadas outras em relação ao equipamento: os dois sensores foram posicionados nas mesmas condições de ângulo azimutal e zenital, além de durante todas as medidas ser feito os ajustados em relação a declividade para retirar o efeito de inclinação do relevo.

As etapas metodológicas de obtenção do IAF em campo foram: a *primeira etapa* se refere a calibração das medidas e foi realizado primeiro pareando os sensores A e B para que seus valores possam ser relacionados, registrado pelo arquivo *Match*, ajustando-se ambos sob as mesmas condições de radiação. A *segunda etapa* foi gerar o arquivo de correção de espalhamento de luz com um dos sensores. Esse arquivo é denominado de “4A”, pois é feito por quatro medidas no modo A: utiliza-se um difusor de luz de cor branca sob o sol, outra com mesmo difusor sob a sombra, outra com o sensor totalmente aberto sem nenhum *view cap* na sombra e por fim uma com o *view cap* (45°), o mesmo utilizado em toda a campanha, sob o sol (KOBAYASHI et al., 2013). A *terceira etapa* consistiu em medir o estimador acima do dossel (A). Para esta ação foi necessário instalar um dos sensores em um local aberto e elevado a uma distância mínima de sete vezes o valor da maior altura de um possível alvo. Assim fixamos um dos sensores em um tripé em área aberta. Configurou-se o *logger* do mesmo para que automaticamente realiza-se medidas

numa frequência de 5 em “B” para 1 em “A”, portanto essa etapa correspondeu a obtenção do valor da radiação solar acima do dossel durante todo o tempo que durava o trabalho de campo. A *quarta etapa* foi obter as medidas em B, que foram realizadas seguindo o desenho amostral das três parcelas de 10 m² em cada área de diferentes estágios de regeneração florestal, sendo medidos 5 pontos para cada sub-parcela, distribuídas da seguinte forma: em cada vértice e ao centro da área.

A *etapa final* foi o tratamento de gabinete que utilizou o software FV2200 e os arquivos gerados em campo, (A, 4A, Match e as medidas de B) para estimar os valores do índice de área foliar e para realizar a correção de espalhamento de luz, ajustadas automaticamente pelo software.

3.3.5.2 Crescimento de árvores – medidas dendrométricas

Para obtenção das medidas de crescimento de troncos de árvores nas áreas em diferentes processos de regeneração florestal, inicial, intermediário e avançado, foi definida a metodologia descrita abaixo.

Foram implementados 20 dendrômetros de banda em cada parcela estudada, com altura de 1.30 m acima do solo, com a devida medida do CAP no momento inicial da instalação. Ao longo do ano de 2019 os campos foram realizados inicialmente mensalmente, depois de 15 em 15 dias, onde foram verificados visualmente a variação de deslocamento da fita metálica que possuem escala em mm, com seus respectivos valores registrados em caderneta de campo.

3.3.5.3 Serrapilheira

Para obtenção das medidas de serrapilheira nas áreas em diferentes processos de regeneração florestal, inicial, intermediário e avançado, foi definida a metodologia descrita abaixo.

Construiu-se coletores do tipo *bag*, com cano de Policloreto de Vinila (PVC) e tela de nylon que foram instalados a uma altura de 1.2 m acima do solo, distribuídos de forma aleatória nas parcelas. A cada visita a campo foram feitos a coleta do material presente nos coletores, que eram armazenados em envelopes de papel e transportados ao

Laboratório do CCST-INPE, para secagem em estufa a 75°C por 48 horas. Após o tempo de secagem aguardou-se o material entrar em equilíbrio com a temperatura ambiente e realizou-se à pesagem em balança analítica para obtenção do peso em gramas (g). Os valores obtidos de serapilheira foram convertidos para unidade de Mg.ha⁻¹.

3.3.6 Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) (Objetivo Específico-5)

O processo de extração dos valores das imagens frações através da aplicação do MLME foi realizado através da função *unmix* presente no GEE. Este algoritmo faz a separação das frações espectrais presentes nos pixels em uma imagem usando uma curva característica de reflectância nos diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético, sendo caracterizada para alvos puros (Endmembers). Essa função recebe os seguintes argumentos: imagem de entrada, a lista de componentes espectrais conhecidos (Endmembers), e as condições de restrição dos valores de saída, a soma sendo igual a 1 e não negativos.

Na fase de testes foram utilizados componentes espectrais de duas bibliotecas livres disponibilizadas on-line, ambas desenvolvidas para imagens do satélite Landsat, e aplicadas para as imagens Sentinel-2. O primeiro grupo de componentes espectrais testado neste trabalho foi utilizado com dados obtidos nas imagens de Landsat TM / ETM+, sobre estudo da floresta Amazônica por Souza et al. (2005). Os componentes espectrais utilizados foram: Green Vegetation (GV), vegetação verde, que nesse caso representaria a vegetação viva; Non - Photosynthetic Vegetation (NPV), vegetação não fotossintética; as frações solo, sombra e nuvens, presentes na análise de monitoramento de degradação florestal de áreas tropicais (BULLOCK et al., 2018). O segundo grupo de componentes espectrais testados foram obtidos na biblioteca que se encontra no software livre IMPACT Toolbox, desenvolvido pelo Instituto de Meio Ambiente e Sustentabilidade da Joint Research Centre (JRC) da Comissão Europeia (SIMONETTI et al., 2015) e as frações espectrais para solo, vegetação e água/sombra foram testadas nas imagens Sentinel-2.

O terceiro grupo de componentes espectrais foram extraídos dos valores obtidos diretamente da coleção de imagens Sentinel-2 selecionada para a presente dissertação, e foi definida a metodologia descrita a seguir.

O procedimento consistiu em obter os valores espectrais de solo, vegetação e água/sombra diretamente de alvos nas imagens da coleção para cada banda espectral através dos gráficos de reflectância para as diferentes bandas, associados a detecção dos endmembers por meio da geometria do simplex, e por meio disso calcular o valor médio obtido para cada fração (Tabela 3.7) (CARVALHO JÚNIOR et al., 2003).

Tabela 3.7 – Média dos valores espectrais de cada fração, solo, vegetação e água/sombra, obtidos da coleção de imagens Sentinel-2.

Frações	Bandas					
	Azul	Verde	Vermelho	Infravermelho Próximo	Infravermelho Médio 1	Infravermelho Médio 2
Solo	0,0591	0,0900	0,1318	0,2180	0,3316	0,2226
Vegetação	0,0189	0,0380	0,0209	0,3208	0,1529	0,0655
Sombra	0,0302	0,0434	0,0228	0,0138	0,0156	0,0113

Fonte: Produção do Autor.

Por meio do mesmo *software* (ENVI) foram geradas imagens de pixels puros para refinar a localização dos componentes espectrais de cada fração, solo, vegetação e água/sombra puros na coleção de imagens, buscando ajustar os valores médios obtidos diretamente pela coleção. Através dos componentes espectrais ajustados (Tabela 3.7) que foram extraídos da coleção de imagens Sentinel-2, para cada área estudada, referentes ao ano de 2019 através do GEE. Na Tabela 3.8 observam-se os três métodos utilizados na presente dissertação, dois (m1 e m2) para a fase de testes e um (m3) ajustado à obtenção das frações espectrais pelo MLME que foram descritos anteriormente. Na Figura 3.20 apresentam-se as bibliotecas espectrais e seus correspondentes comprimentos de ondas (nm) referentes aos três métodos descritos nesta metodologia (Figura A.2) (Apêndice A - Informações Suplementares).

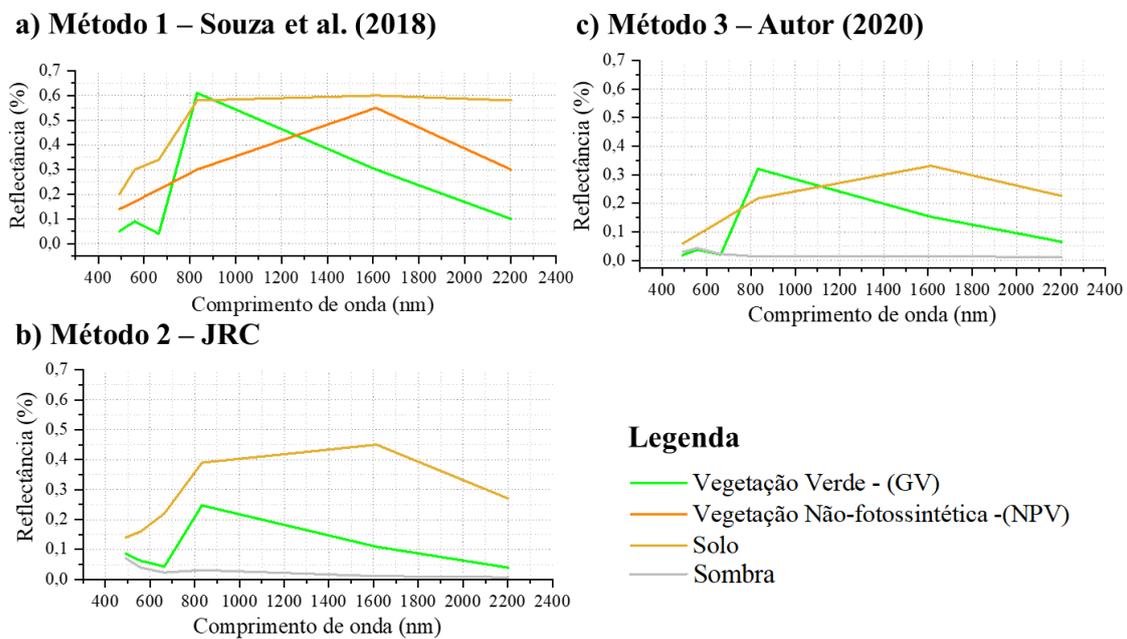
Os resultados serão apresentados de acordo com o método três (m3) obtido pelo ajuste às imagens Sentinel-2. Os outros dois métodos (m1 e m2) foram utilizados para subsidiar a discussão referente a performance do mesmo.

Tabela 3.8 – Referências das bibliotecas espectrais e dos métodos do MLME desenvolvidos para a série Landsat e testados no trabalho. Tais referências foram base de apoio para a adaptação do método (m3) para as imagens Sentinel-2 utilizadas na presente dissertação.

Métodos testados (m) - MLME		Método ajustado	
Utilizados na série Landsat	Frações espectrais	Ajustado para o Sentinel 2	Frações espectrais
m1 (Souza et al, 2005) (Bullock et al, 2018)	GV	m3 (Bandoria, 2020) Frações espectrais	Solo
	NPV		Vegetação
	Solo		Água/Sombra
	Sombra		
m2 JRC (Simonetti et al, 2015)			
Solo			
Vegetação			
Água/Sombra			

Fonte: Produção do Autor.

Figura 3.20 – Comportamento espectral de cada conjunto de bibliotecas espectrais (m1, m2 e m3).



Fonte: Produção do Autor.

3.3.7 Biomassa Acima do Solo (BAS) em cada estágio de regeneração (Objetivo Específico-6)

Para obtenção dos valores de Biomassa Acima do Solo (BAS) para os diferentes estágios de regeneração, foi definida a metodologia descrita abaixo.

A transformação das medidas de crescimento de tronco em biomassa acima do solo foi estimada a partir dos dados de densidade da madeira obtidos por meio da identificação dos indivíduos monitorados por dendrômetros. O pacote do R BIOMASS foi utilizado para adquirir os valores da densidade da madeira e estimar os valores de BAS, através da Equação 3.10, proposta por (CHAVE et al., 2014; RÉJOU-MÉCHAIN et al., 2017).

$$AGB = \exp (-2.024 - 0,896 * E + 0,920 * \ln (WD) + 2,795 * \ln(D) - 0,0461 * (\ln(D)^2)) \quad (3.10)$$

Lê-se: E é a medida do estresse ambiental obtida através da coordenada geográfica do local estudado, WD é densidade da madeira estimada e D é o diâmetro das árvores.

O ajuste dos valores de densidade da madeira foi feito pela função *GetWoodDensity*, que utiliza as bases disponíveis com a nomenclatura das espécies identificadas, e extrai os valores de densidade da madeira (ZANNE et al. 2009). A função *Compute AGB*, é utilizada quando não há dado de altura da árvore disponível, e, portanto, o BAS é calculado a partir das coordenadas do local com a Equação 3.10, ligeiramente modificada da Eq. 7 em (CHAVE et al., 2014).

3.3.8 Análises e testes estatísticos (Objetivo Específico-7)

Foram utilizadas as seguintes estratégias estatísticas (WASSERMAN, 2010) a fim de detectar os diferentes estágios de regeneração, seja para os dados dos sistemas sensores da série Landsat que representaram a análise interanual, seja para a análise intra-anual sobre os dados dos sistemas sensores Sentinel 2A e 2B e dados de campo:

- a) extração automática, organização dos dados e análise exploratória;
- b) teste de diferença de médias (Teste-T), entre períodos (anos) nos diferentes estágios;
- c) análise sobre as anomalias do clima (precipitação e temperatura) em relação a cobertura de vegetação (IVs) sobre as paisagens;
- d) correlação de Pearson aplicada nas variáveis de precipitação e temperatura a fim de avaliar a interferência do clima sobre a vegetação;
- e) decomposição da série original em tendência e sazonalidade, verificando o desempenho detectado pelos IVs;

f) análise sobre a densidade de distribuição: pela diferença sazonal que consiste em uma subtração dos intervalos dos valores mínimos e máximos, referentes aos percentis de 0; 0,15; 0,85 e 1, além disso, pela média anual e mensal.

g) amostragem aleatória simples sem reposição, a fim de diminuir os efeitos de alta correlação espacial e temporal sobre os dados de SR, criando intervalos de credibilidade de 95%;

h) análise da dispersão dos dados, regressão linear e correlação de Pearson entre os dados de campo e dados Sentinel-2.

Apresenta-se abaixo a descrição detalhada destas análises estatísticas. Foram utilizados os softwares R (R CORE TEAM, 2018), Origin (OriginLab, 2018) e Excel (Microsoft, 2016) para a realização do trabalho.

3.3.8.1 Análise interanual

Comparativamente foram testadas as diferenças entre os valores das médias (Teste-T) dos valores máximos mensais de dois índices de vegetação (EVI e NDVI), referentes aos períodos (anos) que indicaram mudanças na cobertura de vegetação. A hipótese considerada nula foi a de que as médias eram iguais, e, portanto, não há distinção entre as idades de regeneração. Utilizou-se como hipótese alternativa a distinção significativa entre as médias das diferentes idades de regeneração, com valor-p menor ou igual a 0,05, ou seja, intervalos de confiança de 95%. Os gráficos dos IVs e os resultados desses testes deram suporte na análise qualitativa-quantitativa e foram utilizados para justificar as mudanças biofísicas da cobertura vegetativa observada ao longo do tempo nas imagens, apoiando a caracterização das idades de cada um dos estágios de regeneração estudados.

3.3.8.1.1 Efeitos climáticos na cobertura de vegetação

Os dados climáticos da série temporal (1984 - 2019) foram analisados por meio de médias mensais e anuais. O conjunto de dados foi dividido entre dois períodos: o seco (maio a outubro) e o chuvoso (novembro a abril). Para subsidiar a verificação da influência das mudanças climáticas nas paisagens estudadas foi feita uma avaliação dos anos que

apresentaram anomalias e as possíveis mudanças sobre a cobertura de vegetação ao longo do tempo.

Para analisar o impacto dos efeitos climáticos nas diferentes paisagens em processo de regeneração foi realizada uma análise de correlação entre dados da série longa de precipitação e temperatura com relação aos índices de vegetação (EVI, NDVI e SAVI). A fim de detectar a alteração da vegetação ao longo do tempo e seu comportamento nos diferentes estágios de regeneração, foi realizada uma análise temporal de decomposição das componentes de tendência e sazonalidade obtidas da série temporal para os três índices de vegetação (EVI, NDVI e SAVI). Estas análises foram realizadas já considerando os períodos obtidos da análise anterior acerca da idade das parcelas. Para verificar se os valores médios de cada IV diferenciam as parcelas em estudo foi feita uma reamostragem aleatória dos dados visando diminuir o efeito de dependência espacial e temporal entre os mesmos. Para cada parcela, foram sorteadas 30 observações, calculando-se então suas médias, esse processo foi repetido 10000 vezes. Após o cálculo da média de cada iteração, foi feita a subtração de cada uma entre as diferentes parcelas, e do total desses resultados, foram extraídos os valores entre os percentis de 2,5% e 97,5% (representando um intervalo de confiança de 95%). Desse processo foram gerados gráficos que demonstram a confiabilidade da separação entre as parcelas utilizando a média mensal dos IVs.

Ainda analisando a capacidade de separabilidade das parcelas por meio dos dados da série longa foi feito uma análise por teste de correlação cruzada entre os IVs da mesma e os dados de precipitação CHIRPS. Diferentes tempos de resposta (meses) da vegetação foram observados pelo gráfico. Finalmente foi realizada uma análise sobre a dispersão dos dados e feita uma regressão linear. Para visualização dos resultados, as equações foram inseridas nos gráficos, a fim de demonstrar as relações com resposta positiva ou negativa entre as variáveis climáticas e os IVs analisados neste estudo.

3.3.8.2 Análise intra-anual

Para analisar este conjunto de dados foi inserido além dos dados das parcelas anteriores (Ri, Rm e Ra) os dados da parcela pasto (P). Foi feita uma análise exploratória do comportamento médio, mediano e de dispersão dos dados intra-anuais obtidos das

imagens Sentinel-2 buscando verificar a capacidade de separação entre as diferentes parcelas estudadas por meio remoto. Para isso, foi feito o teste de médias (Teste-T) através de reamostragem aleatória dos dados visando diminuir o efeito de dependência espacial e temporal entre os mesmos. Após essa separabilidade foi feito um teste de médias num intervalo de credibilidade de 95% para justificar o grau de significância entre essas separações.

Além disso, para testar o efeito da precipitação sobre a vegetação foi realizada uma análise por teste de correlação cruzada entre os IVs do S2 e os dados de precipitação da estação meteorológica local. Diferentes tempos de resposta da vegetação foram analisados baseando-se na regressão linear para visualização dos resultados, foram gerados gráficos e inseridos o coeficiente R^2 e as equações correspondentes a cada parcela.

3.3.8.2.1 Análise dos dados de campo

O conjunto de dados de campo passou por uma análise exploratória da média, mediana e de dispersão dos dados (por parcela) que buscou apoiar a separabilidade entre as parcelas estudadas. Verificou-se a dispersão dos valores medidos de BAS, crescimento de tronco, IAF e Serrapilheira. Os mesmos foram analisados por meio de seus valores médios mensais, verificando a diferença significativa entre as mesmas. A densidade de distribuição dos dados originais demonstrou-se pouco eficaz na separabilidade. Portanto, foi realizado um tratamento de iteração em 10000 vezes de reamostragem de 80 observações de cada variável e parcela, calculando-se a média de cada parcela em cada iteração. A partir desses resultados foram extraídos valores entre os percentis de 2,5% e 97,5% para se criar um intervalo de confiança de 95%. Os dados de Incremento acumulado e BAS também foram analisados por meio de séries temporais. E as medidas de folhas (IAF e serrapilheira) e tronco (incremento acumulado) foram relacionadas com precipitação e temperatura, com o objetivo de observar a sincronicidade entre essas variáveis.

3.3.8.2.2 Análise da BAS no processo de regeneração

A obtenção dos valores de BAS foi feita pelo pacote R (Compute BIOMASS) para os 20 indivíduos identificados e monitorados de cada parcela. Foi feito um gráfico da variação da BAS que apoiou a descrição quantitativa de variação da BAS em cada parcela em diferentes estágios de regeneração.

3.3.8.2.3 Análise biofísica sobre as parcelas por meio dos IVs, MLME e comparações com os dados de campo

A investigação da detecção sobre as diferentes parcelas de foi dividida em duas partes: uma que investigou a sensibilidade por meio dos índices de vegetação (EVI, NDVI e SAVI) e a outra por meio das frações espectrais de solo, vegetação e sombra obtidas pelo MLME, ajustado as imagens Sentinel-2.

Foi feita uma análise sobre os valores médios mensais dos IVs, sua densidade de distribuição por parcela, testes de médias sob uma amostragem aleatória simples sem reposição, visando diminuir o efeito de alta correlação espacial e temporal, além da pequena amostragem. Ainda foi feito uma análise sobre a correlação entre os IVs com a precipitação sob diferentes tempos de respostas (Atraso) mensais. Por fim, foi feito uma análise de regressão linear entre os IVs e as variáveis meteorológicas (Precipitação e Temperatura) com as equações e seus respectivos valores de R^2 inseridos nos gráficos.

Para analisar os efeitos de detecção e capacidade de discernimento dos valores das frações espectrais do MLME extraído das imagens Sentinel-2 sob o método 3 (procedimento metodológico m3 – detalhes na página 59) em cada parcela foi feito um gráfico do comportamento espectral obtido da coleção de componentes selecionados, uma correlação cruzada (Pearson) entre os valores obtidos de cada parcela sob diferentes tempos de respostas (Atraso) mensais, um outro gráfico de regressão linear entre as frações e as variáveis meteorológicas (Precipitação e Temperatura) com as equações e seus respectivos valores de R^2 inseridos nos gráficos. Além disso, foi feito um teste de médias sob uma amostragem aleatória simples sem reposição, visando diminuir o efeito de alta correlação espacial e temporal, além da pequena amostragem. Também foi realizada uma análise regressão linear entre os valores dos IVs e das frações espectrais com as medidas de campo (IAF e Incremento acumulado). Por fim, uma correlação de

Pearson entre todas as variáveis obtidas em campo com os valores de IVs e frações espectrais obtidas das imagens Sentinel-2 foi realizada.

4 RESULTADOS

Este Capítulo está estruturado em duas seções. Na primeira seção apresenta-se os resultados referente a análise temporal obtida pela série Landsat (NDVI e EVI) a fim de responder a primeira pergunta deste estudo. Em seguida, apresentam-se os resultados das análises sobre o ano de 2019 feita sobre os dados Sentinel-2 (NDVI, EVI, SAVI e Frações espectrais - MLME), elucidando a segunda pergunta, e os dados de campo (Crescimento de árvores, IAF e Serrapilheira), elucidando a terceira e quarta pergunta do trabalho. Finalmente apresentam-se os resultados que comparam as estimativas de campo com aquelas obtidas por SR.

4.1 Análise interanual

4.1.1 Caracterização temporal das parcelas em regeneração obtida através das imagens da série Landsat (OE-1)

A análise das mudanças observadas nas imagens sobre a área de estudo (Apêndice B em escala APA-SFX), possibilitou explorar as escalas para observar as mudanças temporais e espaciais sobre as seguintes áreas: áreas da propriedade, área de regeneração de pasto (P) e nas áreas das parcelas em diferentes estágios de regeneração (Ri, Rm e Ra).

O processo de análise das áreas em diferentes estágios de regeneração e a caracterização de suas respectivas idades mostrou que a área da propriedade apresentou aumento de alterações da cobertura de vegetação em julho de 1998 (Figura B5), com mudanças expressivas ocorridas em julho de 2002 (Figura B8) e julho de 2003 (Figura B9), que passaram a diminuir a partir de junho de 2006 (Figura B12) em toda sua extensão.

A área da parcela de pasto (P) apresentou, em agosto de 1999 (Figura B6), alterações na cobertura do seu entorno com mudança expressiva interna sobre sua área em agosto de 2010 (Figura B15) o que foi detectado também em julho de 2014 (Figura B17).

A área da parcela em regeneração inicial (Ri) esteve submetida a alterações em seu entorno, detectadas nas imagens em julho de 1998 (Figura B5) e em agosto de 1999 (Figura B6). Dois anos depois desta última, em agosto de 2001 (Figura B7), detectou-se pequenas alterações em uma parte da área. Após isso, somente em junho de 2006 (Figura

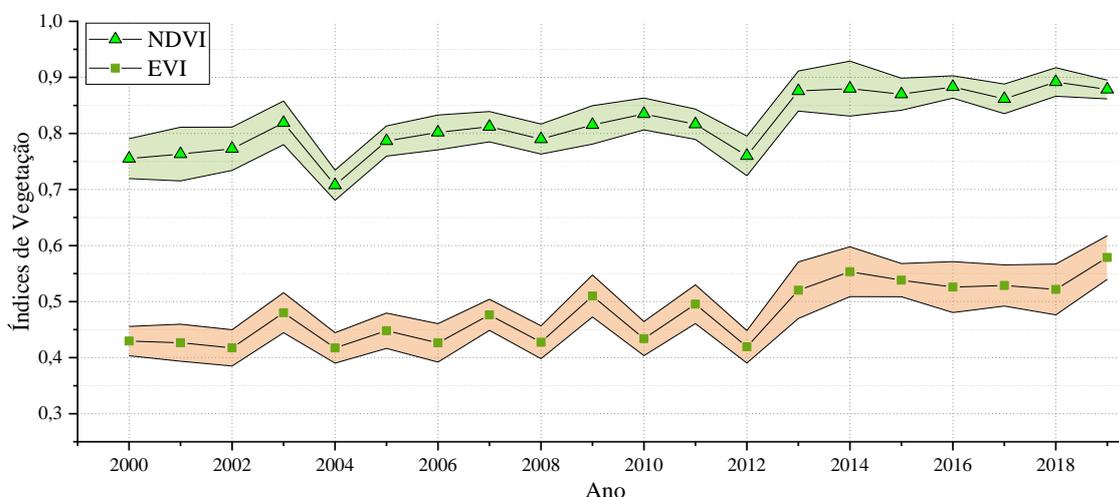
B12) foi detectada pequena alteração a sudoeste da área. No ano de 2012 mudança expressiva de padrão dos IVs (Figura 4.1). Porém, não foi possível confirmação por meio das imagens, devido à presença de nuvens sobre a área nesta data. Entretanto, em julho de 2014, ocorreram alterações em toda a área da parcela detectadas por imagem (Figura B17). Para verificar se o período destacado, antes e após a seta da Figura 4.1 (2000-2012 a 2013-2019) apresentaram diferença significativa, foi feito um Teste-T de médias (Tabela 4.1), que evidenciou diferença significativa entre os dois períodos (p-valor < 0,05) e, portanto, mudança no padrão dos IVs sobre a área.

Tabela 4.1 – A Tabela mostra os parâmetros obtidos do resultado do teste t, que apresentou p-valor significativo para os IVs, apontando que as médias testadas foram diferentes.

Parcela	Parâmetros	Índices de Vegetação				Resultados
		EVI		NDVI		
Ri	Períodos	2000-2012	2013-2019	2000-2012	2013-2019	H1 - Alternativa As médias são diferentes 95% de confiança < 0,05
	Observações	90	74	90	74	
	Média	0,446214229	0,527167109	0,787235877	0,857451934	
	Variância	0,006014291	0,006590146	0,009001204	0,003892379	
	p-valor	5,83E-10		3,18E-08		

Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.1 – Série temporal dos valores médios máximos e desvio padrão dos índices de vegetação NDVI e EVI obtidos pela série Landsat sobre a parcela Ri, destacando a mudança de padrão entre dois períodos.



Fonte: Produção do Autor.

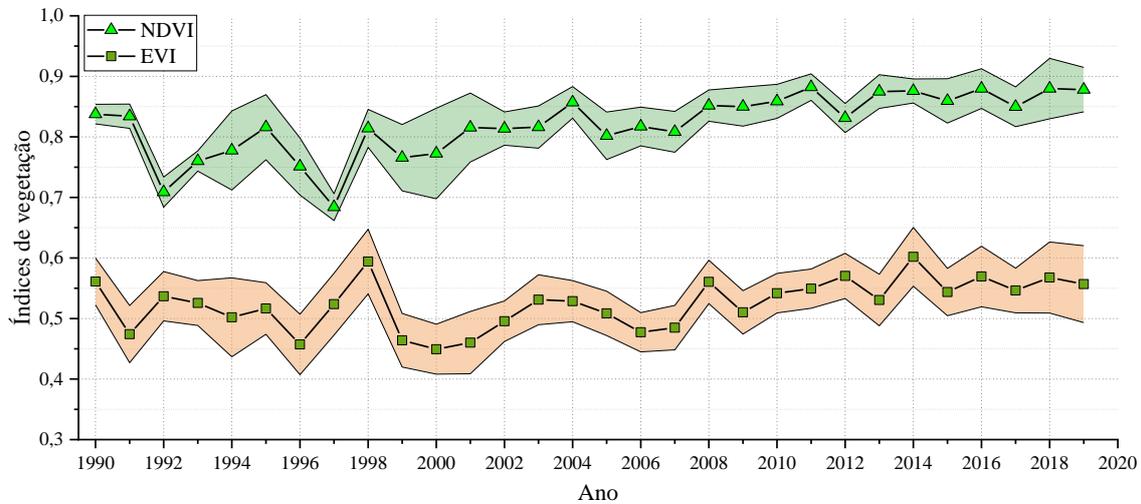
A análise sobre as imagens (Apêndice B) da área da parcela em regeneração intermediária (Rm), mostra que entre julho de 1998 e agosto de 1999 (Figuras B5 e B6) ocorreram retirada crescente da cobertura de vegetação, concentrada a leste de seu entorno e sobre uma pequena porção interna da área. Essas mudanças detectadas pelas imagens sugerem que o início do processo de regeneração teria ocorrido a partir de 1999, e, portanto, a idade correspondente a essa parcela, confirmado pelos valores do IVs (Figura 4.2). A validação dessa mudança, realizada pelo Teste-T de médias dos intervalos (1990-1998 a 1999-2019) dos IVs que apresentaram mudança no padrão da série temporal (Tabela 4.2). O resultado foi significativo para as mudanças de padrão do NDVI (p-valor < 0,05), mas não significativo para o EVI. Mesmo assim, o conjunto de dados NDVI apoiadas pelas imagens ópticas sugere mudança de padrão na cobertura vegetal, nessa área entre 1998 e 1999 (Figuras B5 e B6).

Tabela 4.2 – A Tabela mostra os parâmetros obtidos do resultado do teste t, que apresentou p-valor significativo para o NDVI, apontando que as médias testadas foram diferentes.

Parcela	Parâmetros	Índices de Vegetação				Resultados
		EVI		NDVI		
Rm	Períodos	1990-1998	1999-2019	1990-1998	1999-2019	EVI - H0 - Nula médias são idênticas NDVI - H1 - Alternativa médias são diferentes
	Observações	41	158	41	158	
	Média	0,517883404	0,528838326	0,7717003	0,839918586	
	Variância	0,006090123	0,007251016	0,007130495	0,004257512	
	p-valor	0,217423088		6,38E-06		

Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.2 – Série temporal dos valores médios máximos dos índices de vegetação NDVI e EVI obtidos pela série Landsat sobre a parcela Rm, destacando o período da mudança de padrão temporal testado.



Fonte: Produção do Autor.

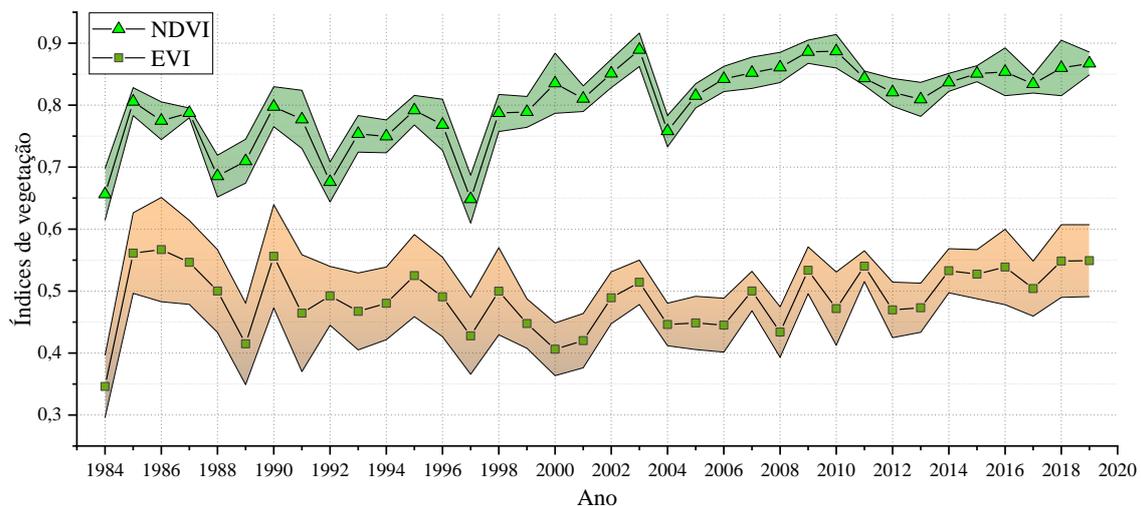
Por fim, a parcela em processo de regeneração em estágio avançado (Ra) não apresentou nenhuma alteração expressiva interna visualmente analisada nas imagens da série Landsat (Apêndice B), apenas detectou-se mudanças no seu entorno em setembro de 1992, junho de 2013 e junho de 2018 (Apêndice B – Figuras B4, B16 e B19). Na Figura 4.3 podemos observar que desde 1984 a variação dos valores médios anuais, calculados a partir dos valores máximos dos IVs mensais, tiveram uma tendência de aumento ao longo de todo o período. Porém, podemos observar mudanças no comportamento sazonal do NDVI por meio da variação de padrão entre os períodos de 1984-1997, 1998-2004 e 2005-2019, comparado ao resto da série. Para verificar se esses períodos foram significativamente distintos entre si e a série foi feito um Teste-T de médias (Tabela 4.3). Os resultados apontam que as médias dos padrões analisados foram distintos. Portanto, apoiam a sugestão de mudança de padrão temporal sobre a cobertura dessa área analisada.

Tabela 4.3 – A Tabela mostra os parâmetros obtidos do resultado do teste t, que apresentou p-valor significativo para o NDVI.

Parcelas	Parâmetros	Índice de Vegetação				Resultados
		NDVI				
Ra	Períodos	1984-1997	1998-2004	1998-2004	2005-2019	NDVI - H1 - Alternativa as médias são diferentes
	Observações	70	45	45	109	
	Média	0,78577213	0,81870447	0,818704471	0,862286346	
	Variância	0,00690271	0,0114215	0,011421498	0,003898662	
	p-valor	0,04168309		0,006553284		

Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.3 – Série temporal dos valores médios máximos dos índices de vegetação NDVI e EVI obtidos pela série Landsat sobre a parcela Ra.



Fonte: Produção do Autor.

Portanto, a análise das séries temporais, associada aos testes de médias dos IVs, detectaram alterações na cobertura vegetal da propriedade como um todo e parcelas ao longo do tempo.

Em relação a parcela em regeneração inicial (Ri) a avaliação foi parcialmente limitada devido a impossibilidade de confirmar sua idade pela análise visual em imagens, devido a presença de nuvens. Porém, através da variabilidade temporal dos IVs observou-se que em 2012 houve uma mudança de padrão, que associado aos testes de médias, sugere, apoiado pelas informações fornecidas pelo atual proprietário sobre o uso desta área, que o início da regeneração desta área é de aproximadamente 7 a 8 anos.

Entre os anos de 1998 e 1999 detectou-se alterações na cobertura da paisagem em toda a propriedade, mas especificamente observou-se que a área próxima da regeneração intermediária (Rm) sofreu alterações, associada aos testes de médias, sugerindo, portanto, uma idade de aproximadamente 20 anos de regeneração para essa parcela.

Em relação a parcela em regeneração avançada (Ra) verificou-se que a mesma possui mais do que 40 anos de idade, já que ao longo do período analisado, mesmo com alguns indícios de variações no NDVI, não foi possível observar mudanças ou alterações marcantes ao longo da série temporal por meio das imagens disponíveis. Consideramos que a variação do NDVI apresentada na Figura 4.3 não foi suficiente para representar uma alteração da cobertura de vegetação nesta parcela devido à falta de confirmação por imagem. Em resumo, e de forma comparativa com informações obtidas por entrevista com o atual proprietário, sumariza-se os resultados da análise na Tabela 4.4, abaixo.

Tabela 4.4 – Resultados da caracterização das idades das parcelas em comparativo entre informações obtidas por entrevista com o atual proprietário e os resultados obtidos pela análise apresentada neste estudo.

Caracterização das Idades das parcelas			
Áreas estudadas	Proprietário	Série Landsat	Observações ¹
P (pasto)			Área de 0,4 ha em revegetação por PSA pela prefeitura de SJC.
Ri (Regeneração inicial)	~ 7 anos	± 7 - 8 anos	Foram plantadas 3171 mudas de arbóreas em junho de 2013. ²
Rm (Regeneração intermediária)	> 15 anos	± 20 anos	Ocorre regeneração natural desde 2005.
Ra (Regeneração avançada)	> 40 anos	> 40 anos	Área de 67 ha que não foi modificada pelo proprietário.

¹ Informações obtidas em entrevista com atual proprietário.
² Monitoramento realizado durante 2 anos pelo atual proprietário.

Fonte: Produção do Autor.

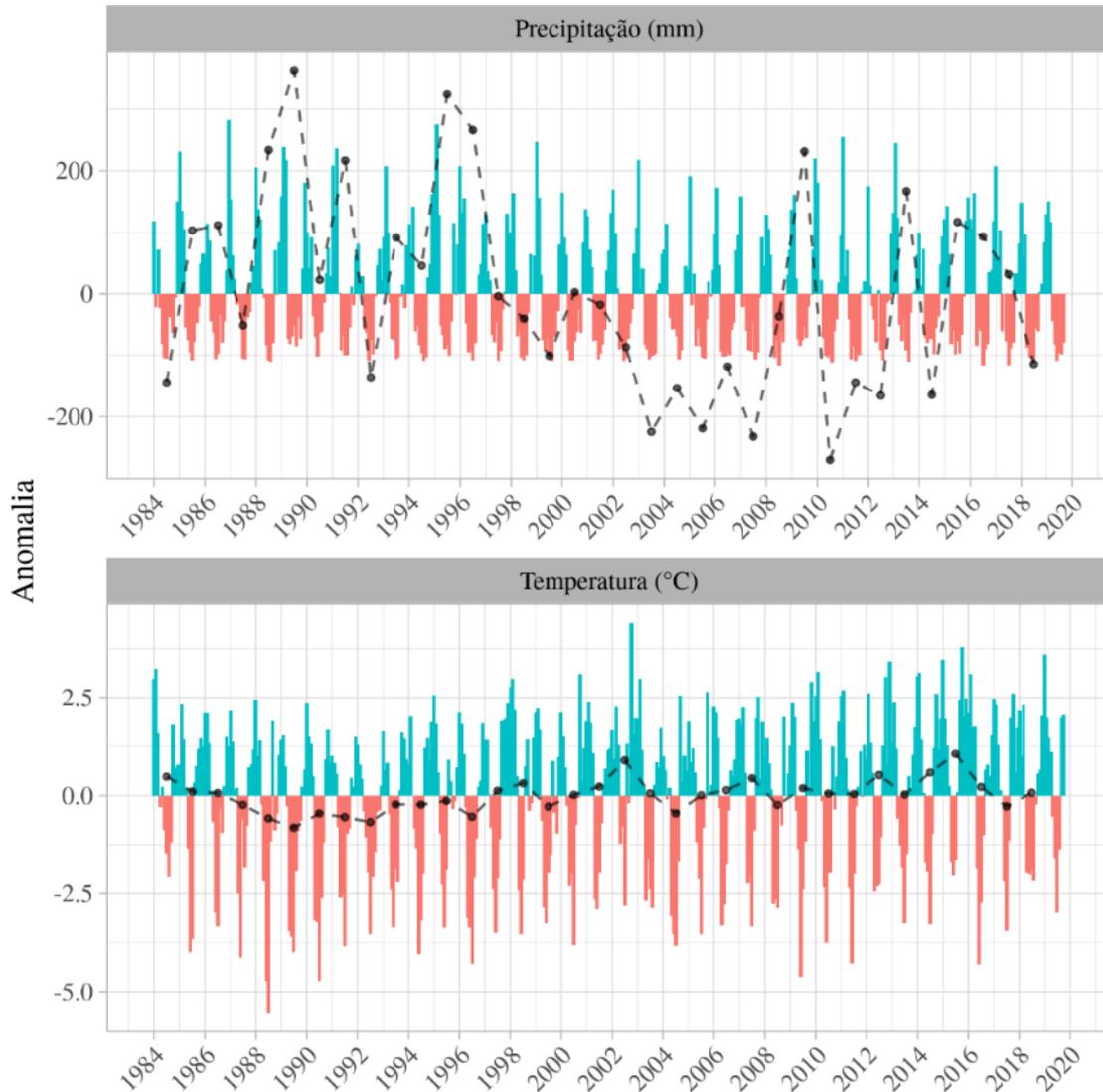
4.1.2 Influência do clima sobre as paisagens

O objetivo dessa análise foi detectar potenciais mudanças no clima que teriam ocorrido ao longo do tempo sobre a área de estudada. O método de cronossequência utilizado sobre a análise da Floresta sucessional assume que a variação do clima, entre os anos e tipos de distúrbio, têm impacto uniforme nas parcelas de diferentes idades de regeneração (PICKETT, 1989).

