



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/04.19.16.52-TDI

**ANÁLISE FENOLÓGICA DO DOSSEL DA FLORESTA
NACIONAL DO TAPAJÓS UTILIZANDO DADOS
ORBITAIS DO SENSOR MODIS E HIPERESPECTRAIS
LOCAIS**

Carolynne Bueno Machado

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelo Dr. Luiz Eduardo Oliveira e
Cruz de Aragão, aprovada em 28
de abril de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NNL76S>>

INPE
São José dos Campos
2017

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas
(CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

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

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

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos
Climáticos (CPT)

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação
(SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/04.19.16.52-TDI

**ANÁLISE FENOLÓGICA DO DOSSEL DA FLORESTA
NACIONAL DO TAPAJÓS UTILIZANDO DADOS
ORBITAIS DO SENSOR MODIS E HIPERESPECTRAIS
LOCAIS**

Carolynne Bueno Machado

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelo Dr. Luiz Eduardo Oliveira e
Cruz de Aragão, aprovada em 28
de abril de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NNL76S>>

INPE
São José dos Campos
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Machado, Carlyne Bueno.

M131a Análise fenológica do dossel da floresta nacional do tapajós utilizando dados orbitais do sensor modis e hiperespectrais locais / Carlyne Bueno Machado. – São José dos Campos : INPE, 2017.

xx + 143 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/04.19.16.52-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientador : Dr. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão.

1. Floresta Amazônica. 2. Series temporais. 3. MAIAC.
4. Estação seca. I.Título.

CDU 528.8(292.88)



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

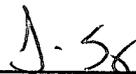
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Carolynne Bueno Machado**

Título: "ANÁLISE FENOLÓGICA DO DOSSEL DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS UTILIZANDO DADOS ORBITAIS DO SENSOR MODIS E HIPERESPECTRAIS LOCAIS"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em **Sensoriamento Remoto**

Dr. Lênio Soares Galvão



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Luiz Eduardo Oliveira e Cruz de Aragão



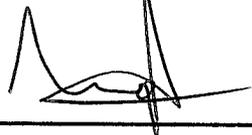
Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Yosio Edemir Shimabukuro



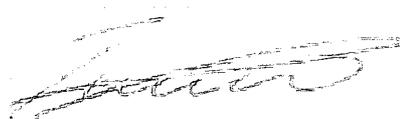
Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Fabien Hubert Wagner



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Paulo Monteiro Brando



Convidado(a) / IPAM / Brasília - DF

Este trabalho foi aprovado por:

majoria simples

unanimidade

São José dos Campos, 28 de abril de 2017

*“É saber se sentir infinito num Universo tão vasto e bonito, é saber sonhar.
E então fazer valer a pena cada verso daquele poema sobre acreditar.
Não é sobre chegar no topo do mundo e saber que venceu,
é sobre escalar e sentir que o caminho te fortaleceu.”*

Trem-bala - Ana Vilela

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a todos que, de forma direta ou indireta, foram parte essencial desta etapa concluída em minha carreira acadêmica, e mais que isso, em minha vida.

Primeiramente, minha maior gratidão é a Deus, que nem por um instante me desamparou. Agradeço pela força concedida nos momentos difíceis, por todas as pessoas e oportunidades colocadas em meu caminho.

Agradeço de forma sincera a toda minha família, pelo suporte e carinho que nunca faltaram, por não me deixarem esquecer de onde vim e para onde posso voltar. Em especial a minha mãe, Neide, que sempre lutou comigo minhas batalhas e sempre foi minha maior inspiração. Minha irmã, Alyne, pelo cuidado e amizade fiel. Ao meu padrasto, Douglas, pelo enorme apoio e presença. E em memória de meu pai, Benedito, que de onde está se alegra também com esta conquista.

Ao meu orientador, Dr. Luiz Aragão, pela oportunidade de estudar em um Instituto de tão grande relevância e por acreditar em meu potencial desde o início. Obrigada pelo apoio científico, pela disposição e paciência. Agradeço também à Dra Liana O. Anderson.

Agradeço à banca examinadora pela disponibilidade, contribuições e críticas, que são parte do meu crescimento pessoal e profissional.

A todos os professores e pesquisadores do INPE, pelo conhecimento oferecido. Em especial ao Dr. Flávio Ponzoni e ao Dr. Lênio Galvão, por toda dedicação e experiência compartilhadas. Ao Dr. Camilo Rennó pelas contribuições estatísticas e disponibilidade.

Estendo meus agradecimentos também a todos do grupo de pesquisa TREES. Em especial à Dra. Yhasmin Moura, pelo apoio de grande importância no desenvolvimento desta pesquisa. Ao Dr. Fabien Wagner pelas contribuições. E em memória do Dr. Thomas Hilker, que também teve colaboração neste trabalho.

Gostaria de agradecer também aos professores da UTFPR Londrina: Dr. Jorge Martins, Dra. Ligia Batista e Dra. Alessandra da Silva, que me apoiaram e incentivaram a ingressar no Mestrado.

Às amigas de república Luana e Alana, que me deram grande apoio pessoal durante o mestrado, tornando esta etapa ainda mais transformadora. Obrigada pela grande amizade. Aos parceiros do ASA e de todos os dias, pelos almoços, cafés, desabafos e piadas, e do vôlei, que proporcionaram energia para finalizar a dissertação. Aos demais amigos do SERE e a todos da turma de 2015 de Sensoriamento Remoto, por toda a caminhada durante o curso, pelos grupos de estudo durante as disciplinas e confraternizações memoráveis.

Aos amigos de longa data, que foram sempre essenciais para tornar a caminhada mais leve, mesmo na distância, por permaneceram em amizade. Obrigada a todos pela paciência durante os sumiços necessários e pelo carinho. Agradeço também aos novos amigos encontrados durante o caminho, por terem papel fundamental nesta etapa.

Enfim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado, e ao Projeto FAPESP (Processo 2013/50533-5).

RESUMO

A variação sazonal da capacidade fotossintética de extensas florestas tropicais, como a Amazônica, pode influenciar no condicionamento climático em escala global. Diversos estudos vêm apontando ganho no desenvolvimento da Floresta Amazônica durante a estação seca, induzido pela maior radiação solar disponível neste período. Este comportamento foi observado com diferentes dados e níveis de aquisição, incluindo medições em campo e imagens do sensor MODIS. Porém, ele confronta o ciclo de crescimento da vegetação simulado em modelos, por não considerar a disponibilidade de água como fator limitante. Outros trabalhos indicam artefatos nas imagens MODIS, devido à sazonalidade do ângulo zenital solar (SZA), o que gera menores frações sombreadas nos dosséis durante a estação seca, resultando em ganho na reflectância detectada pelo sensor. Dentro deste contexto, este trabalho objetivou avaliar o comportamento sazonal da Floresta Nacional do Tapajós, em resposta à disponibilidade de água e radiação. A resposta do sensor MODIS-MAIAC também foi contraposta a um dado local hiperespectral (HVIS), posicionado na torre do km 67. A fenologia foi avaliada com índices espectrais e com as frações: vegetação verde (GV), sombra e vegetação não fotossinteticamente ativa (NPV). A estação seca foi relativa aos meses de déficit hídrico (<100 mm), sendo que a metodologia e os dados utilizados buscaram minimizar a influência da geometria Sol-sensor. Foi realizada uma análise espacial e a análise de séries temporais com o pacote BFAST, para verificar padrões interanuais e intra-anuais de correlação entre as variáveis fenológicas e ambientais. A umidade do solo mostrou defasagem com a precipitação, indicando que a floresta pode ter acesso à água após o término do período chuvoso. Cerca de 40 % da área de floresta na FLONA teve δ EVI positivo durante a estação seca e este percentual aumenta ao considerar a reflectância no infravermelho próximo e a fração GV, ultrapassando 70 %. No entanto, o índice PRI indica menor eficiência fotossintética no período seco, confirmada pelo aumento do NPV, da reflectância no vermelho e no verde. A fenologia da floresta teve forte correlação negativa com a umidade do solo, porém, correlações fracas com a precipitação e radiação. A resposta da floresta às variáveis ambientais foi significativamente diferente dos demais usos da terra, indicando maior resistência em períodos de estresse hídrico. Os padrões de *greening* ocorreram em áreas de floresta mais densa e não aumentam em latitudes maiores, não indicando dependência da variação do SZA. Ao nível local há evidências de mudanças na estrutura de copas individuais, perda e ganho, dependendo da espécie. O dado diário MODIS-MAIAC não teve predominância de correlação significativa com as imagens diárias HVIS, mas, de agosto para setembro de 2012, ambos apresentaram ganho na estrutura dos dosséis ao nível da imagem. 54 % das evidências indicaram *greening* durante a estação seca, de 2004 a 2014 ao nível orbital, mas os resultados não convergem em todas as análises. Portanto, diferentes processos ocorrem simultaneamente na floresta, durante a estação seca, e os sensores respondem a esta mistura de processos. A hipótese é que há contribuição relativa de indivíduos com mudança demográfica das folhas e de indivíduos sofrendo perda da capacidade fotossintética durante a estação seca.

Palavras-chave: Floresta Amazônica. Séries temporais. MAIAC. Estação seca.

PHENOLOGICAL ANALYSIS OF THE TAPAJÓS NATIONAL FOREST CANOPY USING MODIS ORBITAL DATA AND LOCAL HYPERESPECTRAL SENSOR DATA

ABSTRACT

The seasonal variation of the photosynthetic capacity of extensive tropical forests, such as Amazon Forest, can influence in climatic regulation on global scale. Several papers have indicated a radiation-induced green-up of the Amazon Forest during the dry season. This behavior was observed with different data and acquisition levels, including field measurements and MODIS sensor images. However, it confronts the vegetation growth cycle in models, since it does not consider availability of water as a limiting factor. Other studies indicate artifacts in the MODIS images, due to solar zenith angle (SZA) seasonality, which generates less shaded fractions at the canopies during the dry season, resulting in increase of reflectance detected by the sensor. Within this context, this research aimed at evaluating the seasonal behavior of Tapajós National Forest, in response to the water and radiation availability. The response of the MODIS-MAIAC sensor was also opposed to a hyperspectral local data (HVIS), located in the km 67 tower. Phenology was evaluated with spectral indexes and with the fractions: green vegetation (GV), shade and non-photosynthetic vegetation (NPV). The dry season was related to the months of water deficit (<100 mm), and the methodology and data used intended to minimize the influence of Sun-sensor geometry. A spatial analysis was performed and a time-series analysis with BFAST was applied, verifying interannual and intra-annual patterns of correlation between phenological and environmental variables. Soil moisture showed a lag with rainfall, indicating that the forest may have access to water after the rainy season ends. About 40% of the forest area in the Tapajós Forest had positive δ EVI during the dry season and this percentage increases when considering the near infrared reflectance and the GV fraction, exceeding 70%. However, the PRI index indicates lower photosynthetic efficiency in the dry period, confirmed by NPV, red and green reflectance increase. The forest phenology had a strong negative correlation with soil moisture, but weak correlations with precipitation and radiation. The forest response to the environmental variables was significantly different from the other land uses, indicating greater resistance in periods of water stress. Greening patterns occurred in denser forest areas and do not increase in higher latitudes, indicating no dependence on SZA variation. At the local level there is evidence of changes in the structure of individual crowns, loss and gain, depending on the species. The daily MODIS-MAIAC data had no significant correlation with the daily HVIS images, but from August to September 2012 both had an increase in the structure of the canopies at landscape level. 54% of the evidences indicated greening during dry season, from 2004 to 2014 at orbital level, but the results do not converge in all analyzes. Therefore, different processes occur simultaneously in the forest during the dry season, and the sensors respond to this mixture of processes. The hypothesis is that there is a relative contribution of individuals with demographic change of the leaves and individuals suffering loss of photosynthetic capacity during the dry season.

Keywords: Amazon Forest. Time-series. MAIAC. Dry season.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Fontes de REM e componentes de atenuação atmosférica.	8
Figura 2.2 - Efeitos da mudança de IAF na reflectância dos dosséis vegetativos.	13
Figura 2.3 - Gráfico de espalhamento bidimensional da distribuição de pixels no NIR e RED de uma cena aleatória.	15
Figura 2.4 - Exemplo de <i>endmembers</i> obtidos com o sensor AVIRIS.	22
Figura 3.1 - Localização da área de estudo no km 67 dentro da FLONA Tapajós (a); hipsometria, declividade e pedologia (b).	34
Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia proposta.	37
Figura 4.2 - Percentual por pixel de disponibilidade do dado mensal MODIS-MAIAC (jan/2004-jun/2014).	45
Figura 4.3 - Identificação das espécies registradas nas imagens da câmera HVIS.	47
Figura 4.4 - Máscaras das copas sempre iluminadas identificadas para as três espécies.	48
Figura 4.5 - Função resposta do sensor MODIS para as bandas utilizadas (a). Pixel aleatório HVIS transformado com a resposta espectral do MODIS (b). ...	49
Figura 4.6 - Espectros de <i>endmembers</i> utilizados nas imagens HVIS (a) e nas imagens MODIS-MAIAC (b).	50
Figura 4.7 - Níveis de análise dos dados orbitais.	52
Figura 4.8 - Média dos meses consecutivos relativos à estação seca por ano (2004 a 2014) (a) e meses abaixo de 100 mm para o Nível 2 - Torre (b).	55
Figura 4.9 - Classes de uso e cobertura da terra reclassificados do TerraClass 2014, com destaque para a FLONA Tapajós.	56
Figura 5.1 - Médias trimestrais das variáveis ambientais.	61
Figura 5.2 - Coeficiente de correlação (R) entre os dados GRACE e TRMM mensal. .	64
Figura 5.3 - Médias trimestrais do índice EVI, de 2004 a 2014.	65
Figura 5.4 - Médias trimestrais do índice PRI, de 2004 a 2014.	66
Figura 5.5 - δ das variáveis ambientais no <i>tile</i> MODIS estudado, durante a estação seca.	69

Figura 5.6 - δ NDVI e δ EVI na FLONA Tapajós, durante a estação seca.	71
Figura 5.7 - δ das frações do MLME e δ ρ Nir na FLONA Tapajós, durante a estação seca.....	74
Figura 5.8 - δ das bandas espectrais na FLONA Tapajós, durante a estação seca.	75
Figura 5.9 - Correlação entre as imagens de δ para a área de floresta da FLONA.	77
Figura 5.10 - Coeficiente de correlação (R) entre o EVI e as variáveis ambientais.....	79
Figura 5.11 - Coeficiente de correlação (R) entre o NDVI, GV e as variáveis ambientais.....	81
Figura 5.12 - Coeficiente de correlação (R) entre a fração NPV, Sombra e as variáveis ambientais.....	83
Figura 5.13 - Séries temporais das variáveis ambientais e fenológicas para a FLONA.	85
Figura 5.14 - Séries temporais das variáveis ambientais e fenológicas para a Torre.	85
Figura 5.15 - Quebras de tendência das séries de EVI, GV e Umidade do solo.	87
Figura 5.16 - Componente sazonalidade/BFAST para as variáveis ambientais e fenológicas, em ambos os níveis de análise.	89
Figura 5.17 - MLME aplicado às imagens HVIS.....	94
Figura 5.18 - Índices EVI, NDVI, EG e GC: imagens HVIS e MODIS-MAIAC diárias.....	96
Figura 5.19 - Índice PRI e frações MLME: imagens HVIS e MODIS-MAIAC diárias.	96
Figura 6.1 - Médias latitudinais e longitudinais do δ EVI e δ NDVI no <i>tile</i> MODIS-MAIAC estudado.	114
Figura A.1 - Médias trimestrais do dado CERES/RSDSCS <i>clear sky</i> (a) e a diferença com o dado RSDS (b).....	129
Figura A.2 - Domínios hidrogeológicos sobre o <i>tile</i> MODIS-MAIAC.....	129
Figura A.3 - δ do PRI na FLONA Tapajós, durante a estação seca.	130
Figura A.4 - Composição RGB das frações MLME médias.	130
Figura A.5 - <i>Boxplot</i> da correlação por pixel entre EVI e as variáveis ambientais, de acordo com a declividade e pedologia.	131
Figura A.6 - Exemplo do BFAST para a série de EVI no Nível 2-Torre.....	132
Figura A.7 - Magnitude dos eventos extremos de precipitação em anos anômalos.....	132

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 4.1 - Dados utilizados no trabalho em diferentes níveis de aquisição.	38
Tabela 4.2 - Dias com disponibilidade das 17 imagens HVIS selecionadas.	43
Tabela 4.3 - Reclassificação do dado TerraClass 2014.	56
Tabela 5.1 - <i>Breakpoints</i> obtidos com o BFAST em ambos os níveis de análise.	86
Tabela 5.2 - Correlação entre as componentes sazonalidade para o Nível 1 de análise.	91
Tabela 5.3 - Correlação entre as componentes sazonalidade para o Nível 2 de análise.	92
Tabela 5.4 - Coeficiente angular da regressão linear.....	97
Tabela 5.5 - Correlação de Pearson (R) entre as variáveis fenológicas ao nível local e orbital....	99
Tabela 5.6 - Diferença entre as variáveis fenológicas de agosto e setembro de 2012, para o nível local e orbital.	100
Tabela 6.1 - Resumo dos principais resultados observados no trabalho.	108
Tabela B.1 - Estatísticas das imagens de alteração líquida das variáveis fenológicas, para a área da FLONA Tapajós.....	133
Tabela B.2 - Estatísticas das imagens de correlação entre as variáveis fenológicas e ambientais, para a área da FLONA Tapajós.	136
Tabela B.3 - Série temporal extraída para a área total das imagens HVIS de 2012.....	139
Tabela B.4 - Série temporal extraída para a Copa 1 das imagens HVIS de 2012.	140
Tabela B.5 - Série temporal extraída para a Copa 2 das imagens HVIS de 2012.	141
Tabela B.6 - Série temporal extraída para a Copa 3 das imagens HVIS de 2012.	142
Tabela B.7 - Série temporal extraída das imagens diárias MODIS-MAIAC para a área da Torre km 67.	143

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ACP	Análise por Componentes Principais
AMJ	Abril, Maio e Junho
ANA	Agência Nacional de Águas
AVIRIS	<i>Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer</i>
BFAST	<i>Breaks For Additive Seasonal and Trend</i>
CERES	<i>Clouds and the Earth's Radiant Energy System</i>
DAF	Distribuição Angular de Folhas
EEA	Espessura Equivalente de Água
EG	<i>Excess Green</i>
EVI	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
FAPAR	<i>Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation</i>
FDRB	Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional
FLONA	Floresta Nacional
FRB	Fator de Reflectância Bidirecional
GC	<i>Green Chromatic Coordinate</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRACE	<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>
GV	<i>Green Vegetation</i>
HVIS	<i>Hyperspectral Vegetation Imaging System</i>
IAF	Índice de Área Foliar
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IOS	Índice de Oscilação Sul
IV	Índice de Vegetação
JAS	Julho, Agosto e Setembro
JFM	Janeiro, Fevereiro e Março
KW	Kruskal Wallis
LBA	<i>Large-scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia</i>
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
LSRT	<i>Li-Sparse Ross-Thick</i>
MAIAC	<i>Multiangle Implementation of Atmospheric Correction</i>
MLME	Modelo Linear de Mistura Espectral
MNF	<i>Minimum Noise Fraction</i>

MODIS	<i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
ND	Número Digital
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NIR	<i>Near Infrared</i>
NPV	<i>Non-photosynthetic Vegetation</i>
OND	Outubro, Novembro e Dezembro
PAR	<i>Photosynthetically Active Radiation</i>
PPB	Produtividade Primária Bruta
PPI	<i>Pixels Purity Index</i>
PRI	<i>Photochemical Reflectance Index</i>
RAA	<i>Relative Azimuth Angle</i>
REM	Radiação Eletromagnética
RGB	<i>Red, Green and Blue</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RSDS	<i>Surface Downwelling Shortwave Radiation</i>
RSDSCS	<i>Surface Downwelling Shortwave Radiation Clear-Sky</i>
SR	<i>Simple Ratio</i>
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SWIR	<i>Shortwave Infrared</i>
SZA	<i>Solar Zenith Angle</i>
TOA	<i>Top of Atmosphere</i>
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
UCT	Uso e Cobertura da Terra

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Hipóteses abordadas	3
1.2 Objetivos	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
2.1 Sensoriamento Remoto da vegetação.....	7
2.1.1 A interação da radiação eletromagnética com a vegetação.....	7
2.1.1.1 Disponibilidade de radiação solar	8
2.1.1.2 Princípios Físicos do Sensoriamento Remoto	9
2.1.1.3 Comportamento espectral da vegetação	11
2.1.2 Índices Espectrais da Vegetação	13
2.1.3 Modelo Linear de Mistura Espectral.....	17
2.2 A dinâmica da Floresta Amazônica	22
2.2.1 Disponibilidade de água.....	23
2.2.2 Eventos extremos de seca.....	24
2.2.3 Fenologia da vegetação e o <i>Green-up</i>	25
2.3 Análise de séries temporais com o pacote BFAST-R	31
3 ÁREA DE ESTUDO.....	33
4 METODOLOGIA	37
4.1 Banco de dados	38
4.1.1 Dados orbitais	39
4.1.2 Dados locais	42
4.2 Processamento dos dados orbitais.....	44
4.3 Processamento e análise dos dados locais.....	46
4.4 Seleção de <i>endmembers</i> e aplicação do MLME	49
4.5 Análise dos dados orbitais.....	52
4.5.1 Análise de séries temporais.....	53
4.5.2 Análise espacial.....	53
4.6 Conciliação das séries temporais orbitais e locais	57

5	RESULTADOS.....	59
5.1	Padrões espaço-temporais intra-anuais médios.....	59
5.2	Padrões espaço-temporais durante a estação seca.....	67
5.2.1	Mudanças no padrão fenológico em relação à média.....	67
5.2.2	Correlação entre as variáveis fenológicas e ambientais.....	78
5.3	Análise das séries temporais orbitais	84
5.3.1	Quebras de tendência interanuais.....	86
5.3.2	Comportamento intra-anual da vegetação em resposta à disponibilidade de água e radiação.....	88
5.4	Fenologia dos dosséis ao nível local	93
5.5	Fenologia dos dosséis ao nível orbital <i>versus</i> local	97
6	DISCUSSÃO	103
6.1	Análise dos resultados e fontes de incerteza	109
7	CONCLUSÃO.....	117
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	121
	APÊNDICE A - FIGURAS COMPLEMENTARES	129
	APÊNDICE B - TABELAS COMPLEMENTARES.....	133

1 INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica Amazônica transporta cerca de 20 % da descarga de água doce global e contém as maiores florestas tropicais intactas do planeta (SALESKA et al., 2009). Todo o bioma é considerado como um dos maiores tesouros biológicos e vem enfrentando fortes ameaças pelo desmatamento e estresse devido às mudanças climáticas (MALHI et al., 2008).

Florestas tropicais de tamanha magnitude são muito mais que aglomerados de árvores e repositórios de biodiversidade, tratam-se também de grandes reservatórios de carbono, que interagem dinamicamente com o ambiente e condicionam o clima (NOBRE, 2014). As superfícies vegetadas nas regiões tropicais contribuem com a manutenção de massas de ar úmidas, tendo capacidade de transportar e gerar pelo menos o dobro de precipitação do que áreas sem cobertura florestal (ARAGÃO, 2012; SPRACKLEN et al., 2012).

Dessa forma, compreender o comportamento dos ecossistemas inseridos no bioma Amazônia, e seus fluxos de energia, água e carbono, como também os mecanismos ecológicos e climáticos atuantes, é determinante na previsão futura do destino destes sistemas, que estão sob crescente pressão humana (SALESKA et al., 2009). Simultaneamente, diferentes regiões da Amazônia demonstram grande vulnerabilidade aos eventos de oscilação climática, como o El Niño, aumentando a ocorrência de secas (ARAGÃO et al., 2007), que por sua vez aumentam significativamente o número de queimadas, mesmo com a queda nas taxas de desmatamento (ARAGÃO et al., 2008). Este cenário se agrava ao se considerar as previsões de secas mais frequentes e severas (MALHI et al., 2008), aumentando a preocupação com a resiliência da floresta em tais condições.

A disponibilidade de água e radiação, como também os nutrientes presentes no solo, são as variáveis responsáveis por regular os processos de fotossíntese e respiração, assim, suas oscilações sazonais e interanuais interferem nos ciclos biogeoquímicos da floresta e na sua capacidade de armazenar carbono (SALESKA et al., 2003).

Neste contexto, nas últimas décadas, diversos trabalhos vêm estudando o comportamento da Floresta Amazônica, integrando dados em diferentes níveis de

aquisição, porém, gerando resultados bastante contraditórios. Como o principal intuito dos atuais estudos é também testar a vulnerabilidade da floresta a eventos extremos e sua propensão ao colapso (SALESKA et al., 2009), é importante o consenso nesta linha de pesquisa. Afinal, segundo Saleska et al. (2009), historicamente, os modelos simulam que as florestas apresentam declínio em sua capacidade fotossintética em eventos de seca, no entanto, este comportamento está sendo confrontado, com argumentos amparados, tanto em medições feitas em torres de fluxo, quanto em observações orbitais de alta frequência de revisita.

O uso de bioindicadores espectrais, como os índices de vegetação, demonstra o potencial dos dados obtidos por sensoriamento remoto, que proporcionam o acesso a medidas da eficiência fotossintética das florestas na escala dos ecossistemas e dos dosséis vegetativos (THENKABAIL et al., 2011). Isso é possível devido à interação da vegetação com a radiação eletromagnética (REM) solar, gerando respostas características para os diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético.

O índice de vegetação (IV) *Enhanced Vegetation Index* (EVI) é associado à concentração de clorofila e à área foliar da vegetação (SALESKA et al., 2007). Este IV, gerado com o sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), foi utilizado por Huete et al. (2006) como indicador da fenologia de toda a Floresta Amazônica, para os anos de 2000 a 2005. Os resultados mostraram um aumento significativo do EVI durante a estação seca em áreas de floresta intacta (efeito *Green-up*), principalmente na parcela oriental, cujos períodos secos são mais longos (região da Floresta de Tapajós), enquanto as áreas de pastagens apresentaram declínio no EVI. Tal comportamento foi associado ao aumento da capacidade fotossintética das florestas na estação seca, por possuir maior radiação solar disponível, inferindo assim que as raízes profundas das árvores garantem o acesso à água, o que não ocorre após a conversão da floresta para pastagem (HUETE et al., 2006).

O trabalho de Huete et al. (2006) demonstrou a capacidade do sensoriamento remoto de investigar, em uma escala extensiva, um comportamento já abordado por Saleska et al. (2003), no qual a análise pontual de torres de fluxo de carbono

na Amazônia Equatorial apresentou aumento no sequestro de carbono durante a estação seca, associado à diminuição da respiração do ecossistema.

De forma contraditória, um recente estudo realizado por Morton et al. (2014), indica que o *Green-up* da Amazônia, registrado pelos dados orbitais, é resultado da sazonalidade da fração absorvida de radiação fotossinteticamente ativa (FAPAR) (do inglês *Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation*), como consequência da própria disponibilidade de radiação fotossinteticamente ativa (PAR) (do inglês *Photosynthetically Active Radiation*) aumentar entre o solstício de junho e o equinócio de setembro, influenciando diretamente no EVI. Isto foi, de certa forma, indicado também por Galvão et al. (2011), pois em seu estudo o aumento da radiação solar, refletida principalmente na direção do sensor, reduziu as frações de áreas sombreadas durante a estação seca, conferindo o aumento do EVI. Assim, para Morton et al. (2014) o *Green-up* do EVI MODIS seria um artefato produzido pela geometria do Sol-sensor na aquisição das imagens e não uma mudança estrutural da vegetação, de forma que se os dados forem corrigidos tal sazonalidade não é observada.

Portanto, dentro desta abordagem, o presente trabalho buscou contribuir integrando dados em diferentes escalas espaciais, para avaliar o comportamento sazonal da vegetação em resposta aos mecanismos atuantes e essenciais à fotossíntese. Foram utilizados também dados do sensor MODIS, porém, processados com um novo algoritmo de correção atmosférica, normalização do ângulo de aquisição e de iluminação das imagens, (HILKER et al., 2014) e um dado local hiperespectral. O estudo foi realizado na Floresta Nacional (FLONA) do Tapajós, no Estado do Pará (PA), uma área extensa de floresta primária, circundada por diferentes usos da terra e de estação seca mais longa que as demais regiões da Amazônia.