A Figura 4.4 apresenta a anomalia climática na série dos dados de precipitação (CHIRPS) e temperatura da superfície (NCEP/NCAR). Em relação a precipitação média anual pode-se destacar que os anos que apresentaram anomalias positivas foram: 1989, 1991, 1995,

1996, 2009, 2013, 2015 e 2016. No entanto, ao observarmos os valores mensais destacamos que os anos de 1985, 1987, 1989, 1991, 1995, 1999, 2011 e 2013 como anos com médias mensais acima da média de longo prazo para a região. Podemos concluir que ocorre predominantemente anos mais chuvosos até 2000. Em relação a precipitação média anual após esse ano destacamos que em 2003, 2005, 2007 e 2011, apresentaram anomalia negativa. Considera-se, portanto, que após o ano 2000 predominantemente ocorreu um período mais seco. A análise dos gráficos de anomalia em relação a variação média anual da temperatura sugere uma tendência de anomalia de temperaturas positiva a partir de 1998.

Figura 4.4 – Gráfico de anomalia obtido das médias mensais e média anual dos dados de precipitação (CHIRPS) e das médias mensais e anuais de temperatura da superfície (NCEP/NCAR). Essa anomalia é calculada sobre a série subtraída pela média temporal que foi de 95 mm. A análise do gráfico destaca a variabilidade das variáveis em torno do valor médio de cada série. São destacados os períodos seco em vermelho e chuvoso em azul, além da linha preta pontilhada que representa a anomalia média anual.

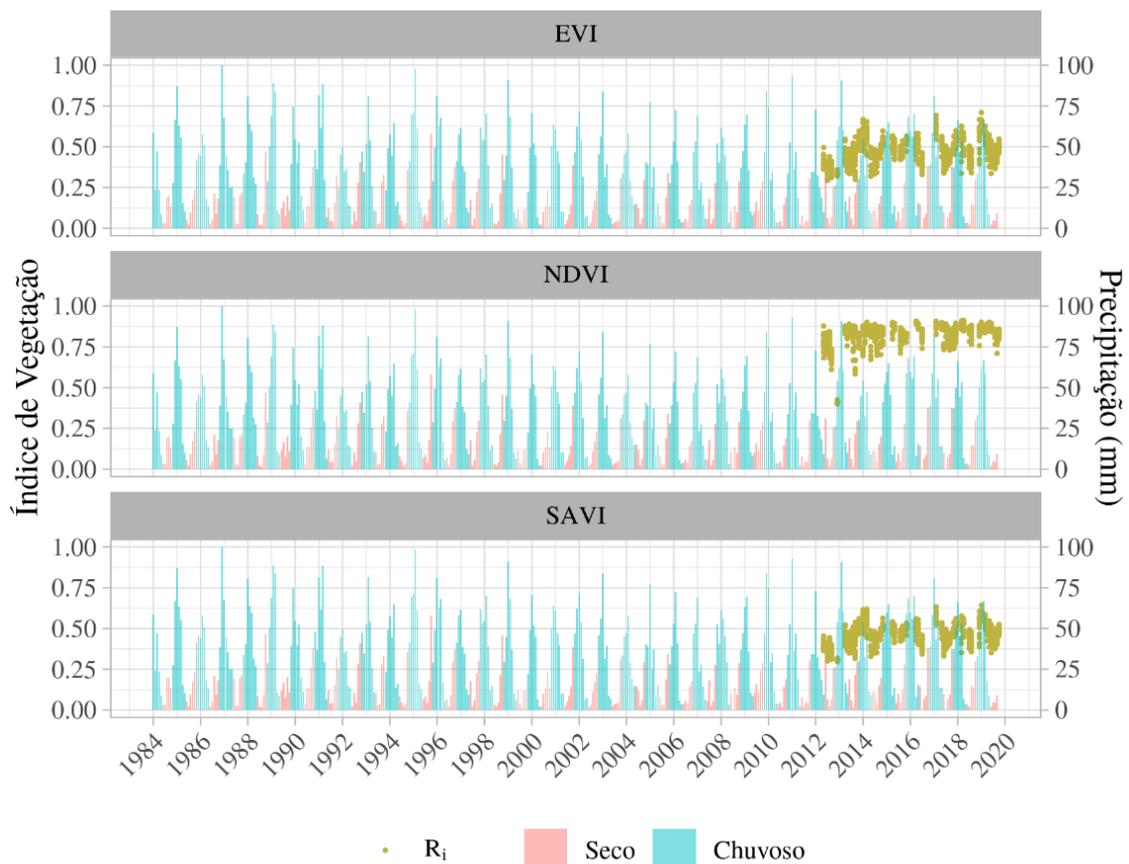


Fonte: Produção do Autor.

As Figuras 4.5, 4.6 e 4.7 apresentam a série temporal (Landsat) dos índices de vegetação EVI, NDVI e SAVI das parcelas, Ri, Rm e Ra em relação aos valores de precipitação mensal, divididas em período seco e chuvoso. A nuvem de pontos indica a grande variabilidade dos valores biofísicos referentes ao dossel de cada parcela ao longo do

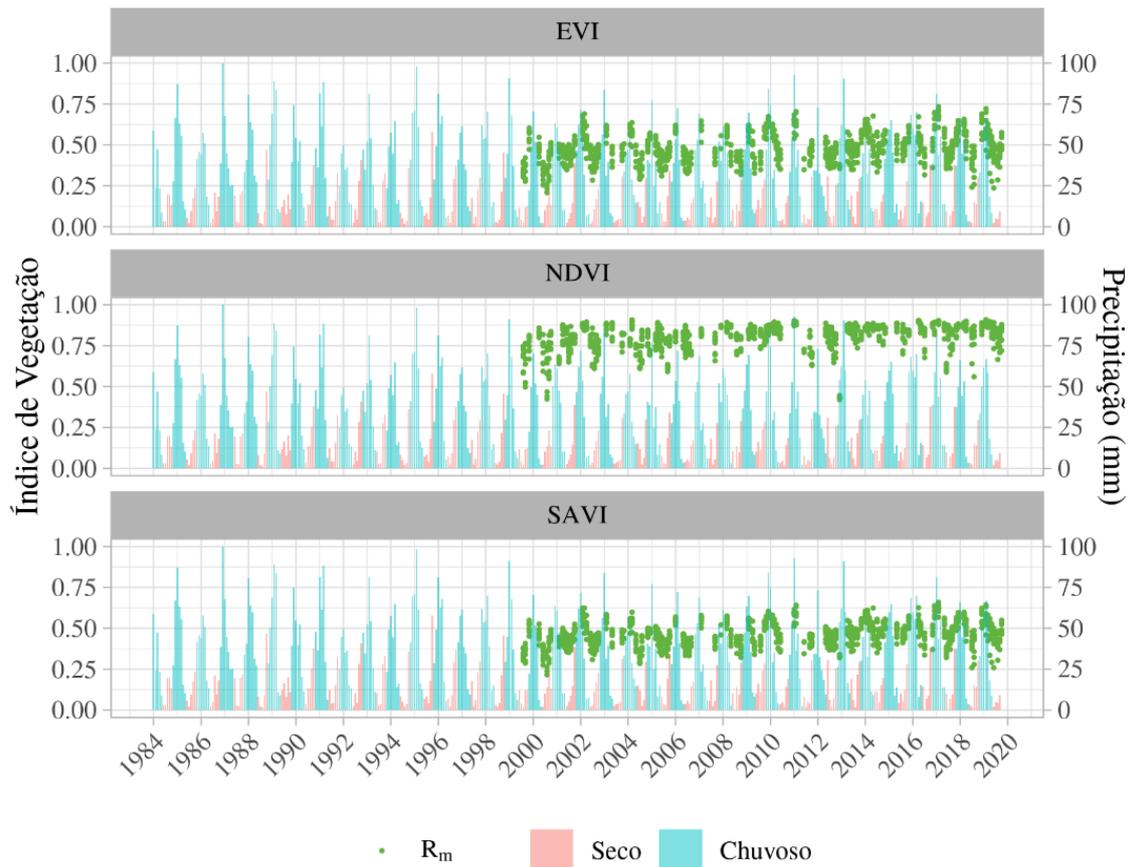
tempo. A flutuação ao longo do tempo dos IVs mostra o comportamento da fenologia da cobertura vegetal em cada área em relação à variação do regime de chuvas. A relação inversamente proporcional indica uma relação de dependência entre os IVs e a precipitação, onde os IVs diminuem no período seco e aumentam no chuvoso, sugerindo um tempo de resposta da vegetação em relação a umidade disponível no ambiente.

Figura 4.5 – Série temporal longa (todos os pixels) dos IVs e dados médios de precipitação (período seco e úmido), extraídos das parcelas em regeneração inicial (Ri).



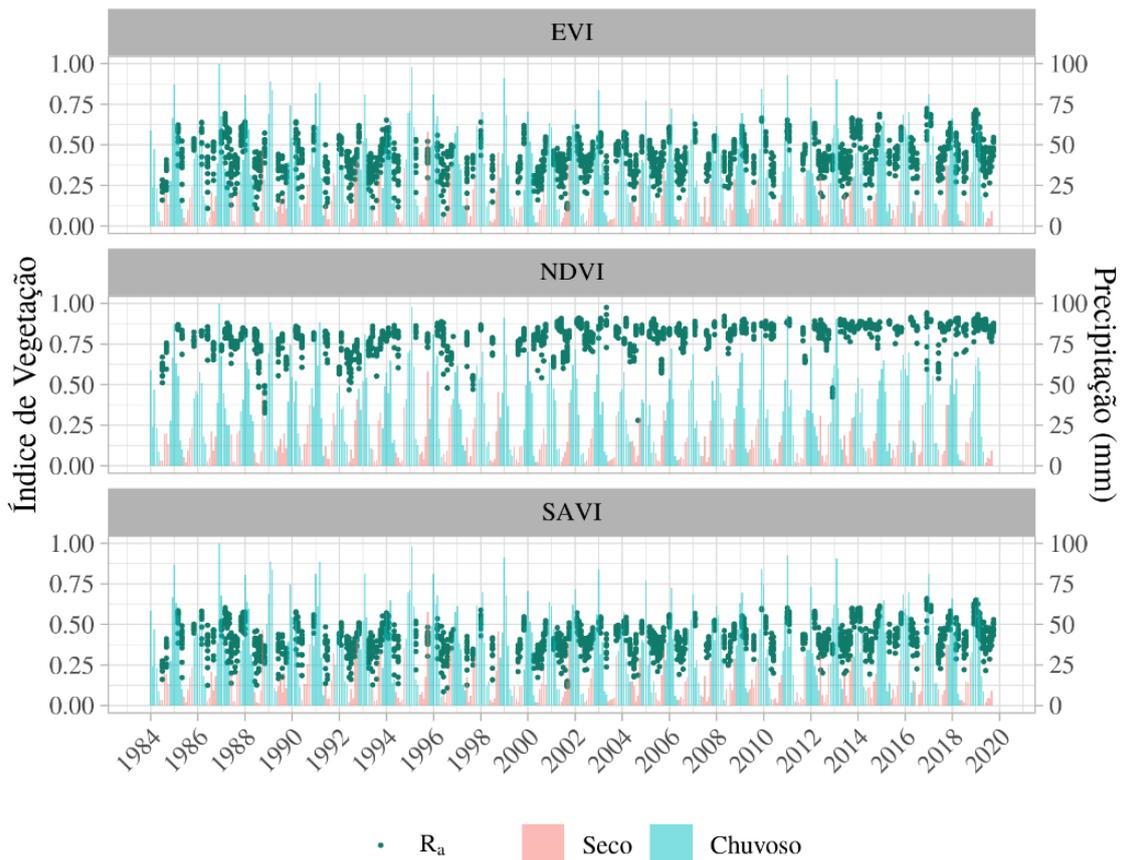
Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.6 – Série temporal longa (todos os pixels) dos IVs e dados médios de precipitação (período seco e úmido), extraídos das parcelas em regeneração intermediária (Rm).



Fonte: Produção do Autor.

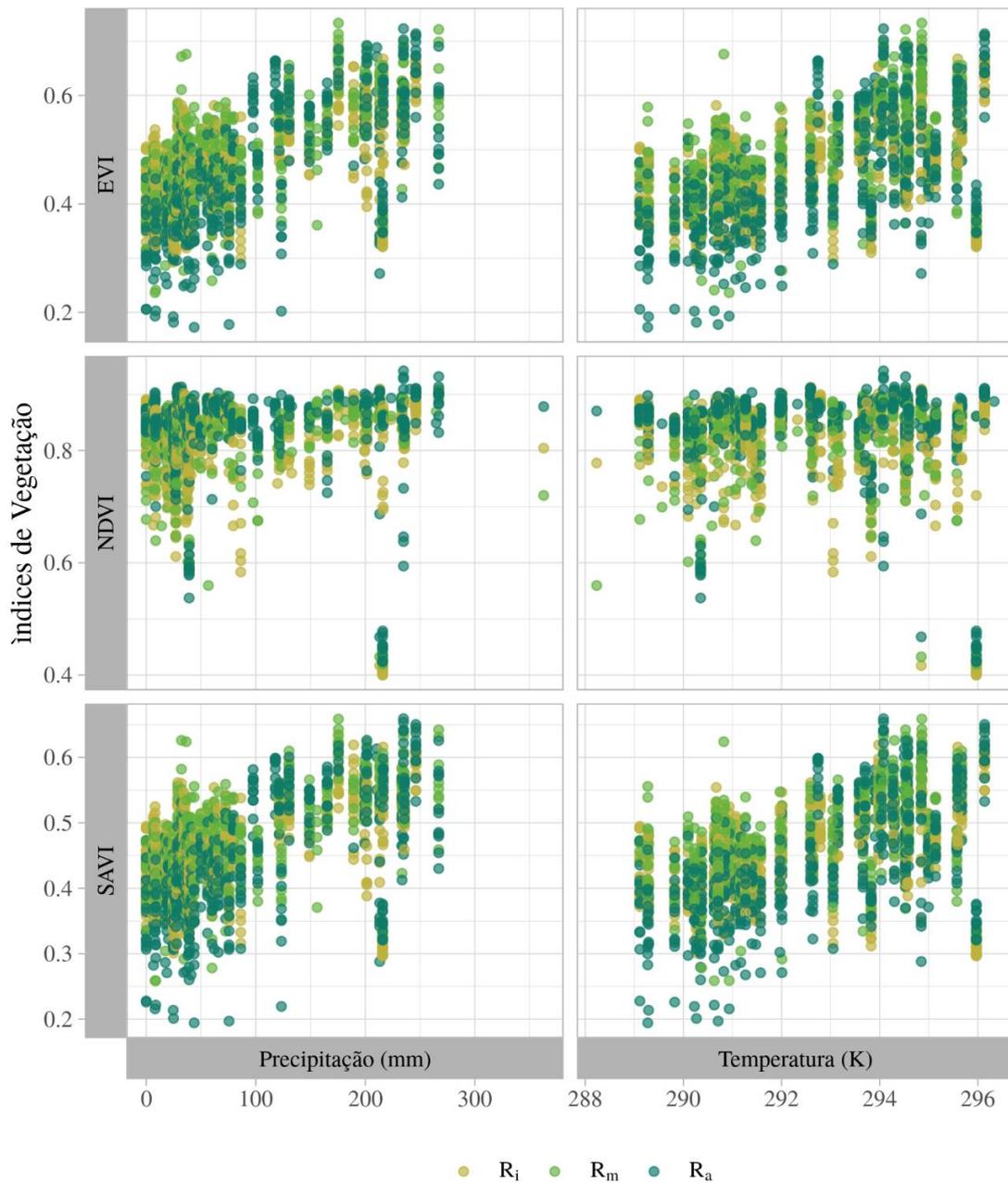
Figura 4.7 – Série temporal longa (todos os pixels) dos IVs e dados médios de precipitação (período seco e úmido), extraídos das parcelas em regeneração avançada (Ra).



Fonte: Produção do Autor.

A Figura 4.8 apresenta a dispersão de todos os valores de IVs por quantidade de pixels obtidos da série Landsat para o período referente a cada estágio de regeneração. Pode-se observar que a dispersão foi crescente e linear para o EVI e SAVI e o NDVI foi insensível a relação com a precipitação e temperatura.

Figura 4.8 – Gráfico de dispersão entre IVs da série Landsat em relação a variáveis climatológicas de precipitação e temperatura.

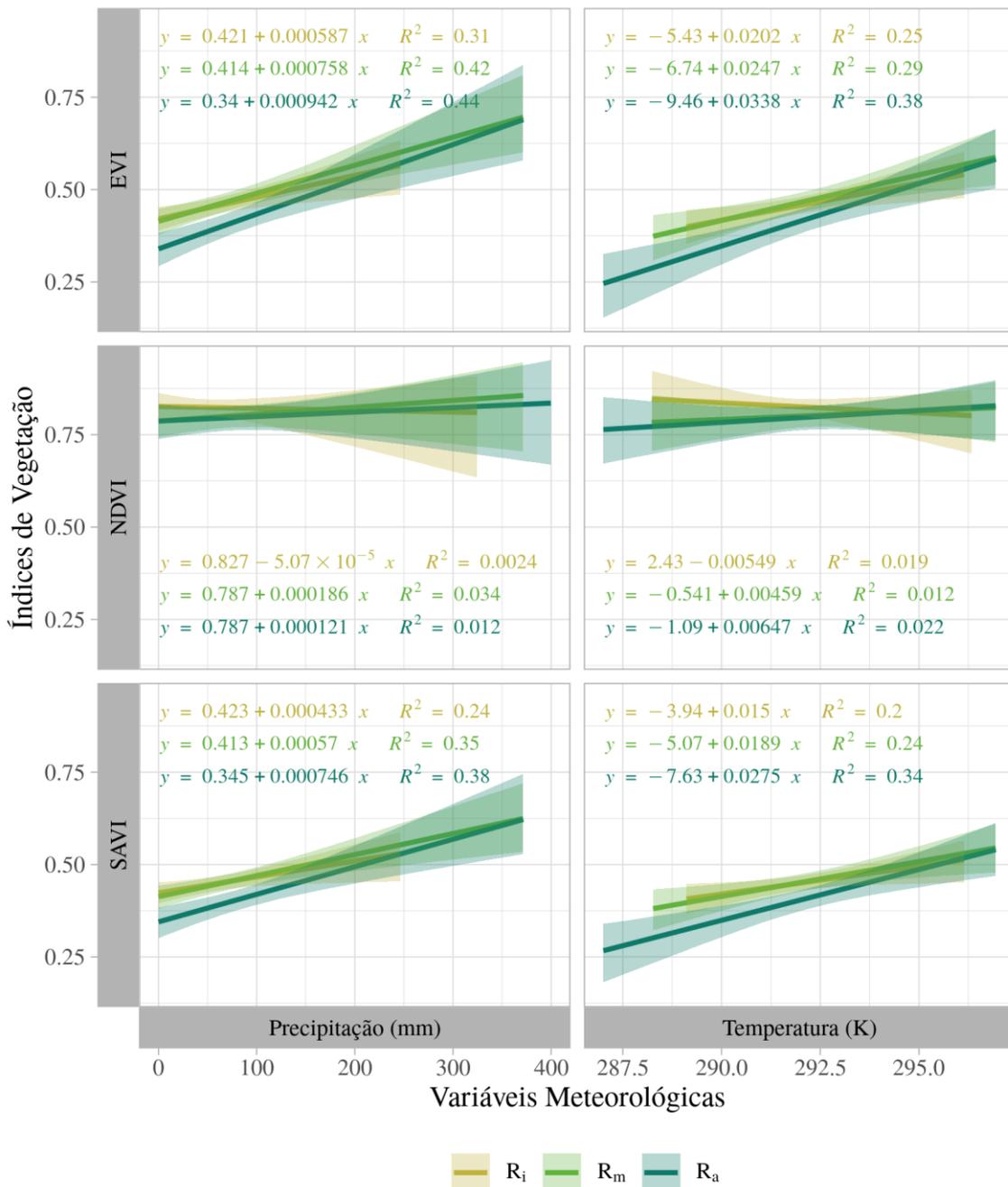


Fonte: Produção do Autor.

Na Figura 4.9 apresenta a análise de correlação entre IVs e as variáveis climáticas (P e T) por meio de regressão linear entre essas variáveis e os IVs da série Landsat. Foi utilizada uma amostragem aleatória buscando obter um intervalo de credibilidade de 95% para a variação dos valores de regressão analisados. A análise dos gráficos possibilitou verificar

a dispersão dos valores dos pixels de cada parcela, apoiando na identificação de ocorrência de correlação positiva entre os valores de IVs e os dados climáticos (i.e., precipitação e temperatura). A análise desses dados sugere que, com um grau de credibilidade de 95%, uma relação de dependência entre a chuva e a fenologia do dossel representada pelos índices de vegetação. De forma similar ao padrão anteriormente observado, a correlação é observada para o EVI e o SAVI, mas não para o NDVI. Os valores de R^2 e a equação de cada parcela estão representados nos gráficos (Figura 4.9). Podemos destacar que para o EVI tivemos maiores correlações na parcela de regeneração avançada, e correlações menores e muito parecidas para as de regeneração inicial e intermediária. Essa mesma constatação foi apresentada pelo SAVI nas três parcelas e, portanto, confirmam a sugestão anterior referente à similaridade de resposta entre os dois IVs.

Figura 4.9 – Gráfico de regressão linear entre as variáveis climáticas e os IVs da série Landsat. As áreas sombreadas indicam um intervalo de credibilidade de 95%.

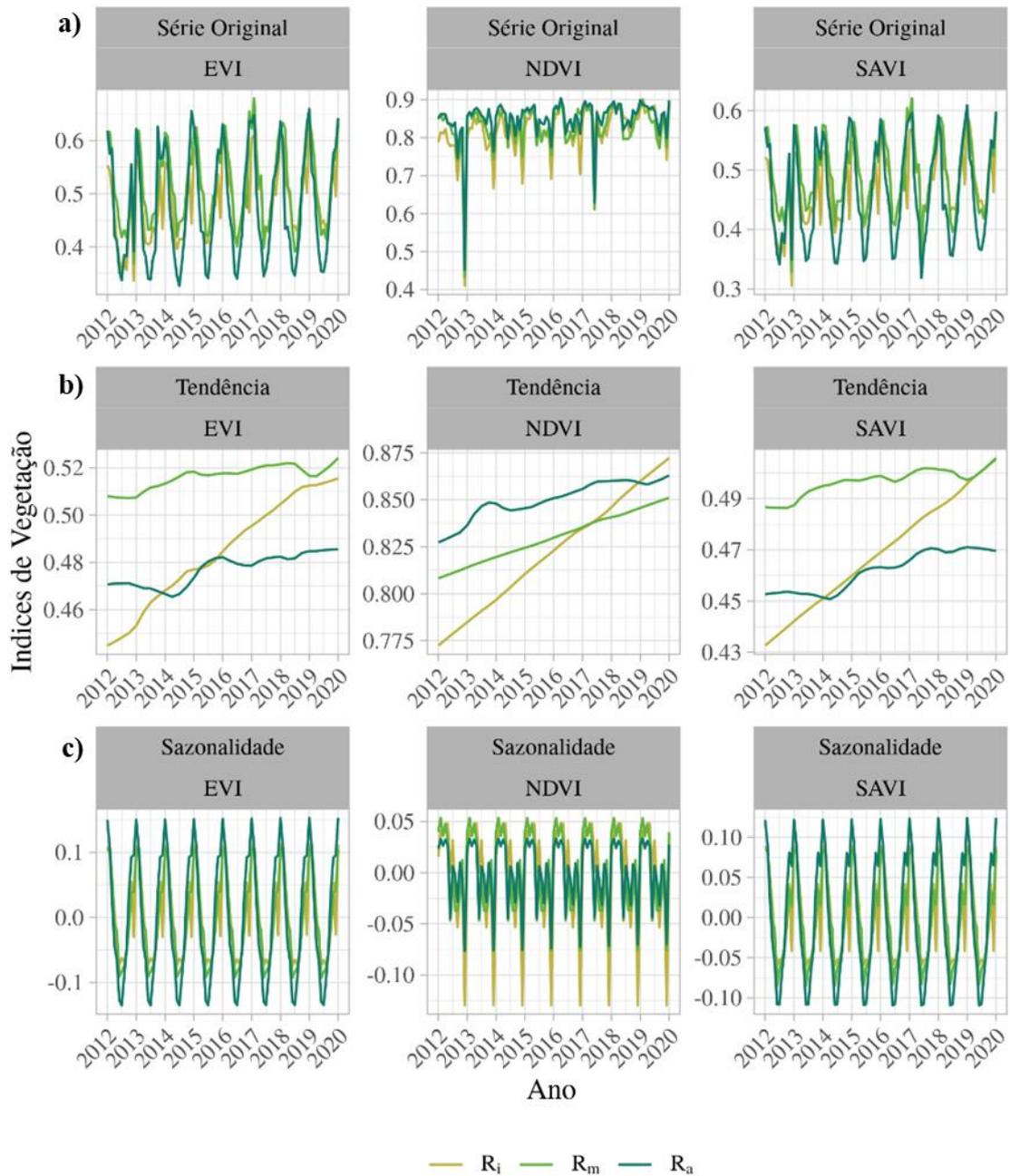


Fonte: Produção do Autor.

No intuito de descrever o comportamento da série temporal dos IVs para cada parcela estudada e sua relação com o processo de regeneração, foi realizada a decomposição da série original (a) em duas séries temporais, uma de tendência (b) e outra de sazonalidade

(c), apresentadas na Figura 4.10. A falta de dados contínuos da série de IVs obtidas do Landsat gerou a necessidade de realizar uma interpolação linear sobre a sequência de valores. Pontos fora da curva (outliers), considerados inconsistentes com o restante da série, foram excluídos no intuito de manter a série com intervalo constante. Ao avaliarmos o comportamento dos gráficos de tendências (b) da Figura 4.10, observamos aspecto ascendente para cada parcela analisada em cada IV, porém com maior distinção para a Ri em relação às outras. Visualmente o comportamento da sazonalidade (c) para cada parcela em relação aos IVs apresentou um padrão, com exceção aos valores de NDVI para a Ri que foi distinto dos demais valores das outras parcelas, entretanto para verificar se foram diferenças consistentes foi feita uma análise sobre a densidade de distribuição dessas diferenças sazonais na Figura 4.11.

Figura 4.10 – Gráfico da decomposição da série Landsat em uma escala mensal, mostrando padrões de tendência e sazonalidade de cada parcela em regeneração, destacando desde o ano de 2012.

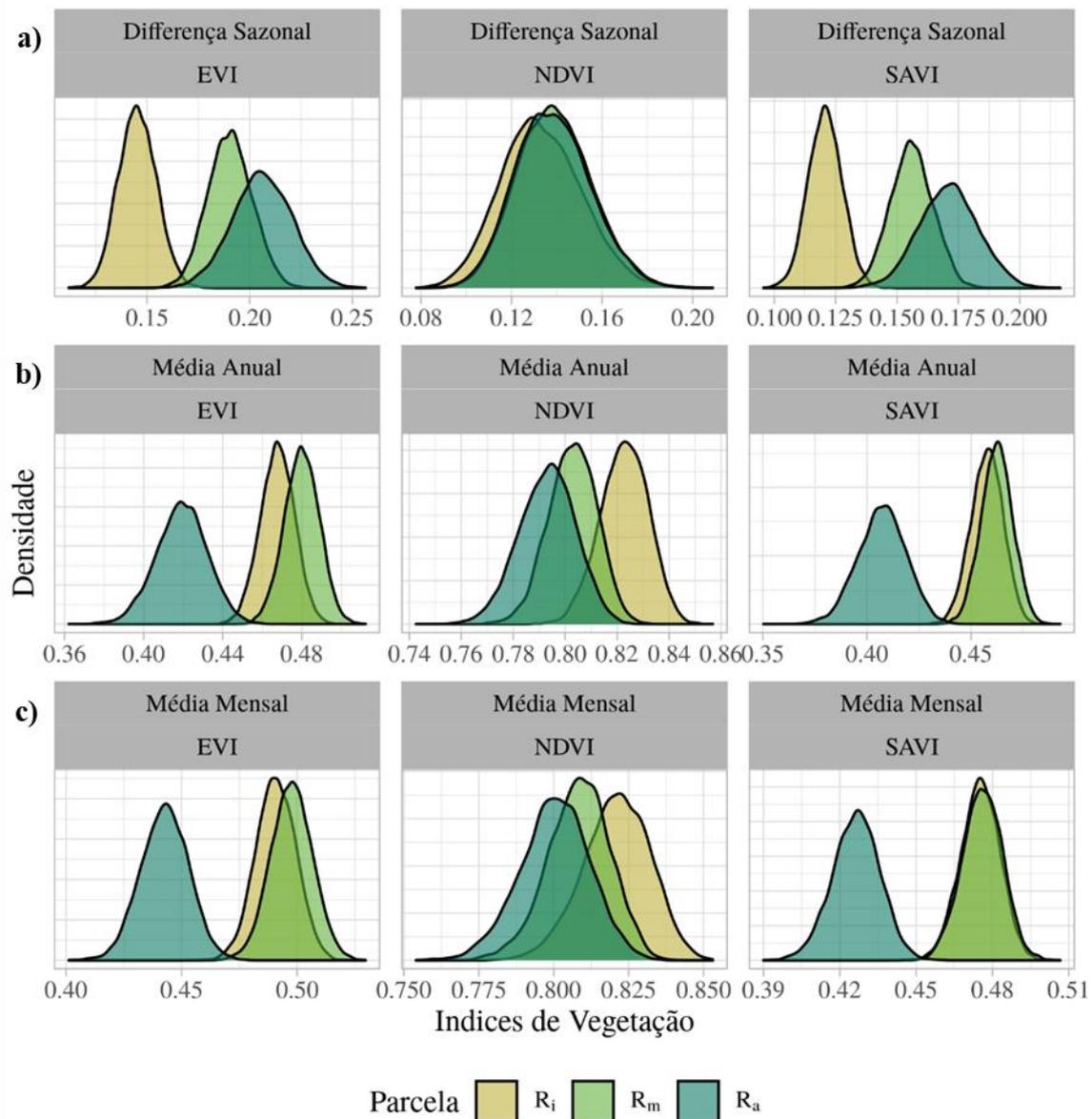


Fonte: Produção do Autor.

A Figura 4.11 apresenta a densidade de distribuição dos valores dos IVs obtidos da série Landsat para cada estágio de regeneração. A distribuição dos valores dos IVs evidencia a separação entre as áreas estudadas, mais pronunciada em termos de EVI e SAVI, do que

em termos do NDVI. Em relação a diferença sazonal (a), a parcela Ri distingue-se das outras parcelas. Em relação à média anual (b) e mensal (c), os mesmos IVs distinguem a parcela Ra em relação as outras parcelas. O NDVI apresentou pouca separabilidade das parcelas.

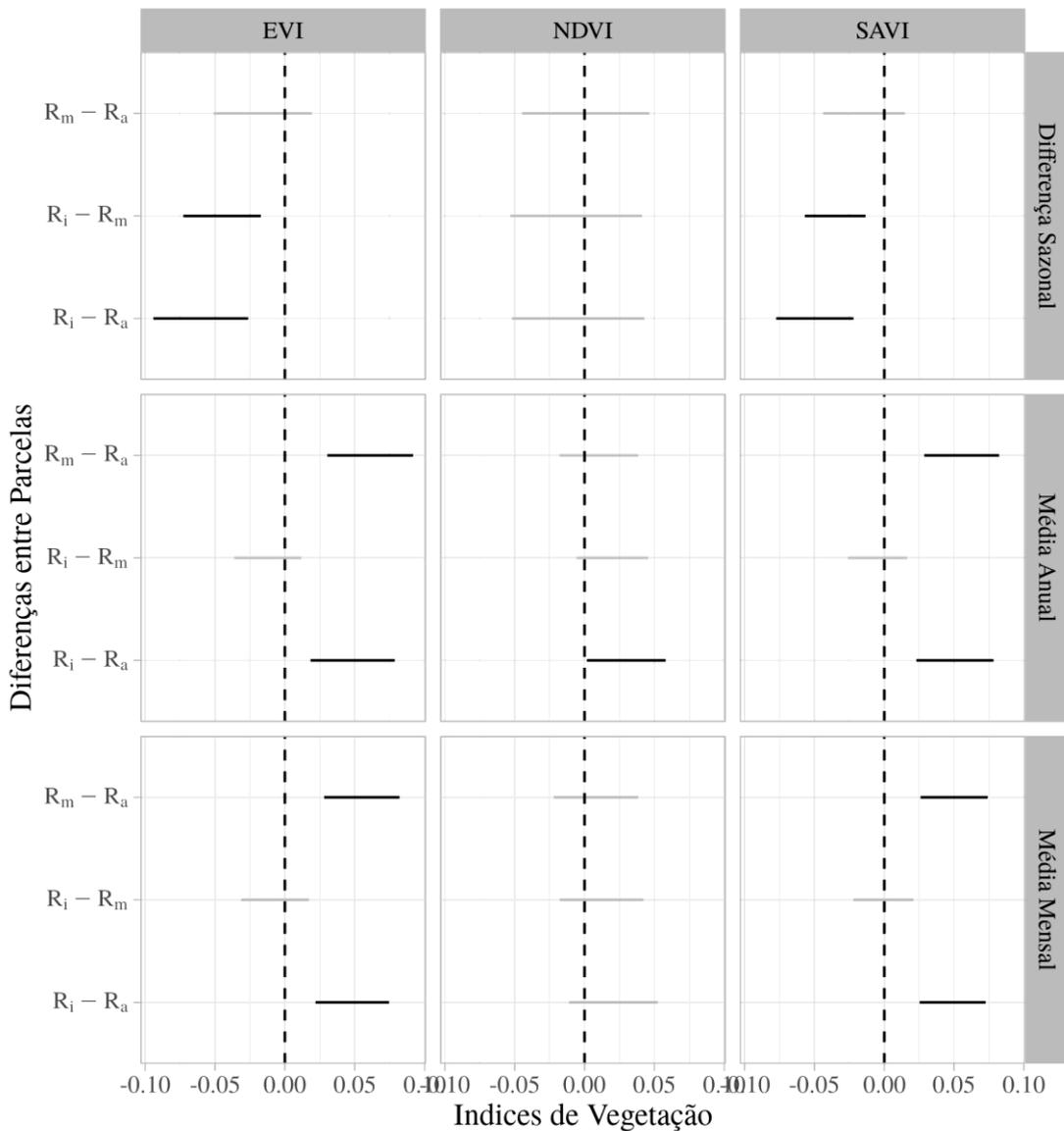
Figura 4.11 – Gráfico de densidade de distribuição dos valores dos IVs de cada área para cada iteração feita no processo de reamostragem.



Fonte: Produção do Autor.

O gráfico da Figura 4.12 apresenta a comparação das diferenças entre as médias em relação a cada IV, e cada período de diferente estágio de regeneração. A análise desse resultado evidenciou que o EVI e o SAVI sob a diferença sazonal, apresentaram separação entre as parcelas $R_i - R_m$ e $R_i - R_a$. Já os valores de média anual e mensal separaram as parcelas R_m e R_a , além da R_i e R_a . O NDVI apresentou pouca eficácia neste teste de diferença de médias, e todos sob uma diferença significativa em intervalo de credibilidade de 95%.

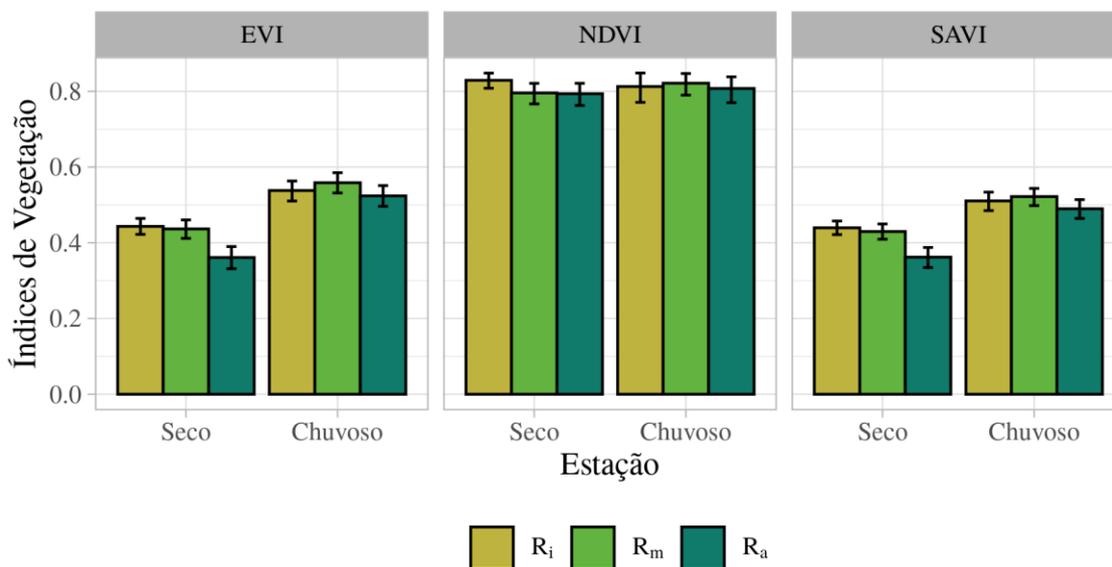
Figura 4.12 – Gráfico de diferenças de médias entre cada estágio de regeneração (R_i , R_m e R_a) para os três índices de vegetação estudados – EVI, NDVI e SAVI, considerando um intervalo de credibilidade de 95%.



Fonte: Produção do Autor.

A Figura 4.13 apresenta a decomposição dos resultados mostrado na figura anterior divididos entre estação seca e chuvosa. A separabilidade foi mais evidente no período seco do que no período chuvoso, considerando a variância para cada parcela, podemos apontar que o desempenho do EVI e SAVI foram distintos do desempenho do NDVI.

Figura 4.13 – Gráfico de decomposição de diferença entre médias entre as estações seca e chuvosa entre as parcelas.