1.1 Hipóteses abordadas

A hipótese nula (H₀) do presente trabalho, em relação às características ecofisiológicas da FLONA Tapajós, baseou-se no resultado observado por (MORTON et al., 2014): os dosséis da Amazônia mantêm sua estrutura constante durante a estação seca, não havendo limitação pela disponibilidade de radiação ou

de água. Ao refutar tal hipótese pode-se assumir então que a floresta não mantém a estrutura dos dosséis, por ser sazonalmente limitada pelos fatores e mecanismos externos responsáveis pelo seu desenvolvimento. Neste caso, pretendeu-se compreender a variabilidade da floresta por meio de duas hipóteses não exclusivas: H1, os dosséis modificam sua estrutura na estação seca, devido à estratégia da vegetação de perder folhas diante da menor disponibilidade de água; H2, na estação seca a vegetação ganha vigor, por ser fortemente limitada pela radiação, mais abundante neste período do ano. A hipótese H1 pode não excluir H2 devido a ambas as variáveis (água e energia) serem indispensáveis para a fotossíntese, podendo, assim, resultar em um comportamento da vegetação diferente dependendo de características específicas de cada espécie, e pela resposta complexa da floresta após sofrer períodos prolongados de seca.

1.2 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho foi analisar sazonalmente a fenologia dos dosséis da FLONA Tapajós, em resposta às variáveis ambientais e ao nível de aquisição dos dados, abordando as atuais discussões a respeito do *Green-up* da vegetação durante a estação seca, de forma a testar as hipóteses citadas.

Para cumprir com o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar o percentual de alteração por pixel das variáveis relativas à fenologia nos meses da estação seca, em relação à média de todo o período (2004-2014), de forma a verificar se os dosséis mantêm sua estrutura constante.
- b) Avaliar a correlação por pixel entre as variáveis durante a estação seca, para identificar se a fenologia da vegetação tem dependência significativa da disponibilidade de água e/ou radiação.
- c) Testar se a floresta apresenta um comportamento de alteração e correlação com as variáveis ambientais significativamente diferentes dos demais usos e cobertura da terra que se encontram na região da FLONA Tapajós.

- d) Avaliar a correlação entre a sazonalidade das variáveis fenológicas e ambientais, assim como as quebras de tendência nas séries temporais durante o período de estudo (2004-2014), visando compreender a limitação pela disponibilidade de água e/ou radiação.
- e) Analisar copas individuais da FLONA Tapajós, com dados hiperspectrais obtidos na estação seca de 2012, avaliando se ocorreram mudanças estruturais nos dosséis florestais, como brotamento e perda de folhas.
- f) Avaliar a correlação entre as variáveis fenológicas obtidas com o sensor hiperspectral e obtidas com os dados diários do MODIS-MAIAC, para verificar se ambos registram o mesmo padrão.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Sensoriamento Remoto da vegetação

A produtividade primária bruta das florestas tropicais, como a Amazônica, é regulada pelos mecanismos externos atuantes, no caso, os componentes necessários para realização da fotossíntese, sendo estes principalmente: a disponibilidade de água e luz. As folhas verdes absorvem de forma seletiva a radiação solar para seu desenvolvimento, emitindo radiação de onda longa e compostos orgânicos voláteis, controlando assim seu crescimento ao regular a entrada de gás carbônico e saída de água pelos estômatos (MYNENI et al., 2007).

As técnicas de sensoriamento remoto correspondem à utilização conjunta de sensores, equipamentos para processamento e transmissão de dados, a bordo de plataformas diversas, com o objetivo de estudar eventos, fenômenos e processos que ocorrem na superfície terrestre, por meio do registro e análise das interações entre as substâncias que a compõem e a REM (NOVO, 2010).

O sensoriamento remoto da vegetação busca então compreender a “aparência” das coberturas vegetais nas imagens e produtos dos sensores. Tal comportamento é resultado de processos complexos, envolvendo diversos parâmetros estruturais, fenológicos e fotossintéticos da vegetação, fatores ambientais e fatores externos relativos aos sensores utilizados. Além disso, a complexidade se torna maior ao estudar áreas com densa vegetação, já que os dosséis são constituídos por muitos estratos e elementos, como: folhas, galhos, frutos, flores, etc. (PONZONI, 2002).

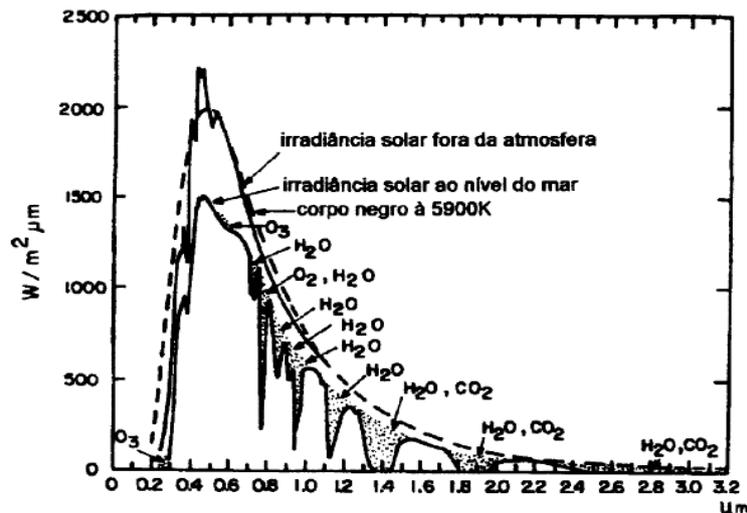
2.1.1 A interação da radiação eletromagnética com a vegetação

A produção primária bruta da vegetação é diretamente proporcional ao fornecimento de energia solar (WRIGHT; VAN SCHAİK, 1994) e como a radiação eletromagnética (REM) é absorvida de forma seletiva, é interessante entender os mecanismos que interagem com os diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético.

2.1.1.1 Disponibilidade de radiação solar

A REM emitida pelo Sol (Figura 2.1) é a fonte de energia na aplicação do sensoriamento remoto passivo e sua distribuição varia desde os comprimentos de onda muito curtos (raios gama) do espectro eletromagnético até os muito longos (ondas de rádio). Aproximadamente 8,7 % da REM solar é emitida na faixa do ultravioleta e ondas mais curtas (<400 nm); 38,2 % na faixa no visível, sendo a radiação detectada pelo olho humano (400 a 700 nm); 22,6 % na faixa do infravermelho próximo (NIR) (700 a 1.000 nm - do inglês *Near Infrared*); e 30,5 % no infravermelho médio (SWIR) em diante (>1.000 nm - do inglês *Shortwave Infrared*). Devido à temperatura do Sol ser da ordem de 6.000 K, o comprimento de onda de máxima emissão é na região do visível (LORENZZETTI, 2015).

Figura 2.1 - Fontes de REM e componentes de atenuação atmosférica.



Fonte: Steffen et al. (1996).

A quantidade de energia por unidade de tempo e por unidade de área, denominada irradiância ($W.m^{-2}$), decresce com o quadrado da distância solar, sendo que a distância Sol/Terra varia de 146 a 152 milhões de quilômetros ao longo do ano. Se considerarmos uma distância média, a irradiância solar integrada em todo o espectro, que chega ao topo da atmosfera terrestre (TOA) (do inglês *Top of Atmosphere*), para uma superfície horizontal, é de $1.367 W.m^{-2}$. Porém, ao longo do ano, devido à órbita elíptica da Terra, este valor sofre uma variação de até 3,5 % (LORENZZETTI, 2015).

A Figura 2.1 apresenta a irradiância solar no TOA e na superfície terrestre, além da curva de emissão de um corpo negro ideal à temperatura solar. Os comprimentos de onda onde a curva da superfície sofre forte decréscimo correspondem às bandas de atenuação atmosférica por espalhamento ou absorção (STEFFEN et al., 1996). A transmitância atmosférica é bastante alta no visível, sendo que para uma atmosfera livre de nuvens as perdas de REM são causadas por espalhamento molecular e aerossóis. Para os comprimentos de onda até 300 nm ocorre a absorção da radiação pelo ozônio, já de 300 a 400 nm predomina o espalhamento atmosférico, que produz grande quantidade de luz difusa. Do NIR em diante existem várias bandas de absorção pelas moléculas de água e dióxido de carbono e também várias janelas atmosféricas, no qual as bandas espectrais dos sensores geralmente são posicionadas para monitorar a superfície terrestre (LORENZZETTI, 2015).

Assim, a intensidade e distribuição espectral da REM na superfície terrestre dependem da composição atmosférica, distância Sol/Terra e do ângulo zenital solar (entre a vertical de um ponto e a direção de incidência da radiação), sendo que este último varia com a latitude, dia do ano e horário. Devido à inclinação de aproximadamente $23^{\circ}56'$ do eixo rotacional da Terra, o ângulo zenital solar (SZA) (do inglês *Solar Zenith Angle*) varia ao longo do ano de acordo com um parâmetro definido como declinação solar, que define a latitude que recebe máxima irradiância, cujos respectivos dias do ano também são mais longos que as demais latitudes. Isto ocorre para o Trópico de Câncer ($23^{\circ}5'$ N) no solstício de verão do hemisfério norte, em 22 de junho, e para o Trópico de Capricórnio ($23^{\circ}5'$ S) no solstício de verão do hemisfério sul, em 22 de dezembro. A declinação solar é considerada igual a zero nos períodos chamados de equinócios, em 21 de março e 22 de setembro, ou seja, nestes períodos do ano o Equador recebe a maior radiação solar e todas as latitudes possuem dias de duração igual a 12 horas (LORENZZETTI, 2015). O SZA também é influenciado pelo ângulo horário.

2.1.1.2 Princípios Físicos do Sensoriamento Remoto

Os alvos na superfície terrestre são iluminados por todo o hemisfério pelas componentes direta e difusa da irradiância solar. As interações da REM com o

alvo faz com que parte desta energia seja refletida, de forma direta ou após sofrer múltiplo espalhamento. Além disso, os alvos naturais não são superfícies perfeitamente difusoras (lambertianas), assim, o fluxo refletido pode variar com a direção (MILTON, 1987).

A energia incidente na superfície e a energia refletida de volta para o sensor, estão confinadas em dois cones alongados, definidos como ângulos sólidos (MILTON, 1987). Os sensores medem justamente o fluxo radiante emergente, por unidade de área e unidade de ângulo sólido, sendo esta a grandeza radiométrica: radiância (NOVO, 2010). Assim, quanto maior a irradiância maior também a radiância, o que inviabiliza a caracterização espectral de um objeto somente por esta grandeza (PONZONI, 2007). Se considerarmos que os dois ângulos sólidos em questão sejam infinitesimais a reflectância bidirecional do alvo pode ser definida como a razão da sua radiância pela irradiância solar. Como essas duas grandezas variam em azimute e em zênite, a reflectância total do alvo seria a reflectância obtida em todas as posições geométricas de aquisição possíveis, resultando na função de distribuição de reflectância bidirecional (FDRB) (MILTON, 1987). A reflectância espectral define-se então como a fração do fluxo total refletido pelo fluxo total incidente, em um dado comprimento de onda, sendo uma propriedade dependente da interação entre a energia e a matéria (NOVO, 2010). Define-se Fator de Reflectância Bidirecional (FRB): a razão entre a radiância de um alvo, pela radiância de uma placa de referência lambertiana ideal, ambas obtidas com ângulo de abertura pequeno ($<15^\circ$), em mesma geometria de aquisição e iluminação. Sendo este um artifício matemático utilizado para a caracterização espectral dos alvos, diante da dificuldade de se obter de forma direta a medida de irradiância solar que chega no alvo (STEFFEN et al., 1996).

No sensoriamento remoto a energia pode ser detectada por sensores como radiômetros e espectrorradiômetros. A distinção entre os dois tipos é o detalhamento espectral, no qual, os radiômetros possuem faixas espectrais limitadas e mais largas, assim, os espectrorradiômetros possuem melhor resolução espectral. A radiação refletida para o sensor é direcionada para um conjunto de detectores que irão quantificar sua intensidade, sendo esta referente a todos os objetos dentro do elemento de resolução espacial. Esta resolução no espaço é

diretamente relativa ao tamanho das pastilhas metálicas dos detectores e à quantidade de energia necessária para sensibilizá-los (PONZONI, 2007). Nas faixas espectrais em que a radiância da superfície é muito baixa essa área considerada deve ser maior, ou seja, ter menor resolução espacial.

Os sensores imageadores produzem imagens bidimensionais da radiância dos alvos, assim, registram a variação espacial da REM resultante da interação com a superfície (NOVO, 2010), gerando imagens pictóricas, onde a radiância é discretizada em valores (Número Digital - ND), de intervalos múltiplos de 2 (níveis de cinza), compatíveis com o processamento por computadores. Esses intervalos definem a resolução radiométrica dos sensores: capacidade de discretizar variações nos níveis de energia detectada. As imagens pictóricas em números digitais possuem informação meramente qualitativa, que permite distinguir os objetos no terreno, mas não permitem a caracterização espectral dos alvos. Estes valores podem ser convertidos para as grandezas físicas de radiância ou de reflectância por meio da calibração radiométrica, permitindo análises quantitativas dos alvos (PONZONI, 2007).

2.1.1.3 Comportamento espectral da vegetação

Os pigmentos fotossintetizantes de uma única folha verde sadia absorvem a radiação eletromagnética no espectro visível, estando presentes geralmente nos cloroplastos: clorofila (65%); xantofilas (29%); e carotenos (6%) (STEFFEN et al., 1996). A clorofila absorve fortemente a radiação na região espectral do vermelho, na região do azul ocorre também grande absorção pelos demais pigmentos. A energia absorvida nestas faixas é convertida em calor ou fluorescência e em compostos orgânicos, sendo armazenados através da fotossíntese. No infravermelho próximo a radiação é fortemente espalhada e interage com a estrutura interna foliar, sendo que quanto mais lacunoso o interior das folhas, maior a reflectância. Porém, no infravermelho médio a REM é absorvida pelas moléculas de água, assim, a reflectância é afetada principalmente pelo teor de umidade da vegetação (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

O comportamento espectral da vegetação se modifica também ao longo do seu ciclo de vida e os impactos que suas alterações fenológicas, e morfológicas, têm

sobre sua resposta espectral variam de acordo com: a faixa espectral; com o tipo de vegetação; e com o ângulo de visada do sensor. Na região espectral do vermelho a reflectância é pouco alterada por estas variáveis, porém, no infravermelho próximo as alterações são bastante expressivas (NOVO, 2010).