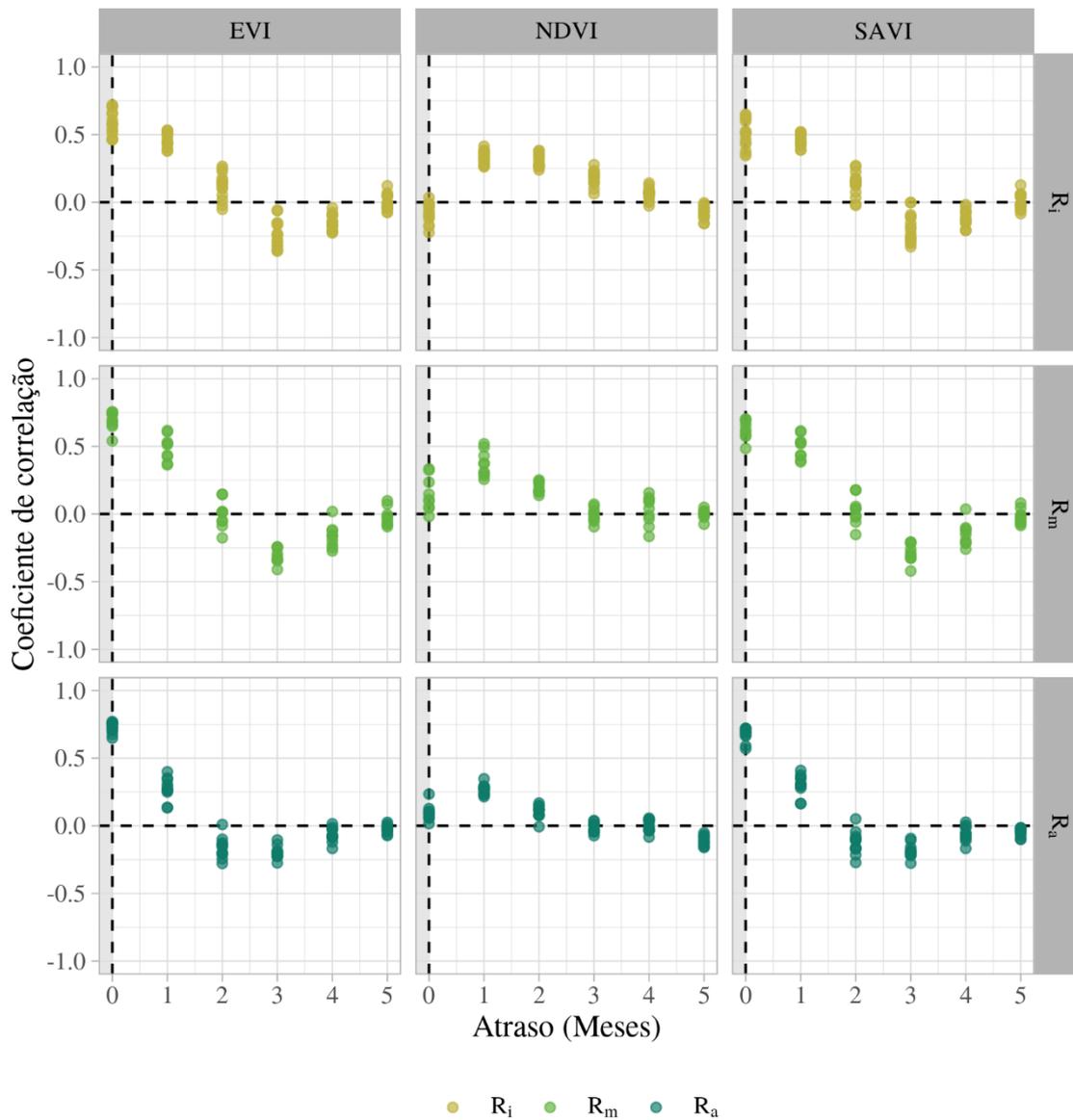


Fonte: Produção do Autor.

Na Figura 4.14 podemos verificar a análise por teste de correlação cruzada (Pearson) entre os IVs da série Landsat e os dados de precipitação CHIRPS. O tempo de resposta da vegetação, no que diz respeito a fenologia do dossel obtida pelos diferentes IVs, varia com a precipitação ao longo do tempo. Diferentes tempos de respostas mensais (atrasos) foram verificados. Na Figura 4.14 podemos destacar que a distribuição dos pontos referentes a cada parcela possui tempos de respostas distintos a esse efeito, mas o comportamento do EVI e SAVI apresentaram resultados parecidos, em relação ao comportamento do NDVI. Percebe-se também que o EVI e SAVI apresentaram correlação positiva em até dois meses, em atraso diferente do que ocorre com os valores de NDVI. Destacamos que a resposta dos IVs sobre a parcela Ra evidenciou comportamento distinto, com correlação positiva entre um mês. Portanto, podemos apontar neste resultado, que em média ocorre um tempo de atraso com correlação positiva

de um a dois meses da resposta da vegetação ao fenômeno da precipitação em cada parcela avaliada.

Figura 4.14 – Gráfico de correlação cruzada (Pearson) sobre os diferentes tempos de resposta dos IVs em relação a precipitação.



Fonte: Produção do Autor.

4.2 Análise intra-anual

4.2.1 Caracterização dos estágios sucessionais da vegetação sobre as parcelas com base na resolução n°1 CONAMA de 1994 (OE-2)

4.2.1.1 Análise quantitativa

A caracterização dos estágios de regeneração sucessional da vegetação de Floresta Ombrófila Densa Montana (IBGE, 2012) da Mata Atlântica, permitiu verificar em campo a diferenciação das paisagens e avaliar com melhor precisão e confirmar as diferenças entre os estágios de regeneração de cada parcela estudada com base na Resolução n°1 do CONAMA (BRASIL, 1994).

A Tabela 4.5 apresenta os resultados dos descritores quantitativos obtidos com base no levantamento realizado em campo em cada parcela em diferente estágio de regeneração. Essa caracterização quantitativa foi possível através da análise dos dados sobre um levantamento mais detalhado e em área maior, que foi realizado em outubro de 2018 por parte da equipe do LabEcoh (CCST/INPE) que implantou a EESPA-SFX do CCST-INPE.

Tabela 4.5 – Descritores quantitativos.

Parâmetros	PASTO	Ri	Rm	Ra
Indivíduos amostrados	25	239	239	392
Área amostrada	300 m ²	300 m ²	300 m ²	300 m ²
Área basal total (m ² /ha)	0,0007	0,2	0,75	2,98
DAP médio (cm)	3,48	3,67	4,59	4,23
Maior DAP (cm)	5,6	42,17	31,19	37,71
Coefficiente de variação do DAP (%)	35,5	140,69	109,3	145,82
Altura média (m)	1,5	3,49	4,91	4,36
Maior altura (m)	2	19	20	25
Coefficiente de variação da altura (%)	15,37	72,83	86,12	94,94
Troncos múltiplos (%)	16	18,8	14,6	15,3
Densidade total (n° de indivíduos/ha)	833,3	7966,6	7966,6	13066,6

Fonte: Produção do Autor.

A avaliação dos descritores quantitativos em conjunto permitiu caracterizar as áreas em suas condições de regeneração. A quantidade de indivíduos amostrados nas parcelas foi de 25, 239, 239 e 392, respectivamente para Pasto, Ri, Rm e Ra. As condições de

distribuição de DAP e altura possibilitou verificar o crescimento de tronco com o tempo por área e indiretamente através da quantidade de troncos múltiplos, ainda foi possível detectar algum tipo de distúrbio ambiental oriundo de cortes e desmatamentos pretéritos. As áreas com regeneração inicial possuem menor densidade de indivíduos, e conforme aumenta o tempo de regeneração em Rm e Ra a quantidade de indivíduos aumenta. Os valores de área basal confirmam a mesma lógica crescente, porém a partir da avaliação do diâmetro médio calculado por parcela podemos verificar que ocorre uma inversão entre os valores das parcelas Rm e Ra.

A altura dos indivíduos apresentou valores médios em variação não uniforme, porém ao observarmos os valores dos maiores indivíduos, percebemos que conforme aumenta o estágio, maiores são as alturas, justificados pelos valores de coeficiente de variação. A maior presença de troncos múltiplos na Ri sugere que essa parcela sofreu maior distúrbio de degradação, já que a formação de troncos múltiplos é, em geral, oriunda do corte raso da vegetação e o poder de rebrota e regeneração da planta arbórea tende a gerar múltiplos troncos em seu processo de revegetação (ASSUMPCÃO et al., 2000). Por fim, a densidade total que é o número de indivíduos por hectare, acabou sendo influenciada pela quantidade de indivíduos amostrados, e que, portanto, apresentou pouca expressão na análise quanto a diferenciação dos estágios, pois os resultados foram idênticos para Ri e Rm.

4.2.1.2 Análise qualitativa

A Tabela 4.6 apresenta os resultados dos descritores qualitativos obtidos com base na avaliação feita em cada parcela em campo em relação aos parâmetros de fitofisionomia, densidade do dossel, presença de emergentes, sub-bosque e presença de epífitas, trepadeiras e gramíneas.

Tabela 4.6 – Descritores qualitativos.

Parâmetros	PASTO	Ri	Rm	Ra
Fitofisionomia (Herbáceo/Arbustiva/ Arbóreo)	Herbáceo - dominante	Arbustivo/Arbóreo transição	Arbustivo/Arbóreo transição	Arbóreo - dominante
Serrapilheira	Ausente	Presente	Presente	Presente
Dossel (Homogêneo / Heterogêneo)	Ausente	Heterogêneo	Heterogêneo	Homogêneo
Emergentes	Ausente	Presente	Presente	Presente
Sub-bosque	Ausente	Presente	Presente	Presente
Epífitas	Ausente	Ausente	Presente	Presente
Trepadeiras	Ausente	Ausente	Presente	Presente
Gramínias	Presente	Presente	Ausente	Ausente

Fonte: Produção do Autor.

A avaliação dos descritores qualitativos permitiu verificar a presença de parâmetros que complementam a caracterização das áreas juntamente com os descritores quantitativos, quanto às características das paisagens baseadas em critérios estabelecidos pela Resolução nº1 do CONAMA. A variação da fitofisionomia de cada parcela apresentou transição entre os estratos arbustivo e arbóreo para as parcelas Ri e Rm, e dominância para o herbáceo no P e arbóreo na Ra. A densidade de dossel apresentou maior variação entre as parcelas, atingindo homogeneidade na Ra, isso pôde ser observado em campo. A presença de indivíduos emergentes foi inexistente apenas em P. Por fim, a presença de epífitas e trepadeiras foi maior em nos estágios mais intermediário e avançado de regeneração e a presença de gramíneas diminuiu conforme aumentou o estágio de regeneração das parcelas.

4.2.2 Análise da relação de dominância das espécies em cada parcela

A Tabela 4.7 apresenta os resultados de identificação dos indivíduos monitorados durante o desenvolvimento deste estudo, presentes nas três parcelas estudadas, em que podemos observar a ocorrência de 32 espécies ao todo, distribuídas em 20 famílias distintas.

Tabela 4.7 – Relação de espécies e famílias identificadas em cada parcela.

Total de Espécies monitoradas	Famílias presentes
Anadenanthera colubrina (Vell.) Brenan	Fabaceae
Aegiphila integrifolia (Jacq.) Moldenk	Lamiaceae
Alchornea glandulosa Poepp.	Euphorbiaceae
Alchornea sidifolia Müll. Arg.	Euphorbiaceae
Cytharexylum myrianthus Cham.	Verbenaceae
Croton organensis Baill.	Euphorbiaceae
Casearia decandra Jacq.	Salicaceae
Cabrlea canjerana (Vell.) Mart.	Meliaceae
Hieronyma alchorneioides Allemão	Phyllanthaceae
Lamanonia ternata Vell.	Cunoniaceae
Malvaceae indet.	Malvaceae
Meriania clausenii (Naudin) Triana	Melastomataceae
Mimosa scabrella Benth.	Fabaceae
Miconia cinerescens Miq.	Melastomataceae
Monteverdia gonoclada (Mart.) Biral	Celastraceae
Myrsine coriacea (Sw.) R.Br. ex Roem. & Schult.	Primulaceae
Nectandra oppositifolia Nees & Mart.	Lauraceae
Piptocarpha macropoda (DC.) Baker	Asteraceae
Psychotria vellosiana Benth.	Rubiaceae
Senna multijuga (Rich.) H.S. Irwin & Barneby	Fabaceae
Schefflera cf. calva (Cham.) Frodin & Fiaschi	Araliaceae
Sessee brasiliensis Toledo	Solanaceae
Schinus terebinthifolia Raddi	Anacardiaceae
Sapium glandulosum (L.) Morong	Euphorbiaceae
Sessee brasiliensis Toledo	Solanaceae
Tibouchina pulchra (Cham.) Cogn.	Melastomataceae
Tibouchina estrellensis (Raddi) Cogn.	Melastomataceae
Tibouchina sellowiana (Cham.) Cogn.	Melastomataceae
Tovomitopsis paniculata (Spreng.) Planch. & Triana	Clusiaceae
Vernonanthura discolor (Spreng.) Baker	Asteraceae
Vernonanthura petiolaris (DC.) H. Rob.	Asteraceae
Weinmannia pinnata L.	Cunoniaceae
Total de 32 espécies	Total de 20 famílias

Fonte: Produção do Autor.

Na Tabela 4.8 podemos observar que desse total de espécies, são distribuídas em 12 tipos nas parcelas Ri e Rm e 14 tipos na Ra. A distribuição de dominância ocorreu da seguinte maneira: na parcela Ri as espécies *Tibouchina pulchra* (Cham.) Cogn e *Trema micrantha* (L.) Blume ocorrem em quatro indivíduos cada, já a espécie *Senna multijuga* (Rich.) H.S.

Irwin & Barneby ocorreu em três indivíduos e a espécie *Sessea brasiliensis Toledo* ocorreu em dois indivíduos. Na parcela Rm a distribuição de dominância foi a seguinte: as espécies *Tibouchina sellowiana (Cham.) Cogn* e *Alchornea glandulosa Poepp.* ocorreram em quatro indivíduos cada, e as espécies *Croton organensis Baill.* e *Ocotea puberula (Rich.) Nees* em dois indivíduos cada. Na parcela Ra ocorreram seis indivíduos da espécie *Alchornea glandulosa Poepp.* e dois indivíduos da espécie *Psychotria vellosiana Benth.*

Tabela 4.8 – Espécies dominantes em cada parcela de regeneração, sua ocorrência em quantidade e característica de endemismo e origem.

Espécies predominantes / Ocorrência	Endemismo / Origem
Ri (Regeneração inicial)	
Tibouchina pulchra (Cham.) Cogn. - 4	Não / Nativa
Trema micrantha (L.) Blume - 4	Não / Nativa
Senna multijuga (Rich.) H.S. Irwin & Barneby	Não / Nativa
Sessea brasiliensis Toledo - 2	Sim / Nativa
<i>Total de espécies: 12</i>	
Rm (Regeneração intermediária)	
Tibouchina sellowiana (Cham.) Cogn. - 4	Não / Nativa
Alchornea glandulosa Poepp. - 4	Não / Nativa
Croton organensis Baill. - 2	Sim / Nativa
Ocotea puberula (Rich.) Nees - 2	Não / Nativa
<i>Total de espécies: 12</i>	
Ra (Regeneração avançada)	
Alchornea glandulosa Poepp. - 6	Não / Nativa
Psychotria vellosiana Benth. - 2	Sim / Nativa
<i>Total de espécies: 14</i>	

Fonte: Produção do Autor.

A análise dessas espécies, com base em dados da literatura, mostra que em sua maioria, tratam-se de nativas, não endêmicas. Ou seja, tratam-se de espécies que podem ser encontradas em várias regiões da Mata Atlântica. A espécie mais comum e presente em duas parcelas Ri e Rm foi a *Tibouchina pulchra (Cham.) Cogn*, que possui diversos estudos acerca do seu potencial para ser utilizada em programas de restaurações com notável valor ornamental. A espécie *Trema micrantha (L.) Blume* também apresenta características semelhantes em relação à primeira espécie, porém possui um diferencial interessante para o processo de regeneração que é a rápida velocidade de desenvolvimento e ciclo curto, de até 15 anos, quando é substituída por outras espécies (BACKES et al.,

2004). A espécie *Senna multijuga* (Rich.) H.S. Irwin & Barneby apresenta também rápido crescimento e atinge facilmente 3,5 metros aos 2 anos (LORENZI, 2002), com produtividade volumétrica máxima registrada em plantios de 15,55 metros cúbicos, por hectare, por ano, aos 86 meses (CARVALHO, 2003). A espécie nativa *Alchornea glandulosa* Poepp também possui rápido desenvolvimento, é considerada uma pioneira secundária inicial e de Clímax (CARVALHO et al., 2006), apresentou presença dominante na amostragem das paisagens nos dois estágios de regeneração Rm e Ra. A espécie *Psychotria vellosiana* Benth é um tipo recomendado para restauração não apenas no bioma da Mata Atlântica, mas em outros biomas como o Cerrado e a Caatinga, possui característica de secundária tardia e de Clímax (TAYLOR, 2013), essa espécie foi encontrada apenas na parcela Ra em apenas dois indivíduos.

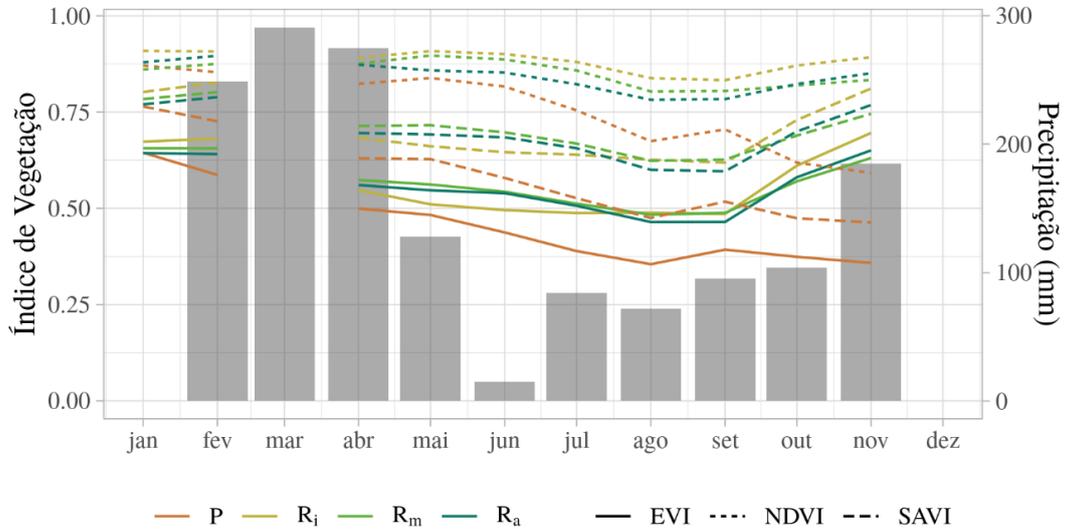
Portanto, a maioria das espécies encontradas na amostragem com dendrômetros realizada nas parcelas estudadas na presente dissertação são de rápido crescimento e apresentam características semelhantes quanto ao tipo de uso recomendado, velocidade de crescimento, ecologia com características de sucessão inicial, intermediária e tardia com algumas de Clímax, o que apoia a caracterização realizada anteriormente baseada na resolução nº1 do CONAMA e utilizadas neste trabalho para diferenciação de paisagens em regeneração sucessional.

4.2.3 Análise da cobertura de vegetação por IVs – Sentinel-2 (OE - 3)

A Figura 4.15 apresenta a série temporal dos valores dos IVs obtidos da coleção de imagens Sentinel-2 e da precipitação acumulada mensal obtida na estação meteorológica localizada na área de estudo referente ao ano de 2019. O gráfico da Figura 4.15 apresenta a variação dos IVs para cada parcela analisada na presente dissertação, demonstrando que maiores valores de precipitação são acompanhados pelos valores de IVs. Assim como ocorreu com a variação sazonal obtida por meio da série temporal dos IVs do Landsat, aqui também se observa uma variação sazonal do IV do Sentinel-2, ao longo do ano de 2019. No entanto, nessa escala, é possível observar que, em geral, ocorre uma defasagem entre o mês de menor chuva (junho) e o mês onde, em geral, os menores valores do EVI foram registrados (agosto e setembro). Interessante observar também que a área de pasto apresenta uma segunda queda, em todos os IVs, entre outubro e novembro. A lacuna no

mês de março referente aos IVs foi decorrente da falta de imagens disponíveis sem nuvens para toda a área estudada.

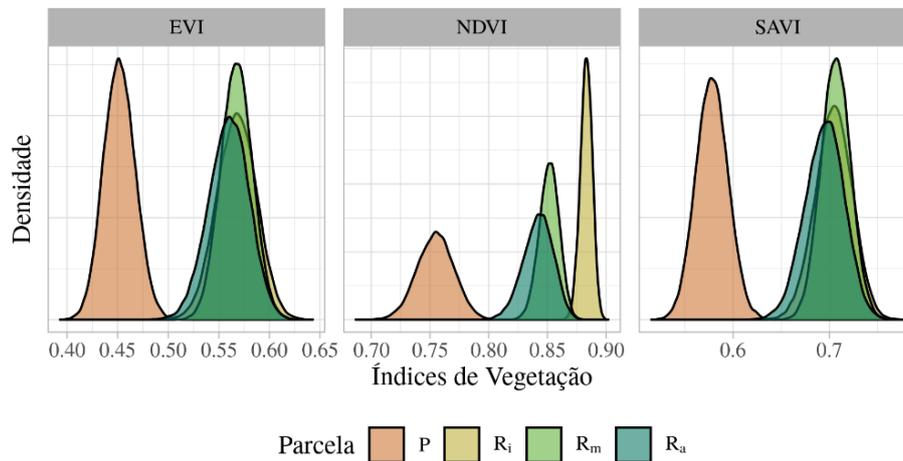
Figura 4.15 – Gráfico da série temporal dos IVs obtidos das imagens Sentinel-2, que busca expressar a flutuação dos IV ao longo do tempo para cada parcela em relação ao regime de chuvas acumulado por mês obtido na área.



Fonte: Produção do Autor.

A Figura 4.16 ilustra a densidade de distribuição dos IVs médios obtidos para cada iteração feita no processo de reamostragem em cada parcela no mesmo período, obtidos da coleção de imagens Sentinel-2. Esse resultado mostra que foi possível diferenciar as parcelas em diferentes estágios de regeneração sucessional com base nos valores médios dos IVs do Sentinel-2. Destaca-se ainda que o NDVI do Sentinel-2 foi capaz de separar, inclusive a parcela P das demais.

Figura 4.16 – Gráfico de densidade de distribuição da média dos IVs de cada área para a iteração feita no processo de reamostragem. Aponta diferenças entre médias das áreas.

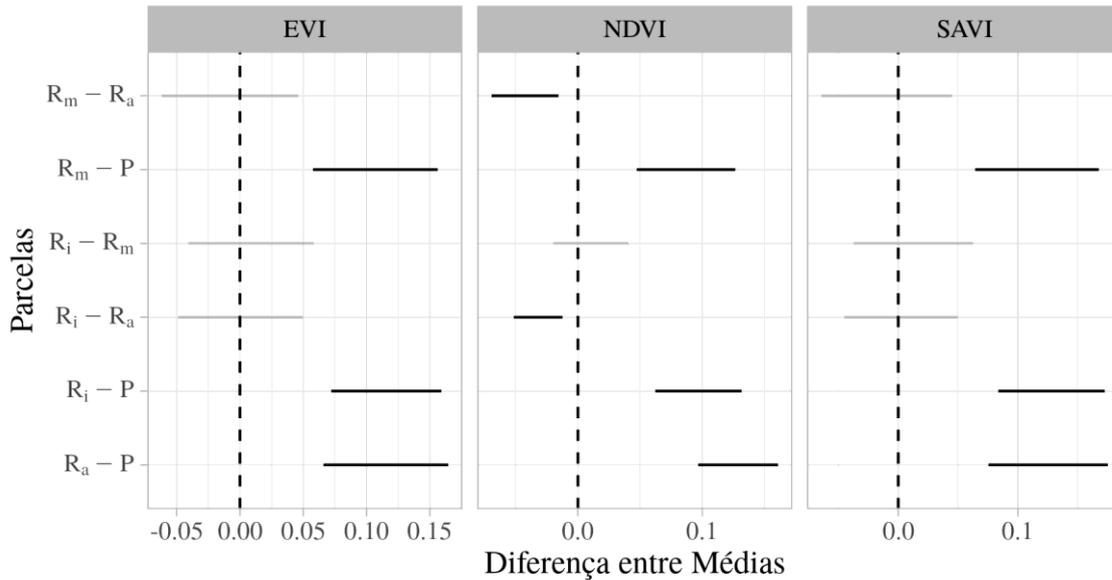


Fonte: Produção do Autor.

O gráfico da Figura 4.17 apresenta a comparação da diferença entre as médias em relação a cada IV, referentes a cada período dos diferentes estágios de regeneração.

A análise desse resultado mostra que os IVs detectaram a separação sobre a parcela de P em todas as combinações. Em relação aos outros estágios, podemos observar que Ri – Rm, foi detectada por nenhum IV. Ainda podemos destacar que as parcelas Ri – Ra e Rm e Ra foram detectadas pelo NDVI, todas em uma diferença significativa sob um intervalo de credibilidade de 95%.

Figura 4.17 – Gráfico de diferença de médias entre cada parcela em relação aos IVs. Quando uma possibilidade dessa diferença é igual a zero, considera-se que não há evidências para considerar uma diferença significativa entre as áreas, considerando um intervalo de credibilidade de 95%.

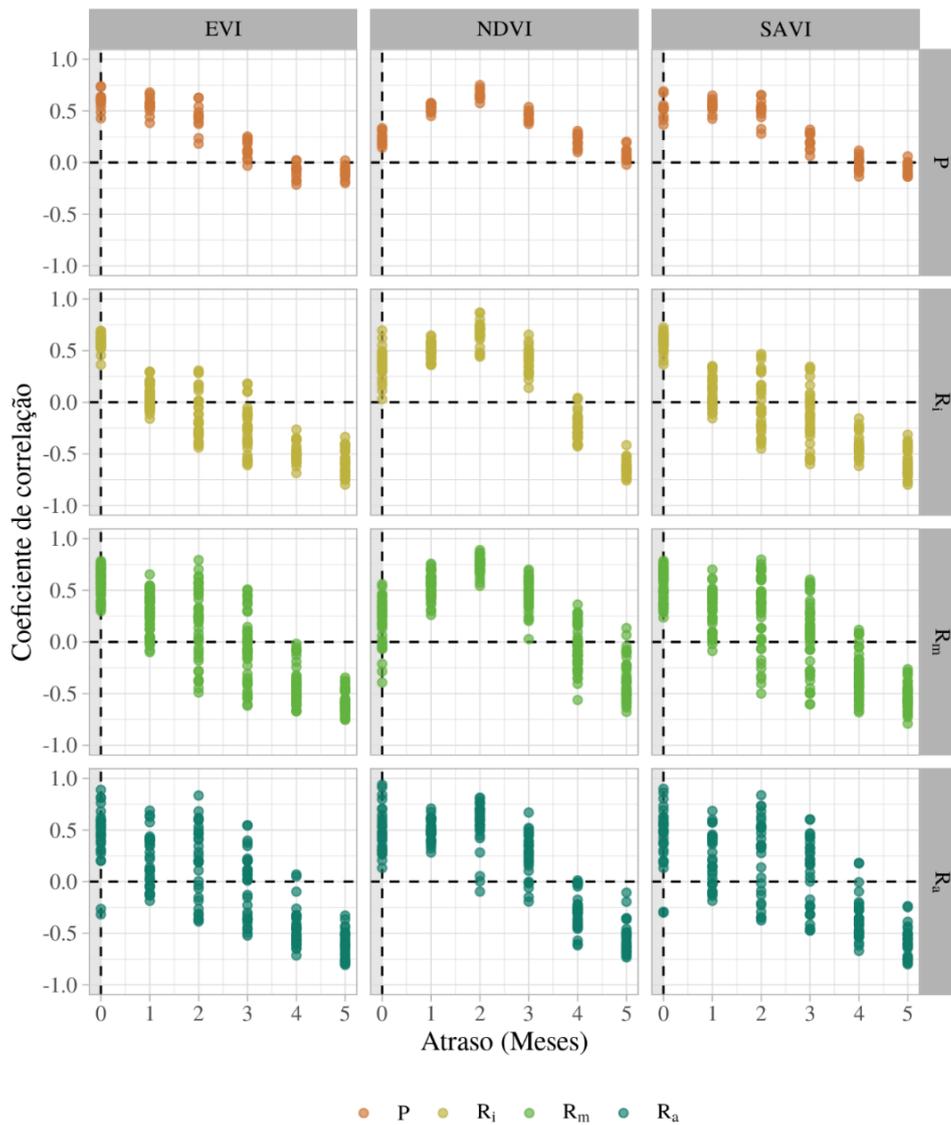


Fonte: Produção do Autor.

Na Figura 4.18 apresenta os resultados da análise por teste de correlação cruzada (Pearson) entre os IVs obtidos das imagens Sentinel-2 e os dados de precipitação obtidos na estação meteorológica local. O tempo de resposta da vegetação se expressa sob a forma de um atraso, da ordem de meses, na variação fenológica do dossel em relação à mudança nas chuvas. A parcela de pasto (P) apresentou atraso (i.e., correlação positiva) de até quatro meses para todos os índices. No entanto, o padrão de variação para o NDVI foi diferente dos demais, com os maiores valores de correlação sendo observados no segundo mês enquanto, para os outros índices, os maiores valores são observados logo de início, e diminuem à medida que o tempo passa.

Podemos observar que as duas parcelas de regeneração intermediária (Ri) e avançada (Ra), apresentaram grande dispersão dos valores dos IVs. A primeira apresentou correlação positiva em até quatro meses para o EVI e SAVI e cinco meses para o NDVI. Já a Ra apresentou correlação positiva em até quatro meses para os três índices de vegetação.

Figura 4.18 – Gráfico de correlação cruzada (Pearson) entre os IVs obtidos da coleção de imagens Sentinel-2 em relação a precipitação do período analisado.

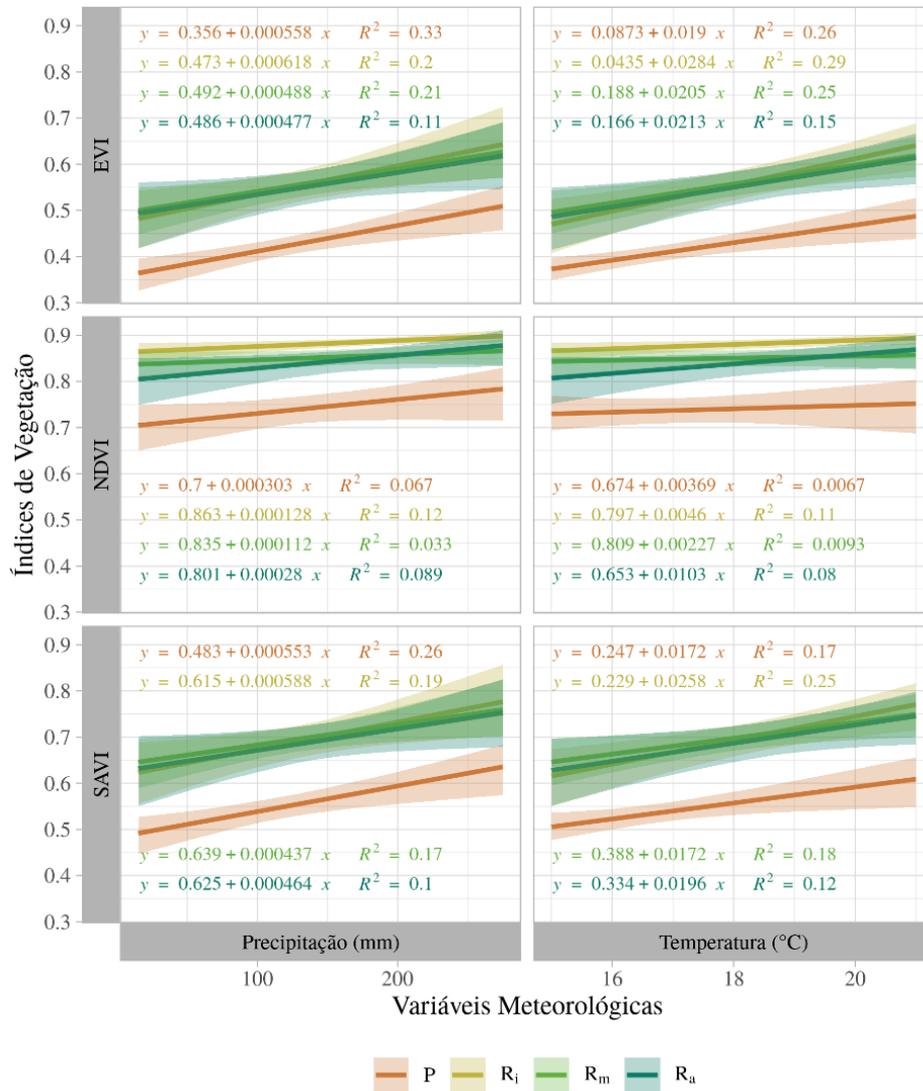


Fonte: Produção do Autor.

Na Figura 4.19 as variáveis climáticas e os IVs da coleção Sentinel-2 foram submetidas ao método amostragem aleatória visando obter um intervalo de credibilidade de 95% para os valores de regressão analisados. A análise dos gráficos permitiu verificar a sugestão apresentada sobre a dispersão dos valores dos pixels de cada parcela, e a correlação positiva entre os valores de EVI e SAVI e os dados climáticos. Essa correlação dos IVs com a precipitação permitiu verificar se há uma relação entre o aumento dos valores de

chuva com os IVs, complementando desta forma a sugestão de que poderia existir uma relação de dependência entre a quantidade de chuvas e a fenologia do dossel apresentada pelos índices de vegetação. Os resultados apontam correlações baixas, mas significativas entre todos os IVs e os valores de precipitação e temperatura para o período estudado.

Figura 4.19 – Gráfico de regressão linear entre variáveis climáticas e IVs da série Sentinel. As áreas sombreadas indicam um intervalo de credibilidade de 95%.

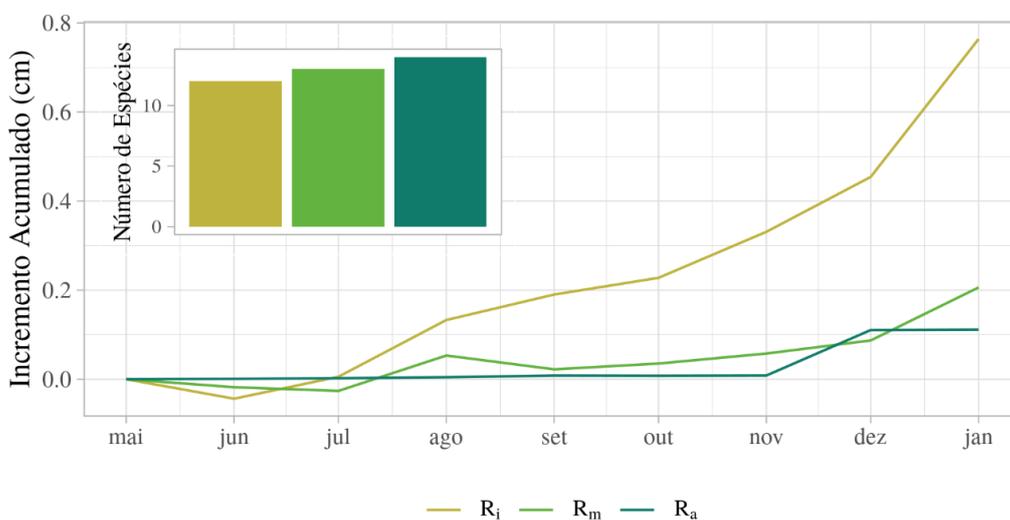


Fonte: Produção do Autor.

4.2.4 Medidas em campo: crescimento de árvores, IAF e serrapilheira (OE-4)

A Figura 4.20 apresenta os valores de incremento acumulado de crescimento de tronco para os 20 indivíduos monitorados em cada parcela desde maio de 2019 a janeiro de 2020. Observa-se, como era de se esperar, que o ritmo de crescimento do tronco na Ri é maior do que nos demais estágios sucessionais. Na Rm ocorrem pequenas oscilações no crescimento até setembro/2019. A partir de setembro o crescimento sempre aumenta, mas o aumento mais pronunciado é observado a partir de dezembro/2019. Na Ra, o crescimento permanece constante de maio a novembro/2019; um aumento expressivo é observado entre novembro e dezembro/2019, e a partir daí ocorre uma estabilização até janeiro/2020.

Figura 4.20 – Gráfico da série temporal do incremento acumulado de grupo de indivíduos amostrados que buscam representar o comportamento de cada área. Podemos observar que a diversidade entre as mesmas difere pouco em relação a quantidade de espécies.

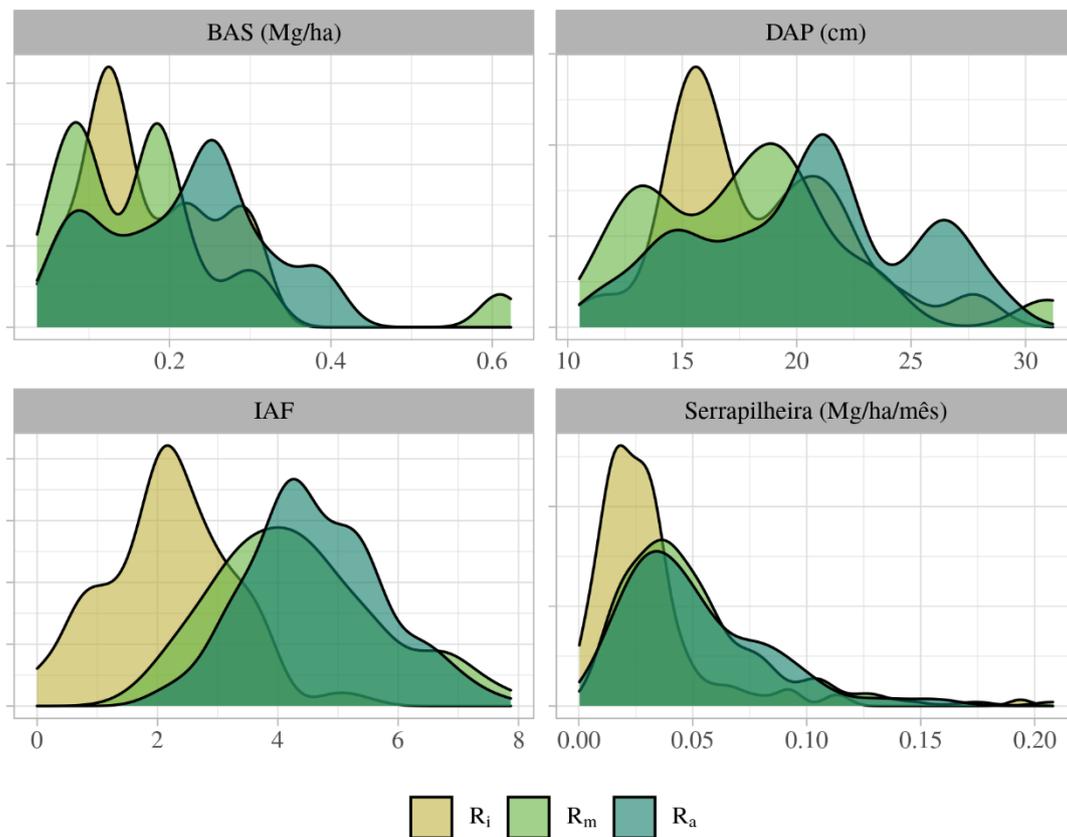


Fonte: Produção do Autor.

Na Figura 4.21 apresenta-se a comparação entre os resultados das variáveis obtidas em campo (BAS, DAP, IAF e queda de serrapilheira) representados pela densidade de distribuição dos valores médios. A avaliação desse comparativo permite afirmar que em tais variáveis medidas ao longo do período estudado foram pouco significativas na separabilidade da parcela Ri, sendo visível o comportamento diferenciado da distribuição

dos seus valores médios. Porém, ao analisar as outras parcelas, observa-se que essa separabilidade não ocorre, e predomina-se a sobreposição entre os estágios, o que dificultou a separabilidade entre as mesmas.

Figura 4.21 – Gráfico de densidade de distribuição da média dos dados de campo (originais). A distribuição dos valores do IAF apresentou maior separabilidade entre as parcelas, não sendo observado entre as outras variáveis.

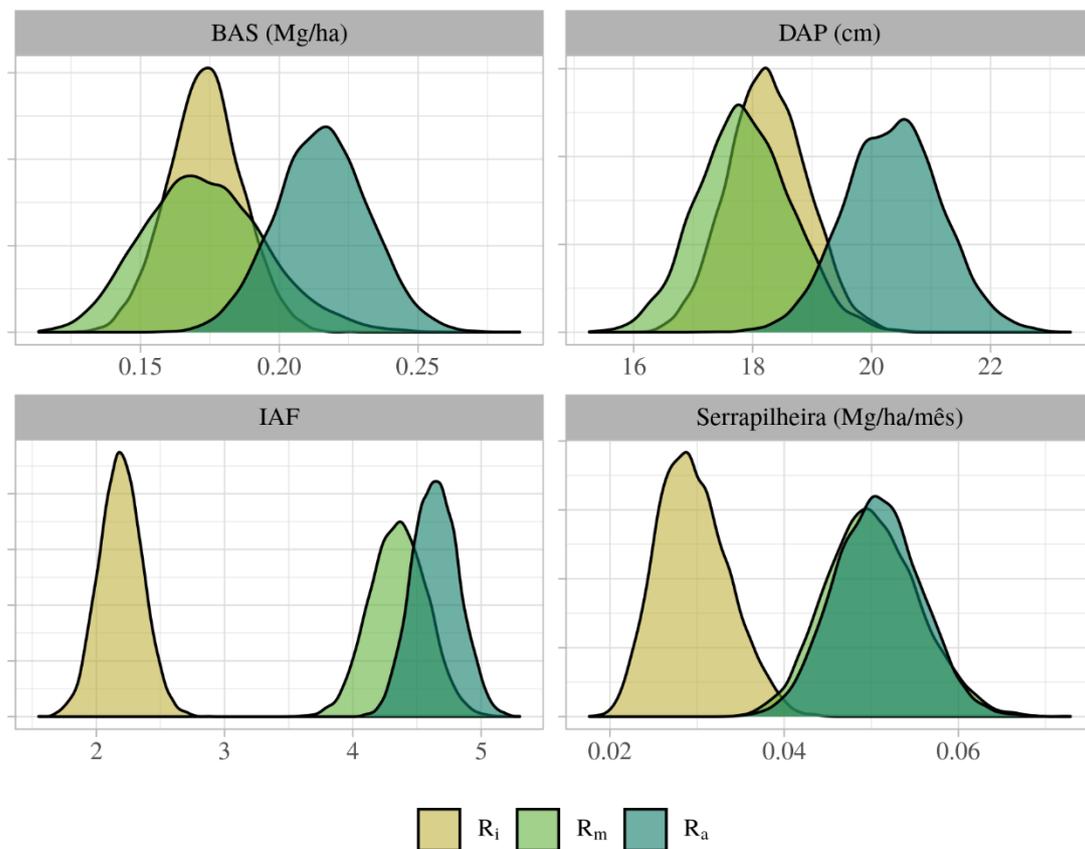


Fonte: Produção do Autor.

Na Figura 4.22 apresenta-se a comparação entre os resultados das variáveis obtidas nos dados de campo representados pela densidade de distribuição dos valores médios, porém com um tratamento de iteração em 10.000 vezes, realizado por reamostragem. Esse procedimento tem influência nos resultados, destacando-se melhor a separabilidade entre as parcelas. Observa-se que a BAS é maior na Ra em relação aos estágios de sucessão inicial e intermediário e que entre os mesmos há maior intensidade de formação da biomassa no estágio inicial em relação ao intermediário. Essa análise pode ser confirmada

com a observação do gráfico de DAP, que expressaria a variação de crescimento do tronco ao longo do período medido, e dessa forma, sugerindo uma assimilação de carbono de longo prazo bem destacados entre os diferentes estágios sucessionais de regeneração. Ao avaliar os gráficos dos resultados obtidos do IAF observa-se que o ritmo de dinâmica do dossel, ou seja de quantidade de folhas medidos nas diferentes parcelas, indicam comportamentos que seguem a lógica crescente de regeneração, e bem destacadas entre a parcela Ri em relação às outras, e com certa sobreposição entre Rm e Ra. Tal resultado sugere que a fenologia do dossel medida em campo apresenta um comportamento de crescimento linear. Comportamento semelhante foi verificado na distribuição dos valores de serrapilheira, porém com maior sobreposição entre as parcelas Rm e Ra.

Figura 4.22 – Gráfico de densidade de distribuição da média dos dados de campo de cada área para uma iteração de 10000 vezes feita no processo de reamostragem. Dessa forma os resultados apontam diferenças entre médias que separam melhor as parcelas.

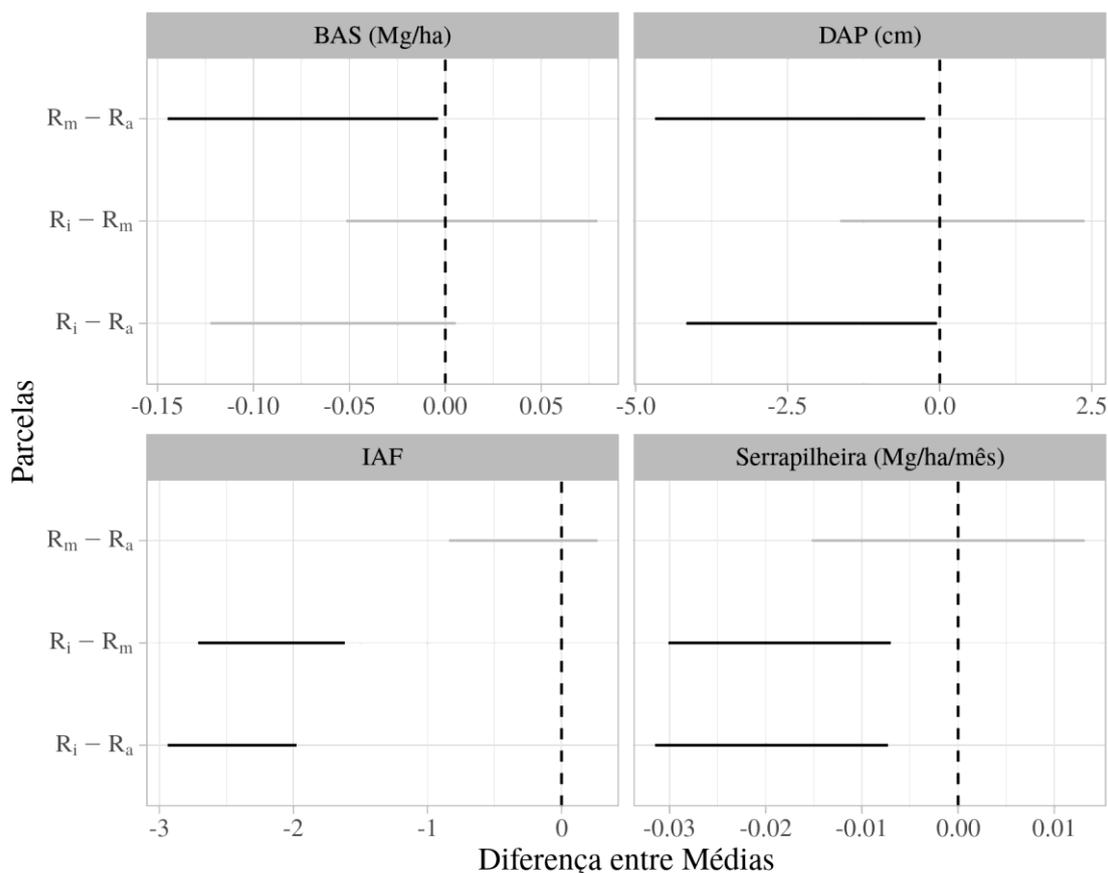


Fonte: Produção do Autor.

A Figura 4.23 apresenta o resultado da análise de significância das médias em relação aos valores obtidos de cada variável de campo. Observa-se que as parcelas foram agrupadas em pares e através da diferença entre as médias dessas parcelas verificou-se a diferença significativa entre as mesmas, em um intervalo de credibilidade de 95%.

A BAS apresentou diferença em apenas um par ($R_m - R_a$). O DAP teve diferença entre ($R_m - R_a$ e R_i e R_a). Os resultados do IAF revelam que os pares ($R_i - R_m$ e $R_i - R_m$) apresentaram diferença entre as médias. A avaliação dos resultados de serrapilheira apresentou o mesmo padrão do IAF. Portanto, BAS e DAP distinguiram pouco os estágios inicial e intermediário e o IAF e serrapilheira não distinguiram os estágios intermediário e avançado.

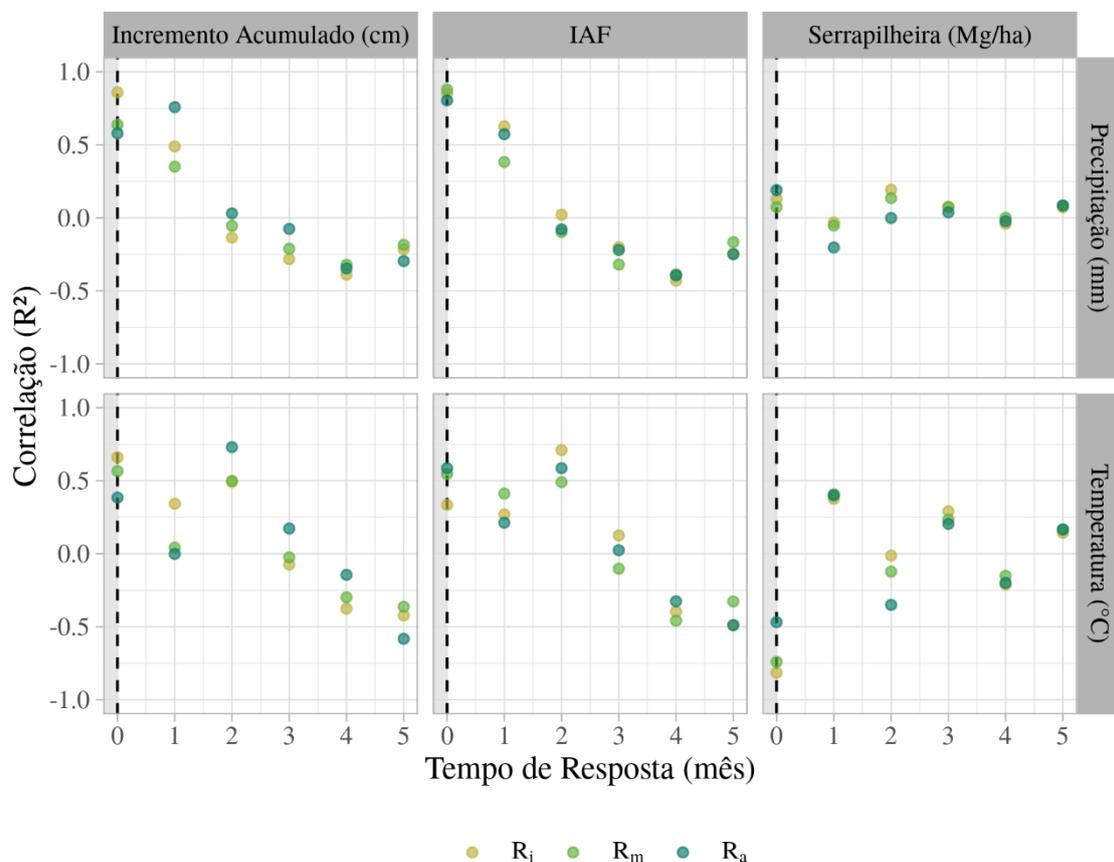
Figura 4.23 – Gráfico de diferença de médias entre cada parcela em relação as variáveis de campo, considerando um intervalo de credibilidade de 95%.



Fonte: Produção do Autor.

A Figura 4.24 mostra a resposta das variáveis obtidas de campo relativas ao crescimento de árvores (medidas de tronco) e de folhas (IAF e serrapilheira). É possível verificar a sincronicidade de resposta das variáveis em relação às mudanças meteorológicas do ambiente em cada parcelas de regeneração. Em relação a precipitação podemos perceber certa sincronicidade de resposta com correlação positiva com incremento acumulado e IAF nos primeiros meses, destacando que a parcela Ri apresentou maior correlação em relação às outras parcelas para incremento acumulado. A serrapilheira não apresentou sincronicidade com as outras variáveis em relação à precipitação. Em relação à temperatura os resultados apontam certa sincronicidade entre o Incremento acumulado e IAF, o que não ocorre com a variável de serrapilheira.

Figura 4.24 – Gráfico de correlação cruzada (Pearson) entre variáveis de campo (Incremento acumulado, IAF e serrapilheira) e variáveis meteorológicas (precipitação e temperatura) em relação às parcelas de diferentes estágios de regeneração.



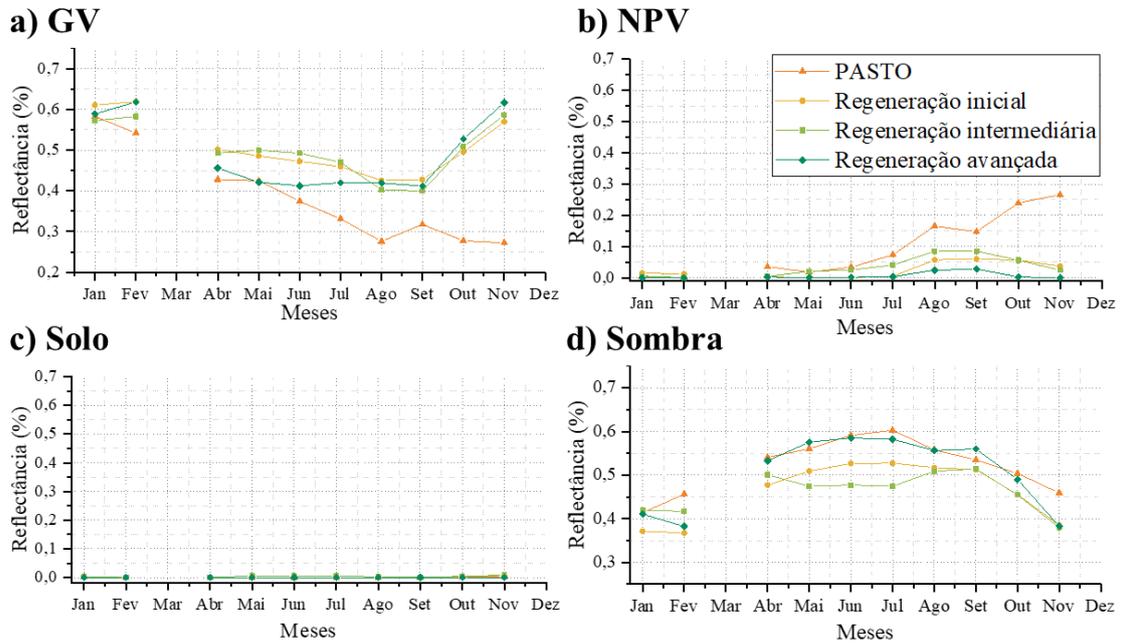
Fonte: Produção do Autor.

4.2.5 Frações espectrais (MLME) (OE-5)

Apresenta-se aqui os resultados da análise intra-anual do MLME ajustado a imagens da coleção Sentinel-2 seguindo três métodos: o método um (m1) refere-se a valores de componentes espectrais ou *endmembers*, desenvolvidos para os sensores a bordo do satélite Landsat 8 OLI (SOUZA et al., 2005; BULLOCK et al., 2018). O método dois (m2) também desenvolvido por valores de *endmembers* de sensores Landsat 8 OLI e disponível no banco de dados do Sistema de Informações Geográficas (SIG) e *software* livre IMPAC Toolbox da *Joint Research Centre* (JRC) da Comissão Europeia (SIMONETTI et al., 2015). Finalmente, o método três (m3) refere-se a metodologia desenvolvida na Mata Atlântica, obtido pelos *endmembers* ajustados sobre a coleção Sentinel-2 sobre a área estudada obtida nesse trabalho.

Apresenta-se na Figura 4.25 os resultados obtidos do método 1 (m1). As frações GV, NPV e sombra apresentaram resultados que diferenciam parcialmente as parcelas de diferentes estágios sucessionais. A fração solo não apresentou resultado significativo. A fração GV, destaca a região do espectro eletromagnético de maior reflectância do verde devido à maior interação com os pigmentos foliares, e segue um padrão de comportamento semelhante aos IVs, apresentando certa sazonalidade, valores altos no período úmido e menores no seco. A fração NPV, destaca a reflectância na região do infravermelho médio, uma região de maior interação com a lignina, e busca representar a parte da vegetação que seriam os galhos e troncos. Observa-se o resultado desta fração com maiores valores no período seco, em conformidade com o esperado baseando-se nos dados de campo. Já a fração sombra apresentou um comportamento de maiores entre os meses de maio a junho, já que nesse período o efeito de sombreamento é maior, devido maior grau de inclinação do Sol em relação à superfície nessa época (geometria Sol-alvo-sensor). Por fim, observa-se que os valores espectrais da fração solo não apresentam resultado expressivo para as parcelas estudadas na presente dissertação.

Figura 4.25 – Resultados da aplicação do MLME baseados no método 1 (SOUZA et al., 2005; BULLOCK et al., 2018) utilizado como referência de biblioteca espectral e suas respectivas frações: a) *Green vegetation* (GV), vegetação verde e/ou viva, b) *Non-photosynthetic vegetation* (NPV), vegetação não fotossinteticamente ativa, c) Solo e d) Sombra, aplicado às imagens Sentinel-2.

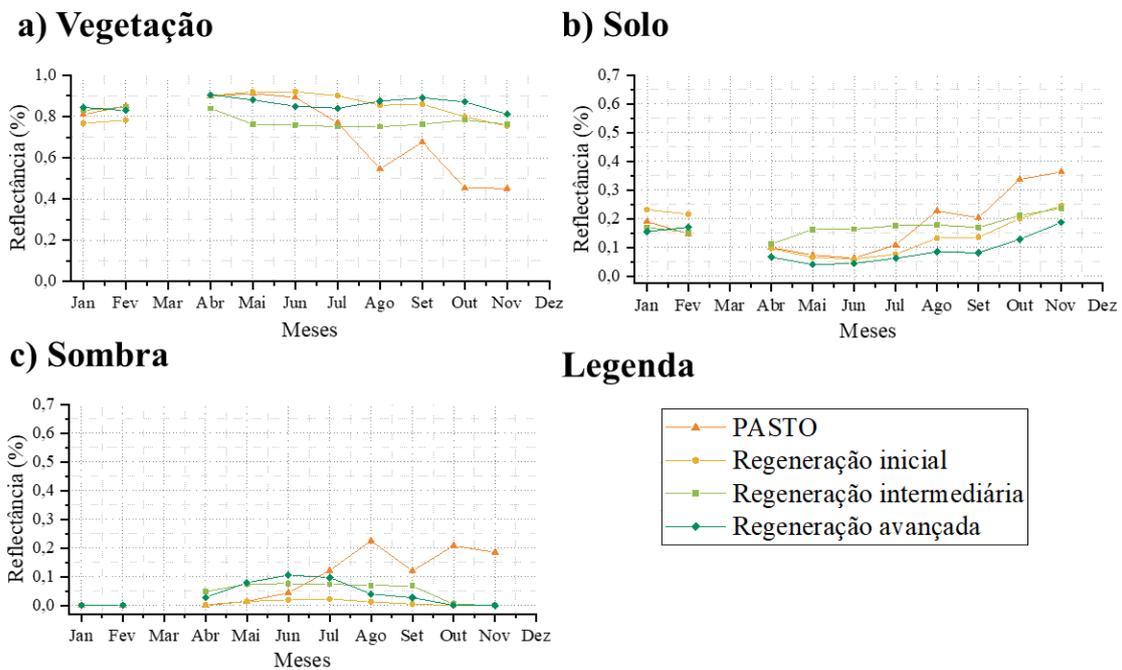


Fonte: Produção do Autor.

As Figuras 4.26 e 4.27 apresentam os resultados obtidos a partir do método 2 (JRC) e método 3 (BANDORIA, 2020), respectivamente. A comparação entre os métodos JRC e BANDORIA, em relação às frações espectrais de vegetação, apresenta que o ajuste surtiu efeito interessante no m3, já que no m2 não foi possível observar o efeito de sazonalidade existente no m3 em relação às parcelas estudadas. Pode-se observar que a parcela P, em ambos os métodos, apresentou resultado distinto das outras parcelas, ou seja, apresentou uma redução de reflectância do período úmido para o seco, mas não foi possível detectar a resposta do primeiro período tanto quanto em relação ao segundo. Quanto à análise da fração solo, em ambos os métodos, pode-se observar que a parcela P apresentou maior crescimento na segunda metade no período analisado. Já quando comparados os resultados obtidos das outras parcelas pode-se observar que o m2 não apresentou resposta sazonal na mudança de período seco para úmido, o que ocorreu no m3. Quanto a variação da reflectância dos valores das frações, no que diz respeito à separabilidade dos estágios, pode-se perceber que ocorreu diferenças na parcela Ra em relação às outras, em ambos

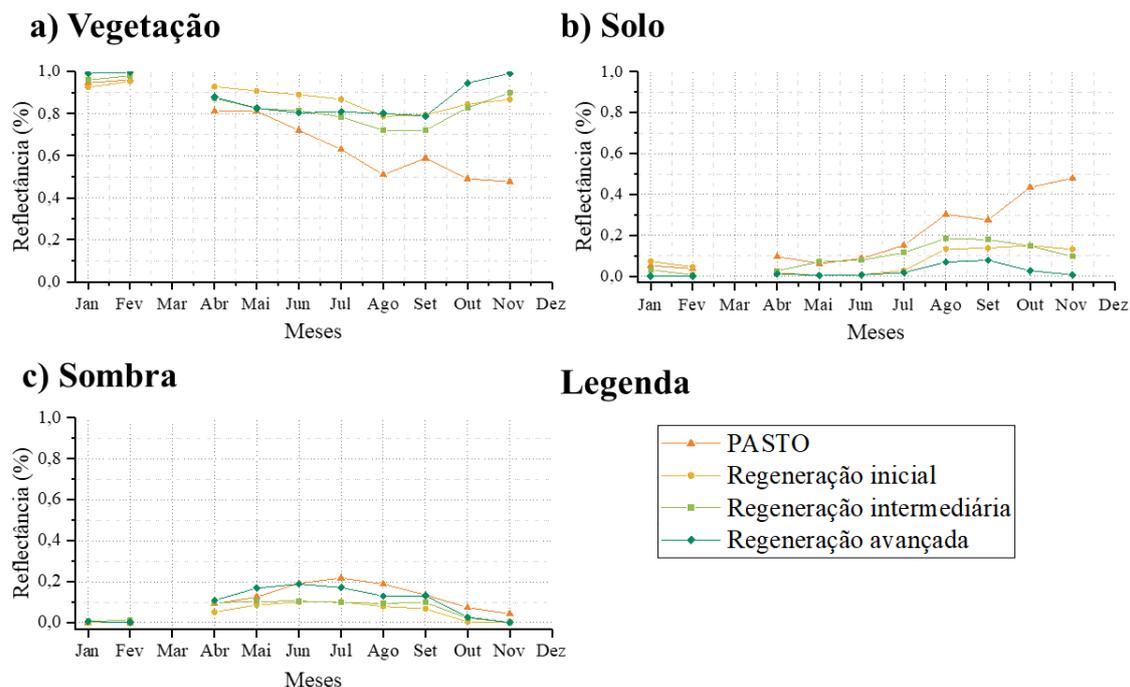
os métodos, o que não acontece as parcelas Ri e Rm. Os resultados da fração sombra em ambos os métodos mostra que os valores da reflectância no m2 apresentaram um desempenho estranho ao que se esperava, já que em todas as parcelas o efeito de posição e luminosidade ocorrem com as mesmas condições de angulação e incidência, portanto deveriam ter respostas com padrões de curva parecidas, o que pode ser observado com maior coerência no m3 entre a variação dos valores das parcelas, que ainda evidenciou a separabilidade entre as parcelas.

Figura 4.26 – Coleção de gráficos que representam os resultados no método 1 (SOUZA et al., 2005; BULLOCK et al., 2018) utilizado frações: a) vegetação, b) Solo e c) Sombra, testados nas imagens Sentinel-2, referentes ao ano de 2019.



Fonte: Produção do Autor.

Figura 4.27 – Coleção de gráficos que representam os resultados obtidos com o método 3 (BANDORIA, 2020) ajustados espectralmente às frações: a) vegetação, b) Solo e c) Sombra, às imagens Sentinel-2, referentes ao ano de 2019.



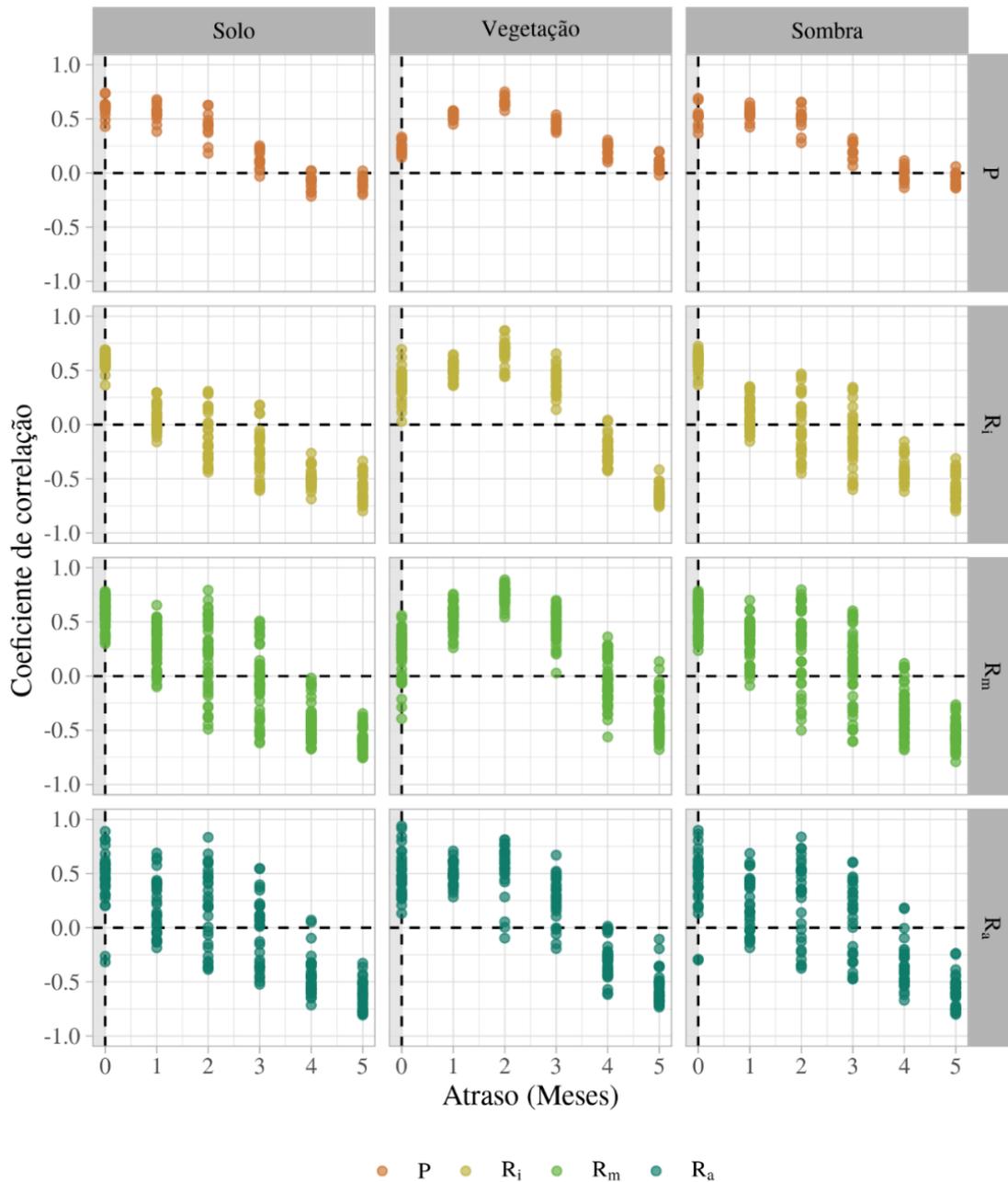
Fonte: Produção do Autor.

Ao se comparar os resultados das frações espectrais de vegetação, solo e sombra das duas fontes de bibliotecas com a terceira ajustada, pode-se dizer que os ajustes apresentaram uma coerência com o comportamento espectral esperado para as diferentes parcelas em relação aos seus diferentes estágios de regeneração sucessional.

A Figura 4.28 apresenta uma análise de correlação cruzada (Pearson) entre as frações (solo, vegetação e sombra) obtidos por meio do MLME aplicado às imagens Sentinel-2 em relação a precipitação sobre as parcelas estudadas.

Destaca-se que a parcela de pasto (P) apresentou maior correlação para a fração solo entre um e dois meses de precipitação, maior em três meses para a fração vegetação e alta entre os três primeiros meses para a fração sombra. A parcela Ri apresentou correlação positiva em um mês para a fração sombra, correlação positiva em três meses de atraso para a vegetação e um mês para sombra. Já a Rm apresentou correlação imediata para todas as frações em relação a precipitação.

Figura 4.28 – Gráfico de correlação cruzada (Pearson) entre os valores das frações espectrais obtidos da coleção de imagens Sentinel-2 em relação a precipitação do período analisado (2019).

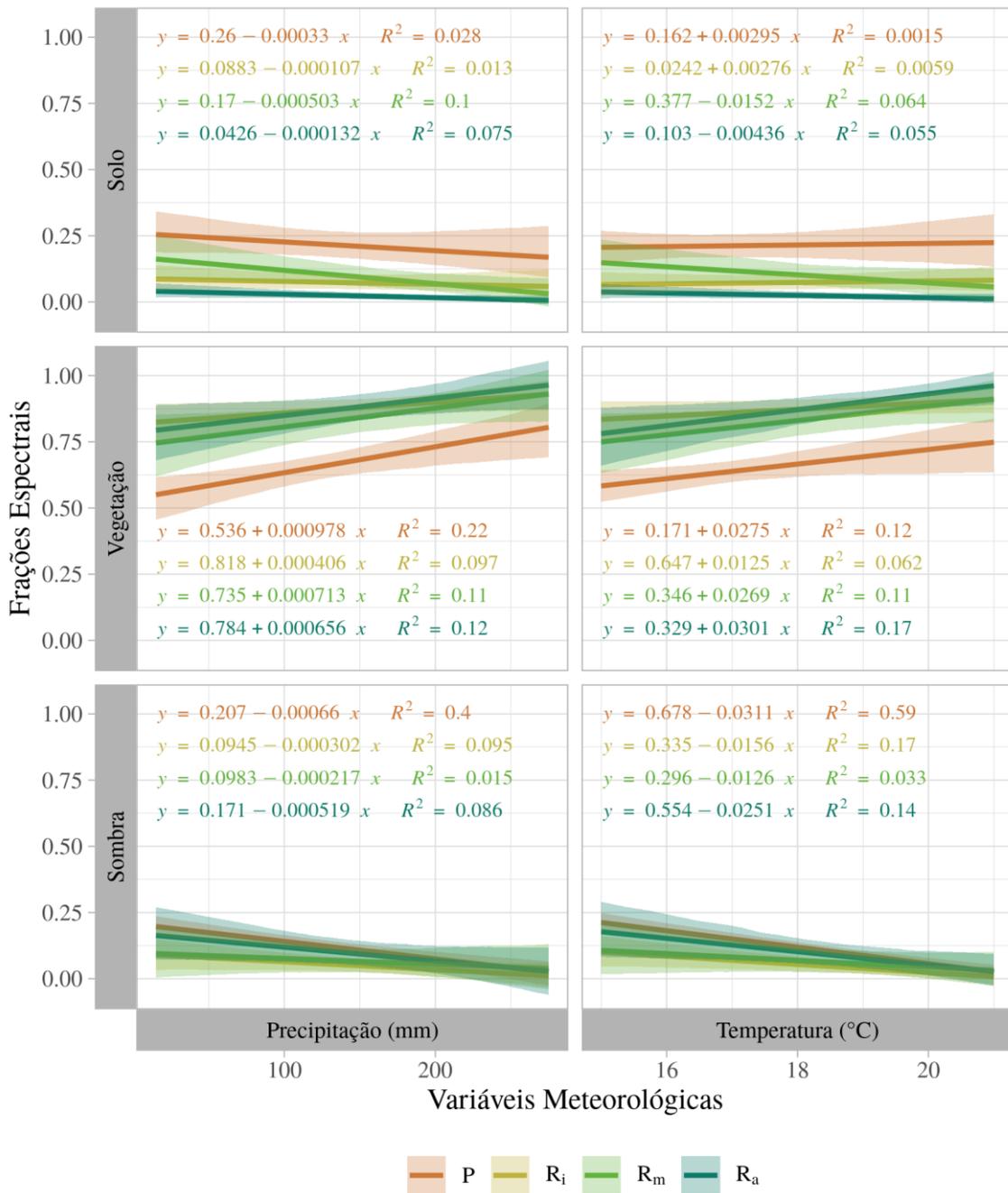


Fonte: Produção do Autor.

A Figura 4.29 apresenta análises de regressão linear entre as frações obtidas do MLME das imagens Sentinel-2 e os valores de precipitação e temperatura em cada parcela de regeneração distintas. Pode-se observar, que em geral, ocorreu correlação positiva entre os valores da fração vegetação e as variáveis climáticas nas três parcelas. A fração

vegetação apresentou correlação de 22% sobre parcela P, 11% Rm e 12% Ra, com a precipitação, e de 12% para a parcela P, 11% para Rm e 17% para Ra em relação a temperatura.

Figura 4.29 – Gráfico de regressão linear entre variáveis climáticas e valores de frações espectrais obtidos da série Sentinel-2. As áreas sombreadas indicam um intervalo de credibilidade de 95%.

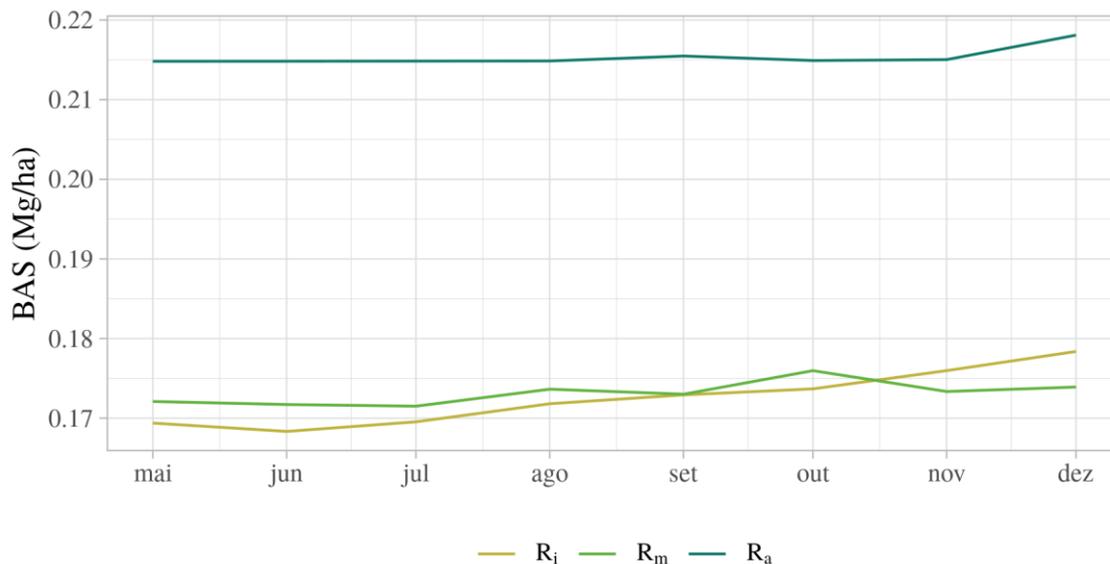


Fonte: Produção do Autor.

4.2.6 A BAS em cada estágio de regeneração sucessional (OE-6)

A Figura 4.30 apresenta um gráfico com a série temporal da BAS obtida dos valores de DAP e das espécies identificadas no universo amostral investigado.

Figura 4.30 – Gráfico da série temporal de BAS (Mg/ha) nas três parcelas em diferentes estágios de regeneração. Podemos verificar que a Ri entre outubro e novembro apresentou um aumento significativo em relação a BAS da parcela Rm.



Fonte: Produção do Autor.

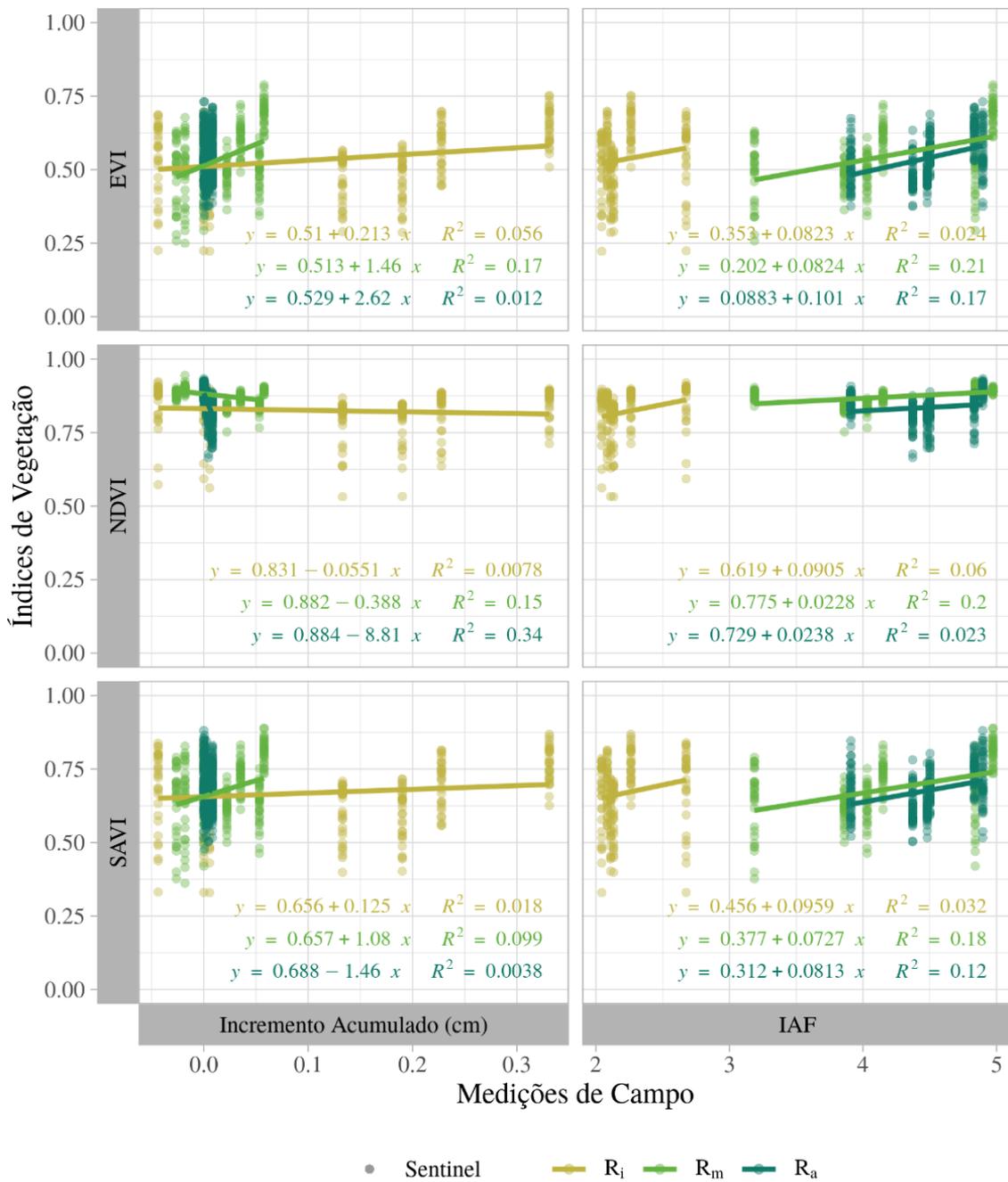
A análise do gráfico demonstra que a BAS durante o período analisado foi maior na Ra, pois esta parcela possui idade de regeneração superior às demais. Pode-se observar que as outras parcelas Ri e Rm apresentam uma variação de BAS muito parecidas, mas durante quase todo o período medido a Rm apresentou maiores valores em relação a Ri, que somente após o mês de outubro aparentemente começou a ter maiores valores.