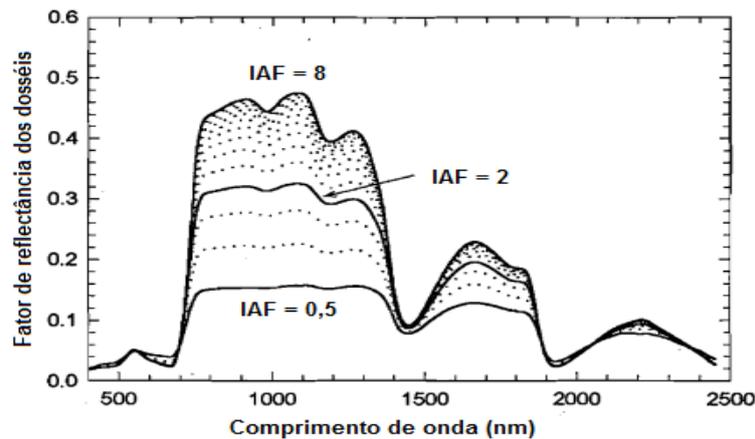
A produção de clorofila e o percentual de água aumentam rapidamente com o desenvolvimento das plantas, até estas atingirem sua maturação, e depois diminuem até que a coloração verde já não exista e a folha esteja em estágio de senescência avançado (KUMAR, 1974). Sendo assim, folhas senescentes são fotossinteticamente menos eficientes que folhas novas, também devido à cobertura por epífitas e por possuírem um controle estomático deficiente (MINENY 2007).

Conforme a vegetação perde água, durante seu ciclo de vida, ocorrem alterações na reflectância em diferentes comprimentos de onda, acompanhadas da suavização das feições de absorção pela água, entre 1,3 μm e 1,5 μm , e 1,9 μm e 2,0 μm . A perda de água acarreta fenômenos físico-químicos nas folhas, contribuindo com a degradação de proteínas e de pigmentos fotossintetizantes, o que torna a folha menos apta a absorver a REM e realizar a fotossíntese, conseqüentemente, a reflectância aumenta na faixa do visível. Na região do infravermelho próximo a saída de água promove alterações na estrutura interna das folhas, sendo isto dependente: da densidade das paredes celulares, da arranjo das células dentro dos tecidos foliares e do tempo de manutenção do teor de umidade. No caso da reflectância aumentar nesta faixa espectral com a perda de água, uma explicação seria que as células podem se tornar mais prismáticas, formando faces críticas ao desvio da trajetória da REM. No entanto, resultados diferentes podem ser observados, diminuindo a reflectância no infravermelho próximo com a saída de água, neste caso, um colapso na estrutura interna das folhas pode torná-las mais compactas, o que resultaria em um menor espalhamento interno da REM (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

Os dosséis vegetativos possuem comportamento espectral análogo ao de uma folha isolada, porém, neste caso ocorre o espalhamento múltiplo da radiação. O aumento de camadas de folhas (Figura 2.2), expresso pelo índice de área foliar (IAF), fornece maior quantidade de pigmentos fotossintetizantes para absorção da

radiação no visível; maior densidade de espaços para espalhamento no infravermelho próximo; e, maior oferta de água no conjunto, diminuindo a reflectância no infravermelho médio. Porém, o IAF altera a reflectância do dossel somente até um ponto de saturação, acima do qual o aumento de IAF não aumenta o espalhamento no infravermelho próximo e nem a absorção na faixa espectral do vermelho (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

Figura 2.2 - Efeitos da mudança de IAF na reflectância dos dosséis vegetativos.



Fonte: Adaptado de Asner (1998).

A resposta espectral da vegetação também pode ser afetada pela arquitetura dos dosséis e pelo tipo de substrato presente (NOVO, 2010). A interação da REM nos dosséis florestais, detectada pelos sensores, não depende somente das propriedades de espalhamento e de absorção dos elementos da vegetação, mas também da densidade e distribuição angular das folhas (DAF). Quando a fonte de iluminação está posicionada exatamente atrás do sensor, esta geometria de aquisição é denominada como *hotspot*, no qual, será detectada a maior proporção de componentes da vegetação iluminados diretamente e as sombras presentes nos dosséis serão escondidas pela folhagem iluminada, conseqüentemente, a reflectância será maior (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

2.1.2 Índices Espectrais da Vegetação

A característica multi e hiperespectral dos sensores imageadores permite que as imagens possam ser transformadas radiometricamente para gerar novos produtos de sensoriamento remoto, através da combinação e transformação das bandas espectrais, sendo uma alternativa para a apresentação e interpretação da

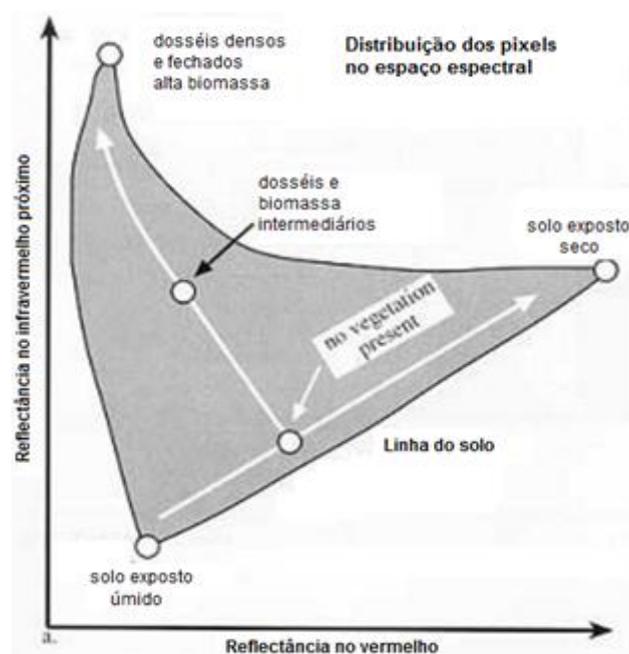
informação. É importante realçar a necessidade das imagens estarem convertidas em FRB para a realização de tais transformações, pois os números digitais não estão em uma mesma escala radiométrica em cada banda. A correção atmosférica também é importante, pois o espalhamento adiciona radiância de forma diferente para as faixas espectrais (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010). Este processamento pode ser realizado para estudar aspectos mais relevantes da vegetação, por exemplo, extraindo informações biofísicas dos dados digitais e realçando informações não visíveis nos dados originais. Para tanto, usualmente utilizam-se os IVs, sendo medidas radiométricas adimensionais, que indicam e quantificam a biomassa verde, porcentagem de cobertura foliar, teor de clorofila e radiação fotossinteticamente absorvida (JENSEN, 2011).

Alguns IVs orientados ao estudo da estrutura da vegetação utilizam a combinação de reflectância (ρ) das bandas espectrais do NIR e vermelho (RED), como o *Simple Ratio* (SR), que consiste na razão entre as duas bandas (THENKABAIL et al., 2011). O uso das bandas mencionadas fundamenta-se no comportamento antagônico da reflectância da vegetação e da influência do aumento de IAF nessas faixas espectrais, como já observado na Figura 2.2 (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010). O IV *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) também utiliza a mesma combinação de bandas, no entanto, trata-se de um índice normalizado (Equação 2.1), o que reduz o impacto do espalhamento atmosférico e dos efeitos topográficos (THENKABAIL et al., 2011). O NDVI é bastante utilizado como indicativo da atividade fotossintética da vegetação, porém, satura com altos valores de IAF, além de variar com o ângulo de visada do sensor e com o substrato (HUETE et al., 1997). Os valores do NDVI variam de -1 a 1 e quanto maior o índice maior é a proporção de vegetação fotossinteticamente ativa. No entanto, em áreas florestais densas, como as florestas primárias, que podem apresentar a saturação da reflectância, ou influência da presença de sombras, em qualquer uma das bandas espectrais, essa relação pode se inverter, resultando então em valores de NDVI mais baixos do que os provenientes de florestas secundárias (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (2.1)$$

Isso fica claro ao observar a Figura 2.3, que apresenta um exemplo de gráfico bidimensional da distribuição de pixels nas faixas espectrais do NIR e RED, representando as propriedades espectrais de objetos frequentemente encontrados em uma cena. Assim, os pixels com as proporções mais puras de vegetação, água e solo aparecem nas extremidades da distribuição. Devido ao posicionamento da feição vegetação na Figura 2.3, ao fazer a razão entre as bandas (NIR/RED), o resultado será: quanto maior a proporção de vegetação nos pixels, maiores serão os valores obtidos (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

Figura 2.3 - Gráfico de espalhamento bidimensional da distribuição de pixels no NIR e RED de uma cena aleatória.



Fonte: Adaptado de <http://droughtview.arizona.edu/science-behind-droughtview>.

O EVI foi formulado por Huete et al. (1997) e incluiu: a correção do substrato, ao adicionar o coeficiente ($L=1$), e a correção do espalhamento atmosférico, através da adição da reflectância da banda do azul (BLUE) (THENKABAIL et al., 2011). Na equação do EVI (Equação 2.2) também foi adicionado o coeficiente G, sendo um fator de ganho ajustado a 2,5 e as constantes C1 e C2, que discretizam o uso das bandas do vermelho e do azul, correspondendo a 6 e 7,5, respectivamente. O EVI mostra melhora na sensibilidade em regiões de alta biomassa, permitindo um monitoramento mais satisfatório da vegetação (JENSEN, 2011). Porém, de acordo com Galvão et al. (2011), por não ser um índice normalizado, é influenciado pelos efeitos topográficos e pelo ângulo de iluminação na aquisição da imagem. Além

disso, o fator L foi atribuído originalmente para um ambiente semiárido, ou seja, um ambiente mais influenciado pelo substrato, sendo que em regiões de florestas densas e de dosséis fechados, ao considerar L=0, os valores de EVI se mostram sazonalmente menos afetados pelo ângulo de iluminação (GALVÃO et al., 2011).

$$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C1 * \rho_{RED} - C2 * \rho_{BLUE} + L} \quad (2.2)$$

A análise temporal de índices calculados somente com as bandas espectrais referentes ao visível também pode indicar mudanças estruturais nos dosséis vegetativos (LOPES et al., 2016). A transformação da banda verde (GREEN) pela Equação 2.3, retornando o índice *Green Chromatic Coordinate* (GC) e do índice *Excess Green* (EG) (Equação 2.4), foram utilizados por Lopes et al. (2016) na Amazônia Central, permitindo a identificação de copas com diferentes densidade de folhas e eventos de brotamento de folhas novas. Mesmo que o índice GC apresente valores mais baixos em dosséis florestais com menor quantidade de folhas ele ainda não pode ser um indicativo direto de densidade, pois o GC também é influenciado pela coloração das folhas. Dessa forma, a alteração gradual da coloração das folhas com sua idade é o grande desafio na utilização de índices RGB (somente com as bandas do visível) para a análise fenológica. O índice EG é um índice alternativo, porém pode ser ruidoso por não ser normalizado (LOPES et al., 2016).

No entanto, um aumento abrupto na série temporal do índice GC, calculado para uma copa individual, indica rápida produção de folhas novas. Assim como uma queda abrupta pode ser seguramente associada à uma perda rápida de folhas, entrando em um estado decíduo/semidecíduo, ou no estágio inicial do brotamento, quando as folhas novas podem estar ainda avermelhadas por falta de clorofila (LOPES et al., 2016).

$$GC = \frac{GREEN}{RED + GREEN + BLUE} \quad (2.3)$$

$$EG = 2 * GREEN - (RED + BLUE) \quad (2.4)$$

Os índices mencionados até aqui podem ser calculados através de dados obtidos por sensores com bandas espectrais largas (>10 nm), ou sensores hiperespectrais,

de bandas estreitas (<10 nm) e contínuas. Porém, diversos índices bioquímicos e fisiológicos das plantas são estritamente hiperespectrais, requerendo bandas centradas em regiões específicas do espectro, relativas à absorção por elementos da vegetação. Por exemplo: índices relativos à umidade dos dosséis e ao estresse hídrico da vegetação requerem bandas associadas com a absorção pela água, como em 970 e 1200 nm; já índices associados à concentração de lignina e celulose utilizam o infravermelho de ondas curtas (1100 a 2500 nm); em contraste, os pigmentos fotossintéticos absorvem na região do visível e do ultravioleta, com bandas distintas, porém sobrepostas, assim, IVs sensíveis à concentração dos pigmentos frequentemente incluem combinações das bandas do visível. A formulação de IVs que utilizam bandas espectrais estreitas se deu originalmente por meio da espectrometria laboratorial, no entanto, podem ser aplicados para dados de outros sistemas mediante alterações (THENKABAIL et al., 2011).

Os sistemas hiperespectrais oferecem inúmeras possibilidades alternativas para o cálculo de IVs, com faixas espectrais mais estreitas ou mais largas, para a integração, que podem ser exploradas. Exemplo de tal aplicação é o Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI) (do inglês *Photochemical Reflectance Index*), sensível aos pigmentos carotenoides, amplamente utilizado e concebido por capturar a transição de violaxantina a zeaxantina, que ocorre devido à incapacidade das plantas de utilizar a REM absorvida pela clorofila. Trata-se de um dos IVs mais eficientes em retratar o estresse e a fisiologia da vegetação. Esta transição resulta em uma diminuição sutil (<1%) na reflectância a 531 nm, que pode ser quantificada utilizando um índice de diferença normalizada com a banda de referência em 570 nm (Equação 2.5). Assim, valores de PRI mais negativos referem-se ao aumento do estresse da planta (THENKABAIL et al., 2011).

$$PRI = \frac{\rho_{531} - \rho_{570}}{\rho_{531} + \rho_{570}} \quad (2.5)$$

2.1.3 Modelo Linear de Mistura Espectral

Como já mencionado, o registro da radiância pelos sensores é proveniente da mistura espectral dos objetos presentes dentro do elemento de resolução espacial, costumeiramente chamado de pixel. Assim, o valor associado a cada pixel da imagem representa a radiância média dos alvos da superfície (em uma dada banda

espectral) mais a interferência da atmosfera pelos fenômenos de absorção e espalhamento, sendo dependente também das características de resolução espacial e espectral do próprio sensor. O modelo linear de mistura espectral (MLME) trata-se de uma combinação linear das respostas espectrais de cada componente presente na mistura, sendo necessário aplicar algoritmos de inversão de modelos para estimar sua proporção. A combinação linear necessita da curva espectral (de reflectância) de cada componente considerado no MLME, que é obtida com a identificação de “pixels puros” (*endmembers*) na cena, sendo pixels que contenham somente um dos componentes (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

De acordo com Lu et al. (2003) o modelo matemático do MLME pode ser definido pela Equação 2.6, onde: ($i=1, \dots, m$) é o número de bandas espectrais consideradas; ($k=1, \dots, n$) é o número de *endmembers* do modelo; f_k é a proporção do componente k dentro do pixel; R_i é a reflectância espectral da banda i , que contém um mais componentes presentes; R_{ik} é a reflectância espectral do *endmember* k , dentro do pixel e para a banda i ; e ε_i é o erro na banda i . Para a solução do modelo existe a restrição de que o somatório de f_k para o pixel esteja entre 0 e 1 (LU et al., 2003).

$$R_i = \sum_{k=1}^n f_k R_{ik} + \varepsilon_i \quad (2.6)$$

O resultado da aplicação do MLME são imagens fração, representando a proporção de cada componente de mistura espectral por pixel, e uma imagem de erro. Este produto pode ser tratado como uma forma de redução da dimensionalidade dos dados e também de realce das informações, ou seja, imagens fração de vegetação irão realçar áreas de cobertura vegetal (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

A imagem erro ou imagem RMSE (*Root Mean Square Error*), obtida do processamento com o MLME, tem como função principal indicar a qualidade dos *endmembers* utilizados no modelo. Pixels escuros indicam baixo valor de RMSE, relativos a pixels modelados corretamente, enquanto que pixels brilhantes demonstram um valor mais alto de RMSE, provavelmente causado pelo uso de *endmembers* inapropriados ao modelo de mistura. Outros fatores contribuem para

que os valores de erro sejam mais elevados, tal como a ausência de um importante *endmember* para modelar o pixel (FERREIRA, 2003).