A questão que é apresentada com essa análise, e se abre para possíveis trabalhos é qual seria a importância da regeneração sucessional para a recuperação dos ambientes e o impacto que isso acarreta para o clima, seja no processo de absorção de carbono de curto ou longo prazo, e qual seria a importância desse fenômeno para o ambiente e para a sociedade que depende dos benefícios que isso gera direta e indiretamente para a melhoria de vida da população?

4.2.7 Correlações entre dados de campo e Sentinel-2 (OE-7)

As Figuras 4.31 e 4.33 apresentam gráficos de regressão linear de cada parcela em diferente estágio de regeneração extraídos da coleção de imagens Sentinel-2, entre os IVs e frações espectrais com relação às variáveis de campo (incremento acumulado e IAF), obtidas sob uma amostragem aleatória, com resultados em intervalos com 95% de credibilidade. Ao analisar os resultados da Figura 4.31 destaca-se que a variável incremento acumulado explicou o EVI em 17% para Rm, explicou o NDVI em 15% para Rm e 34% para Ra. A variável IAF explicou o EVI em 21% para Rm e 17% para Ra, explicando também o NDVI em 20% para Rm, e o SAVI em 18% para Rm e 12% para Ra.

Figura 4.31 – Gráfico de regressão linear entre variáveis de campo e IVs obtidos do Sentinel-2 MSI.

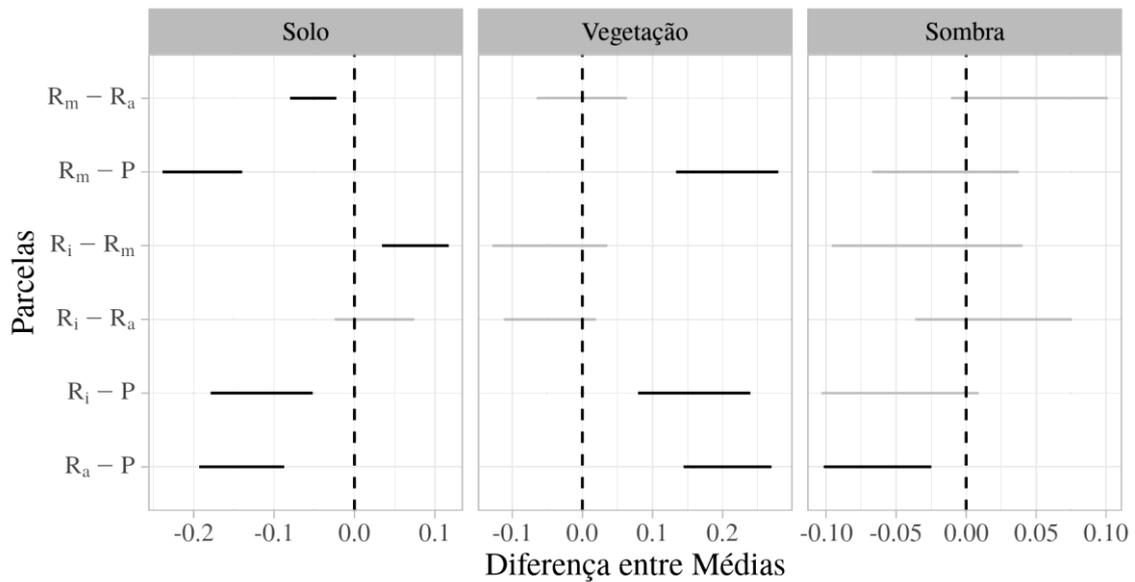


Fonte: Produção do Autor.

A Figura 4.32 mostra que a parcela P apresentou separabilidade em todas as frações. Entretanto a fração solo foi mais sensível na separação entre as parcelas de regeneração

intermediária e avançada ($R_m - R_a$). As outras parcelas não apresentaram diferenças de médias significativas em relação às frações espectrais.

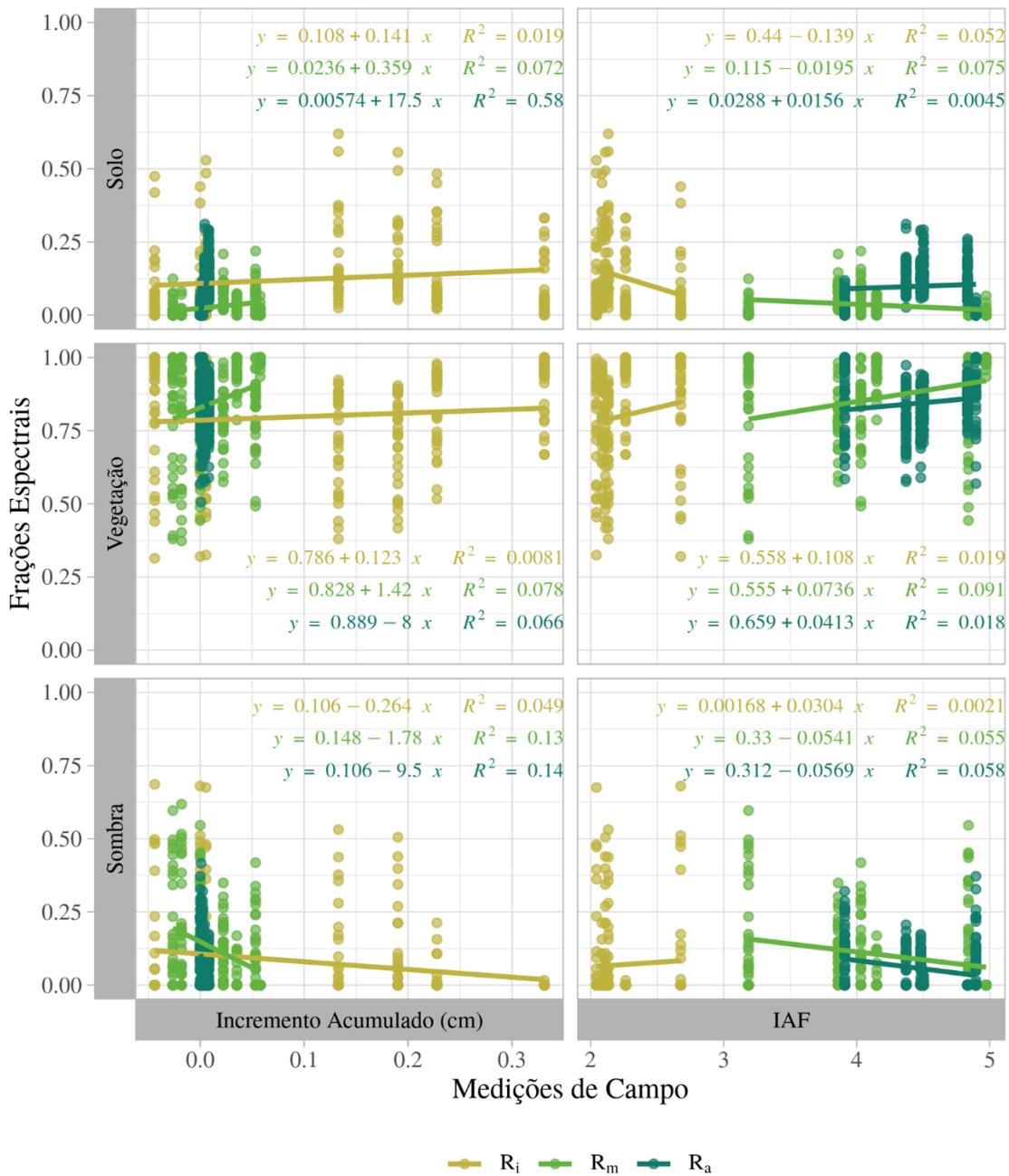
Figura 4.32 – Diferença de médias entre cada parcela em relação às frações espectrais. Quando uma possibilidade dessa diferença é igual a zero, considera-se que não há evidências para considerar uma diferença significativa entre as áreas, considerando um intervalo de credibilidade de 95%.



Fonte: Produção do Autor.

A Figura 4.33 apresenta um gráfico com valores obtidos das frações espectrais extraídos do MLME através do m3 das imagens da coleção Sentinel-2 em regressão linear com os dados de campo. Ao analisar os gráficos da Figura 4.33 destacamos que a variável incremento acumulado explicou a fração sombra em 58% para R_a e explicou a fração sombra em 13% para R_m e 14% para a parcela R_a . Em relação ao IAF em geral as correlações foram baixas, mas destacamos que explicou a fração vegetação em 0,9% para R_m .

Figura 4.33 – Regressão linear entre variáveis de campo e frações obtidos pelo método 3 (BANDORIA, 2020) das imagens Sentinel-2.



Fonte: Produção do Autor.

As Tabelas 4.9 e 4.10 apresentam os resultados das análises de correlação de Pearson entre variáveis de campo (BAS, Incremento acumulado, IAF e Serrapilheira), os IVs e as frações espectrais e seus respectivos coeficientes de correlação e valores-p.

Destaca-se que as melhores correlações apresentadas nas parcelas entre os IVs e as variáveis de campo.

Na parcela Ri, a BAS, incremento acumulado e IAF explicam, respectivamente 14%, 13% e 17% da variação do SAVI ($p < 0,05$). A Serrapilheira explica 14% da variação do NDVI ($p < 0,05$). Já na parcela Rm a BAS, incremento acumulado e o IAF não apresentaram valores significativos para nenhum IV. Finalmente, a serrapilheira explica 16% da variação do NDVI ($p < 0,05$). Na parcela Ra a BAS e o incremento acumulado explicam em 13% e 10% a variação do EVI ($p < 0,05$), e o IAF explicou 15% da variação do NDVI ($p < 0,05$). Finalmente, a serrapilheira não apresentou relações significativas com nenhum índice para esta parcela.

Destacamos as melhores correlações apresentadas nas parcelas entre as frações espectrais e as variáveis de campo.

Na parcela Ri, a BAS, e incremento acumulado, explicam respectivamente 22% da variação da fração sombra ($p < 0,05$). O IAF e a serrapilheira, explicam respectivamente 22% e 17% a fração solo ($p < 0,05$). Já na parcela Rm a BAS e IAF, explicam respectivamente 18% e 23% da variação das frações solo e sombra ($p < 0,05$), incremento acumulado e serrapilheira não apresentaram valores significativos para nenhuma fração espectral. Na parcela Ra o incremento acumulado e IAF, explicam respectivamente 76% e 13% as frações solo e vegetação ($p < 0,05$). BAS e serrapilheira não apresentaram valores significativos para nenhuma fração espectral.

Tabela 4.9 – Correlação de Pearson das variáveis obtidas em campo com relação aos IVs obtidos pelo Sentinel-2 e seus respectivos coeficientes de correlação e valores-p.

Parcelas	Variáveis (campo)	IV	R ²	valor-p
Ri	BAS	EVI	0.24	2,78E+11
	BAS	NDVI	-0,07	0,25
	BAS	SAVI	0.14	0,03
	Incremento Acumulado	EVI	0,23	5,47E+11
	Incremento Acumulado	NDVI	-0,08	0,2
	Incremento Acumulado	SAVI	0,13	0,04
	IAF	EVI	0,15	0,036
	IAF	NDVI	0,24	8,78E+10
	IAF	SAVI	0,17	0,016
	Serrapilheira	EVI	0,04	0,51
	Serrapilheira	NDVI	0,14	0,05
	Serrapilheira	SAVI	0,09	0,18
Rm	BAS	EVI	0,35	5,15E+07
	BAS	NDVI	-0,33	5,53E+08
	BAS	SAVI	0,26	7,60E+10
	Incremento Acumulado	EVI	0,41	3,09E+05
	Incremento Acumulado	NDVI	-0,39	2,43E+07
	Incremento Acumulado	SAVI	0,31	2,14E+08
	IAF	EVI	0,45	4,70E+05
	IAF	NDVI	0,44	1,55E+06
	IAF	SAVI	0,42	1,29E+06
	Serrapilheira	EVI	0,01	0,89
	Serrapilheira	NDVI	0,16	0,02
	Serrapilheira	SAVI	0,03	0,59
Ra	BAS	EVI	-0,13	0,015
	BAS	NDVI	-0,39	1,16E+03
	BAS	SAVI	-0,19	3,55E+10
	Incremento Acumulado	EVI	0,1	0,04
	Incremento Acumulado	NDVI	-0,57	5,83E-15
	Incremento Acumulado	SAVI	-0,06	0,26
	IAF	EVI	0,4	7,91E+02
	IAF	NDVI	0,15	0,01
	IAF	SAVI	0,34	3,85E+07
	Serrapilheira	EVI	0,06	0,29
	Serrapilheira	NDVI	-0,008	0,88
	Serrapilheira	SAVI	0,06	0,26

Fonte: Produção do Autor.

Tabela 4.10 – Correlação de Pearson entre as variáveis obtidas em campo e as frações espectrais obtidas pelo Sentinel-2 e seus respectivos coeficientes de correlação e valores-p.

Parcelas	Variáveis (campo)	Frações Espectrais	R ²	valor-p
Ri	BAS	Solo	0,12	0,06
	BAS	Vegetação	0,09	0,15
	BAS	Sombra	-0,22	0,001
	Incremento Acumulado	Solo	0,13	0,045
	Incremento Acumulado	Vegetação	0,09	0,19
	Incremento Acumulado	Sombra	-0,22	0,0012
	IAF	Solo	-0,22	0,002
	IAF	Vegetação	0,13	0,06
	IAF	Sombra	0,045	0,54
	Serrapilheira	Solo	-0,17	0,016
	Serrapilheira	Vegetação	0,07	0,31
	Serrapilheira	Sombra	0,07	0,32
Rm	BAS	Solo	0,18	0,005
	BAS	Vegetação	0,29	1,24E+11
	BAS	Sombra	-0,35	6,75E+04
	Incremento Acumulado	Solo	0,26	6,40E+10
	Incremento Acumulado	Vegetação	0,27	2,94E+10
	Incremento Acumulado	Sombra	-0,36	2,79E+08
	IAF	Solo	-0,27	1,57E+12
	IAF	Vegetação	0,3	2,88E+11
	IAF	Sombra	-0,23	0,0012
	Serrapilheira	Solo	-0,13	0,07
	Serrapilheira	Vegetação	-0,03	0,67
	Serrapilheira	Sombra	0,017	0,33
Ra	BAS	Solo	0,43	7,71E-02
	BAS	Vegetação	-0,23	1,48E+11
	BAS	Sombra	-0,1	0,49
	Incremento Acumulado	Solo	0,76	1,81E-48
	Incremento Acumulado	Vegetação	-0,25	2,29E+09
	Incremento Acumulado	Sombra	-0,37	9,98E+01
	IAF	Solo	0,06	0,25
	IAF	Vegetação	0,13	0,02
	IAF	Sombra	-0,24	4,53E+10
	Serrapilheira	Solo	-0,017	0,77
	Serrapilheira	Vegetação	0,001	0,85
	Serrapilheira	Sombra	0,001	0,97

Fonte: Produção do Autor.

5 DISCUSSÃO

Este trabalho demonstrou que a série Landsat possibilitou caracterizar e apoiar a delimitação temporal de áreas em processo de regeneração sucessional. Evidenciou a importância da investigação realizada em campo, que com base na resolução CONAMA de 1994, confirmou-se o processo de regeneração sucessional da Mata Atlântica sobre as parcelas estudadas. Mostrou também que o levantamento de dados de campo associados a métricas obtidas por SR no ano de 2019 pelas imagens Sentinel-2 MSI possibilitou caracterizar biofísicamente os diferentes estágios de regeneração florestal, estimativas de biomassa e crescimento de tronco deram condições para melhorar o entendimento sobre o papel da regeneração secundária sobre o ambiente. Enquanto não for possível utilizarmos de dados de SR ativo sobre amplas áreas e biomas do território brasileiro os dados multiespectrais utilizados nesta pesquisa destacam a importância para estimativas e abordagens sobre questões ambientais associadas à recuperação de áreas degradadas. Entretanto, o estudo realizado na Mata Atlântica por SR aponta limitações intrínsecas acerca dos métodos empregados, seja pelos IVs ou pelas frações espectrais do MLME, diretamente associadas a questão da correção topográfica sobre a região, assim certos cuidados são cruciais para o bom desempenho deste tipo de abordagem, e uma generalização dos resultados obtidos para uma região toda seria inviabilizada sem a devida consideração acerca desta questão.

5.1 Qual a contribuição do uso de dados da série Landsat e Sentinel-2 para a detecção e caracterização de regeneração florestal?

Ferramentas de SR multiespectral e os IVs derivados a partir de imagens de diversos sistemas sensores aplicados a estudos sobre a vegetação têm possibilitado entender processos biofísicos e ecossistêmicos. É possível estimar indiretamente processos, classificar a distribuição da cobertura de vegetação em diversas escalas, inferir mudanças ecológicas associadas aos diversos tipos de cobertura, estimar a radiação ativa, fenologia, produtividade de culturas, além da detecção de distúrbios e, sobretudo tem apoiado na caracterização da recuperação de florestas tropicais em diversos biomas no Brasil

(TEILLET et al., 1997; VIEIRA et al., 2003; PONZONI et al., 2004; CINTRA, 2007; SILVA et al., 2013; BEZERRA, 2019; SHIMABUKURO et al., 2019).

Os resultados encontrados nesta pesquisa destacam a importante contribuição das imagens da série Landsat, especificamente em relação a caracterização temporal da evolução de florestas secundárias em paisagens em regeneração. Os resultados mostram que quando associadas a medidas de campo, aumenta seu potencial exploratório na análise biofísica da vegetação, porém nossos resultados foram fracos para compreender o funcionamento das plantas observadas por meio do incremento acumulado e mudanças no IAF. A análise baseou-se em uma abordagem quantitativa e qualitativa sobre imagens da série temporal Landsat e possibilitou detectar e caracterizar diferentes estágios da vegetação associados a mudanças em sua estrutura e o tempo de regeneração. Permitiu identificar também as idades das paisagens, através da análise de atributos da fenologia do dossel por IVs e por interpretação visual, confrontadas com informações sobre o uso da terra obtidas sobre a área. Os resultados (Tabela 4.4) apontam fato as parcelas selecionadas são amostras representativas do processo de regeneração secundária, sendo possível associá-las a três estágios bem marcados: inicial, que corresponde entre 7 e 8 anos de idade, intermediário, com aproximadamente 20 anos de idade, e avançado, que são áreas com mais de 40 anos de idade. Estes estágios correspondem ao caracterizado em campo baseada na resolução nº1 do CONAMA para Mata Atlântica e, sob testes de médias significativos (valor-p <0,05).

Na literatura em Sensoriamento Remoto identificam-se que os estudos abordando a integração de IVs e MLME em florestas tropicais, e predominantemente aplicados sobre a Amazônia (SOUZA et al., 2005; COCHRANE, 2005; ANDERSON et al., 2011; SOUZA et al., 2013; BULLOCK et al., 2018; SHIMABUKURO et al., 2019) e alguns aplicados sobre a Mata Atlântica (SILVA et al., 2004; RIBEIRO et al., 2009). Parte destes estudos apontam a importância do uso de dados de campo, o método de cronosequência e abordagens qualitativas para entender o processo de regeneração sucessional no bioma (HOLZ et al., 2000; JOLY et al., 2014; REZENDE et al., 2015; GUISLON et al., 2017), e mapear a degradação, por abordagens com sistemas sensores de alta resolução (REZENDE et al., 2018; WAGNER et al., 2020). Portanto, muitos desses estudos diferenciam florestas primárias de secundárias, entretanto, apontam espaço e necessidade de investigar a evolução secundária de ambientes florestais, sobretudo na Mata Atlântica.

As imagens dos sistemas sensores MSI do Sentinel 2A e B, possuem maior resolução espacial do que a série Landsat, isso tem sido explorado nas abordagens metodológicas e em investigações sobre a vegetação (RICHTER et al., 2012; ADDABBO et al., 2016; VAGLIO LAURIN et al., 2016; DAI et al., 2018; SILVEIRA, 2018; SKAKUN et al., 2018; BEZERRA, 2019).

Considerando o potencial de desempenho do sistema sensor MSI Sentinel-2 na detecção de diferenças de estágios sucessionais de florestas subtropicais (SOTHE et al., 2017), aplicou-se neste estudo diferentes IVs (NDVI, EVI e SAVI). Os resultados indicaram a detecção de diferenças entre os estágios de regeneração, destacando-se que os IVs separarão a parcela de pastagem (P) em todas as combinações, e o estágio zero e inicial foram discretizados somente pelo NDVI, sob uma diferença de médias significativas e intervalo de credibilidade de 95%. Quando comparados com variáveis climáticas, apresentaram também correlações positivas e significativas entre o EVI e o SAVI em até 5 meses com a precipitação para os estágios secundários, permitindo afirmar que existe uma relação quase homogênea entre o aumento, sob um tempo de resposta, dos valores de chuva com a resposta da vegetação (Figura 4.14). Quando comparados, os resultados apontam que o incremento acumulado medido em campo explicou a variação de 12% a 34% dos IVs obtidos do Sentinel-2. Ou seja, mostrando que os mesmos foram sensíveis a detecção da diferença estrutural sobre a evolução secundária de parcelas da Mata Atlântica (Figura 4.31).

Estudos apontam o uso associado de IVs e frações espectrais na análise sobre a detecção de mudanças sobre a cobertura de vegetação (SILVA et al., 2013; ATZBERGER et al., 2014; DOXANI et al., 2015; GAMEIRO et al., 2016; CORDEIRO et al., 2017; BULLOCK et al., 2018; DUTRA; et al., 2018; SKAKUN et al., 2018; GAO et al., 2019). Algumas metodologias utilizam IVs sob biomas secos no Brasil, visando estimar a estrutura da floresta, e mudanças de uso e cobertura (GAMARRA et al., 2016; DUTRA et al., 2018; SILVEIRA et al., 2019).

Os resultados sobre as frações espectrais obtidas do sistema sensor Sentinel-2 MSI (Figura 4.32), destacou que a parcela pastagem (P) apresentou uma diferenciação na média em todas as frações espectrais testadas, considerando um intervalo de credibilidade de 95%. Destaca-se que a fração espectral de solo foi mais sensível sob diferenciação da

média entre as parcelas de regeneração intermediária e avançada ($R_m - R_a$). As frações espectrais vegetação e sombra não apresentaram diferenças de médias significativas entre os estágios, entretanto quando comparadas a medidas de incremento acumulado, observa-se que tal variável explicou entre 13% a 58% de tais frações espectrais.

A questão do apoio a detecção sobre a degradação em florestas tropicais, têm sido encaminhada em diversas abordagens sob várias escalas de análise, predominantemente no âmbito regional (LAMBIN, 1999; GAO et al., 2019). A análise dos produtos de NDVI e EVI do sistema sensor MODIS tem sido amplamente testada na escala regional para caracterizar padrões de resposta do crescimento da floresta tropical em diferentes escalas temporais (HUETE et al., 2002; MAEDA et al., 2016; VICENTE-SERRANO et al., 2016).

Assim, os resultados apresentados sobre IVs e frações espectrais, obtidos dos sistemas sensores de média resolução, Landsat (TM, ETM+, OLI) e Sentinel-2 (MSI), submetidos a análise de paisagens de florestas secundárias, demonstram-se sensíveis a detecção biofísica das diferentes condições da cobertura de vegetação sobre as paisagens em processo de regeneração da Mata Atlântica, conseguindo desta forma, diferenciar a evolução das florestas secundárias, seja na evolução temporal, ou sobre a análise intra-anual. A pesquisa destaca o desempenho de dados de sistemas sensores de resolução média aplicados sobre áreas pequenas com alta heterogeneidade no espaço, traduzindo-se em pequenas manchas de vegetação de um ambiente pouco explorado na literatura. Assim, demonstra-se de forma comparativa o papel do SR multiespectral sobre o estudo do ambiente físico. Apesar de limitações, como a questão da escala, o processo de extração de dados e a diferença dos sensores, ficou evidente a busca pela compreensão de tais técnicas para o avanço sobre a compreensão dos processos de regeneração florestal investigado.

5.1.1 As informações obtidas pelo Sentinel-2 MSI são mais sensíveis à detecção sobre o processo de regeneração?

A expectativa sobre o potencial desempenho do sistema sensor Sentinel-2 MSI tem sido explorada nos últimos anos em análises sobre processos e dinâmicas da vegetação,

testando assim a sua capacidade de detecção (RICHTER et al., 2012; ADDABBO et al., 2016; VAGLIO LAURIN et al., 2016; SOTHE et al., 2017; DAI et al., 2018).

Ao longo dos últimos anos diversas metodologias foram desenvolvidas no SR buscando detectar e discernir paisagens em sucessão de florestas secundárias na Amazônia realizadas pelo uso de sistemas sensores de média-a-alta resolução e hiper espectrais mostrando por exemplo, que o aumento da precisão sobre a classificação de tais paisagens, pôde ser realizada em conjunto separado de pixels, de 83,3% para 98,3% para Ri, 53,3% para 70,0% para Rm e 58,3% para 76,7% para Ra, quando comparados a variações multiangulares (GALVÃO et al., 2009).

O monitoramento da fenologia intra-anual de diferentes fisionomias vegetais sobre o ambiente Amazônico por IVs, também tem sido realizado por sistemas sensores de média-alta resolução, como o *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), e estudos mistos entre IVs e frações espectrais destacam que o EVI apresentou correlação significativa com a fração sombra, explicando-a em 88% (valor-p <0,05) sobre a variabilidade da floresta tropical aberta (ANDERSON et al., 2011). Este resultado baseia-se na hipótese que o aumento no EVI provavelmente estava associado a modificações estruturais do dossel, como a diminuição da heterogeneidade do dossel devido a perda de folhas por árvores decíduas e semidecíduas.

Assim, no âmbito dos estudos florestais os IVs têm sido utilizados predominantemente, segundo a literatura do SR, para o mapeamento de diferentes tipos de coberturas da vegetação, em abordagens em macro e microescala, a exemplo desta última, para a identificar espécies em florestas tropicais, explorando o potencial investigativo sobre o discernimento espectral em análises biofísicas da vegetação (FERREIRA et al., 2016; CORDEIRO et al., 2017).

Desta forma, considerando diversos estudos e o potencial a ser explorado do sistema sensor Sentinel-2 MSI, associado a metodologias que usam de forma comparativa os IVS e as frações espectrais, foi possível testar o desempenho do mesmo, sobre a caracterização de parcelas de regeneração no ano de 2019, desde o estágio zero, pasto (P), até aqueles que expressam a evolução sucessional de floresta secundária (Ri – Regeneração inicial, Rm – Regeneração médias e Ra – Regeneração avançada) na Mata Atlântica. Os resultados apontam que os IVs utilizados possibilitaram separar os estágios de

regeneração zero (P) dos demais. Entretanto, como já apontado, o estágio inicial foi discretizado dos outros somente pelo NDVI (valor- $p < 0,05$), contrastando com o que foi apontado sobre o desempenho obtido pelo NDVI na análise interanual. A comparação sobre os efeitos meteorológicos em relação ao tempo de resposta da vegetação, evidenciou correlações positivas, resultados que sugerem a dependência da vegetação, detectada pelo EVI e SAVI em relação a variação de precipitação e temperatura sobre a área.

O aumento do potencial de identificação de informações espectrais da vegetação tem sido demonstrado pelo uso do método do Modelo Linear de Mistura Espectral. Buscando ajustar a capacidade de discernimento das informações da vegetação obtidas pelos IVs sobre imagens de diversos sistemas sensores, estudos têm desenvolvido diversas bibliotecas espectrais sobre ambientes florestais (CARVALHO JÚNIOR et al., 2003; ZANOTTA et al., 2014; DRUMETZ; CHANUSSOT; JUTTEN, 2016). Tais bibliotecas são referências ajustados aos intervalos de respostas espectrais de diversos sistemas sensores, e têm sido utilizadas para distinguir as informações sobre a vegetação e usadas no monitoramento e mapeamento, aprimorando em até 90% a acurácia, sobre o fenômeno da degradação em florestas tropicais (BULLOCK et al, 2018; SHIMABUKURO et al., 2019).

Os resultados sobre três conjuntos de bibliotecas espectrais na análise intra-anual (2019) mostrou-se perceptível o comportamento sazonal nos métodos (m2 - SOUZA et al., 2005; BULLOCK et al., 2018; e m3 - BANDORIA, 2020) e em ambos ocorreram diferenças sobre o comportamento espectral em relação às frações vegetação, solo e sombra. Observando-se apenas resultados sobre o m3 (BANDORIA, 2020 - este estudo), comparada com dados de precipitação e temperatura do local, sob intervalos de credibilidade de 95%, destaca-se que o comportamento da parcela de pasto (P) foi distinto por correlação com as frações e a precipitação. Além disso, observou-se correlação positiva entre os valores da fração vegetação e as variáveis climáticas nas três parcelas (Figura 4.29).

O uso de frações espectrais apontam que o desempenho do Sentinel-2 (MSI), aplicado a outros biomas brasileiros (semiárido) foi sensível na separação de diferenças entre a vegetação não fotossinteticamente ativa (NPV) e solo, e portanto tem melhorado o

desempenho sobre índices de vegetação de proporção simples como NDVI e SAVI, que apresentam bastante semelhança com as frações, mas dificultam sua separação (DAI et al., 2018). Entretanto, ainda existem lacunas e possibilidades quanto ao desempenho do uso misto entre IVs e frações espectrais. O que têm sido destacado são aplicações associadas a dados de campo, sobretudo quando aplicadas ao entendimento de florestas secundárias da Mata Atlântica (GREIG et al., 2018). A associação entre diferentes fontes de dados com aqueles obtidos por SR na Mata Atlântica, aponta uma tendência e necessidade de explicar o processo da regeneração florestal e seus impactos sobre a sociedade. Sendo assim, o desempenho do sistema sensor Sentinel-2 MSI ainda precisa ser explorado sob diferentes escalas, paisagens e abordagens para consolidar métodos de caracterização da regeneração florestal. Entretanto, quando associados a dados de campo, tais perspectivas podem ser melhor discutidas sobre o estudo da evolução da regeneração de florestas como apresentado nesta dissertação.

5.2 Qual é a importância do processo de regeneração florestal para o clima?

Estudos que associam SR e dados de campo apontam para a importância de investigarmos a relação entre crescimento de tronco, folhas e sua relação com os processos de assimilação (WAGNER et al., 2014, 2016) e estoque de carbono sobre a estrutura da vegetação (MALHI et al., 2009). Alguns utilizam imagens de sistemas sensores de alta resolução de maneira indireta, correlacionando a resposta espectral da região do infravermelho e sua relação com a estrutura da vegetação para estimar biomassa arbórea (correlação de -0,80) e carbono orgânico arbóreo (correlação de - 0,79) (WATZLAWICK et al., 2009), outros têm apostado no uso misto entre multi-sensores e dados de campo para estimar a biomassa sobre ambientes degradados, obtendo resultados de coeficiente de determinação $R^2 = 0.49$ e sob RMSE de 58 Mg ha^{-1} (49.08%) sobre imagens de textura e IVs (SANTOS et al., 2019).

Os resultados obtidos sobre a BAS neste trabalho demonstram que cada estágio apresenta uma característica distinta correspondente ao seu ritmo próprio de regeneração (Figura 4.30). Destaca-se a tendência ascendente sobre o estágio inicial em relação aos outros estágios. Esse resultado é importante porque aponta para o entendimento do impacto da regeneração inicial na área estudada, que pode ser entendida como representativa de um

processo que ocorre em todo o bioma. Além disso, a relação deste crescimento com o processo de assimilação de carbono, considera-se que a escala de bioma tem potencial de impactar os estoques terrestre de Carbono, posto que as taxas de ganho registradas nos estágios iniciais são maiores que nos seguintes (CHAZDON et al., 2016). Assim, mesmo sob amostragem reduzida, o método de análise por cronosequência sobre a estrutura das paisagens em regeneração demonstrou potencial para detectar o processo de assimilação de carbono na regeneração inicial.

O avanço das técnicas de SR e a integração de sensores passivos e dados Lidar tem ampliado as possibilidades de investigação acerca da estimativa sobre a biomassa acima do solo (BAS) (SANTOS et al., 2019), mas enquanto essas novas tecnologias não se tornam acessíveis, busca-se o aprimoramento de técnicas aplicadas a sensores multiespectrais. Estimativas de estoques e emissão de carbono no Brasil têm apontado a importância de levarmos em consideração as taxas de desmatamento, mas aponta-se uma grande limitação a não inclusão de emissões derivadas dos processos de degradação florestal (BERENGUER et al., 2014) tão pouco a assimilação do carbono por vegetação secundária (este estudo).

A importância do processo de regeneração florestal para o clima tem sido reconhecida como fator de impacto sobre o estoque de carbono mundial. Modelagens apontam que em 40 anos de baixo investimento em recuperação de paisagens de florestas secundárias podem quantificar um acúmulo de 8,48 Pg de Carbono o que corresponderia a uma assimilação de 31,09 Pg de CO₂ sendo o Brasil possui 28% de áreas em regeneração inicial e intermediária (CHAZDON et al., 2016).

5.3 Qual a importância dos dados de campo para o entendimento do processo de regeneração florestal detectados por sensoriamento remoto (SR)?

O estudo sobre ecologia de paisagens em processo de regeneração florestal na Mata Atlântica tem sido essencial para o entendimento da dinâmica de biomassa e carbono, a diversidade de espécies arbóreas, e a caracterização do estágio de sucessão. Tais estudos em geral realizam medidas de DAP e levantamentos fitossociológicos em parcelas de 1ha. A exemplo do levantamento realizado por Marchiori e colaboradores (2016) em área de Mata Atlântica, estudo que caracterizou o índice de valor de importância (IVI) sobre

algumas espécies arbóreas, baseado em índices que expressam a diversidade, produtividade, e distribuição de abundância, encontradas no parque Estadual da Serra do Mar. No estudo foram apontados que as espécies *Psychotria vellosiana* Benth e *Cabralea canjerana* (Vell.) Mart, apresentaram respectivamente valores de importância de 2,58 e 1,18, ambas com característica de vegetação secundária avançada. Além disso, apontaram também que a espécie *Vernonanthura petiolaris* (DC.) H. Rob possui valor de importância de 0,28, e é considerada como espécie pioneira, espécies estas que foram identificadas na parcela Ra em nosso estudo. Outro exemplo, é a espécie *Sapium glandulosum* (L.) Morong com valor de importância de 0,23 e considerada como secundária inicial, identificada na parcela Rm em nosso estudo. Por fim, tais estudos destacaram que a espécie *Tibouchina pulchra* (Cham.) Cogn é considerada com alto valor de importância 6,91 e possui característica de regeneração inicial, apresentando coerência com o que apontamos sobre a mesma neste estudo, caracterizada como predominantemente na parcela Ri. A identificação de tais espécies e o estudo conjunto com medidas de SR visam apoiar práticas e o desenvolvimento de políticas de restauração de paisagens degradadas (MIRANDA et al., 2019).

A pluralidade de abordagens pode ampliar de maneira integrativa a análise quantitativa e qualitativa sobre a cobertura de vegetação. Associar informações obtidas em campo acerca do uso histórico de cobertura sobre uma área, apresenta-se como um importante suporte analítico em diversos trabalhos (PANTOJA, 2017), sobretudo em investigações sobre o processo de regeneração das paisagens de florestas tropicais (MACHADO et al., 2005).

A caracterização dos estágios sucessionais das parcelas realizada em campo em 2019 por este estudo, associadas às características da resolução nº1 do CONAMA para a Mata Atlântica, possibilitou validar as estimativas realizadas por meio do SR multiespectral. Por exemplo, os resultados de área basal total de 0,2, 0,75 e 2,98 m²/ha, o coeficiente de variação da altura de 72,8, 86,1 e 94,9 (%), e o DAP médio de 3,67, 4,59 e 4,23 (cm), respectivamente sobre as parcelas Ri, Rm e Ra, foram essenciais para a caracterização dos estágios de regeneração, e para a interpretação dos IV e das imagens fração do MLME.

A determinação da idade e caracterização da regeneração secundária na Amazônia destaca a importância de medidas de campo, a exemplo de trabalhos que utilizaram imagens multiespectrais de média resolução e dados de campo, apresentou resultados de similaridade de espécies entre os estágios intermediário e avançado, quando comparados com floresta madura de referência, e diferenças estatisticamente significativas (valor- $p < 0,05$) sobre medidas de crescimento de árvores (DAP) entre os estágios Ri e Rm (SILVA et al., 2016).

Destaca-se que nesta dissertação as variáveis de campo explicaram os IVs obtidos do sistema sensor Sentinel-2 MSI, da seguinte forma: a variável incremento acumulado obtida do DAP explicou o EVI em 17% para Rm, e explicou o NDVI em 15% para Rm e 34% para Ra. Destaca-se ainda que a variável incremento acumulado explicou a fração sombra em 58% para Ra e em 13% para Rm, e 14% para a parcela Ra. Portanto, assim como apontado no estudo de Silva e colaboradores (2016) a variável DAP foi essencial para discernir os estágios e validar os IVs.

Em relação a variável IAF, também obtida em campo, o mesmo explicou o EVI em 21% para Rm e 17% para Ra, o NDVI em 20% para Rm, e por fim explicou o SAVI em 18% para Rm e 12% para Ra. As correlações entre IAF e as frações espectrais em geral foram baixas, mas destaca-se que o mesmo explicou a fração vegetação em 0,9% para Rm. Portanto, tais resultados apontam a importância das medidas de campo no entendimento do processo estudado.

Identifica-se como uma limitação desta pesquisa o desenho amostral para abordagens baseadas em sensores remotos satelitais, assim como o tamanho das parcelas e sua proximidade, podem ter afetado a detecção e caracterização dos estágios de regeneração. Considera-se que idealmente seria interessante realizar levantamentos em áreas maiores e mais distantes, assim como um maior número de parcelas, para assim reduzir o efeito de autocorrelação e capturar melhor a heterogeneidade das florestas nesta região. No entanto, os altos custos com equipamentos, recursos humanos e tempo, foram fatores limitantes para a pesquisa de campo. Por fim, outro fator que pode ter influenciado os resultados entre as análises de campo e o SR foi a série temporal de coletas *in situ* disponível.