De acordo com os dados utilizados, existe uma série de etapas complementares que podem ser empregadas anteriormente à seleção de *endmembers* e à aplicação do MLME, como: o pré-processamento das imagens, com correção atmosférica e calibração radiométrica; a redução da dimensionalidade dos dados, através da Análise por Componentes Principais (ACP) e/ou Eliminação de Ruídos (MNF) (do inglês *Minimum Noise Fraction*); utilização de um Índice de Pureza dos Pixels (PPI) (do inglês *Pixels Purity Index*) (FERREIRA, 2003). A redução da dimensionalidade dos dados é uma etapa importante na utilização de imagens hiperespectrais, devido à relação sinal/ruído e à redundância/correlação das bandas espectrais estreitas. O algoritmo do PPI analisa repetidamente o espectro de todos os pixels da imagem e separa aqueles menos redundantes, com base em um limiar, identificando os candidatos a *endmembers* (KUMAR et al., 2007).

Diferentes metodologias podem ser aplicadas na seleção de *endmembers*, por exemplo: a utilização de bibliotecas espectrais, como as disponibilizadas por pacotes no software ENVI; medidas de reflectância em campo ou em laboratório; espectros obtidos na própria imagem ou por meio de autovetores de maior ordem da ACP; seleção manual dos espectros analisados de PPI; seleção manual após a análise exploratória do espaço de atributos da imagem; e a combinação da imagem com métodos de seleção de *endmembers* de referência, incluindo o alinhamento dos *endmembers* da imagem com os espectros de referência através de uma calibração relativa (LU et al., 2003).

Para a Floresta Amazônica, na região de Rondônia, Lu et al. (2003) utilizaram *endmembers* relativos aos componentes sombra, solo e vegetação verde (GV) (do inglês *Green Vegetation*) em imagens TM/Landsat, para então aplicar outros métodos de classificação, identificando diferentes estágios sucessionais secundários da floresta, de forma satisfatória. Os *endmembers* de sombra, solo e GV foram obtidos pela análise exploratória do espaço de atributo das bandas, como exemplificado na Figura 2.3. O número de *endmembers* considerados é dependente da aplicação, dimensionalidade dos dados, números de bandas espectrais das imagens e da variabilidade dos componentes presentes na cena,

podendo ser obtido por métodos estatísticos como a ACP, porém, para imagens TM/Landsat, por exemplo, geralmente são considerados 3 ou 4 *endmembers* (LU et al., 2003).

Para mapear frações de cobertura florestal da Amazônia com o dado MODIS, Lu et al. (2011) também utilizaram os *endmembers* de GV, sombra e solo, após transformar as 6 primeiras bandas do sensor com o MNF, obtendo aproximadamente 99% da informação nas três primeiras bandas transformadas e não-correlacionadas, que foram então analisadas por meio de um gráfico de espalhamento. Utilizando este modelo, de três *endmembers*, as áreas urbanas, de pastagem e de vegetação em estágio inicial de sucessão podem apresentar valores altos na fração solo, durante a estação seca; assim como a água, áreas úmidas e de baixa cobertura vegetal terão valores altos na fração sombra. Dessa forma, áreas de floresta primária (que não sofreu distúrbios por desastres naturais ou por atividades humanas) e áreas de floresta em estágio sucessional avançado podem ser mascaradas utilizando baixos limiares da fração sombra e solo (LU et al., 2011). Considera-se sombra e água como sendo a mesma fração devido ao comportamento espectral semelhante destes dois componentes (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010).

O MLME também foi aplicado em imagens do sensor Hyperion em uma zona de transição Cerrado/Floresta Amazônica, no Estado do Mato Grosso, utilizando modelos com três *endmembers* (GV, solo e sombra) e dois *endmembers* (GV e sombra), por Galvão et al. (2011). Para a seleção dos *endmembers* foi utilizado o índice PPI e a análise do espaço de atributos das imagens transformadas com o MNF, permitindo identificar alta correlação negativa entre a fração sombra e o índice EVI com ambos os modelos, associada à influência do SZA no efeito *Green-up* (GALVÃO et al. 2011).

De acordo com Roberts et al. (1993) dentro da floresta podem existir ainda componentes com perda significativa de clorofila, que diminuem o contraste entre a reflectância do NIR e do vermelho, responsável pela diferenciação do componente GV do componente de solo. Estes componentes de floresta, com perda de clorofila, são identificados como Vegetação Não-fotossinteticamente Ativa (NPV) (do inglês *non-photosynthetic vegetation*), que pode incluir materiais

como: matéria orgânica seca, serapilheira, cascas, madeira e troncos (ASNER, 1998). Dependendo do sensor, e do comportamento espectral do solo da região de estudo, o NPV pode não ser distinguível do solo (ROBERTS et al., 1993). Dessa forma, do ponto de vista das assinaturas espectrais, os componentes considerados em áreas florestais são: GV, NPV, solo e sombra; e quando o NPV não é considerado a fração solo pode ser superestimada, subestimando assim a fração GV, porém, em áreas de floresta densa a fração solo é próxima a zero (LU et al., 2011).

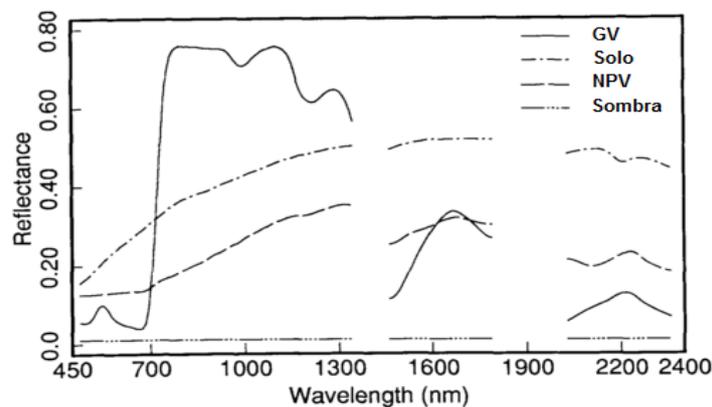
Alencar et al. (2011) aplicaram também o MLME em imagens TM e ETM⁺/Landsat para monitorar 23 anos consecutivos de cicatrizes de queimadas na Floresta Amazônica, verificando um retorno das queimadas muito mais rápido que o regime natural do fogo e a grande influência de secas severas na frequência de retorno, principalmente em áreas fragmentadas. As imagens foram calibradas com o sistema CLAS (do inglês *Carnegie Landsat Analysis System*), um modelo de mistura baseado na abordagem de Monte Carlo, que permitiu selecionar *endmembers* e determinar as frações dos componentes GV, NPV e sombra. No entanto, neste caso, a fração sombra foi associada a um *endmember* “aparente”, de reflectância igual a zero em todas as bandas espectrais, correspondente assim às áreas severamente queimadas ou que não recebem radiação. Os mapas de cicatrizes de queimadas foram obtidos por meio de um índice, formulado com a diferença normalizada das três frações obtidas (ALENCAR et al., 2011).

A presença do componente GV pode influenciar na linearidade da mistura espectral dos pixels, devido à transmissão e espalhamento da radiação no NIR, fazendo com que ela interaja com diferentes tipos de materiais ao mesmo tempo. Assim, a não-linearidade do modelo, e também a presença do componente NPV, podem tornar a interpretação da mistura espectral mais complexa (ROBERTS et al., 1993).

A Figura 2.4 apresenta um exemplo das curvas espectrais de *endmembers* correspondentes aos componentes GV, solo e NPV, com base na resposta do *Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer* (AVIRIS), e de sombra/água, assumindo 1% de reflectância em todas as bandas espectrais (ROBERTS et al., 1993).

Com a utilização de sensores hiperespectrais, as curvas ganham detalhamento devido ao grande número de bandas estreitas e contínuas, o que melhora a caracterização espectral dos alvos e permite a identificação de bandas de absorção, porém, isso aumenta a quantidade de equações lineares para a inversão do modelo. É possível observar na Figura 2.4 o aumento de reflectância na região espectral do visível nos componentes NPV e solo, devido à perda dos pigmentos fotossintetizantes, assim como o menor contraste entre o visível e NIR em relação ao componente GV. Porém, é evidente também que o NPV e o solo possuem espectros mais semelhantes entre si que os demais componentes, além de apresentarem aumento da reflectância no SWIR, devido à perda de água.

Figura 2.4 - Exemplo de *endmembers* obtidos com o sensor AVIRIS.



Fonte: Adaptado de Roberts et al. (1993).

2.2 A dinâmica da Floresta Amazônica

Durante a fotossíntese, o dióxido de carbono (CO_2) é removido da atmosfera e fixado na forma de carboidratos, que por sua vez fornecem energia para os processos bioquímicos de crescimento, reprodução e acumulação de biomassa. Nos ecossistemas terrestres o CO_2 retorna para a atmosfera como um produto do processo de respiração das plantas ou microrganismos do solo. Dessa forma, um ecossistema é referido como um sumidouro de carbono se a entrada de CO_2 for superior à saída (THENKABAIL et al., 2011). Os ecossistemas inseridos no bioma Amazônia são considerados como grandes sumidouros de carbono (NOBRE, 2014), portanto, entender sua dinâmica sazonal e espacial, e os fatores que controlam essas variações, é essencial para compreender e prever sua resiliência a mudanças ambientais e climáticas.

2.2.1 Disponibilidade de água

Sobre toda a extensão da Floresta Amazônica é esperada a existência de um complexo mosaico fenológico, devido às diferenças na estrutura e composição dos dosséis, associadas com as condições geomorfológicas e pedológicas, assim como com as variações nos regimes de precipitação e radiação (ANDERSON, 2012). Da mesma forma, e devido a essas mesmas condições, existe um mosaico fenológico da Floresta Amazônica, que responde de forma divergente durante períodos críticos de disponibilidade de água (SILVA, 2013).

Por exemplo, os padrões temporais da produção de folhas nas florestas de terra firme, na Amazônia, são mais difíceis de distinguir do que os padrões das áreas de Várzeas e Igapós, devido à falta de um evento forte para marcar ou homogeneizar um sinal que se correlacione com a resposta da vegetação, como os eventos de inundação podem causar. Períodos de baixa precipitação podem ser utilizados como estes eventos, porém, o que dificulta é não existir uma padronização na definição da estação seca (ANDERSON, 2012).

O período comumente utilizado na literatura para definir a estação seca na Amazônia é de julho a setembro (HUETE et al., 2006; BRANDO et al., 2010), porém, ocorrem padrões sazonais de precipitação bastante diferentes em toda a área do bioma, principalmente devido à sua grande extensão.

A estação seca pode ser caracterizada então pelo período em que a evapotranspiração da floresta excede a precipitação (déficit hídrico), diminuindo a disponibilidade de umidade no solo para as plantas, no qual tem sido considerado o limiar de 100 mm por mês, sendo este um valor médio de transpiração dos dosséis das florestas amazônicas (ARAGÃO et al., 2007).

Moura et al. (2015) utilizaram o déficit hídrico para definir a estação seca sobre a área da Floresta Amazônica de 1998 a 2012. Observou-se elevado déficit hídrico no norte da Amazônia entre janeiro e março, correspondente à estação seca do hemisfério norte, enquanto o período de maio a agosto marca a estação seca de grande parte da região situada no hemisfério sul. O maior déficit hídrico observado ocorreu nos meses de junho e julho, na borda sudeste da Amazônia,

enquanto o menor ocorre em março, com precipitação excedendo os 100 mm, por quase toda a bacia Amazônica (MOURA et al., 2015).

2.2.2 Eventos extremos de seca

Os biomas brasileiros são constantemente afetados por secas extremas (ALHO; SILVA, 2012; SANTOS et al., 2014; DE NYS et al., 2016; MARENGO; ESPINOZA, 2016; MACHADO; ARAGÃO, 2017, no prelo). No caso da Amazônia, o El Niño, associado com a fase negativa do Índice de Oscilação Sul (IOS), coincide com a redução de precipitação amazônica, principalmente na região norte e central, de forma contrária, os eventos de La Niña geram anomalias opostas nestas regiões (ANDERSON, 2012).

Durante o El Niño, que iniciou no verão austral de 2010, ocorreu uma forte seca na Amazônia, que se tornou mais intensa durante o La Niña no inverno austral, seguindo até a primavera. As regiões centro-norte e centro-sul da Amazônia Legal Brasileira, cobrindo o Estado de Roraima e Mato Grosso, foram as mais afetadas pela seca de 2010, já durante a forte seca de 2005 as regiões mais afetadas foram as situadas no Acre (ANDERSON, 2012). Segundo Aragão et al. (2007) secas associadas ao El Niño afetam mais as regiões norte, central e leste da Amazônia, e de acordo com Brando et al. (2010) a forte seca de 2005 foi causada devido a um aquecimento anômalo do Atlântico Norte tropical.

Em 2005, durante a seca severa na Amazônia, alguns trabalhos indicaram ganho nos valores de EVI (*greening*) em relação aos anos mais chuvosos (SALESKA et al., 2007). Porém, Samanta et al. (2010) e (2011) confrontaram o *greening* da Amazônia induzido pela seca durante 2005, reportado por Saleska et al. (2007), pois, segundo os autores, corrigindo as imagens do MODIS da Coleção 4, quanto à contaminação por sombras, nuvens e aerossóis, ou utilizando a Coleção 5, não observou-se evidência de que as florestas apresentaram maior verdor em 2005, em relação aos outros anos, e nem de que a disponibilidade de radiação também foi maior para induzir este comportamento (SAMANTA et al., 2010;2011).