Mesmo assim, considerando tais obstáculos, foi possível destacar a importância da presença de indivíduos pioneiros para a recuperação de ambientes degradados, além de detectar parcialmente uma relação de dominância e comportamento da resposta da vegetação a nível de espécie, o que pode apoiar outros estudos que buscam compreender a velocidade de crescimento das diferentes fases de regeneração.

Por fim, o conjunto de informações das parcelas em diferentes estágios de regeneração possibilitou mesmo com as limitações apontadas, uma aproximação sobre a “verdade terrestre” acerca do processo de regeneração.

5.4 Qual é o ritmo de crescimento da floresta em regeneração sucessional?

A investigação sobre o crescimento de árvores tem sido realizado através de medidas dendrométricas (SILVA et al., 2015), e pelo método de cronossequência, usados para o levantamento de dados em campo, presentes na literatura sobre o estudo de florestas tropicais (MACHADO et al., 2005). Na literatura do SR, o uso comparativo de sistemas sensores e medidas de campo voltadas a comparação de informações biofísicas por medidas de IVs e IAF, têm sido aplicadas para diferenciar paisagens florestais (CLARK et al., 2008; HEISKANEN et al., 2015). Por exemplo, cita-se Middinti e colaboradores (2017), que apontaram alta correlação entre NDVI, EVI e SAVI, 0,74, 0,76 e 0,73, respectivamente, obtidos por Landsat 8 OLI e produtos MODIS, com medidas de IAF obtidas em campo. A partir dos dados de campo coletados com o equipamento LAI COR-2200, os autores ajustaram uma equação para predizer a quantidade e mapear o IAF sobre uma área de floresta tropical.

O conjunto de informações de campo deste estudo, levantadas com base em medidas de bandas dendrométricas, IAF e serrapilheira, apoiam a compreensão acerca do ritmo de crescimento de tronco e folhas. Os resultados (Figura 4.17) apontam que em geral o ritmo de resposta de incremento acumulado, e o IAF foram similares. Os resultados das correlações com a precipitação, entretanto, evidenciaram que as parcelas não respondem a essa variável no mesmo tempo. O incremento acumulado teve maior correlação sobre a parcela Ri. Os valores dos maiores diâmetros e seu coeficiente de variação revelam que a parcela em regeneração inicial apresentou maiores valores, isso se justifica porque essa parcela é dominada por espécies pioneiras de rápido crescimento, que ao longo do tempo

tendem a ser substituídas por espécies que buscam um equilíbrio ecológico da paisagem (Clímax).

Já o IAF não discerniu os três estágios de regeneração. O tempo de resposta em relação a temperatura foi de três meses e muito similar entre as parcelas. A serrapilheira apontou maiores correlações com um mês de atraso em relação a temperatura, não distinguindo as parcelas.

Estes resultados contribuem para o entendimento do ritmo de recuperação de paisagens, e apoiam a discussão sobre as possíveis relações com dados de SR, sobretudo aqueles que usam IVs para estimar a BAS em florestas tropicais (WAGNER et al., 2013).

Os resultados apontaram ainda que a taxa de crescimento do tronco foi melhor detectado pelo EVI e o SAVI sobre a Rm. Em relação a taxa de crescimento das folhas, os mesmos IVs detectaram ritmo de crescimento similar em todas as parcelas (Figura 4.22). A fração espectral de vegetação apresentou melhor correlação com o incremento acumulado para Rm. Já para o IAF destacou maior crescimento para Ri e Rm (Figura 2.23B). Esse conjunto de resultados apontam a importância sobre a regeneração inicial e intermediária, que em geral apresentaram maior taxa e, portanto, importância no processo de recuperação no ambiente tropical.

5.5 Qual a importância das novas ferramentas de processamento e sua interação com dados de ‘recentes’ sistemas sensores?

A plataforma do Google Earth Engine (GEE), um Sistema de Informações Geográficas *on line*, disponibiliza dados pré-processados de diversos sistemas sensores, e abre amplas possibilidades de realizar operações rápidas de extração de informações sobre um banco de dados amplo e diversas aplicações (LALIT et al., 2019). Alguns desses bancos de dados apresentam alto padrão de qualidade e correções, enquanto que outros ainda exigem certos cuidados no seu uso indiscriminado. Pensando nisso, nesta pesquisa foi organizado um banco de dados específico, com a inserção de imagens pré-processadas dos sensores MSI do Sentinel 2A e 2B, que possibilitaram a extração de informações biofísicas da vegetação sobre a área estudada no ano de 2019, seja por meio dos IVs ou pela obtenção das frações (vegetação, solo e sombra) derivadas do MLME, que foram ajustadas ao método 3 – desenvolvido nesta pesquisa.

Pode-se dizer, por fim, que diversas limitações técnicas e metodológicas são parte integrante da rotina de desenvolvimento de uma pesquisa, sobretudo aquelas que tem como fundamento ajustar fatores matemáticos e físicos acerca dos dados de SR. Técnicas diversas precisam ser levadas em consideração para melhorar a qualidade dos dados, sobretudo nos últimos anos, com o avanço da tecnologia, e diante de uma ampla diversidade de dados disponíveis, *on line*, e processadas nas nuvens de forma automática, como por exemplo, no GEE. Cuidados com correções atmosféricas, geométricas, de registro e de reflectância de superfície, são essenciais. Noções de linguagem de programação (JavaScript) associadas a princípios de física e matemática, podem evitar o uso de programas que podem dificultar a obtenção de dados com qualidade. Além disso, ter noções de estatística (Linguagem R) e outros idiomas, sobretudo o inglês, apresentam-se como obstáculos constantes para o processo de formação científico no país. Sem tais conhecimentos, algumas afirmações podem ser invalidadas, talvez com robustez analítica, mas com base técnica limitada, e muitas vezes ruído, ajuste do sensor, ou algum problema na imagem, pode desqualificar uma investigação inteira obtido por meio de dados de sistemas-sensores e suas imagens, gerando interpretações errôneas. Portanto, é necessário dominar as novas ferramentas e tecnologias disponíveis, e utilizá-las mantendo-se a base teórica e avaliação crítica, baseando-se no conhecimento formal técnico-científico.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram caracterizadas as idades de fragmentos florestais da Mata Atlântica em diferentes estágios de regeneração sucessional. Isso foi possível por meio de imagens da série temporal Landsat e pela verificação feita por dados de campo obtidos sobre o ano de 2019. A caracterização biofísica dos estágios de regeneração e de suas idades a partir de séries longas de dados, como do Landsat, destacou a importância do SR para análises de longo prazo, afirmando sua qualidade e capacidade de detectar diferenças entre áreas pequenas e com diferentes estágios de regeneração de floresta tropical. A partir da utilização dos IVs foi possível detectar quantitativamente diferenças espectrais sobre florestas sucessionais em recuperação, destaca-se o desempenho dos IVs ajustados a estrutura da vegetação (EVI e SAVI) que apontam melhor discernimento para detectar diferenças entre áreas.

O uso integrado de dados climáticos de estações de campo e SR apoiou tal caracterização. Mudanças temporais de tendência de temperatura e precipitação foram detectadas sobre o histórico da região, porém foram consideradas como pouco influenciadoras sobre o processo de regeneração, mas podem ser utilizadas para futuras investigações. Assim, permanece a necessidade de investigar as possíveis interferências da mudança detectada sobre o regime de chuvas em longo prazo e sua influência no processo de regeneração.

Em relação a análise intra-anual o esforço em obter dados em campo apoiou a construção de indicadores sobre processos pontuais do comportamento biofísico das parcelas estudadas, e isso possibilitou realizar comparações com as informações obtidas pelo Sentinel-2 MSI. A caracterização do processo de regeneração sobre as parcelas em campo foi fundamental para tal investigação a fim de possibilitar correlações com dados de SR. A breve discussão sobre a diversidade ecológica das parcelas e os destaques apresentados, demonstraram, mesmo que de forma parcial, a importância sobre estudos da ecologia da paisagem e destacaram que a recuperação das áreas degradadas exige um conjunto interdisciplinar de conhecimentos para apoiar investigações sobre o processo da regeneração florestal, e os reais impactos que isso acarreta para o ambiente e a sociedade.

Os dados dendrométricos mensurados sobre as parcelas possibilitaram entender a taxa de crescimento de uma amostra e discutir a estimativa sobre a dinâmica de assimilação de

carbono, investigação essa que pode ser continuada com medidas de longo prazo sobre a área estudada. Também considera-se que as medidas de IAF e de serrapilheira apoiaram o entendimento da taxa de mudanças da fenologia dos dosséis sobre cada parcela, o que também precisa ser complementado com a continuidade das medidas, aumentando com isso a amostragem sobre o processo e como consequência a possibilidade de generalização sobre uma região e não apenas para uma localidade.

O apontamento de que os dados obtidos dos sistemas sensores Sentinel-2 A e B MSI poderiam ter maior sensibilidade sobre a detecção das paisagens em regeneração se comparado com os resultados da série Landsat foi confirmada com as diferenças significativas do NDVI sobre as parcelas. Entretanto, quando utilizado o MLME os resultados apontam que a fração espectral de solo possibilitou diferenciar as parcelas, exceto ainda confusão acerca dos estágios inicial e intermediário. Portanto, considera-se que um método complementa o outro, podendo ser considerado como uma alternativa investigativa sobre a caracterização de paisagens em regeneração. Além disso, tais resultados podem auxiliar outras investigações, como por exemplo, a classificação e o mapeamento das paisagens em escala regional. Por fim, os resultados obtidos sobre o ajuste dos componentes espectrais (endmembers) sobre o ambiente de Mata Atlântica, podem ser utilizados por outros estudos biofísicos que são inclinados a explorar as imagens do Sentinel-2 MSI.

As comparações entre dados de campo e IVs do Sentinel-2 MSI demonstraram aumento da capacidade na detecção de estágios de regeneração. Entretanto, destaca-se neste estudo que a parcela Ri apresentou melhor correlação com frações sombra e solo, comparadas com as variáveis BAS e IAF, respectivamente. Para a parcela Rm a fração sombra apresentou melhor desempenho com o IAF e na parcela Ra destacou-se a fração solo em correlação ao incremento acumulado do tronco.

O estudo sobre paisagens degradadas e recuperação florestal é importante para o Brasil, sobretudo no atual contexto da Contribuição Nacionalmente Determinada (CND), compromisso assumido pelo país, sobretudo pela redução das emissões de gases de efeito estufa estimada para 2025. Além disso, medir esse processo significa discutir os impactos do comprometimento de recuperar 12 milhões de hectares de vegetação em território nacional a fim de limitar o aumento da temperatura média global a até 2°C. Portanto, a

investigação sobre a regeneração dos ambientes florestais no país representa uma contribuição para o avanço do conhecimento e fornece uma ferramenta de monitoramento e validação para a prestação de contas à sociedade.

Os resultados desta pesquisa apontam para o potencial de assimilação de carbono da Mata Atlântica e aumento gradual do estoque de carbono em todos estágios de regeneração. No entanto, observou-se isso até florestas com uma idade aproximada de 40 anos, observou-se que o crescimento expressivo de árvores ocorre em estágio inicial e intermediário de regeneração, diminuindo a taxa de crescimento com a idade.

Conclui-se que foi possível caracterizar paisagens em diferentes processos de regeneração, resultados melhorados com informações de campo. Especificamente no que se refere a investigação de paisagens em regeneração por meio de dados de SR os objetivos foram atingidos, apoiando a discussão sobre os limites e potenciais de detecção de sistemas sensores multiespectrais, aplicado sobre pequenas áreas em floresta secundária sucessional e heterogênea em florestas tropicais.

Em síntese, o uso de IVs e frações espectrais baseados em imagens de satélite possui um importante papel no entendimento espacial e temporal de parâmetros biofísicos da superfície em uma região onde a maioria das informações são geradas pontualmente. Os dados gerados podem ser utilizados para alimentar modelos de avaliação da vegetação, permitindo, entre outros, quantificar impactos, em âmbito local, regional e global, causado por mudanças de uso e cobertura da terra, e apoiar no levantamento sobre o potencial de influência no clima sobre áreas em processo de regeneração sucessional florestal.

Finalmente, a metodologia da mistura espectral mostrou-se uma ferramenta valiosa para compreender mudanças nas diferentes fisionomias vegetais. Os valores das frações, como sombra e solo, complementam os dados dos índices de vegetação, fornecendo informações adicionais sobre os estágios de regeneração na Mata Atlântica.

6.1 Trabalhos futuros

Baseando-se nas limitações encontradas no presente estudo recomenda-se algumas possibilidades de continuação desta investigação quanto aos ajustes sobre o discernimento de informações biofísicas.

A caracterização espacial das idades da regeneração poderia ser ampliada para uma escala regional sobre a Mata Atlântica. Entretanto, isso só seria possível se forem feitas as devidas correções topográficas sobretudo para uma área de morros como é a Mata Atlântica, fator esse que limita significativamente o uso dos IVs. Mesmo assim, tomados os cuidados necessários, essas informações podem ser importantes para prever o tempo de recuperação das paisagens e os impactos da recuperação sobre serviços ecossistêmicos diversos para a região, sobretudo no Vale do Paraíba - SP.

Para facilitar a obtenção de resultados sugere-se ajustar a amostragem dos dados de campo, e dar continuidade as medidas e coletas dos dados de IAF, serrapilheira e de crescimento de tronco, pois essas informações foram essenciais na compreensão e caracterização do processo da regeneração. Ainda, acredita-se que ampliando a amostragem, poderá diminuir os fatores de dependência espacial e temporal, obstáculo presente neste estudo. Algumas dessas recomendações são reflexos das dificuldades e adaptações realizadas no desenvolvimento deste estudo, mas apesar disso, o mesmo pôde apresentar uma contribuição sobre a temática de investigação de longo prazo sobre a recuperação de paisagens na Mata Atlântica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SÁBER, A.N. Províncias geológicas e domínios morfoclimáticos no Brasil. São Paulo, **Geomorfologia**, v.20, p. 1-26, 1970.

AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza do Brasil: potencialidades paisagísticas**. 6.ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 2010.

ADDABBO, P.; FOCARETA, M.; MARCUCCIO, S.; VOTTO, C.; ULLO, S. L. Contribution of Sentinel-2 data for applications in vegetation monitoring. **Acta IMEKO**, v. 5, n. 2, p. 44–54, 2016.

ANDERSON, L. O.; ARAGÃO, L. O. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; ALMEIDA, S.; HUETE, A. Fraction images for monitoring intra-annual phenology of different vegetation physiognomies in Amazonia. **International Journal of Remote Sensing**, v. 32, n. 2, p. 387–408, 2011.

ANDERSON, L. O.; RIBEIRO NETO, G.; CUNHA, A. P.; FONSECA, M. G.; MOURA, Y. M.; DALAGNOL, R.; WAGNER, F. H.; ARAGÃO, L. E. O. E. C. Vulnerability of Amazonian forests to repeated droughts. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 373, n. 1760, 2018.

ARAGÃO, L. E. O. C.; POULTER, B.; BARLOW, J. B.; ANDERSON, L. O.; MALHI, Y.; SAATCHI, S.; PHILLIPS, O. L.; GLOOR, E. Environmental change and the carbon balance of Amazonian forests. **Biological Reviews**, v. 89, n. 4, p. 913–931, 2014.

ASSUMPCÃO, J.; NASCIMENTO, M. T. Estrutura e composição florística de quatro formações vegetais de restinga no complexo lagunar Grussaí/Iquipari, São João da Barra, RJ, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 14, n. 3, p. 301–315, 2000.

ATZBERGER, C.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; UDELHOVEN, T.; MATTIUZZI, M.; SANCHEZ, G. A.; ARAI, E. Obtaining crop-specific time profiles of NDVI: the use of unmixing approaches for serving the continuity between SPOT-VGT and PROBA-V time series. **International Journal of Remote Sensing**, v. 35, n. 7, p. 2615–2638, 2014.

BACKES, P.; IRGANG, B. **Mata Atlântica: as árvores e a paisagem**. Porto Alegre: Paisagem do Sul, 2004. 396p.

BARBOSA, J. M.; PASTOR, I. M.; PEDREÑO, J. N.; BITENCOURT, M. D. Remotely sensed biomass over steep slopes: An evaluation among successional stands of the Atlantic Forest, Brazil. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 88, p. 91–100, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271613002815>. Acesso em: 01 nov. 2019.

BAUER, M. E.; BURK, T. E.; EK, A. R.; COPPIN, P. R.; LIME, S. D.; WALSH, T. A.; WALTERS, D. K.; BEFORT, W.; HEINZEN, D. F.; SERVICE, F. Satellite Inventory of Minnesota Forest Resources. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 60, n. 3, p. 287–298, 1994.

BERENGUER, E.; FERREIRA, J.; GARDNER, T. A.; ARAGÃO, L. E. O. C.; CAMARGO, P. B.; CERRI, C. E.; DURIGAN, M.; OLIVEIRA, R. C.; VIEIRA, I. C. G.; BARLOW, J. A large-scale field assessment of carbon stocks in human-modified tropical forests. **Global Change Biology**, v. 20, n. 12, p. 3713–3726, 2014.

BEZERRA, U. A. **Índices espectrais utilizando os sensores OLI/Landsat-8 e MSI/sentinel-2, na bacia hidrográfica do rio Moxotó-PE**. 2019. 113p. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução n° 1 de 31 de janeiro de 1994** Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=142>.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Portaria n° 333, de 16 de agosto de 2018: institui a estratégia do Ministério do Meio Ambiente para o alcance da Agenda 2030 e dos objetivos de desenvolvimento sustentável. **Diário Oficial da União**, v.161, sessão 1, p.72, 21 ago. 2018.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Incc pretendida contribuição nacionalmente determinada**. 2019. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/informma/item/10570-indc-contribui%C3%A7%C3%A3o-nacionalmente-determinada>.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Resoluções do Conama**: resoluções vigentes publicadas entre setembro de 1984 e janeiro de 2012. Brasília: MMA, 2012. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/uploads/LivroConamaResolucoes.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2020.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Biomass**. Brasília: MMA, 2019. Disponível em: <www.mma.gov.br/biomass/mata-atlantica_emdesenvolvimen-to>. Acesso em: 15 fev. 2019.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Política Nacional sobre Mudanças do Clima (PNMC)**. Brasília: MMA, 2019.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Convenção quadro das nações unidas sobre o clima / acordo de Paris**. Brasília: MMA, 2019. Disponível em: <http://https://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>. Acesso em: 9 abr. 2020.

BULLOCK, E. L.; WOODCOCK, C. E.; OLOFSSON, P. Monitoring tropical forest degradation using spectral unmixing and Landsat time series analysis. **Remote Sensing of Environment**, p. 110968, 28 nov. 2018.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. v. 1, p. 1039. Disponível em: www.flora.ipe.org.br. Acesso em: 24 fev. 2020.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2006. v. 2, p. 627. Disponível em: www.flora.ipe.org.br. Acesso em: 24 fev. 2020.

CARVALHO JÚNIOR, O. A.; CARVALHO, A. P. F.; GUIMARÃES, R. F.; MENESES, P. R.; SHIMABUKURO, Y. E. Mistura espectral: (I) detecção dos membros finais utilizando a geometria Simplex. **Espaço & Geografia**, v. 6, n. 1, p. 147–173, 2003.

CALDERÓN-CONTRERAS, R.; WHITE, C. S. Access as the means for understanding social-ecological resilience: bridging analytical frameworks. **Society and Natural Resources**, v. 33, n. 2, p. 205–223, 2020.

CAMPANILI, M.; SCHAFFER, W. B. Mata Atlântica: manual de adequação ambiental. **Biodiversidade**, n. 35, p. 96, 2010.

CHAVE, J.; RÉJOU-MÉCHAIN, M.; BÚRQUEZ, A.; CHIDUMAYO, E.; COLGAN, M. S.; DELITTI, W. B. C.; DUQUE, A.; EID, T.; FEARNSIDE, P. M.; GOODMAN, R. C.; HENRY, M.; MARTÍNEZ-YRÍZAR, A.; MUGASHA, W. A.; MULLER-LANDAU, H. C.; MENCUCCINI, M.; NELSON, B. W.; NGOMANDA, A.; NOGUEIRA, E. M.; ORTIZ-MALAVASSI, E.; PÉLISSIER, R.; PLOTON, P.; RYAN, C. M.; SALDARRIAGA, J. G.; VIEILLEDENT, G. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, v. 20, n. 10, p. 3177–3190, 2014.

CHAZDON, R. Tropical forest regeneration. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi Ciências Naturais**, v. 7, n. 3, p. 195–218, 2012.

CHAZDON, R. L. Tropical forest regeneration. In: LEVIN, S. (Ed.). **Encyclopedia biodiversity**. 2.ed. [S.l.]: Elsevier, 2013. p. 277–286.

CHAZDON, R. L. **Renascimento de florestas: regeneração na era do desmatamento.** São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

CHAZDON, R. L. et al. Carbon sequestration potential of second-growth forest regeneration in the Latin American tropics. **Science Advances**, v. 2, n. 5, p. 11, 2016.

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. (Org.). **Tempo e clima no Brasil.** São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CAVALCANTI, B. S.; MARQUES, G. R. G. Recursos hídricos e gestão de conflitos: a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul a partir da crise hídrica de 2014-2015. **Revista de Gestão dos Países de Língua Portuguesa**, v. 15, n. 1, p. 04-16, 2016. Disponível em: http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1645-44642016000100002. Acesso em: 19 nov. 2019.

CINTRA, D. P. **Classificação de estágios sucessionais florestais por meio de imagens de alta resolução (Ikonos) no Parque Estadual da Pedra Branca, RJ.** 2007. 87 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) - Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2007. Disponível em: <http://www.if.ufrj.br/pgcaf/pdfdt/Dissertacao%20Danielle%20Cintra.pdf>. Acesso em: 17 out. 2019.

CLARK, D. B.; OLIVAS, P. C.; OBERBAUER, S. F.; CLARK, D. A.; RYAN, M. G. First direct landscape-scale measurement of tropical rain forest Leaf Area Index, a key driver of global primary productivity. **Ecology Letters**, v. 11, n. 2, p. 163–172, 2008.

CLAVERIE, M.; VERMOTE, E. F.; FRANCH, B.; MASEK, J. G. Evaluation of the Landsat-5 TM and Landsat-7 ETM + surface reflectance products. **Remote Sensing of Environment**, v. 169, p. 390–403, 2015.

CORDEIRO, A. P. A.; BERLATO, M. A.; FONTANA, D. C.; DE MELO, R. W.; SHIMABUKURO, Y. E.; FIOR, C. S. Regiões homogêneas de vegetação utilizando a variabilidade do NDVI. **Ciencia Florestal**, v. 27, n. 3, p. 883–896, 2017.

CUMMING, G. S.; PETERSON, G. D. Unifying research on social–ecological resilience and collapse. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 32, n. 9, p. 695–713, 2017.

DAI, J.; ROBERTS, D.; DENNISON, P.; STOW, D. Spectral-radiometric differentiation of non-photosynthetic vegetation and soil within Landsat and sentinel 2 wavebands. **Remote Sensing Letters**, v. 9, n. 8, p. 733–742, 2018.

DE OLIVEIRA, L. M.; GALVÃO, L. S.; PONZONI, F. J. Topographic effects on the determination of hyperspectral vegetation indices: a case study in southeastern Brazil. **Geocarto International**, v. 0, n. 0, p. 1–18, 2019.

DE WASSEIGE, C.; BASTIN, D.; DEFOURNY, P. Seasonal variation of tropical forest LAI based on field measurements in Central African Republic. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 119, n. 3–4, p. 181–194, 2003.

DOXANI, G.; MITRAKA, Z.; GASCON, F.; GORYL, P.; BOJKOV, B. R. A spectral unmixing model for the integration of multi-sensor imagery: a tool to generate consistent time series data. **Remote Sensing**, v. 7, n. 10, p. 14000–14018, 2015.

DRUMETZ, L.; CHANUSSOT, J.; JUTTEN, C. Variability of the endmembers in spectral unmixing: recent advances. In: WORKSHOP ON HYPERSPECTRAL IMAGE AND SIGNAL PROCESSING, EVOLUTION IN REMOTE SENSING, 2016. **Proceedings... IEEE**, 2016.

DUTRA, A.; SHIMABUKURO, Y.; ESCADA, M. I. Data mining using NDVI time series applied to change detection. **Proceedings**, v.2, n.356, p. 5169, 2018.

ESPÍRITO-SANTO, F. D. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. Mapping forest successional stages following deforestation in Brazilian Amazonia using multi-temporal Landsat images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 3, p. 635–642, 2005.

EUROPEAN SPACE AGENCY – ESA. **Copernicus Open Access Hub, Sentinel-2**. 2019. Disponível em: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Acesso em: 25 jan. 2019.

EUROPEAN SPACE AGENCY – ESA. **Sentinel-2**. 2020. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>. Acesso em: 11 abr. 2020.

FERREIRA, M. P.; ZORTEA, M.; ZANOTTA, D. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SOUZA FILHO, C. R. Mapping tree species in tropical seasonal semi-deciduous forests with hyperspectral and multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v. 179, p. 66–78, 2016.

FISCHER, J.; GARDNER, T. A.; BENNETT, E. M.; BALVANERA, P.; BIGGS, R.; CARPENTER, S.; DAW, T.; FOLKE, C.; HILL, R.; HUGHES, T. P.; LUTHE, T.; MAASS, M.; MEACHAM, M.; NORSTRÖM, A. V.; PETERSON, G.; QUEIROZ, C.; SEPPELT, R.; SPIERENBURG, M.; TENHUNEN, J. Advancing sustainability through mainstreaming a social-ecological systems perspective. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 14, p. 144–149, 2015.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Global forest resources assessment 2010**. Rome: FAO, 2010.

- FOGA, S.; SCARAMUZZA, P. L.; GUO, S.; ZHE, Z.; DILLEY JR, R. D.; BECKMANN, T.; SCMIDT, G. L.; DWYER, J. L.; HUGHES, J. M.; LAUE, B. Cloud detection algorithm comparison and validation for operational Landsat data products. **Remote Sensing of Environment**, v. 194, p. 379-390, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717301293>. Acesso em: 19 nov. 2019.
- FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA; INPE. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica, 2017-2018**. 2018. 65 p. Disponível em: <http://mapas.sosma.org.br/>. Acesso em: 19 abr. 2020.
- FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations: a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, p. 1–21, 2015.
- GALVÃO, L. S.; PONZONI, F. J.; LIESENBERG, V.; SANTOS, J. R. Possibilities of discriminating tropical secondary succession in Amazônia using hyperspectral and multiangular CHRIS/PROBA data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 11, n. 1, p. 8–14, 2009.
- GALVÃO, L. S.; SANTOS, J. R.; SILVA, R. D.; SILVA, C. V.; MOURA, Y. M.; BREUNIG, F. M. Following a site-specific secondary succession in the Amazon using the Landsat CDR product and field inventory data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 2, p. 574–596, 2015.
- GAMARRA, R. M.; TEIXEIRA-GAMARRA, M. C.; CARIJO, M. G. G.; PARANHOS FILHO, A. C. Uso do NDVI na análise da estrutura da vegetação conservação no Cerrado. **O Espaço Geográfico em Análise - RAEGA**, v. 27, p. 307–332, 2016.
- GAMEIRO, S. et al. 2016. Avaliação da cobertura vegetal por meio de índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF) na Sub-Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe, CE, **Terrae**, n. 2000, p.15-22, 2016.
- GAO, Y.; QUEVEDO, A.; SZANTOI, Z.; SKUTSCH, M. Monitoring forest disturbance using time-series MODIS NDVI in Michoacán, Mexico. **Geocarto International**, p. 1–17, 2019.
- GONÇALVES, N. B.; LOPES, A. P.; DALAGNOL, R.; WU, J.; PINHO, D. M.; NELSON, B. W. Both near-surface and satellite remote sensing confirm drought legacy effect on tropical forest leaf phenology after 2015/2016 ENSO drought. **Remote Sensing of Environment**, v. 237p. 111489, 2020.

- GONSAMO, A.; CHEN, J. M. Improved LAI algorithm implementation to MODIS data by incorporating background, topography, and foliage clumping information. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 2, p. 1076–1088, 2014.
- GOSLEE, S. C. Topographic corrections of satellite data for regional monitoring. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 78, n. 9, p. 973–981, 2012.
- GREIG, C.; ROBERTSON, C.; LACERDA, A. E. B. Spectral-temporal modelling of bamboo-dominated forest succession in the Atlantic Forest of Southern Brazil. **Ecological Modelling**, v. 384, p. 316–332, 2018.
- GUEDES, F. B.; SEEHUSEN, S. E.; (Org.). **Pagamentos por serviços ambientais na Mata Atlântica: lições aprendidas e desafios**. Brasília: MMA, 2011.
- GUISLON, A. V.; ELIAS, G. A.; BERNARDO, V. M.; ASSUNÇÃO, V. K.; SANTOS, R. Histórico de uso e ocupação da floresta atlântica em uma unidade de conservação no Sul do Brasil. **Fronteiras**, v. 6, n. 2, p. 47–64, 2017.
- GUO, X.; Li, Z. Remote Sensing of terrestrial non-photosynthetic vegetation using hyperspectral, multispectral, SAR, and LiDAR data. **Progress in Physical Geography**, v. 40, n. 2, p. 273-304, 2015. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0309133315582005>. Acesso em: 1 nov. 2019.
- HANTSON, S.; CHUVIECO, E. Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, n. 5, p. 691–700, 2011.
- HEISKANEN, J.; KORHONEN, L.; HIETANEN, J.; PELLIKKA, P. K. E. Use of airborne lidar for estimating canopy gap fraction and leaf area index of tropical montane forests. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 10, p. 2569–2583, 2015.
- HIROTA, P. L. P; PONZONI, F. J; (Coord.). **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica período 2017-2018**. Fundação SOS Mata Atlântica, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019. Disponível em: https://www.sosma.org.br/wp-content/uploads/2019/05/Atlas-mata-atlantica_17-18.pdf. Acesso em: 17 out. 2019.
- HOLZ, S.; PLACCI, G.; QUINTANA, R. D. Effects of history of use on secondary forest regeneration in the Upper Parana Atlantic Forest (Misiones, Argentina). **Forest Ecology and Management**, v. 258, n. 7, p. 1629–1642, 2009.
- HUETE, A. R. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). **Remote Sensing of Environment**, v. 22, n. 1, p. 295–309, 1988.

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; LEEUWEN, W. VAN. A comparison of vegetations indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v. 59, p. 440–451, 1997.

HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E.; GAO, X.; FERREIRA, L. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195–213, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**: sistema fitogeográfico; inventário das formações florestais e campestres; técnicas e manejo de coleções botânicas e procedimentos para mapeamentos. 2.ed. Rio de Janeiro - RJ: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2012. 275 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 271p. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv63011.pdf>. Acesso em: 17 out. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Bases e referenciais cartográficos**. 2019. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas.html>. Acesso em: 20 fev. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Mapa de biomas do Brasil**. Rio de Janeiro – RJ: IBGE, 2010. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/15842-biomas.html?=&t=downloads>. Acesso em: 10 abr. 2020.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment**: an earth resource perspective. 2.ed. Harlow, England: Pearson Education, 2014. 614 p.

JOLY, C. A.; JOLY, C. A.; METZGER, J. P.; TABARELLI, M. Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: ecological findings and conservation initiatives. **New Phytologist**, v. 204, p. 459–473, 2014.

JUSTICE, C. O.; VERMOTE, E.; TOWNSHEND, J. R. G.; DEFRIES, R.; ROY, D. P.; HALL, D. K.; SALOMONSON, V. V.; PRIVETTE, J. L.; RIGGS, G.; STRAHLER, A.; LUCHT, W.; MYNENI, R. B.; KNYAZIKHIN, Y.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. R.; WAN, Z.; HUETE, A. R.; VAN LEEUWEN, W.; WOLFE, R. E.; GIGLIO, L.; MULLER, J. P.; LEWIS, P.; BARNESLEY, M. J. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1228–1249, 1998.

- KALNAY, E.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; JENNE, R.; JOSEPH, D. The NCEP NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 77, n. 3, p. 437–472, 1996.
- KOBAYASHI, H; Y. RYU; D. D. BALDOCCHI; J. M. WELLES; J. M. NORMAN. On the correct estimation of gap fraction: how to remove scattered radiation in gap fraction measurements? 2013. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.174/175, p.170-183. Disponível em: http://environment.snu.ac.kr/wp-content/uploads/2016/03/Kobayashi_2013_AFM.pdf. Acesso em: 25 nov. 2019.
- KORHONEN, L.; HADI; PACKALEN, P.; RAUTIAINEN, M. Comparison of Sentinel-2 and Landsat-8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index. **Remote Sensing of Environment**, v. 195, p. 259–274, 2017.
- LALIT, K.; ONISIMO, M. Google Earth Engine applications. **MDPI AG**, v. 38, p. 125–130, 2019.
- LAMBIN, E. F. Monitoring forest degradation in tropical regions by remote sensing: some methodological issues. **Global Ecology and Biogeography**, v. 8, n. 3/4, p. 191–198, 1999.
- LEDO, A. Protocol for inventory of mapped plots in tropical forest. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 27, n. 2, p. 240–247, 2015.
- LIMA, G, T, N, P; HACKBART, V, C, S; BERTOLO, L, S; SANTOS, R, F. Identifying driving forces of landscape changes: Historical relationships and the availability of ecosystem services in the Atlantic forest. **Ecosystem Services**, v. 22, p. 11–17, 2016.
- LOËTSCH, F.; HALLER, K.E.; ZÖHRER, F. **Forest inventory**. 2. ed. Munich: BLV Verlagsgesellschaft, 1973. v. 2, p.469.
- LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil**. 4.ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2002. v.1, p. 368.
- LU, D.; MAUSEL, P.; BRONDÍZIO, E.; MORAN, E. Classification of successional forest stages in the Brazilian Amazon basin. **Forest Ecology and Management**, v. 181, n. 3, p. 301–312, 2003.
- MACHADO, M.; JOANNA, A.; TUCKER, M.; SILVA, S.; DANIEL, V.; ZARIN, J. Successional pattern and process in secondary forests of different ages in the eastern Amazon. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 4, p. 343–357, 2005.

- MAEDA, E. E.; MOURA, Y. M.; WAGNER, F.; HILKER, T.; LYAPUSTIN, A. I.; WANG, Y.; CHAVE, J.; MÖTTUS, M.; ARAGÃO, L. E. O. C.; SHIMABUKURO, Y. Consistency of vegetation index seasonality across the Amazon rainforest. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 52, p. 42–53, 2016.
- MAGALHÃES, J.; MELENDEZ-PASTOR, I.; NAVARRO-PEDREÑO, J.; DANTAS, M. Remote sensing remotely sensed biomass over steep slopes: an evaluation among successional stands of the Atlantic Forest, Brazil. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 88, p. 91–100, 2014.
- MALHI, Y.; ARAGÃO, L. E. O. C.; METCALFE, D. B.; PAIVA, R.; QUESADA, C. A.; ALMEIDA, S.; ANDERSON, L.; BRANDO, P.; CHAMBERS, J. Q.; DA COSTA, A. C. L.; HUTYRA, L. R.; OLIVEIRA, P.; PATIÑO, S.; PYLE, E. H.; ROBERTSON, A. L.; TEIXEIRA, L. M. Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. **Global Change Biology**, v. 15, n. 5, p. 1255–1274, 2009.
- MAPBIOMAS. **Relatório final da coleção 4 do Bioma Mata Atlântica**. Disponível em: https://mapbiomas.org/pages/database/reference_maps. Acesso em: 10 dez. 2019.
- MARCHIORI, N. M.; ROCHA, H. R.; TAMASHIRO, J. Y.; AIDAR, M. P. M. Composição da comunidade arbórea e biomassa aérea em uma floresta atlântica secundária, Parque Estadual da Serra do Mar, São Paulo, Brazil. **Cerne**, v. 22, n. 4, p. 501–514, 2016.
- MARTINI, A. M. Z.; FIASCHI, P.; AMORIM, A. M.; PAIXÃO, J. L. A hot-point within a hot-spot: a high diversity site in Brazil's Atlantic Forest. **Biodiversity and Conservation**, v. 16, n. 11, p. 3111–3128, 2007.
- MARTINS NETO, R. P.; BREUNIG, F. M. Drones nas ciências florestais. In: PRUDKIN, G.; BREUNIG, F. M. (Org.). **Drones e ciência: teoria e aplicações metodológicas**. Santa Maria, RS: FACOS-UFSM, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Gonzalo_Prudkin2/publication/332902695_DRONES-E-CIENCIA_Teoria_e_aplicacoes_metodologicas/links/5cdd50ef299bf14d959d4a92/DRONES-E-CIENCIA-Teoria-e-aplicacoes-metodologicas.pdf#page=68. Acesso em: 18 out. 2019.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília - DF: UnB, 2012. 266p.
- MIDDINTI, S.; THUMATY, K. C.; GOPALAKRISHNAN, R.; JHA, C. S.; THATIPARTHI, B. R. Estimating the leaf area index in Indian tropical forests using landsat-8 OLI data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 38, n. 23, p. 6769–6789, 2017.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (PROGRAM). **Ecosystems and human well-being: our human planet**: summary for decision-makers. [S.l.]: **Island Press**, 2005.

MIRANDA, C. D. C.; DONATO, A.; FIGUEIREDO, P. H. A.; BERNINI, T. A.; ROPPA, C.; TRECE, I. B.; BARROS, L. O. Levantamento fitossociológico como ferramenta para a restauração florestal da Mata Atlântica, no Médio Paraíba do Sul. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 4, p. 1601, 2019.

MOREIRA, E. P.; VALERIANO M. M.; SANCHES, I. A.; FORMAGGIO, A. R. Topographic effect on spectral vegetation indices from Landsat TM data: is topographic correction necessary? **Boletim de Ciências Geodécias**, v. 22, n.1, p. 95–107, 2016.

MULER, R. A. S. **Análise da resposta sazonal e interanual da dinâmica florestal utilizando dados do sensor MODIS/MAIAC e medidas IN SITU em um fragmento de floresta no sudoeste da Amazônia**. 2018. 93 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

NÊMEC, P. Comparison of modern forest inventory method with the common method for management of tropical rainforest in the Peruvian Amazon. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 27, n. 1, p. 80–91, 2015.

NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4.ed. São Paulo: Blucher, 2010.

NUNES, L. H.; CALBETE, N. O. Variabilidade pluviométrica no Vale do Paraíba paulista. **Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 11, n. 3, p. 3987–3994, 2000.

PAN, Y.; BIRDSEY, R. A.; FANG, J.; HOUGHTON, R.; KAUPPI, P. E.; KURZ, W. A.; PHILLIPS, O. L.; SHVIDENKO, A.; LEWIS, S. L.; CANADELL, J. G.; CIAIS, P.; JACKSON, R. B.; PACALA, S. W.; MCGUIRE, A. D.; PIAO, S.; RAUTIAINEN, A.; SITCH, S.; HAYES, D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. **Science**, v. 333, p. 988–993, 2011.

PANTOJA, N. **Alteração da cobertura florestal e biomassa em área de manejo florestal no Estado do Acre integrando dados de campo e sensores remotos**. Manaus: INPA, 2017.

PICKETT, S. T. A. Space-for-time substitution as an alternative to long-term studies. **Long-Term Studies in Ecology**, p. 110–135, 1989.

PONZONI, F. J. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**: diagnosticando a Mata Atlântica. São José dos Campos: INPE, 2002.

- PONZONI, F. J.; REZENDE, A. C. P. Caracterização espectral de estágios sucessionais de vegetação secundária arbórea em Altamira (PA), através de dados orbitais. **Revista Árvore**, v. 28, n. 4, p. 535–545, 2004.
- PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y. E.; KUPLICH, T. M. **Sensoriamento remoto da vegetação**. 2.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 160 p.
- PONZONI, F. J. Impacto da correção topográfica na caracterização espectral de solo e cobertura vegetal por meio de imagens TM/Landsat 5. **Cerne**, v. 22, n. 3, p. 289–298, 2016.
- REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010.
- RIBEIRO, M., METZGER, J.P., MARTENSEN, A.C., PONZONI, F.J., HIROTA, M.M. The Brazilian Atlantic Forest: how much is left, and how is the remaining forest distributed? implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, n.6, p.1141-1153, 2009.
- RIBEIRO, W. C. **A ordem ambiental internacional**. São Paulo: Contexto, 2001. 176 p.
- R CORE TEAm. **R: a language and environment for statistical computing**. Vienna (Austria): R Foundation for Statistical Computing, 2018.
- REGO, L. F. G. **Automatic land-cover classification derived from high resolution IKONOS satellite image in the urban Atlantic Forest in Rio de Janeiro, Brazil, by means of an objects-oriented approach**. Tese (Doutorado) - Universidade Albert-Ludwigs, Freiburg, Alemanha, 2003.
- RÉJOU-MÉCHAIN, M.; TANGUY, A.; PIPONIOT, C.; CHAVE, J.; HÉRAULT, B. Biomass: an R package for estimating above-ground biomass and its uncertainty in tropical forests. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 8, n. 9, p. 1163–1167, 2017.
- REZENDE, C. L.; SCARANO, F. R.; ASSAD, E. D.; JOLY, C. A.; METZGER, J. P.; STRASSBURG, B. B. N.; TABARELLI, M.; FONSECA, G. A.; MITTERMEIER, R. A. From hotspot to hopespot: an opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 16, n. 4, p. 208–214, 2018.
- REZENDE, V. L.; OLIVEIRA-FILHO, A. T.; EISENLOHR, P. V.; KAMINO, L. H. Y.; VIBRANS, A. C. Restricted geographic distribution of tree species calls for urgent conservation efforts in the Subtropical Atlantic Forest. **Biodiversity and Conservation**, v. 24, n. 5, p. 1057–1071, 2015.

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

RICHTER, K.; HANK, T. B.; VUOLO, F.; MAUSER, W.; D'URSO, G. Optimal exploitation of the sentinel-2 spectral capabilities for crop leaf area index mapping. **Remote Sensing**, v. 4, n. 3, p. 561–582, 2012.

ROSS, J. S. **Ecogeografia do Brasil**: subsídios para o planejamento ambiental. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

ROUSE, J. W.; HASS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE (ERTS) SYMPOSIUM, 3., 1973. **Proceedings...** 1973. p. 309–317.

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental**: conceitos e métodos. 2.ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 584 p.

SANTOS, M. **A natureza do espaço**: técnica e tempo, razão e emoção. 4.ed. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2014.

SANTOS, E. G.; SHIMABUKURO, Y. E.; MENDES DE MOURA, Y.; GONÇALVES, F. G.; JORGE, A.; GASPARINI, K. A.; ARAI, E.; DUARTE, V.; OMETTO, J. P. Multi-scale approach to estimating aboveground biomass in the Brazilian Amazon using Landsat and LiDAR data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 40, n. 22, p. 8635–8645, 2019.

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS. PREFEITURA MUNICIPAL. **Serviços ambientais**. 2019. Disponível em: <<https://www.sjc.sp.gov.br/servicos/urbanismo-e-sustentabilidade/servicos-ambientais/>>. Acesso em: 10 fev. 2019.

SÃO PAULO. GOVERNO DO ESTADO. **Conexão Mata Atlântica** – GEF (Global Environment Facility). São Paulo - SP, 2019. Disponível em: www.ambiente.sp.gov.br/conexao. Acesso em: 5 fev. 2019.

SHIMABUKURO, Y. E.; SMITH, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, p. 16–20, 1991.

SHIMABUKURO, Y. E.; PONZONI, F. J. **Mistura espectral**: modelo linear e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

SHIMABUKURO, Y. E.; ARAI, E.; DUARTE, V.; JORGE, A.; SANTOS, E. G.; GASPARINI, K. A. C.; DUTRA, A. C. Monitoring deforestation and forest degradation using multi-temporal fraction images derived from Landsat sensor data in the Brazilian Amazon. **International Journal of Remote Sensing**, v. 40, n. 14, p. 5475–5496, 2019.

SHUKLA, P. R.; SKEA, J.; CALVO BUENDIA, E.; MASSON-DELMOTTE, V.; PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D. C.; ZHAI, P.; SLADE, R.; CONNORS, S.; VAN DIEMEN, R. **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. Genebra: IPCC, 2019. 874p.

SCHMIDT, G.; JENKERSON, C.; MASEK, J.; VERMOTE, E.; GAO, F. **Landsat Ecosystem Disturbance adaptive Processing System (LEDAPS) algorithm description**. Reston, Virginia: U.S Geological Survey, 2013. 27 p. Disponível em: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20131057>. Acesso em: 18 nov. 2019.

SILVA, C. V. J.; SANTOS, J. R.; GALVÃO, L. S.; SILVA, R. D.; MOURA, Y. M. Floristic and structure of an Amazonian primary forest and a chronosequence of secondary succession. **Acta Amazonica**, v. 46, n. 2, p. 133–150, 2016.

SILVA JUNIOR, C. H. L. **Dinâmica da formação de bordas florestais e seu impacto nos estoques de carbono na Bacia Amazônica utilizando sensoriamento remoto**. 2018. 183 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2018. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3QEKUAS>>. Acesso em: 15 dez. 2019.

SILVA, R. P.; NAKAMURA, S.; AZEVEDO, C. P.; CHAMBERS, J.; ROCHA, R. M.; PINTO, A. C. M.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Uso de banda dendrométrica na definição de padrões de crescimento individual em diâmetro de árvores da bacia do rio Cuieiras. **Acta Amazonica**, v. 33, n. 1, p. 67–84, 2015.

SILVA, F. B.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARAGÃO, L. E. O. C.; ANDERSON, L. O.; PEREIRA, G.; CARDOZO, F.; ARAI, E. Large-scale heterogeneity of Amazonian phenology revealed from 26-year long AVHRR/NDVI time-series. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 2, 2013.

SILVEIRA, H. L. F. **Uso de dados do sensor MSI/Sentinel-2 e de LIDAR aerotransportado para mapeamento de fitofisionomias de Caatinga e estudo das relações com atributos físico-químicos dos solos**. 2018. 136 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018. Disponível em: <http://mtc-m21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/04.26.18.25/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em: 18 nov. 2019.

SIMONETTI, D.; MARELLI, A.; HUGH, E. **IMPACT: portable GIS toolbox for image processing and land cover mapping**. [S.l.]: European Union, 2015. 47 p.

SIMONETTI, D.; SIMONETTI, E.; SZANTOI, Z.; LUPI, A.; EVA, H. D. First Results from the Phenology-Based Synthesis Classifier Using Landsat 8 Imagery. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 12, n. 7, p. 1496–1500, 2015.

SKAKUN, S.; LI, Z.; ROGER, J.; HUANG, H.; ZHANG, H. K.; VERMOTE, E.; ROY, D. P.; YAN, L. Characterization of Sentinel-2A and Landsat-8 top of atmosphere, surface, and nadir BRDF adjusted reflectance and NDVI differences. **Remote Sensing of Environment**, v. 215, p. 482–494, 2018.

SOTHE, C.; ALMEIDA, C. M.; LIESENBERG, V.; SCHIMALSKI, M. B. Evaluating Sentinel-2 and Landsat-8 data to map successional forest stages in a subtropical forest in Southern Brazil. **Remote Sensing**, v. 9, n. 8, 2017.

SOUZA, C. M.; ROBERTS, D. A.; COCHRANE, M. A. Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. **Remote Sensing of Environment**, v. 98, n. 2–3, p. 329–343, 2005.

SOUZA, C. M.; SIQUEIRA, J. V.; SALES, M. H.; FONSECA, A. V.; RIBEIRO, J. G.; NUMATA, I.; COCHRANE, M. A.; BARBER, C. P.; ROBERTS, D. A.; BARLOW, J. Ten-year Landsat classification of deforestation and forest degradation in the Brazilian amazon. **Remote Sensing**, v. 5, n. 11, p. 5493–5513, 2013.

SOUZA, J. M.; ROBERTS, D. Mapping forest degradation in the Amazon region with Ikonos images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 3, p. 425–429, 2005.

SOS MATA ATLÂNTICA. **Qual é a área de cobertura da Mata Atlântica?** SOS Mata Atlântica, 2019. Disponível em: <https://www.sosma.org.br/artigos/qual-e-area-de-cobertura-da-mata-atlantica/>. Acesso em: 9 abr. 2020.

SPRACKLEN, D. V.; GARCIA-CARRERAS, L. The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall. **Geophysical Research Letters**, v. 42, n. 21, p. 9546–9552, 2015.

SUN, X.; COOK, K. H.; VIZY, E. K. The South Atlantic subtropical high: climatology and interannual variability. **Journal of Climate**, v. 30, n. 9, p. 3279–3296, 2017.

TAYLOR, C. Psychotria. In: JARDIM BOTÂNICO (Ed.). **Lista de espécies da flora do Brasil**. Rio de Janeiro: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: www.flora.ipe.org.br. Acesso em: 24 fev. 2020.

TEILLET, P. M.; GUINDON, B.; GOODENOUGH, D. G. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 8, n. 2, p. 84–106, 1982.

TEILLET, P. M.; STAENZ, K.; WILLIAMS, D. J. Effects of spectral, spatial, and radiometric characteristics on remote sensing vegetation indices of forested regions. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, n. 1, p. 139–149, 1997.

TOKOLA, T.; HOU, Z. Alternative remote sensing materials and inventory strategies in tropical forest inventory - Case Lao PDR / Materiais alternativos de sensoriamento remoto e estratégias de inventário no inventário de florestas tropicais – Caso Lao PDR. **Revista Ambiência**, v. 8, p. 483–500, 2012.

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127–150, 1979.

UNITED NATIONS. **Framework Convention on Climate Change** - FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. Paris, 2015. Disponível em: < <https://nacoesunidas.org/wp-content/uploads/2016/04/Acordo-de-Paris.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2019.

UNITED NATIONS. **Framework Convention on Climate Change** - FCCC/CP/2019/L.10. Madri, 2019. Disponível em: https://unclimatesummit.org/?gclid=CjwKCAiA6bvwBRBbEiwAUER6JeYosLilfS2Gb8c1CyvZI79IHLXHp66-6b34pYFaG3RuL_ZLiHSF9xoCeKUQAvD_BwE. Acesso em: 03 jan. 2020.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. **Landsat satellite missions**. 2020. Disponível em: https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-satellite-missions?qt-science_support_page_related_con=2#qt-science_support_page_related_con. Acesso em: 11 abr. 2020.

VAGLIO LAURIN, G.; PULETTI, N.; HAWTHORNE, W.; LIESENBERG, V.; CORONA, P.; PAPALE, D.; CHEN, Q.; VALENTINI, R. Discrimination of tropical forest types, dominant species, and mapping of functional guilds by hyperspectral and simulated multispectral Sentinel-2 data. **Remote Sensing of Environment**, v. 176, p. 163–176, 2016.

VERMOTE, E.; JUSTICE, C.; CLAVERIE, M.; FRANCH, B. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 46–56, 2016.

VICENTE-SERRANO, S. M.; CAMARERO, J. J.; OLANO, J. M.; MARTÍN-HERNÁNDEZ, N.; PEÑA-GALLARDO, M.; TOMÁS-BURGUERA, M.; GAZOL, A.; AZORIN-MOLINA, C.; BHUYAN, U.; EL KENAWY, A. Diverse relationships between forest growth and the Normalized Difference Vegetation Index at a global scale. **Remote Sensing of Environment**, v. 187, p. 14–29, 2016.

VIDAL DA SILVA, V.; MARTINS FERREIRA, A. Caracterização dos estágios de sucessão ecológica secundária da Mata Atlântica no médio Vale do Rio Paraíba do Sul Fluminense. **Geografia**, v. 29, n. 3, p. 469–478, 2004.

VIEIRA, I. C. G.; ALMEIDA, A. S.; DAVIDSON, E. A.; STONE, T. A.; REIS DE CARVALHO, C. J.; GUERRERO, J. B. Classifying successional forests using Landsat spectral properties and ecological characteristics in eastern Amazônia. **Remote Sensing of Environment**, v. 87, n. 4, p. 470–481, 2003.

WAGNER, F.; ROSSI, V.; STAHL, C.; BONAL, D.; HÉRAULT, B. Asynchronism in leaf and wood production in tropical forests: a study combining satellite and ground-based measurements. **Biogeosciences**, v. 10, n. 11, p. 7307–7321, 2013.

WAGNER, F.; ROSSI, V.; AUBRY-KIENTZ, M.; BONAL, D.; DALITZ, H.; GLINIARS, R.; STAHL, C.; TRABUCCO, A.; HÉRAULT, B. Pan-tropical analysis of climate effects on seasonal tree growth. **PLoS ONE**, v. 9, n. 3, p. 20–22, 2014.

WAGNER, F. H. et al. Climate seasonality limits leaf carbon assimilation and wood productivity in tropical forests. **Biogeosciences**, v. 13, n. 8, p. 2537–2562, 2016.

WAGNER, F. H.; SANCHEZ, A.; AIDAR, M. P. M.; ROCHELLE, A. L. C.; TARABALKA, Y.; FONSECA, M. G.; PHILLIPS, O. L.; GLOOR, E.; ARAGÃO, L. E. O. C. Mapping Atlantic rainforest degradation and regeneration history with indicator species using convolutional network. **PloS one**, v. 15, n. 2, e0229448, 2020.

WANG, Y.; ZIV, G.; ADAMI, M.; MITCHARD, E.; BATTERMAN, S. A.; BUERMANN, W.; SCHWANTES MARIMON, B.; MARIMON JUNIOR, B. H.; MATIAS REIS, S.; RODRIGUES, D.; GALBRAITH, D. Mapping tropical disturbed forests using multi-decadal 30 m optical satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 221, p. 474–488, 2019.

WASSERMAN, L. **All of statistics**: a concise course in statistical inference. New York: Springer, 2010. 443 p.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucária utilizando imagens do satélite Ikonos II. **Ciencia Florestal**, v. 19, n. 2, p. 169–181, 2009.

WOORTMANN, C. P. I. B. **Equações alométricas, estoque de biomassa e teores de carbono e nitrogênio de campinaranas da Amazônia central**. p. 105, 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - Manaus - Amazônia. Disponível em: https://repositorio.inpa.gov.br/bitstream/1/5072/1/Cecilia_Woortmann.pdf. Acesso em: 27 abr. 2020.

WORLD RESOURCES INSTITUTE BRASIL. **O que os drones podem ensinar para o monitoramento da restauração florestal**. WRI-Brasil, 2019. Disponível em: <https://wribrasil.org.br/en/node/44362>. Acesso em: 18 out. 2019.

ZANNE, A. E.; LOPEZ, G. G.; COOMES, D. A. Global wood density database. **Dryad**, v.2, 2009.

ZANOTTA, D. C.; HAERTEL, V.; SHIMABUKURO, Y. E.; RENNO, C. D. Linear spectral mixing model for identifying potential missing Endmembers in spectral mixture analysis. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 5, p. 3005–3012, 2014.

APÊNDICE A - INFORMAÇÕES SUPLEMENTARES

Figura A.1 – Trecho do código comentado que foi utilizado no *script* do GEE para realizar a filtragem de nuvens e sombra de nuvens na extração dos índices nas imagens da série Landsat.

Funções utilizadas para filtrar de nuvens da coleção da série Landsat - GEE
<pre>// Função para máscara de nuvem da banda pixel_qa da coleção Landsat em Reflectância de Superfície. function maskL8sr(image) { // Bits 3 e 5 são para sombra de nuvem e nuvem, respectivamente. var cloudShadowBitMask = 1 << 3; var cloudsBitMask = 1 << 5; // Obtendo a banda pixel_qa. var qa = image.select('pixel_qa'); // Ambos os sinalizadores devem ser definidos como zero, indicando condições claras. var mask1 = qa.bitwiseAnd(cloudShadowBitMask).eq(0) .and(qa.bitwiseAnd(cloudsBitMask).eq(0)); // Retorna as imagens filtradas. return image.updateMask(mask1) .select("B[0-9]*") .copyProperties(image, ["system:time_start"]); }</pre>

Fonte: Produção do Autor.

Figura A.2 – Trecho de código comentado com os três métodos e seus respectivos valores espectrais que foram utilizados no Google Earth Engine (GEE) na presente dissertação.

Bibliotecas Espectrais utilizadas na presente dissertação
<p>// Definição dos componentes espectrais obtidos em cada método utilizado:</p>
<p>// Método 1 (m1): (Souza et al, 2013) e (Bullock et al, 2018), desenvolvidos para imagens da série Landsat (TM/ETM+ e OLI) no estudo da degradação florestal da Amazônia.</p> <p>var GV = [0.05, 0.09, 0.04, 0.61, 0.30, 0.10]; // Vegetação verde var NPV = [0.14, 0.17, 0.22, 0.30, 0.55, 0.30]; // Vegetação Não fotossinteticamente ativa var SOIL = [0.20, 0.30, 0.34, 0.58, 0.60, 0.58]; // Solo var Shade = [0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00]; // Sombra var Cloud = [0.90, 0.96, 0.80, 0.78, 0.72, 0.65]; // Nuvem</p>
<p>// Método 2 (m2): JRC - Comissão Europeia (Simonetti et al, 2015), desenvolvido para imagens Landsat 8 (OLI).</p> <p>var soil = [0.14, 0.16, 0.22, 0.39, 0.45, 0.27]; // Solo var veg = [0.086, 0.062, 0.043, 0.247, 0.109, 0.039]; Vegetação var water = [0.07, 0.039, 0.023, 0.031, 0.011, 0.007]; Água/Sombra</p>
<p>// Método 3 (m3): Frações espectrais obtidas das imagens Sentinel 2 (MSI) (Bandoria, 2020).</p> <p>var soil = [0.0591, 0.0900, 0.1380, 0.2180, 0.3316, 0.2261]; // Solo var veg = [0.0189, 0.0380, 0.0209, 0.3208, 0.1529, 0.0655]; // Vegetação var water = [0.0302, 0.0434, 0.0228, 0.0138, 0.0156, 0.0113]; // Água/Sombra</p>

Fonte: Produção do Autor.

Tabela A1 – Características do sensor MSI do Sentinel-2.

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Área Imageada	Resolução Radiométrica
MSI (Multispectral Instrument)	(B2) - Azul	490 μm	10 m	10 dias	290 km	12 bits
	(B3) - Verde	560 μm				
	(B4) - Vermelho	665 μm				
	(B8) - Infravermelho Próximo (NIR)	842 μm				
	(B5) - Red Edge 1	705 μm	20 m			
	(B6) - Red Edge 2	740 μm				
	(B7) - Red Edge 3	783 μm				
	(B08A) - Red Edge 4	865 μm				
	(B11) - SWIR 1	1610 μm	60 m			
	(B12) - SWIR 2	2190 μm				
	(B1) - Aerossol	443 μm				
(B9) - Water Vapor	940 μm					
(B10) - Cirrus	1375 μm					

Fonte: Produção do Autor.

Tabela A2 – Características dos sensores da série Landsat (5-TM , 7-ETM + e 8-OLI).

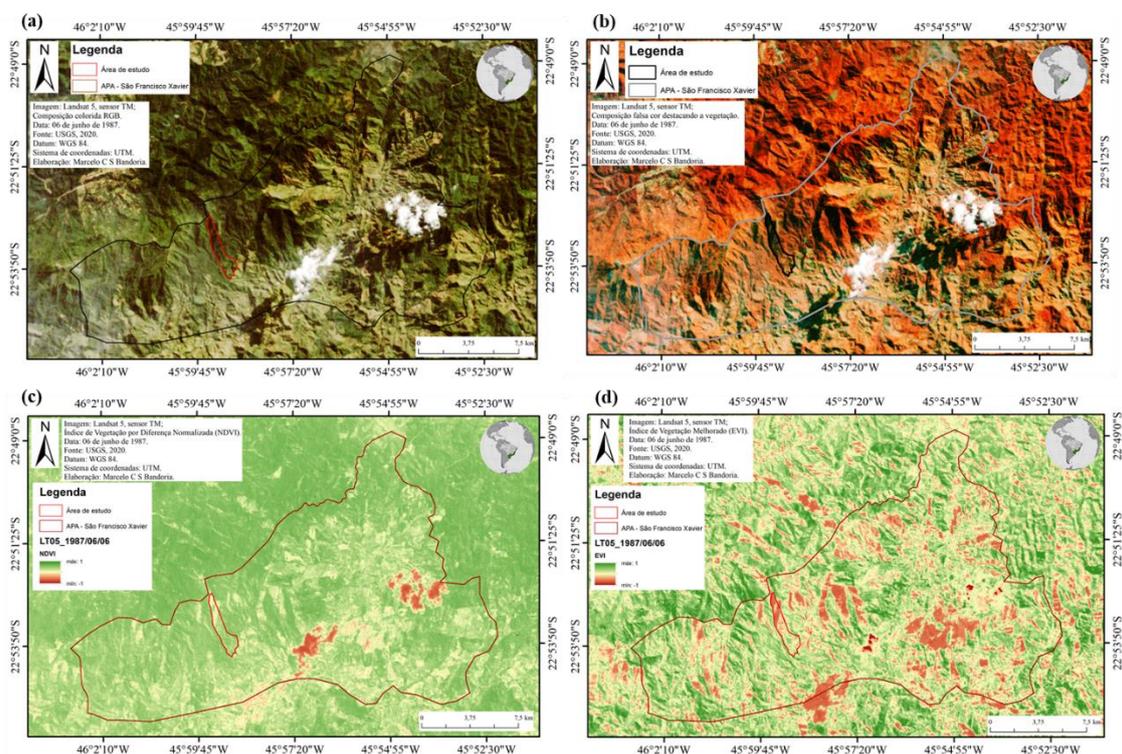
Sensores	Bandas Espectrais	Resolução Espectral	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Faixa Imageada	Resolução Radiométrica
TM (Thematic Mapper)	(B1) - Azul	0,45 - 0,52 μm	30 m	16 dias	185 km	8 bits
	(B2) - Verde	0,50 - 0,60 μm				
	(B3) - Vermelho	0,63 - 0,69 μm				
	(B4) - Infravermelho Próximo (NIR)	0,76 - 0,90 μm				
	(B5) - Infravermelho Médio	1,55 - 1,75 μm	120 m			
	(B6) - Infravermelho Termal	10,4 - 12,5 μm	30 m			
	(B7) - Infravermelho Médio	2,08 - 2,35 μm				
ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)	(B1) - Azul	0,45 - 0,52 μm	30 m	16 dias	185 km	8 bits
	(B2) - Verde	0,50 - 0,60 μm				
	(B3) - Vermelho	0,63 - 0,69 μm				
	(B4) - Infravermelho Próximo (NIR)	0,76 - 0,90 μm				
	(B5) - Infravermelho Médio	1,55 - 1,75 μm	120 m			
	(B6) - Infravermelho Termal	10,4 - 12,5 μm	30 m			
	(B7) - Infravermelho Médio	2,08 - 2,35 μm	15 m			
	(B8) - Pancromática	0,52 - 0,9 μm				
OLI (Operational Land Imager) e TIRS (Thermal Infrared Sensor)	(B1) - Coastal aerosol	0,43 - 0,45 μm	30 m	16 dias	185 km	16 bits
	(B2) - Azul	0,45 - 0,51 μm				
	(B3) - Verde	0,53 - 0,59 μm				
	(B4) - Vermelho	0,64 - 0,67 μm				
	(B5) - Infravermelho Próximo (NIR)	0,85 - 0,88 μm				
	(B6) - SWIR 1	1,57 - 1,65 μm	15 m			
	(B7) - SWIR 2	2,11 - 2,29 μm	30 m			
	(B8) - Pancromático	0,50 - 0,68 μm				
	(B9) - Cirrus	1,36 - 1,38 μm				
	(B10)- Thermal Infrared (TIRS 1)	10,60 - 11,19 μm	100 m			
	(B11) - Thermal Infrared (TIRS 2)	11,0 - 12,51 μm				

Fonte: Produção do Autor.

APÊNDICE B - SEQUÊNCIA DE FIGURAS PRODUZIDAS POR MEIO DAS IMAGENS DA SÉRIE LANDSAT

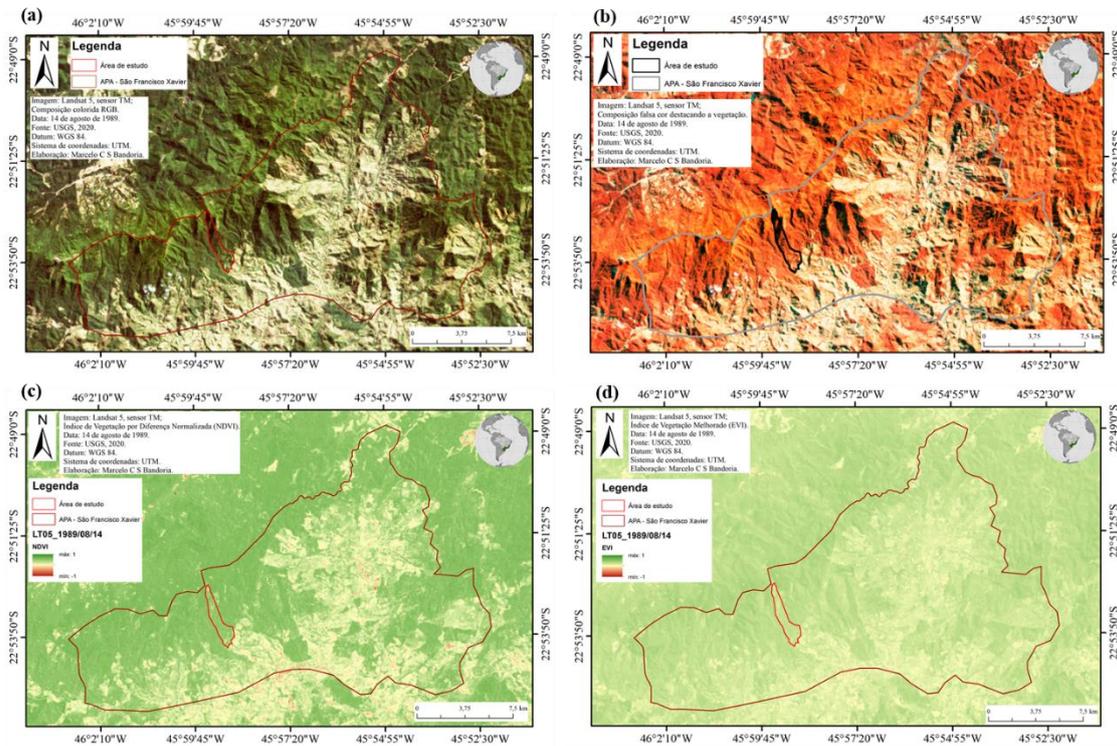
A coleção de imagens representa o processo de análise biofísico da evolução da regeneração florestal da área de estudos feitas através da série Landsat. As figuras que seguem na sequência apresentam 4 imagens, sendo (a) composição colorida verdadeira (RGB), (b) composição colorida falsa cor destacando a vegetação no infravermelho próximo, (c) índice de vegetação por diferença normalizada e (d) índice de vegetação melhorado.

Figura B1 – A primeira imagem analisada foi do ano de 1987, obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, como referência inicial de análise do processo de regeneração da área de estudo.



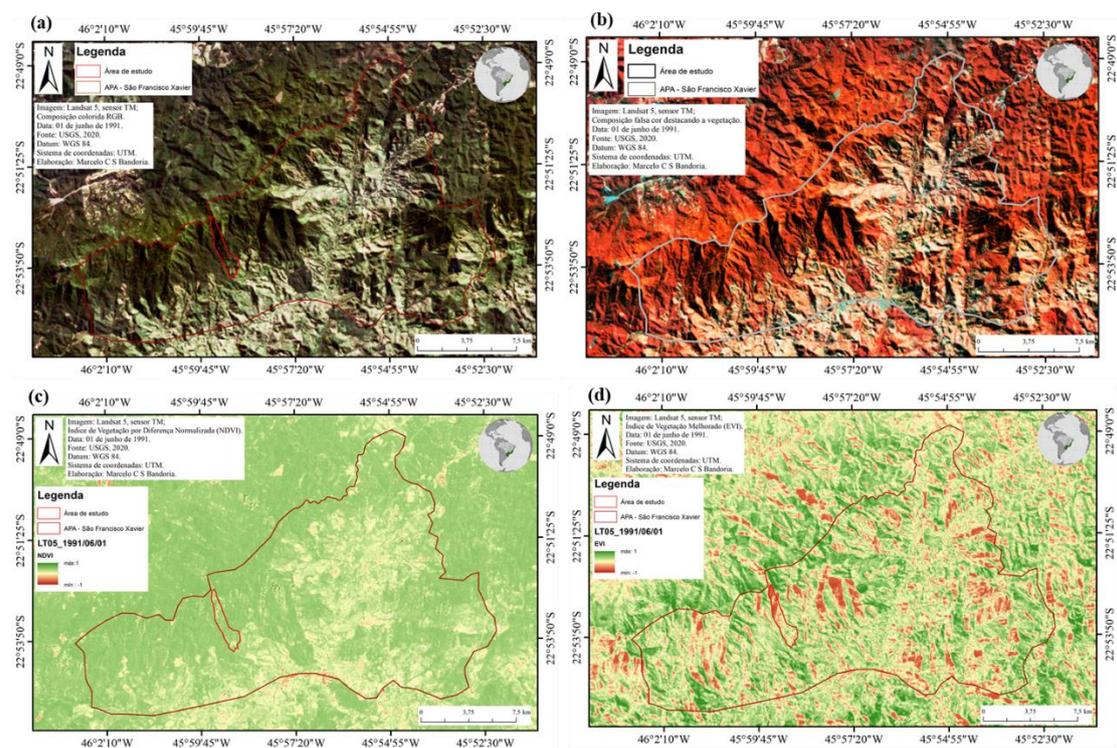
Fonte: Produção do Autor.

Figura B2 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 1989.



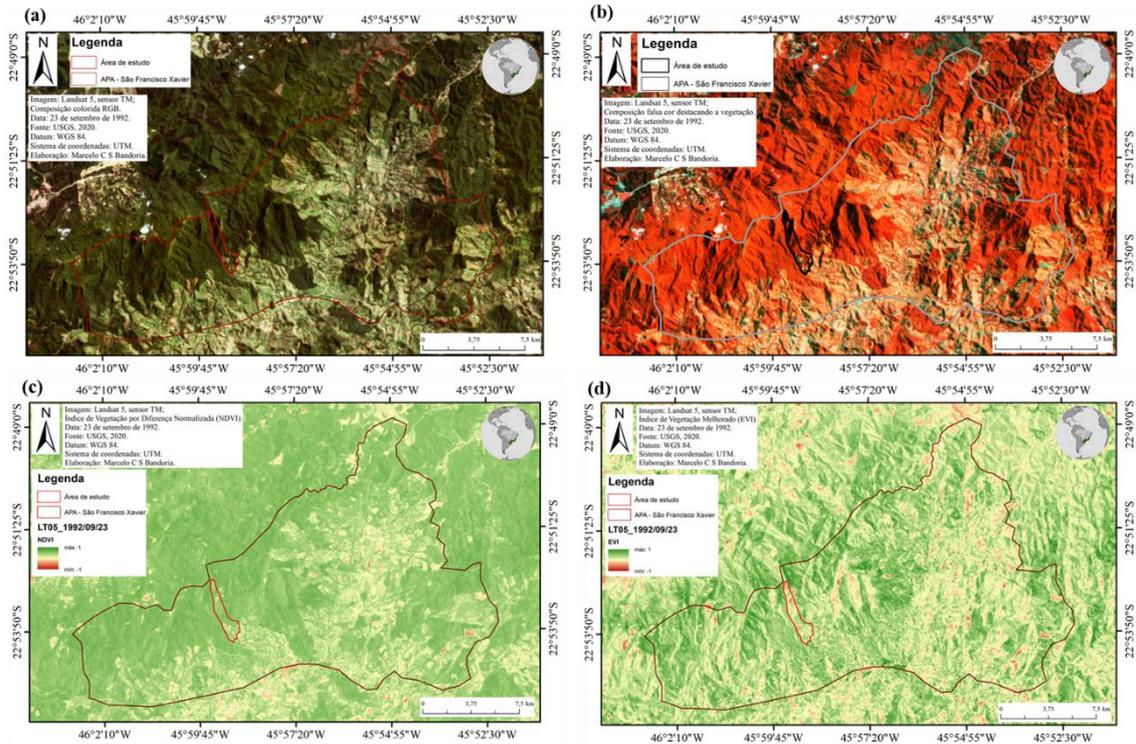
Fonte: Produção do Autor.

Figura B3 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 1991.



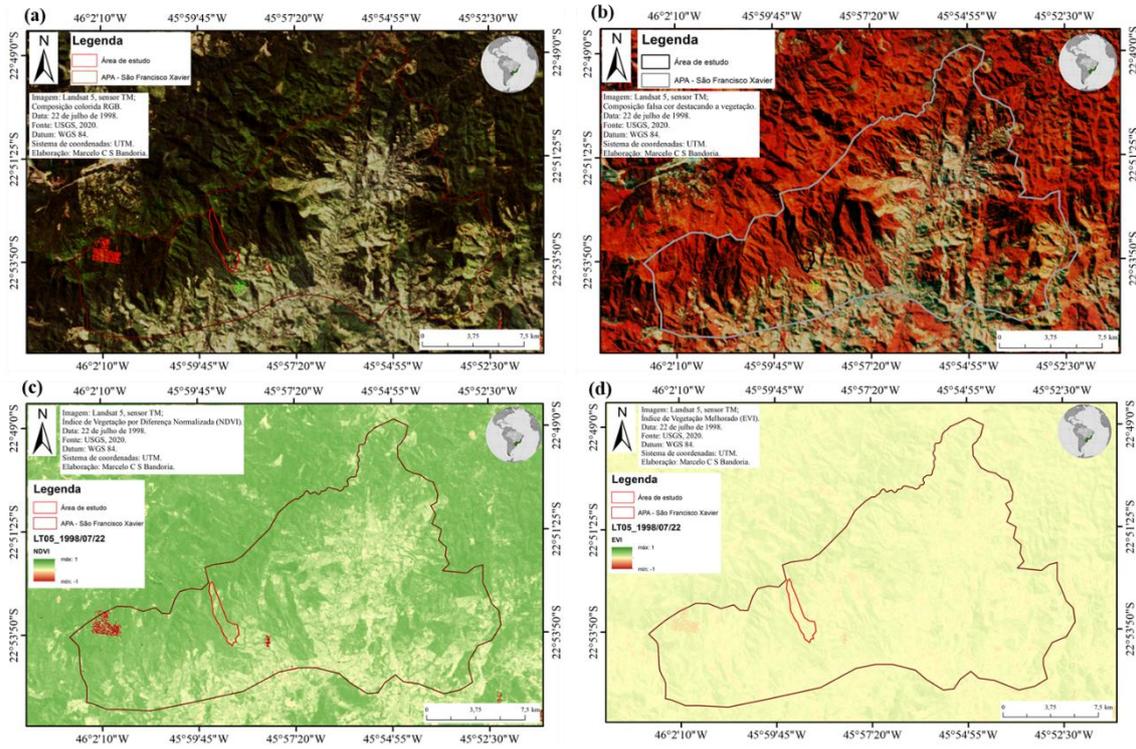
Fonte: Produção do Autor.

Figura B4 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 1992.



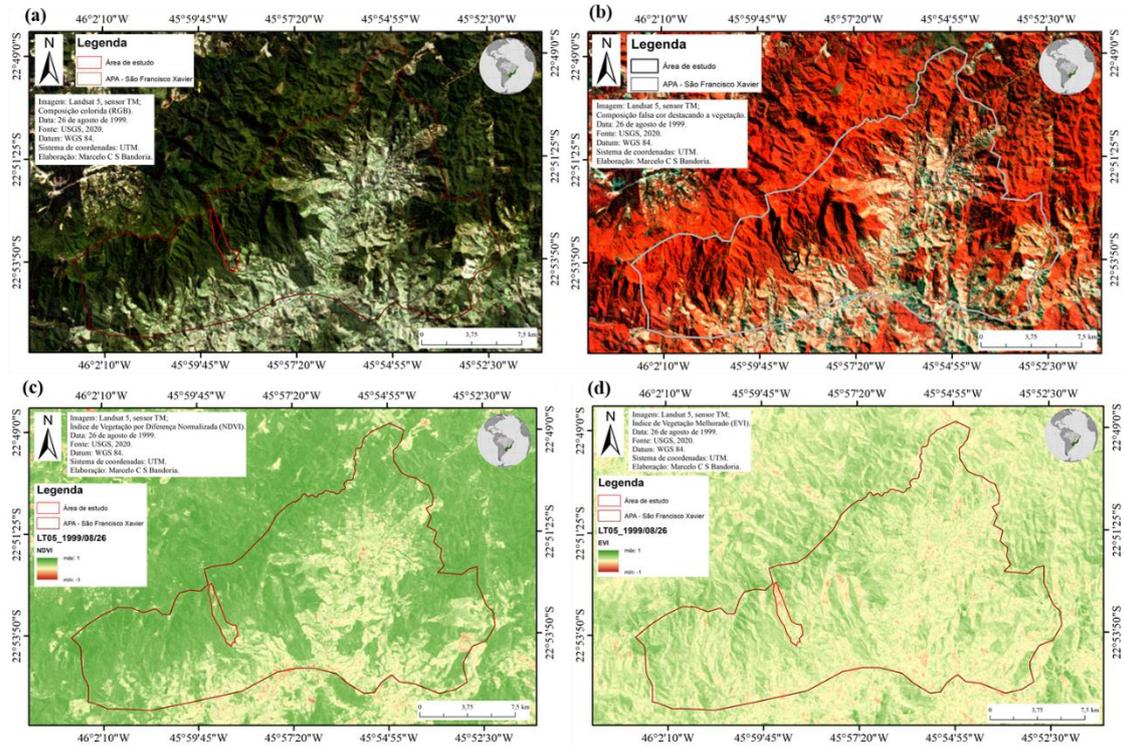
Fonte: Produção do Autor.

Figura B5 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 1998.