As conclusões de Samanta et al. (2010; 2011) foram coerentes com a grande perda de biomassa e mortalidade de árvores por estresse hídrico (PHILLIPS et al., 2009) e ocorrência de fogo (ARAGÃO et al., 2007) em 2005 na Amazônia, devido à

seca. Além disso, os índices de vegetação MODIS não mostraram correlação espacial com a precipitação, mas sim com a disponibilidade de radiação, de forma que o *Green-up* observado em 2005 pode então ter sido resultado de mudanças estruturais nos dosséis, pois o EVI mostrou correlação significativamente inversa ao aumento de mortalidade de árvores (ANDERSON et al., 2010). Da mesma forma, observou-se uma perda intensa e generalizada na capacidade fotossintética da Amazônia, durante a seca severa de 2010 (XU et al., 2011) identificado como efeito *browning* (MOURA et al., 2015), ou seja, perda do verdor da vegetação.

De acordo com Saatchi et al. (2013) o retroespalhamento de micro-ondas dos dosséis da floresta, obtido via QuickSCAT (escaterômetro da *National Aeronautics and Space Administration* - NASA), é relativo às copas emergentes, que frequentemente são expostas a um maior déficit de pressão de vapor, sendo assim mais sensíveis a eventos de seca. Esse dado refletiu mudanças no conteúdo de água e estrutura dos dosséis durante a seca de 2005, predominantemente na porção sudoeste da Floresta Amazônica, demonstrando que o estresse hídrico é o principal fator dominante nas mudanças estruturais dos dosséis (SAATCHI et al., 2013).

A região do Tapajós não apresentou anomalia significativa negativa durante as secas de 2005 e 2010, obtida com o déficit hídrico mensal, sendo que as regiões mais afetadas da Amazônia Legal foram identificadas nas porções oeste/sudoeste (SAATCHI et al., 2013).

2.2.3 Fenologia da vegetação e o *Green-up*

A fenologia é definida como o estudo sazonal dos eventos de ciclo de vida das plantas, críticos para sua sobrevivência e reprodução (RATHCKE; LACEY, 1985). As características fenológicas das espécies refletem a influência do meio, no qual estão inseridas, em seu metabolismo, com implicações substanciais no funcionamento da planta ao nível da folha, do indivíduo e do ecossistema (ANDERSON, 2012).

De acordo com Saleska et al. (2003) uma dinâmica inesperada pode ser observada nos fluxos de troca de carbono pela vegetação na Amazônia, diferindo das estimativas geradas por modelos de emissão. Dentro do Programa LBA (do inglês

Large-scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia) foram instaladas diversas torres de fluxo na floresta, capazes de estimar a troca de carbono pela vegetação, dentre outras variáveis. Observou-se que de julho de 2000 a agosto de 2003 a dinâmica da Floresta do Tapajós, na Amazônia oriental, comportou-se como uma fonte de carbono na estação úmida e um sumidouro na estação seca, sendo o oposto do ciclo de crescimento das árvores. Especificamente, durante este período, a fotossíntese não respondeu às mudanças sazonais, mas a respiração apresentou variação de 40%, sendo máxima na estação úmida. Tal comportamento poderia ser resultado das árvores nessa região terem acesso à umidade em áreas profundas do solo, durante períodos secos. No entanto, por esta região estar mais exposta a secas severas e ter sido afetada por estas secas no passado, principalmente associadas aos eventos de El Niño, é provável que distúrbios relacionadas a secas tenham causado uma perda pretérita de carbono, que alterou a sazonalidade das trocas de carbono (SALESKA et al., 2003).

Segundo Saleska et al. (2009), nas regiões Equatoriais a irradiância solar disponível é controlada primariamente pela cobertura de nuvens, assim, durante a estação seca, a disponibilidade de radiação aumenta consideravelmente. Dessa forma, as observações de aumento de produção primária bruta nos períodos secos, pelas torres de fluxo e ganhos dos índices do sensor MODIS, levam à conclusão de que em terra firme as florestas tropicais úmidas da Amazônia não são sazonalmente limitadas pela disponibilidade de água, mas sim impulsionadas por uma combinação de disponibilidade de energia solar e ganho na fenologia da vegetação. As florestas mais ao sul da Amazônia mostram menor ganho em seu vigor com a disponibilidade de radiação, indicando maior propensão ao estresse hídrico em estações secas intensas, sendo que a limitação fotossintética pela disponibilidade de água alcança o extremo na transição entre os biomas da Amazônia com o Cerrado (SALESKA et al., 2009).

O efeito de *Green-up* na época seca, observado na Amazônia, estaria relacionado ao aumento do “verdor” da floresta, induzido pela maior radiação solar disponível na estação seca, tendo duas explicações principais: mudanças sazonais no IAF (índice biofísico associado à estrutura dos dosséis); ou mudanças sazonais na

estrutura demográfica e na capacidade fotossintética das folhas (DOUGHTY; GOULDEN, 2008).

Segundo Myneni et al. (2007) este comportamento seria resultado do brotamento de folhas novas nos dosséis, pois o IAF gerado pelo sensor MODIS também apresenta ganho. No entanto, segundo Doughty e Goulden (2008), na região de Tapajós, durante a estação seca (considerada no trabalho de julho a setembro) ocorreu brotamento de folhas novas, mas também perda de folhas senescentes, o que manteve um IAF moderado. Além disso, o IAF MODIS diminuiu drasticamente em dezembro com o início da estação úmida, em contrapartida, a produção de serapilheira apresentou valores baixos. Presumiu-se então que o sensor orbital possa ter superestimado os valores de EVI e IAF na estação seca, devido a artefatos nas imagens, associados a mudanças na iluminação dos dosséis. O fato é que a reflectância da floresta Amazônica aumenta durante a estação seca no NIR, como uma característica das folhas mais novas, e como o algoritmo do IAF MODIS se baseia nesta variável, ele pode estar ultrapassando o ponto de saturação dos dosséis, sendo insensível à sazonalidade do IAF em áreas de floresta densa, como a FLONA Tapajós (DOUGHTY; GOULDEN, 2008).

Também de acordo com Galvão et al. (2011) a reflectância da floresta Amazônica aumentou significativamente no NIR durante a estação seca, mesmo com a correção do ângulo de visada do sensor, porém, a bandas do vermelho e do azul também apresentaram ganho, o que indica que outros fatores, e não somente o IAF, são responsáveis por tal comportamento. De acordo com os autores, ambos os índices EVI e IAF MODIS são extremamente correlacionados com a reflectância no NIR, por isso apresentaram *greening*, porém, isso não foi confirmado com as medições em campo de IAF em 2010. O EVI do sensor hiperespectral Hyperion e do MODIS apresentaram forte correlação negativa com a fração sombra quando aplicado o MLME, no sul da Amazônia, o que confirma a influência da geometria de iluminação, de forma que na estação seca houve maior predominância de componentes iluminados nos dosséis. Além disso, utilizando o sensor hiperespectral aerotransportado Hymap e IAF fixo, em florestas maduras na região do Acre, foi observado um aumento de reflectância da vegetação conforme o SZA diminuía (GALVÃO et al., 2011).

Brando et al. (2010) associaram a produtividade primária bruta (PPB) com o índice EVI mensal do sensor MODIS, com o SZA e FRB normalizados para o nadir, de forma a minimizar os efeitos de contaminação por nuvens e da oscilação sazonal do SZA. Os autores testaram dois modelos lineares do EVI para a Floresta Amazônica tendo como variáveis preditoras o déficit de pressão de vapor, a PAR, a precipitação, a latitude e longitude, considerando a estação seca de julho a setembro (2000 a 2008). Foi observado que em áreas de vegetação esparsa a PPB diminuiu com a queda no déficit de pressão de vapor e com disponibilidade de água para as plantas, porém, em regiões de floresta densa as variáveis climáticas não explicaram adequadamente a variabilidade interanual do EVI. Além disso, foram realizadas medições em campo na região do Tapajós, que mostraram que o EVI mensal tem forte sazonalidade e não foi relacionado com o IAF medido, mas foi positivamente correlacionado com o brotamento de folhas novas e com a disponibilidade de radiação (BRANDO et al., 2010).

Hilker et al. (2014) utilizaram estimativas de reflectância de superfície corrigidas com o algoritmo *Multiangle Implementation of Atmospheric Correction* (MAIAC) na Amazônia tropical e subtropical, de 2000 a 2012, e observaram correlação entre reduções anuais de precipitação, eventos de oscilações El Niño e diminuição da capacidade fotossintética da vegetação, associada ao declínio do índice NDVI. O efeito de *browning* em larga escala pode indicar decréscimo na captura de carbono e mudanças substanciais no balanço de energia da Amazônia. Assim, secas persistentes podem degradar os dosséis florestais da Amazônia, o que teria efeitos na dinâmica climática global (HILKER et al., 2014).

Segundo Morton et al. (2014) não existem evidências de que a estrutura dos dosséis se modifique durante a estação seca, sendo que isso foi avaliado por meio de três linhas diferentes de estudo: 1) modelo de transferência radiativa, simulando mudanças nas métricas do sistema *Light Detection And Ranging* (LIDAR) e nas regiões ópticas do espectro por alterações nos dosséis; 2) medições de LIDAR a bordo do satélite ICESat da NASA; e 3) correção e reprocessamento dos dados diários de reflectância de superfície MODIS, de forma a eliminar os efeitos da geometria Sol-sensor. Segundo Morton et al. (2014) reprocessando os dados MODIS não se observa o *Green-up* reportado por Huete et al. (2006) e

Saleska et al. (2007). Avaliando a resposta do LIDAR no comprimento de onda de 1064 nm (NIR), a reflectância da floresta nesta faixa espectral não aumenta do início para o fim da estação seca. Os dados LIDAR são mais robustos e também menos influenciados pela contaminação atmosférica causada pelas queimadas (MORTON et al., 2014).

A anisotropia dos dosséis florestais da Amazônia também pode influenciar nas observações dos sensores orbitais. Moura et al. (2015) utilizaram os dados multiangulares do sensor MODIS-MAIAC e encontraram correlação significativa entre o aumento da anisotropia e o aumento do IAF, com uma série de medições em campo e por LIDAR, sobre a Floresta Amazônica. Assim, foram realizadas estimativas de mudanças na estrutura da vegetação, associadas à anisotropia, sendo que esta foi definida como a diferença entre a reflectância de ângulo azimutal relativo (RAA - do inglês *Relative Azimuth Angle*) em 180° e em 0°, ou seja, na direção do sensor e na direção contrária ao sensor. O *greening/browning* foi definido como aumento/perda significativa de anisotropia durante a estação seca em comparação à média anual, sendo que este período foi definido como os meses com déficit hídrico. Houve predominância de *greening* no último mês da estação chuvosa para a área total da Floresta Amazônica, porém, conforme a estação seca se estende a vegetação começa a sofrer *browning*. De forma consistente, o IAF aumenta no início da estação seca sobre a bacia Amazônica, mas diminui a partir de dois meses de estação seca. A forte correlação positiva entre as estimativas do IAF e a anisotropia confirma que dados de sensores remotos multiangulares melhoram a descrição tridimensional da estrutura complexa dos dosséis florestais. No norte e leste da Amazônia foi observada alta anisotropia, predominantemente nas regiões de floresta mais densa do que em áreas de floresta aberta, mais ao sul. O trabalho concluiu que a magnitude das mudanças sazonais é afetada pelo início e duração das secas, por isso o uso de períodos secos fixos não revela a real resposta da vegetação (MOURA et al., 2015).

Da mesma forma, para Guan et al. (2015) a disponibilidade de água exerce controle primário sobre a sazonalidade das florestas tropicais, sendo que somente em anos no qual o acúmulo de precipitação é acima de 2000 mm, a vegetação

consegue manter seu estado fenológico e sua capacidade fotossintética. Este seria então um limiar que determina se a disponibilidade de água armazenada no solo será suficiente para a manutenção da floresta durante a estação seca (GUAN et al., 2015).

Outros estudos, baseados em modelos de transferência radiativa, ainda afirmam que mesmo com as correções atmosféricas e de ângulo solar dos dados MODIS pode-se observar o *Green-up* da Amazônia Central, apoiando as hipóteses de brotamento de folhas, aumento da fotossíntese e evapotranspiração (BI et al., 2015).

Lopes et al. (2016) utilizaram dados de uma câmera RGB, posicionada a 81 m de altura na Amazônia Central, para analisar a sazonalidade da estrutura de 267 copas individuais. Índices RGB podem não ser diretamente associados à quantidade de folhas nos dosséis, pois a idade das plantas pode alterar a coloração das folhas de uma mesma espécie. No entanto, a aplicação das séries diárias do índice GC, com uma metodologia que buscou minimizar os artefatos nas imagens (imagens de dias nublados, intercalibração, copas sempre iluminadas e posição do Sol sempre atrás da câmera), mostrou um forte padrão sazonal de renovação das folhas dos dosséis florestais, concentrado nos 5 meses mais secos do ano. Além disso, de acordo com Lopes et al. (2016), o brotamento de folhas novas teve correlação positiva significativa com a PAR e negativa com a precipitação. O EVI derivado das copas individuais com o sensor QuickBird, de alta resolução espacial, mostrou aumento dos valores em eventos de brotamento, sendo também altamente correlacionado com o EVI extraído do dado MODIS-MAIAC para a região (raio de 3 km na torre), que possui correção da sazonalidade da geometria de aquisição/iluminação, convergindo assim com o *Green-up* abordado na literatura (LOPES et al., 2016).

Um dos trabalhos mais recentes a respeito do *Green-up*, e de resultado bastante interessante, é o de Tang e Dubayah (2017). Os autores também utilizaram o sistema LIDAR proveniente do satélite ICESat da NASA de 2003 a 2006, analisando três períodos do ano: março a junho; junho a outubro; e outubro a março. De acordo com Tang e Dubayah (2017) o LIDAR não sofre com artefatos como as imagens ópticas obtidas com sensores passivos, resultante da geometria

Sol-sensor, e pode medir a densidade de área foliar do dossel e do sub-bosque, que neste caso foi separado com um limiar de 10 metros. Foi observado brotamento de folhas (aumento de IAF) no dossel, principalmente no início da estação seca, seguido da perda de folhas no final da estação seca, que coincide com o aumento de IAF do sub-bosque. Dessa forma, o desenvolvimento do sub-bosque não se correlaciona nem com a precipitação e nem com a insolação, mas é fortemente correlacionado com a dinâmica estrutural do dossel superior. Ou seja, a sazonalidade da abertura de clareiras favorece o desenvolvimento do sub-bosque. Assim, essa variabilidade que existe em ambos os níveis dos dosséis é o que melhor revela o efeito *Green-up* na estação seca, principalmente ao se generalizar o comportamento da Amazônia inteira (TANG; DUBAYAH, 2017).

2.3 Análise de séries temporais com o pacote BFAST-R

As ferramentas de sensoriamento remoto proporcionam a identificação de distúrbios na superfície terrestre, devido à sua capacidade de monitoramento consistente, e de alta frequência, sobre extensas áreas (VERBESSELT et al., 2012). Esse conjunto de dados, obtidos de forma sistemática, formam séries temporais com ampla aplicação nos estudos de observação da Terra.

Segundo Verbesselt et al. (2012) os índices de vegetação, que expressam a dinâmica do ecossistema, podem revelar diferentes tipos de alterações nos padrões sazonais e interanuais na superfície, como: ocorrência de fogo; secas; inundações; desmatamento; urbanização; etc. As mudanças nos ecossistemas, comumente observadas por meio de sensoriamento remoto, podem ser divididas em três categorias: mudança sazonal ou cíclica, induzidas, por exemplo, pela temperatura ou precipitação, criando distintos padrões fenológicos para cada espécie; mudanças de tendência gradual, exemplo as tendências na média anual de precipitação e as mudanças graduais no manejo do solo, como o avanço sucessional da floresta após ocorrência de fogo; e as mudanças abruptas de tendência, que ocorrem em curto prazo de tempo, causadas por atividades humanas, como o desmatamento, ou por ocorrência natural, como as causadas por rajadas vento ou por secas severas (VERBESSELT et al., 2012).

Estimar essas mudanças nas séries temporais torna-se complexo, pois os três tipos ocorrem em paralelo nos ecossistemas. Além disso, a detecção das mudanças abruptas, de curto prazo, depende de sua magnitude e da relação sinal/ruído, frequentemente associada com as características de resolução espectral, temporal e espacial do dado de sensoriamento remoto (VERBESSELT et al., 2012).

O pacote estatístico *Breaks For Additive Seasonal and Trend* (BFAST), disponível no software R, integra a decomposição de séries temporais em tendência, sazonalidade e componentes residuais, através de métodos de detecção de mudanças. Este método é capaz de detectar mudanças fenológicas dentro de séries temporais de dados de sensoriamento remoto, ao responder a perturbações abruptas (VERBESSELT et al., 2010).

Dessa forma, o BFAST é globalmente aplicável, pois pode ser executado por pixel, nas séries de imagens de sensoriamento remoto, ou em séries temporais unidimensionais, em regiões de diferentes tipos de cobertura da terra. Além disso, o algoritmo pode ser aplicado em séries que possuem ou não sazonalidade, como em séries hidrológicas, climatológicas e econométricas (VERBESSELT et al., 2010).

O BFAST estima, de forma iterativa, o número e o momento dos distúrbios nas séries temporais, caracterizando-os de acordo com sua magnitude e direção. O algoritmo assume que a tendência da série é linear e possui pontos potenciais de quebra, que podem ser determinados acoplando os modelos lineares de forma iterativa nas diferentes seções dos dados, por meio de uma janela temporal. As mudanças abruptas são detectadas minimizando a soma residual de quadrados e suas posições são determinadas com base no critério de informação Bayesiano (VERBESSELT et al., 2010).

3 **ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo trata-se da Floresta Nacional (FLONA) do Tapajós, no Estado do Pará, fronteira com a Rodovia Santarém-Cuiabá (BR-163) a leste e com o Rio Tapajós a oeste. A torre utilizada neste trabalho está próxima ao km 67 (02°51'S, 54°58'O) da Rodovia Santarém-Cuiabá (BR-163), a aproximadamente 80 km de Santarém - PA (Figura 3.1-a) (PYLE et al., 2008).

A FLONA Tapajós é uma extensa área de floresta tropical fechada, de aproximadamente 450.000 ha (PYLE et al., 2008). Esta se estende pelos municípios de Belterra, Santarém, Aveiro, Rurópolis e Placas. Sua área situa-se sobre um amplo planalto, com solos bem drenados e predominantemente compostos por latossolo amarelo argiloso, com baixo teor de nutrientes e matéria orgânica (DOUGHTY; GOULDEN, 2008). Como se observa na Figura 3.1-b, a pedologia da região também apresenta áreas com solo podzólico vermelho amarelo, que se estendem predominantemente pelas áreas de maior declividade (em cores quentes), indicando a presença de um terreno mais irregular. A pedologia foi gerada com o arquivo de solos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2004, disponibilizado pelo Ministério do Meio Ambiente, no endereço eletrônico: <<http://mapas.mma.gov.br/i3geo/datadownload.htm>>.

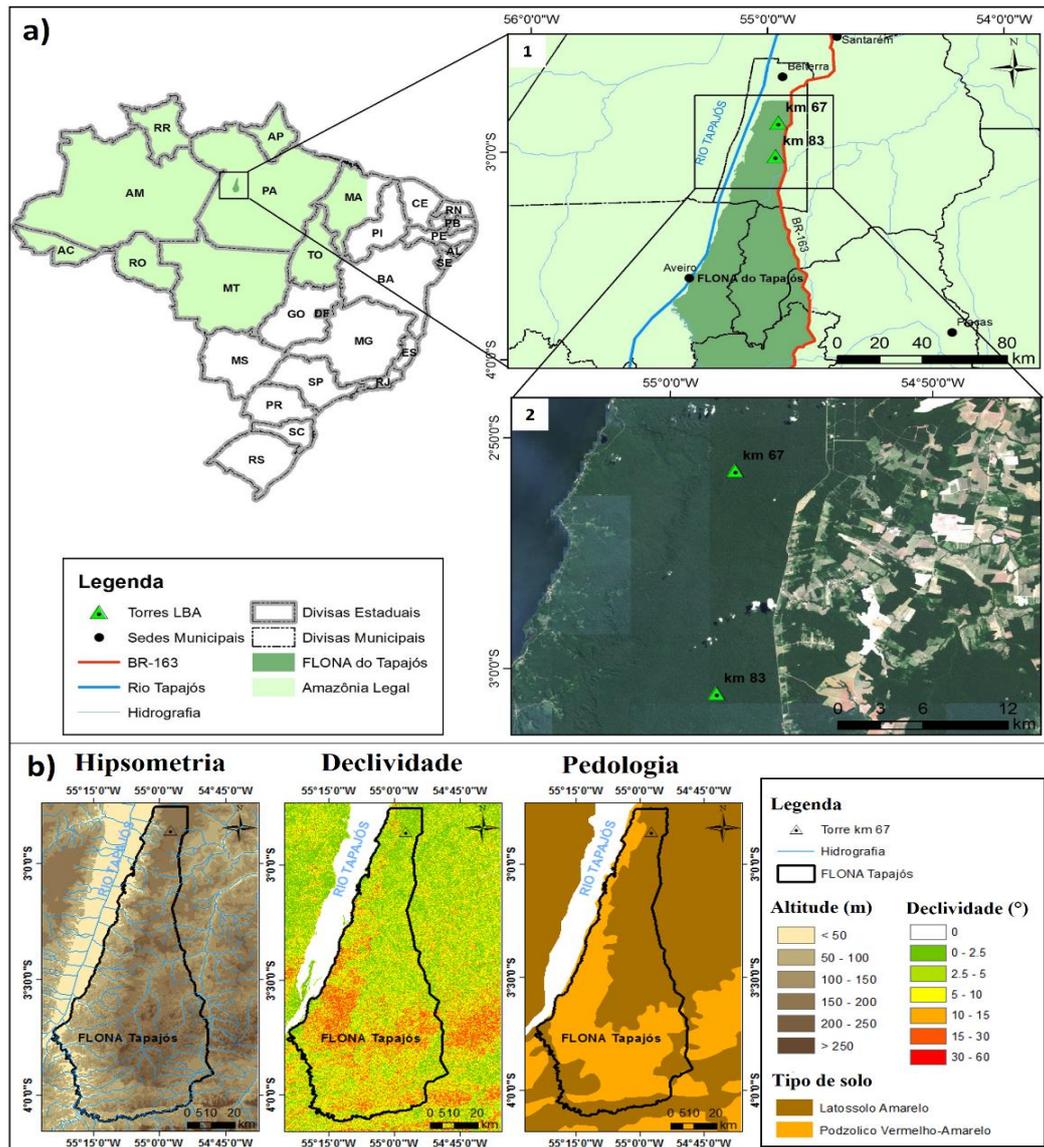
A hipsometria e a declividade foram obtidas por meio dos dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission* - NASA) com 30 m de resolução espacial (Figura 3.1-b). A região apresenta altitude aproximada de até 250 m, sendo que o planalto onde se encontra a torre do km 67 e as áreas se estendendo na direção centro-sudeste são as regiões de maior altitude.

A região da FLONA Tapajós recebe em média 2.300 mm de precipitação anualmente, com 5 a 6 meses de estação seca, (meses com precipitação abaixo de 100 mm), variando de junho a novembro (ver seção 5.3).

A densidade e diversidade florística atingem aproximadamente 460 indivíduos e 133 espécies por hectare, respectivamente (VIEIRA et al., 2004). As florestas situadas na região central e oriental da Amazônia (onde está localizada a FLONA Tapajós) apresentam solos mais pobres, têm crescimento lento e considerável biomassa acima do solo, além de possuírem maior densidade específica da

madeira, árvores mais altas e menor diversidade de espécies de folhas largas, em relação às florestas do noroeste e sudoeste da Amazônia. As florestas na região oriental ainda possuem menor produtividade primária líquida em relação às florestas situadas na parcela ocidental, com dosséis de grandes copas e de altura variando de 26 a 41 metros (ANDERSON, 2012).

Figura 3.1 - Localização da área de estudo no km 67 dentro da FLONA Tapajós (a); hipsometria, declividade e pedologia (b).



Em (a) está a localização das torres de fluxo do km 67 e km 83 na FLONA do Tapajós (1) e a imagem do sensor OLI/Landsat 8, órbita ponto 227/062, composição real colorida, de julho de 2015 (2). Em (b) está a hipsometria e a declividade da FLONA Tapajós, obtidas com o dado SRTM de 30 m, e a pedologia, obtida pelo arquivo de solos do IBGE (2004).

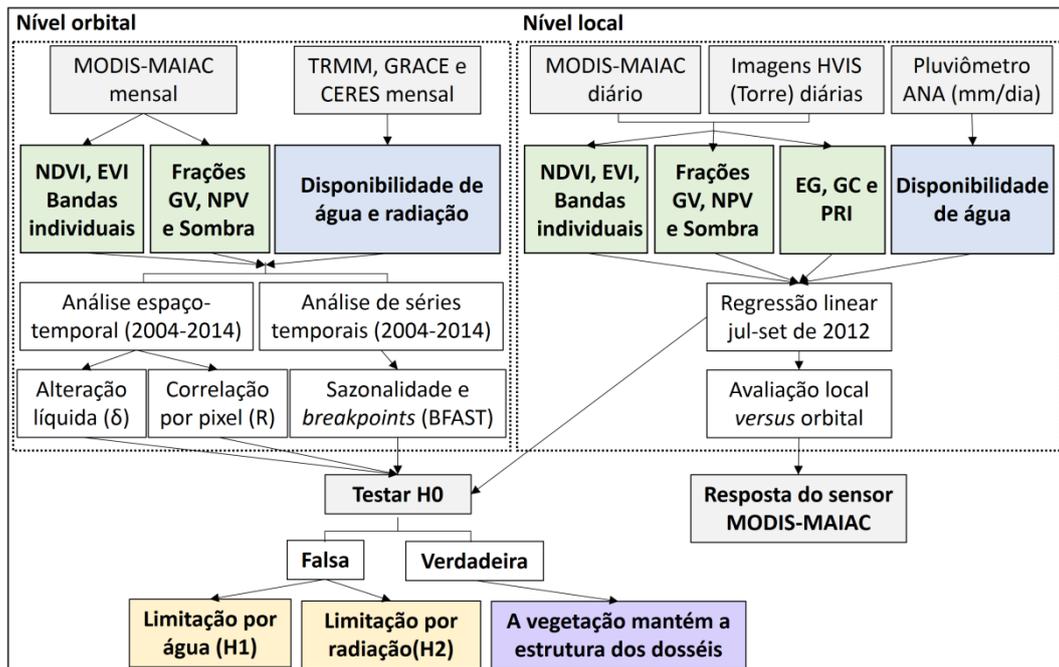
Fonte: Produção da autora.

De acordo com o mapa hidrogeológico do Brasil, produzido pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) e adaptado por Almeida Filho (2010), a região da FLONA Tapajós (Figura A.2) situa-se sobre o domínio hidrogeológico de bacias sedimentares (aquífero poroso), no qual se têm alta favorabilidade para o armazenamento de água subterrânea, com alta porosidade/permeabilidade e capacidade de retirada de vazões significativas. Já o norte da Amazônia Equatorial e a região sudeste da área de estudo, pertencem ao domínio hidrogeológico cristalino (aquífero fissural), que por possuir em sua litologia rochas sem porosidade primária a ocorrência de água subterrânea fica condicionada por porosidade secundária devido a fraturas e fendas, o que confere uma tendência de menor acúmulo de água subterrânea. O restante da região predominantemente pertence ao domínio de formações cenozoicas (aquífero poroso), caracterizado também por possuir porosidade primária e elevada permeabilidade nos terrenos arenosos (ALMEIDA FILHO, 2010).

4 METODOLOGIA

A metodologia proposta para este trabalho está sintetizada na Figura 4.1 e será discutida nas próximas seções. Foram abordadas 4 etapas principais na realização do trabalho: 1) análise espaço-temporal dos dados orbitais; 2) análise de séries temporais dos dados orbitais, de 2004 a 2014; 3) análise temporal dos dados locais, de julho a setembro de 2012; e 4) correlação entre as séries orbitais e locais.

Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia proposta.



Fonte: Produção da autora.

A fenologia da vegetação foi associada aqui não somente ao índice EVI, mas também a outros índices utilizados na literatura, à reflectância de superfície das bandas individuais e às frações geradas com o MLME. A metodologia consistiu em analisar temporalmente as séries mensais orbitais fenológicas e ambientais com o pacote estatístico BFAST, o que permitiu verificar a existência de mudanças na tendência das séries e correlacionar a sazonalidade das variáveis. Foi realizada também uma análise espacial por pixel, identificando padrões de alteração líquida e de dependência das variáveis ambientais pelas fenológicas, durante os meses da estação seca, de acordo com o uso e cobertura da terra. Assim, foi possível testar a hipótese H0, neste nível de aquisição, verificando se a vegetação sofre alteração de sua estrutura durante a estação seca, e se existe

limitação sazonal pela disponibilidade de água e radiação no seu desenvolvimento.