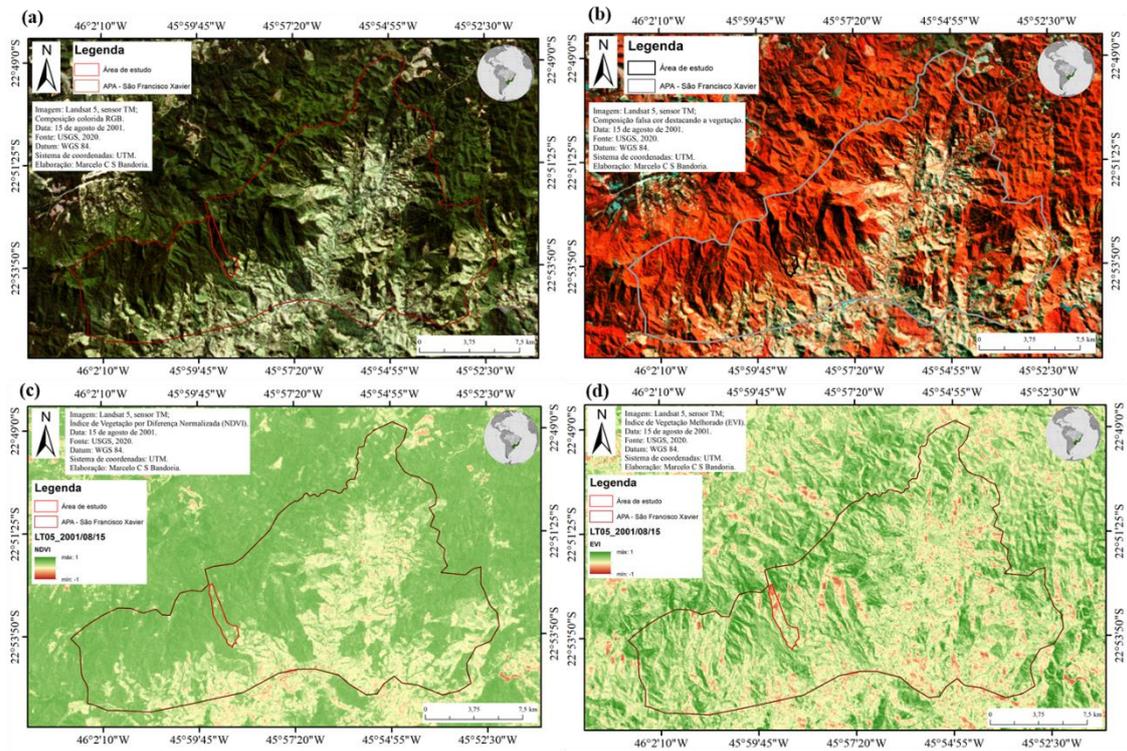
Fonte: Produção do Autor.

Figura B6 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 1999.



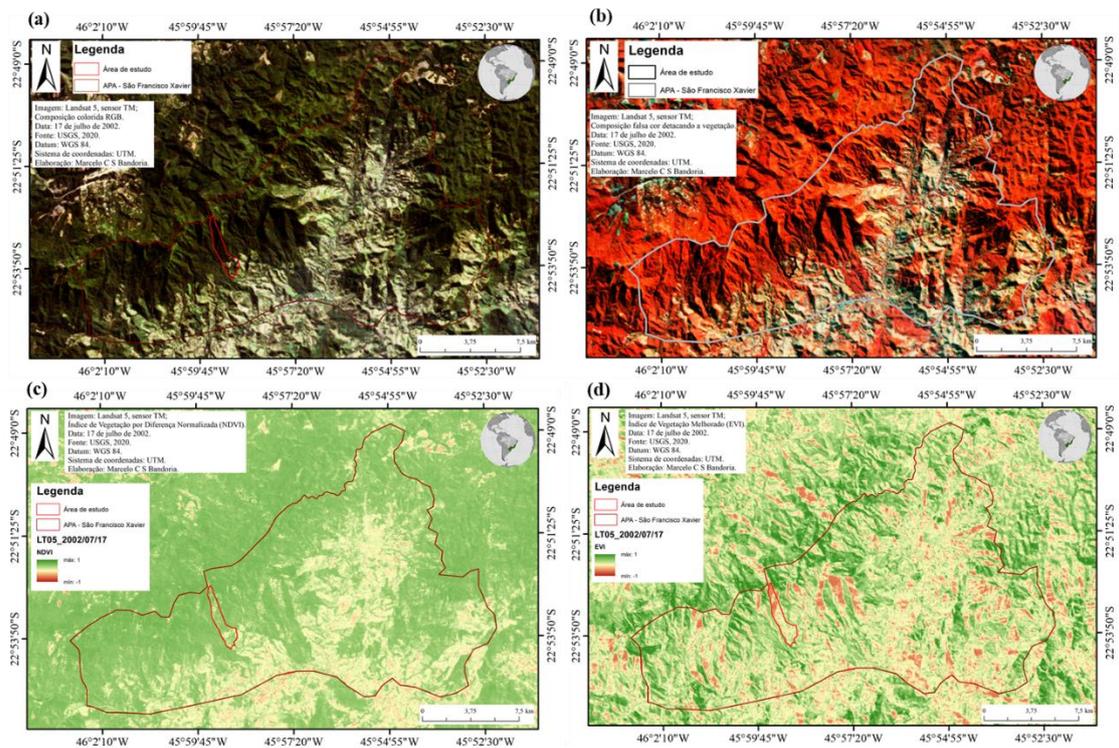
Fonte: Produção do Autor.

Figura B7 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2001.



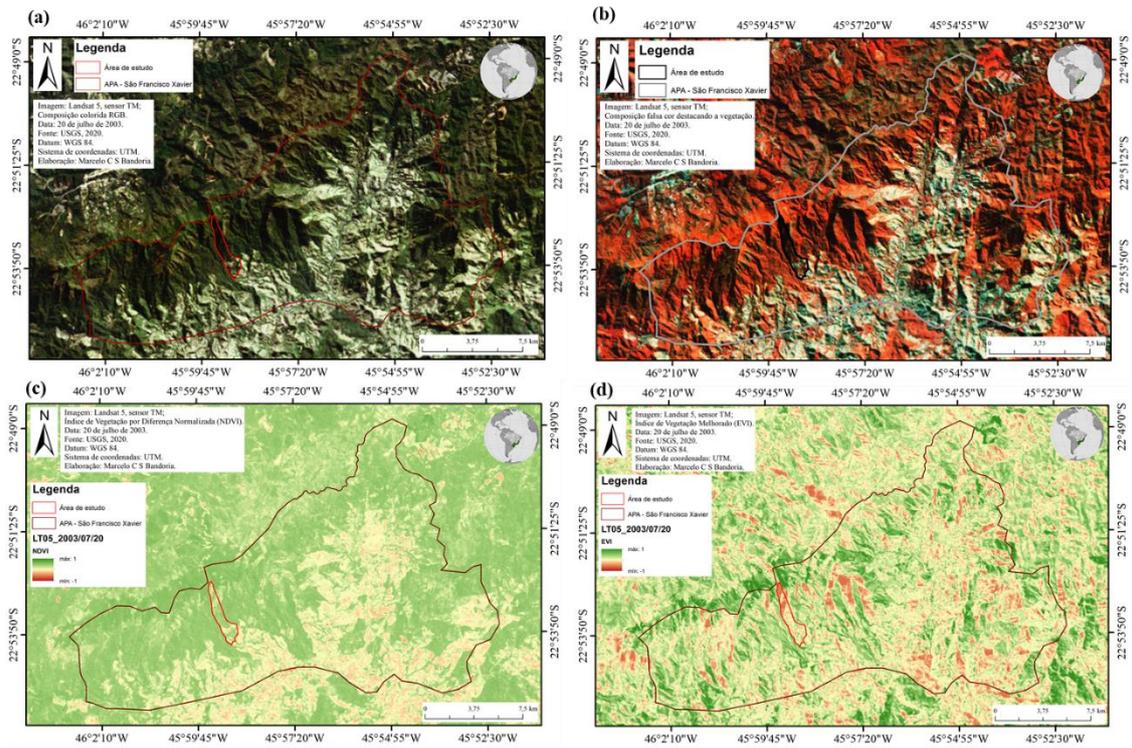
Fonte: Produção do Autor.

Figura B8 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2002.



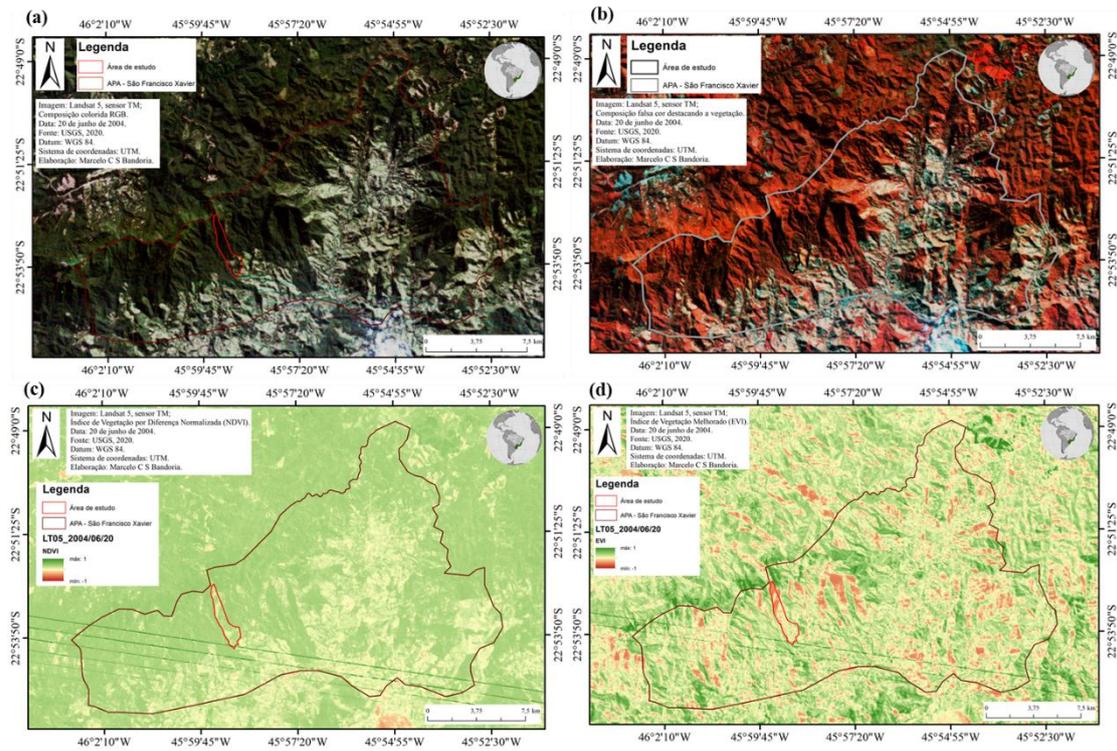
Fonte: Produção do Autor.

Figura B9 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2003.



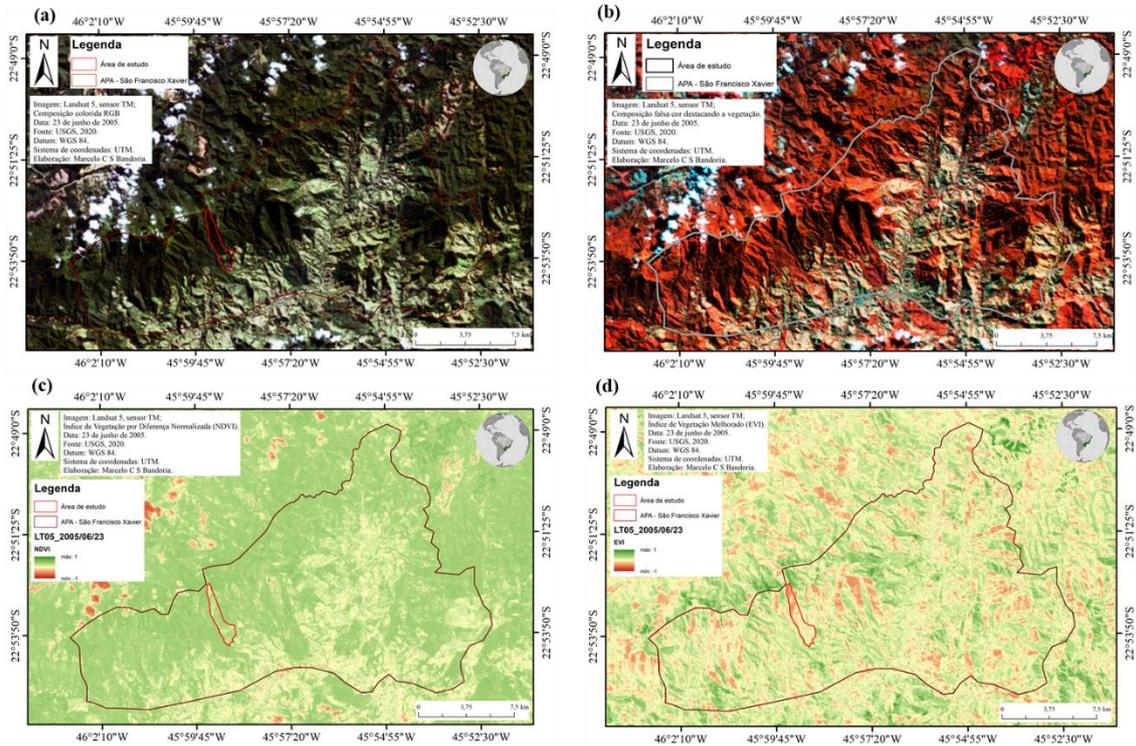
Fonte: Produção do Autor.

Figura B10 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2004.



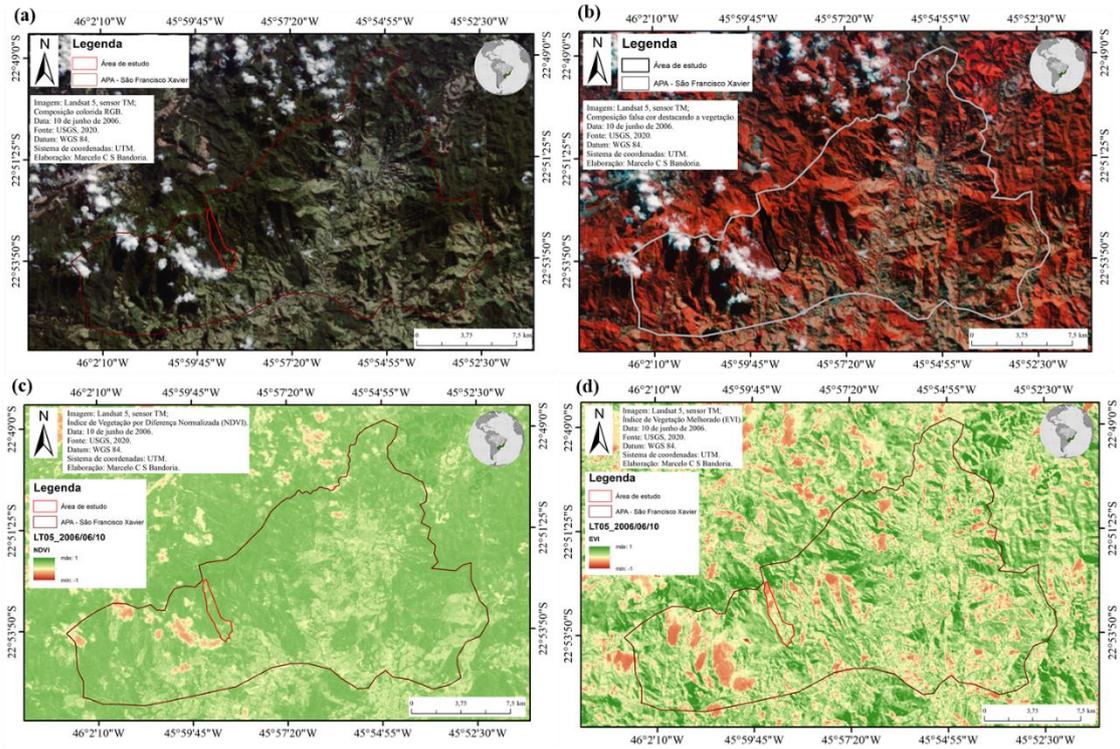
Fonte: Produção do Autor.

Figura B11 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2005.



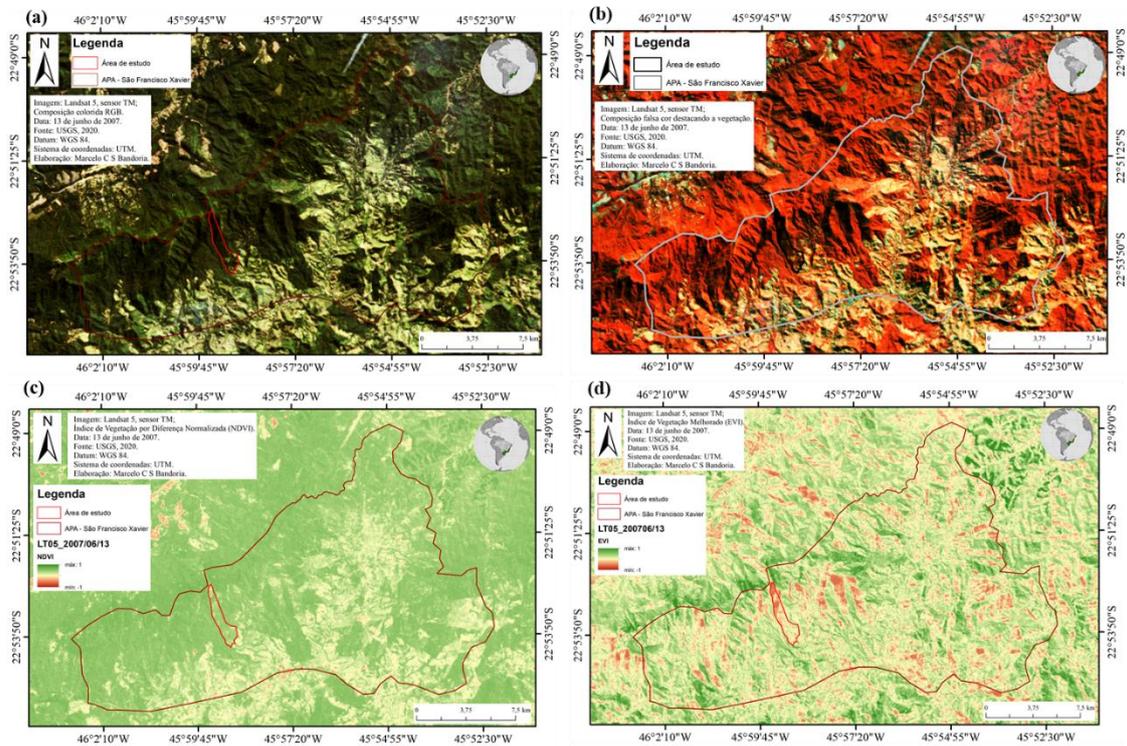
Fonte: Produção do Autor.

Figura B12 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2006.



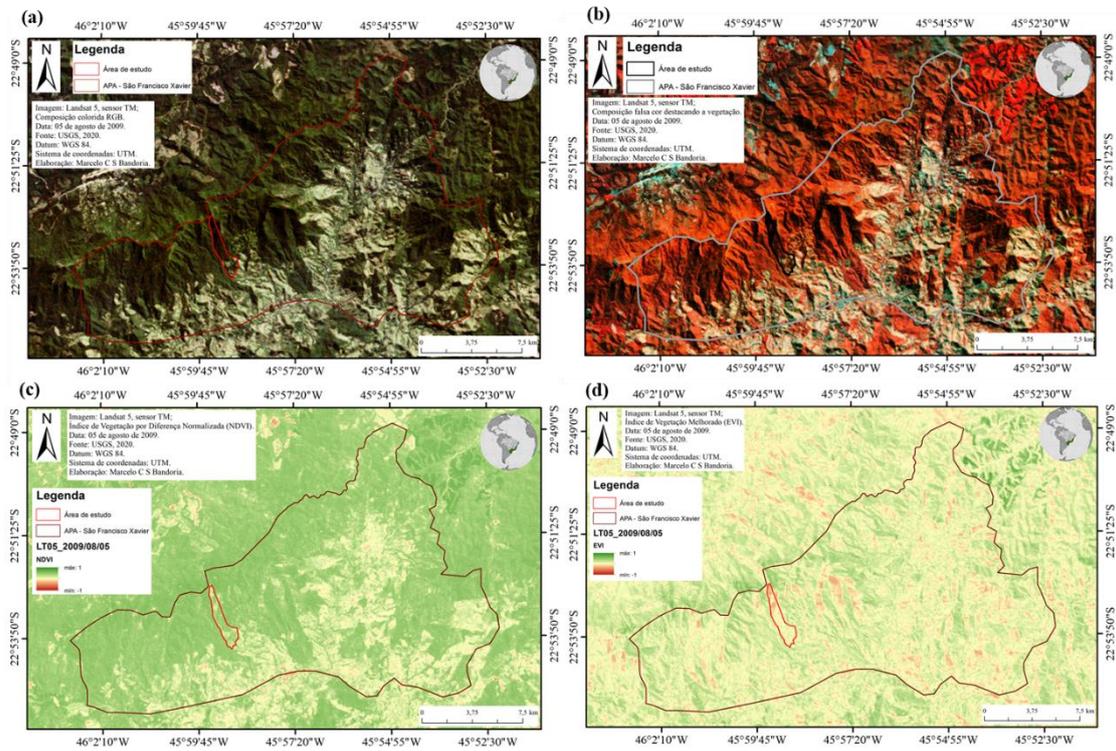
Fonte: Produção do Autor.

Figura B13 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2007.



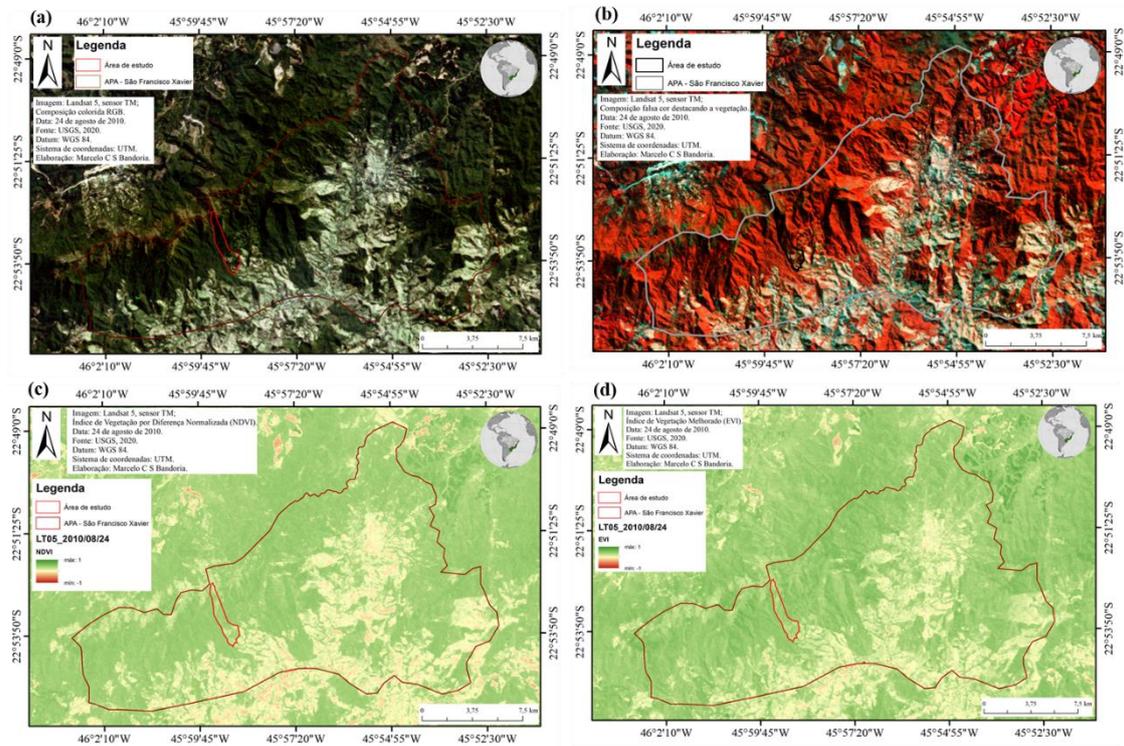
Fonte: Produção do Autor.

Figura B14 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2009.



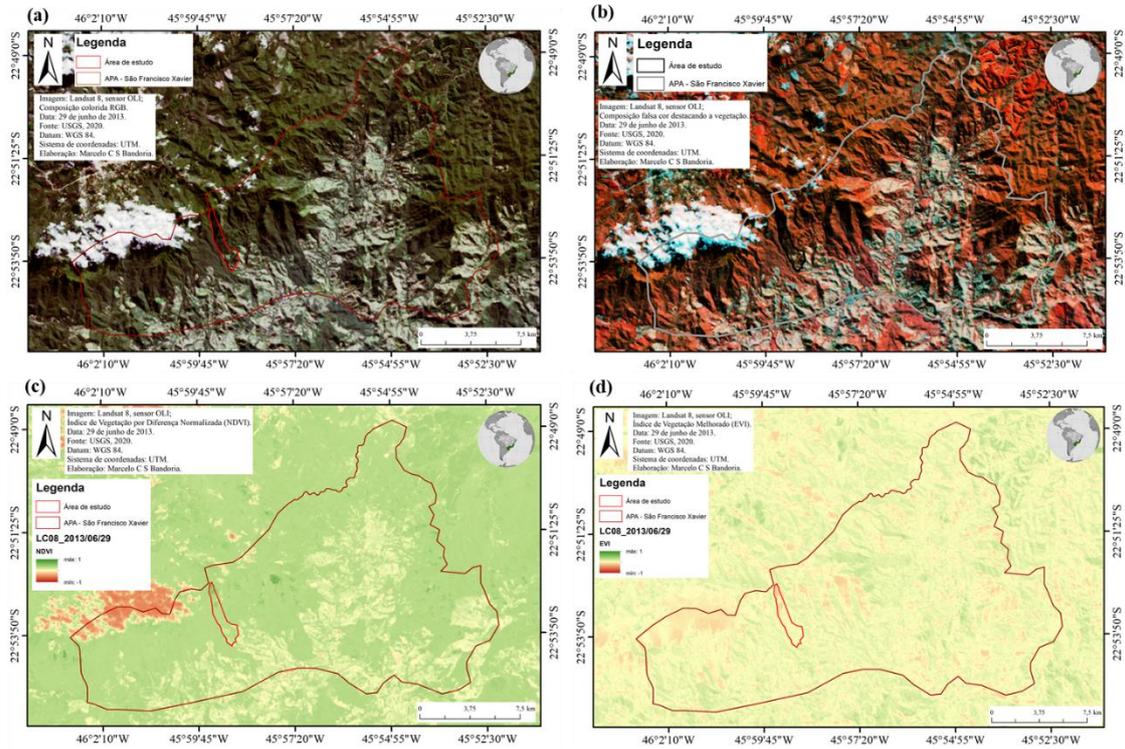
Fonte: Produção do Autor.

Figura B15 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2010.



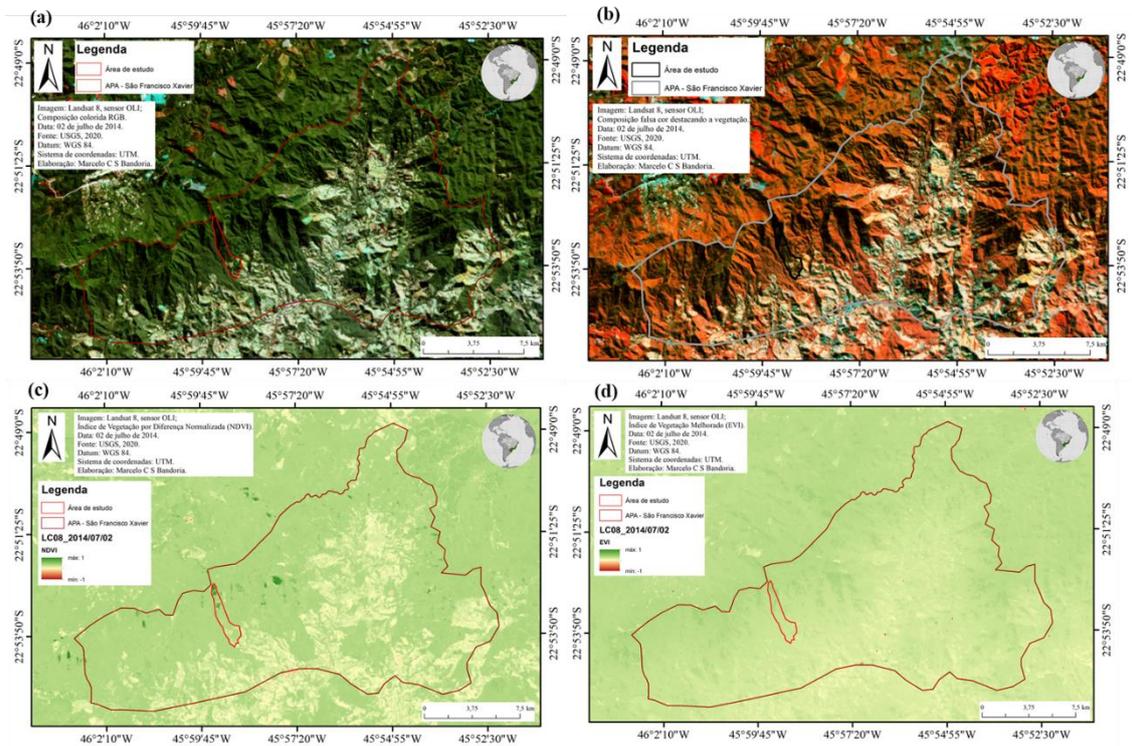
Fonte: Produção do Autor.

Figura B16 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 5, sensor TM, referente ao ano de 2013.



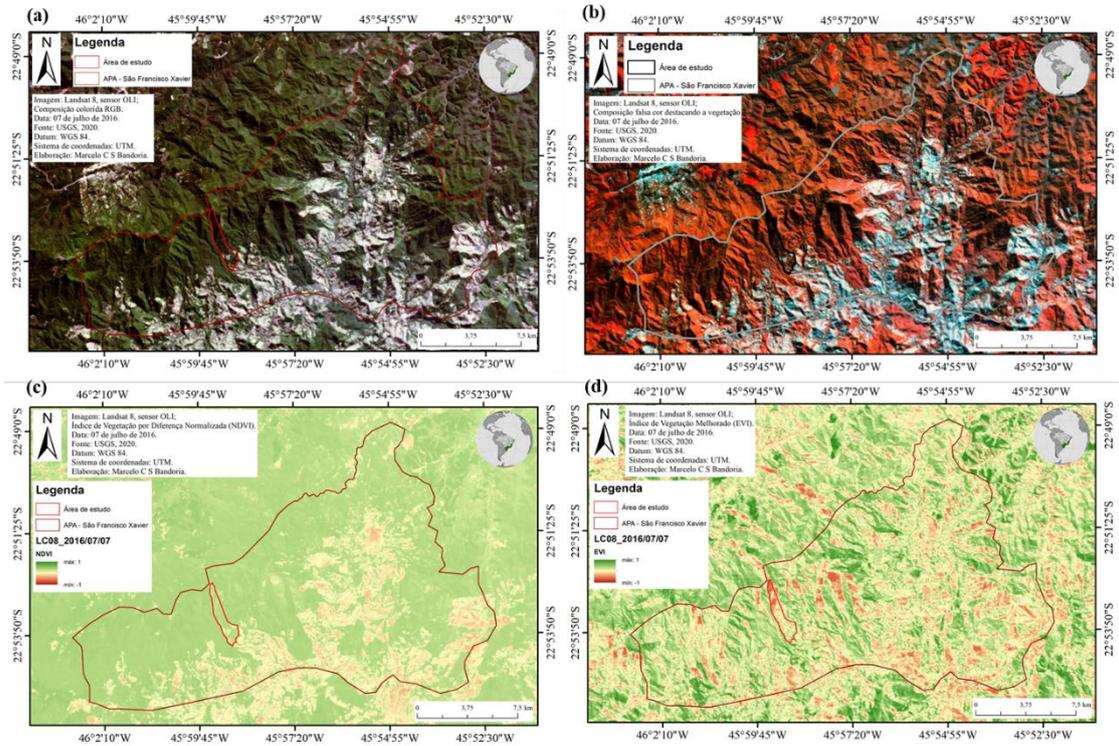
Fonte: Produção do Autor.

Figura B17 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 8, sensor OLI, referente ao ano de 2014.



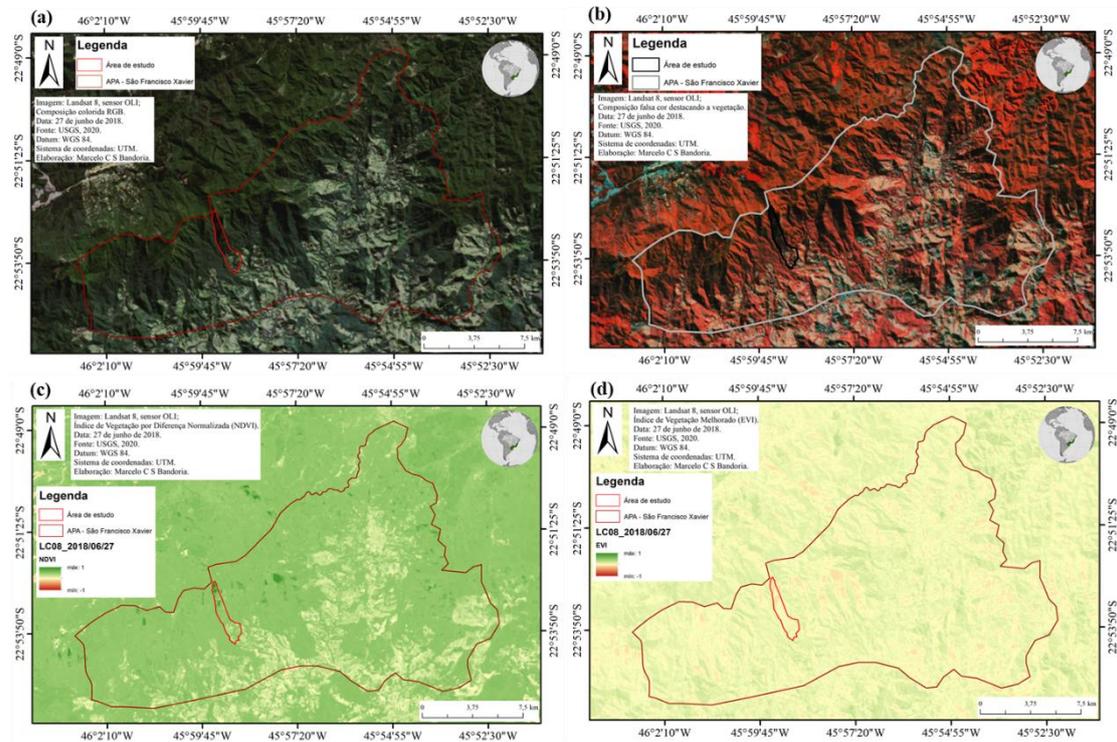
Fonte: Produção do Autor.

Figura B18 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 8, sensor OLI, referente ao ano de 2016.



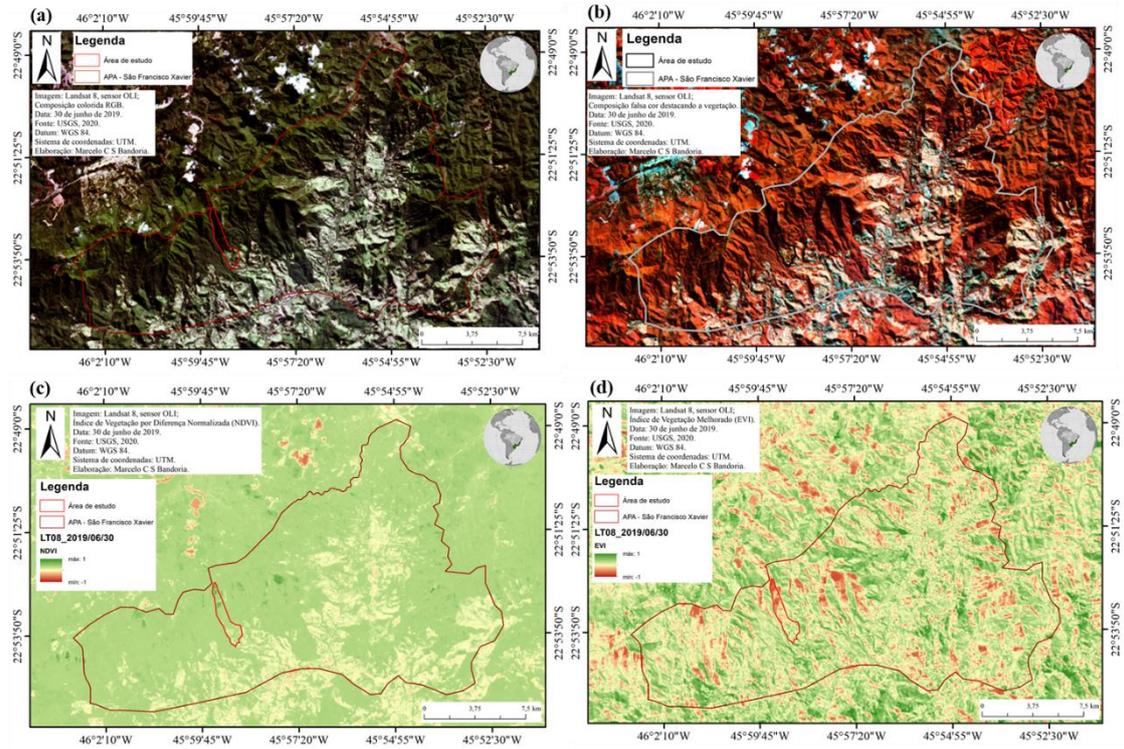
Fonte: Produção do Autor.

Figura B19 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 8, sensor OLI, referente ao ano de 2018.



Fonte: Produção do Autor.

Figura B20 – A coleção de imagens (a, b, c, d) foi elaborada com a imagem obtida do satélite Landsat 8, sensor OLI, referente ao ano de 2019.



Fonte: Produção do Autor.

APÊNDICE C - DETALHES SOBRE A OBTENÇÃO DAS IMAGENS VANT

O levantamento de imagens por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) pilotado remotamente, foi realizado em 12 de junho de 2019 nas áreas pela equipe de florestas do *World Resources Institute* (WRI-Brasil) que destacou em sua página na internet a importância dessa ferramenta para analisar o processo de regeneração da Mata Atlântica (WRI Brasil, 2019).

O VANT utilizado foi do tipo quadricóptero, modelo *Phantom 4 Pro* (DJI), sensor RGB que opera no comprimento de onda compreendido entre 400 e 700 nm, de 20 megapixels. A metodologia utilizada para obtenção das imagens foi: plano de voo elaborado no software *Map Pilot*, com sobreposição longitudinal de 90% e lateral de 80%, gerando fotos de alta sobreposição, com resolução espacial dos ortomosaicos *Ground Sample Distance* (GSD) de 5 cm com altura de 200 m no voo (Regeneração avançada), 2,4 cm e 2,5 cm (Regeneração inicial e média), as duas últimas com 100m de altura de voo. As imagens foram processadas pelo software *Agisoft PhotoScan Professional* (*Metashape Pro+*) e analisadas retirando-se as bordas que não representam a qualidade de sobreposição lateral desejada. Após o processamento foram produzidos ortomosaicos com o bloco de imagens tomadas e Modelos Digitais de Superfície (MDS) Fotogramétricos, reconstruindo o espaço tridimensional por meio das imagens pelo algoritmo de *Structure for Motion* (SfM).

O poder de resolução espacial destas imagens possibilitou uma análise por fotointerpretação do dossel florestal com maior nível de detalhamento, porém com limitações para análises biofísicas, já que o sensor utilizado não possuía operação na região do infravermelho de ondas curtas (NIR) e de ondas médias (SWIR) utilizados na análise biofísica da vegetação pelo sensoriamento remoto multiespectral. Essa ferramenta tem sido utilizada em diversas metodologias que buscam realizar mapeamentos florestais, classificação de uso e ocupação do solo (BREUNIG., et al 2019). Neste trabalho essas imagens foram utilizadas para apoiar por meio da fotointerpretação a caracterização dos estágios de regeneração e possuem o intuito de complementar o trabalho realizado em campo.