Além disso, copas individuais (sempre iluminadas) da FLONA Tapajós foram analisadas com os dados hiperespectrais, obtidos com o sensor posicionado na torre do km 67, semelhante ao realizado por e Lopes et al. (2016) com câmeras RGB de alta resolução espacial em Manaus-AM. Isso permitiu identificar brotamento e perda de folhas nos dosséis durante a estação seca de 2012, para então compreender a resposta registrada pelos dados diários do sensor MODIS-MAIAC, no mesmo período. Essa análise temporal da série de dados locais, também permitiu testar a hipótese H0, verificando se neste nível de aquisição, os dosséis alteram sua estrutura. A conciliação com os dados diários do MODIS-MAIAC buscou testar se a fenologia dos dosséis, analisada em nível local, varia da mesma forma que a analisada em nível orbital.

4.1 Banco de dados

Os dados utilizados neste trabalho estão descritos na Tabela 4.1, de acordo com o tema que poderá ser avaliado por meio de sua utilização, com destaque também para o nível de aquisição.

Tabela 4.1 - Dados utilizados no trabalho em diferentes níveis de aquisição.

Dado original	Res. Temporal	Res. Espacial	Sensor/ fonte	Tema estudado
Nível orbital				
NDVI e EVI	Oito dias (jan/04-jun/14)	1 km	MODIS-MAIAC	Fenologia da vegetação
Reflectância de superfície (bandas: 1, 2, 3, 4, 7)	Diária (jul-set/12)			
Reflectância de superfície (bandas: 11 e 12)	16 dias (jan/04-jun/14)			
Precipitação (mm/mês)	Mensal (jan/04-jun/14)	0,25°	TRMM	Disponibilidade de água
Espessura Equivalente de Água - EEA (cm)		1°	GRACE	
Radiação de ondas curtas - RSDS ($W.m^{-2}$)			CERES	Disponibilidade de radiação

(continuação)

Nível local				
Reflectância de superfície (bandas: 11 a 105)	Diária (jul-set/12)	Sub- métrica	HVIS	Fenologia da vegetação
Precipitação (mm)		-	ANA	Disponibilidade de água

Fonte: Produção da autora.

4.1.1 Dados orbitais

O presente trabalho inclui a utilização de dados do sensor MODIS Coleção 6, com calibração radiométrica e correção geométrica, de janeiro de 2004 a junho de 2014, correspondentes ao *tile* h02v01 (coordenada central: $-5,0127^\circ$ de latitude e $-55,3267^\circ$ de longitude). O sensor MODIS está a bordo dos satélites da NASA Terra e Aqua, em órbita síncrona com o Sol a 705 km de altura. O campo de visada do sensor é de $\pm 55^\circ$ do nadir, o que resulta em uma ampla faixa de imageamento de 2.330 km. As imagens geradas possuem alta resolução radiométrica de 12 bits, o que permite uma descrição da radiância solar refletida em 4.096 níveis de cinza. O MODIS possui 36 bandas espectrais corrigidas: 20 bandas na faixa de 0,4 a 3,0 μm e 16 bandas entre 3 e 15 μm . A resolução espacial dos dados originais varia de 250 m (bandas 1 e 2), a 500 m (bandas 3 a 7) e 1 km (bandas 8 a 35) (JENSEN, 2011).

Os dados do MODIS utilizados possuem correção com o algoritmo MAIAC (*Multiangle Implementation of Atmospheric Correction*), sendo relativos à reflectância de superfície das bandas mencionadas (Tabela 4.1), e aos índices EVI e NDVI. A resolução espacial das imagens é de 1 km, com correção atmosférica e normalização do ângulo de visada e SZA para 45° . O MAIAC trata-se de um novo algoritmo que mascara a cobertura de nuvens e corrige a influência atmosférica nas imagens, por meio de análise de séries temporais e agrupamento de pixels, criando um modelo de aerossóis e reflectância de superfície sem a utilização dos típicos métodos empíricos (HILKER et al., 2014). O algoritmo deriva as máscaras de nuvens partindo do seguinte princípio: pixels adquiridos em um mesmo local possuem um padrão textural comum, que muda lentamente com o tempo, de forma que a cobertura por nuvens causa distúrbios aleatórios de alta frequência na

série temporal deste pixel, diferentemente de quando estes são adquiridos em condições de céu limpo (LYAPUSTIN et al., 2008).

Com o MAIAC simultaneamente são recuperados os produtos em grades de 1 km de resolução espacial: coluna de vapor d'água, máscara de nuvens, espessura óptica de aerossóis e o Fator de Reflectância Bidirecional (FRB), em 12 bandas do MODIS. O algoritmo inicia acumulando em 16 dias os dados calibrados e corrigidos geometricamente do MODIS (nível 1B), em grades de 1 km, considerando que neste período os alvos são estáveis. Os dados diários, acumulados neste período e em uma área maior, fornecem diferentes ângulos de visada do sensor, que são necessários para a obtenção da função distribuição de reflectância bidirecional (FDRB). O posterior acúmulo dos dados diários em grades de 25x25 km assume que as características da atmosfera permanecem constantes dentro dessa distância, e fornece as observações de aerossóis necessárias para resolver as equações e retornar a FDRB, por meio do modelo de transferência radiativa *Li-Sparse Ross-Thick* (LSRT) (HILKER et al., 2009).

O MAIAC não considera que os alvos da superfície terrestre sejam lambertianos, adicionando a variável anisotropia na correção. Isso é obtido através da sua característica multiangular, que permite o cálculo da FDRB, retornando a reflectância de superfície para uma dada geometria Sol-sensor (HILKER et al., 2009) e para os ângulos azimutais relativos: na direção contrária/direta ao sensor. Assim, o MAIAC também retorna a reflectância de superfície geometricamente normalizada, adequada para o cálculo dos IVs, que foi a utilizada neste trabalho (MAEDA et al., 2016).

As bandas do MODIS-MAIAC aqui utilizadas correspondem às seguintes faixas espectrais: azul (b3= 459-479 nm); verde (b4= 545-565 nm); vermelho (b1= 620-670 nm); infravermelho próximo (b2= 841-876 nm); e infravermelho médio (b7= 2.105-2.155 nm). Também foram utilizadas as bandas finas 11 e 12 do MODIS-MAIAC, posicionadas no espectro visível, para o cálculo do índice PRI. Estas bandas foram disponibilizadas para o presente trabalho com resolução temporal de 16 dias, SZA normalizado para 35° e ângulo de visada normalizado ao nadir. As bandas 11 e 12 são relativas ao ângulo relativo azimutal (RAA) de 0°, ou seja, são

referentes à reflectância obtida na direção do sensor (*backscattering*), cobrindo as seguintes faixas do espectro: b11 (526-536 nm) e b12 (546-556 nm).

A precipitação mensal da área de estudo, a nível orbital, foi obtida com os dados da *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), missão que fornece características da precipitação tanto em regiões tropicais, quanto subtropicais, possibilitando a aquisição de dados de maneira sistemática (VIANA et al., 2010). Foram utilizados dados de precipitação mensal, do produto TRMM 3B43, com resolução espacial de 0,25°, disponibilizados pela NASA, com imagens de janeiro de 2004 a junho de 2014. Este produto é gerado por um algoritmo que calcula a precipitação global em fina escala, através da combinação de estimativas de múltiplos sensores orbitais passivos e ativos (HUFFMAN et al., 2007).

A disponibilidade de umidade no solo para a vegetação, a nível orbital, foi associada com as observações de mudanças na espessura equivalente de água líquida (EEA), relativa ao armazenamento vertical de água, que é obtida com os dados do *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) da NASA. O objetivo deste experimento foi medir em escala mensal a variação espaço-temporal do campo gravitacional da Terra, que ocorre primariamente devido às variações das massas de água (SYED et al., 2008). A missão GRACE consiste em dois satélites idênticos colocados em mesma órbita polar a aproximadamente 500 km de altitude e 220 km um do outro, de forma que: conforme realizam seu trajeto, as regiões da Terra com gravidade mais forte afetarão o satélite líder, que será afastado do segundo satélite. Essa distância entre eles é medida por um sistema micro-ondas de alta precisão que, em conjunto a medidas de Sistema de Posicionamento Global (GPS) (do inglês *Global Positioning System*) e acelerômetros a bordo dos satélites, é capaz de detectar mudanças com uma precisão de um micron (BOMFIM, 2006).

Grande parte da variação mensal do campo gravitacional é de fato causada por mudanças no armazenamento de água em reservatórios hidrológicos, movimentação de massas atmosféricas, terrestres e de gelo oceânico, e por trocas de massa entre esses compartimentos do sistema terrestre. O dado aqui utilizado passou por etapas de processamento para remover o sinal correspondente às massas oceânicas e atmosféricas, que ocorrem em uma escala de tempo mais curta

que um mês (NASA, 2017). Além disso, a topografia influencia no campo gravitacional, no entanto, a magnitude do sinal da variação geográfica de massa na Terra é muito maior do que o sinal gerado pelas mudanças no armazenamento de água e ocorrem em uma escala de tempo mais lenta. Dessa forma, para o dado GRACE poder ser utilizado em hidrologia esse sinal é removido considerando a variação mensal média, resultando não em uma quantidade exata do armazenamento de água no espaço e sim na mudança do armazenamento no tempo. Esse armazenamento é relativo às massas de água superficial e subterrânea, à umidade do solo e à neve, quando for o caso (BOMFIM, 2006). Os coeficientes de EEA obtidos pelas soluções de processamento do GRACE são disponibilizados em centímetros equivalentes de água armazenada (cm), podendo ser positivos ou negativos, representando assim ganho ou perda no armazenamento, respectivamente.

O fluxo de radiação solar de ondas curtas incidente na superfície foi obtido pelo produto *Energy Balanced and Filled* (EBAF-Surface Ed 2.8) proveniente do projeto *Clouds and the Earth's Radiant Energy System* (CERES) da NASA, que possui sensores de banda larga acoplados nos satélites Terra e Aqua. O dado utilizado corresponde ao *Surface Downwelling Shortwave Radiation* (RSDS). O CERES tem como objetivo investigar a influência das nuvens e aerossóis no fluxo radiativo dentro da atmosfera terrestre. De acordo com Yan et al. (2011) o sistema incorpora ao processamento quatro modelos diferentes para as estimativas de fluxo na superfície, além de englobar nuvens e aerossóis obtidos com o sensor MODIS e medições meteorológicas de campo e de satélites geoestacionários. O algoritmo se baseia em modelo de transferência radiativa, que utiliza o fluxo de ondas curtas refletido pelo TOA e água precipitável para derivar o fluxo incidente na superfície. Os fluxos descendentes e ascendentes são então calculados por meio do albedo da superfície (YAN et al., 2011).

4.1.2 Dados locais

Foram utilizadas as imagens do sensor *Hyperspectral Vegetation Imaging System* (HVIS), da *Surface Optics Corporation* (SOC-700VS), posicionado na torre do km 67 na FLONA Tapajós, coletadas e processadas por integrantes do projeto GoAmazon (<www.fapesp.br/chamadas/goamazon>). As imagens foram obtidas a

cada 10 minutos durante o dia, com resolução espectral de 5 nm entre 385 e 1050 nm, totalizando 128 bandas espectrais. O sistema adquiriu em 2012 imagens com cinco ângulos zenitais de visadas: ~15°, ~30°, ~45°, ~60° e ~75°. De todas as imagens obtidas, 17 foram previamente selecionadas por possuírem geometria de aquisição próxima aos dados do sensor MODIS (45° de ângulo zenital) e serem provenientes de dias com máxima irradiância solar. Esta etapa de seleção foi realizada para minimizar a influência das variações de irradiância solar e cobertura por nuvens no sinal obtido. As imagens também foram obtidas na direção *hotspot* e por volta do meio dia, para reduzir o sombreamento dos dosséis. Placas de referência *Spectralon* foram também acopladas na torre e capturadas nas imagens, permitindo a calibração radiométrica, de forma a transformar os dados brutos de radiância para reflectância.

Assim, as 17 imagens hiperespectrais, se estendendo de 29 de julho a 25 de setembro de 2012 (Tabela 4.2), foram previamente calibradas para FRB relativo, corregistradas e intercalibradas por integrantes do projeto GoAmazon, sendo utilizadas no presente trabalho para avaliar o comportamento dos dosséis da FLONA Tapajós, contrapondo o observado pelo sensor MODIS-MAIAC. Como observado na Tabela 4.1 foram utilizadas somente as bandas espectrais HVIS de 437 a 925 nm, totalizando 95 bandas, de forma a reduzir os ruídos presentes nos dados.

As imagens foram calibradas através da Equação 4.1, utilizando os painéis de referência, no qual, os valores de ND correspondem aos números digitais de todos os pixels na imagem e da placa, para cada banda do sensor hiperespectral.

$$FRB_{relativo} = \frac{ND_{(X,Y)imagem}}{ND_{(X,Y)placa}} \quad (4.1)$$

Tabela 4.2 - Dias com disponibilidade das 17 imagens HVIS selecionadas.

Mês	Dias
Julho/2012	29/07; 30/07; 31/07
Agosto/2012	03/08; 04/08; 05/08; 06/08; 07/08; 11/08; 12/08; 14/08
Setembro/2012	03/09; 14/09; 17/09; 18/09; 23/09; 25/09

Fonte: Produção da autora.

Dados de precipitação diária, obtidos na estação pluviométrica de código 254000, situada no município de Santarém - PA, aproximadamente 54 km a nordeste da torre km 67, também foram utilizados. Estes dados estão disponibilizados na plataforma *Hidroweb* da Agência Nacional de Águas (ANA) e possuem uma série temporal de 1969 a 2014.

4.2 Processamento dos dados orbitais

Os dados TRMM, GRACE e CERES tiveram sua resolução espacial reamostrada para a resolução MODIS (1km) por meio de uma interpolação bilinear, como realizado por Hilker et al. (2014). Esta etapa foi realizada no software ArcGis 10.2, por meio da ferramenta *ModelBuilder*, que permite construir uma rotina de técnicas de geoprocessamento, manipulando várias imagens simultaneamente.

As imagens MODIS-MAIAC foram reprojetaadas da projeção Sinusoidal original para a Geográfica e com o *Datum* WGS84, para serem compatíveis com os demais dados orbitais e facilitar o processamento. Para garantir que os pixels de todos os dados tivessem a mesma posição no espaço (fazendo com que todas as imagens apresentassem mesmo número de linhas e colunas) foi utilizada a ferramenta *Extract by mask* no ArcGis 10.2, também dentro do *ModelBuilder*. Assim, os dados GRACE, TRMM e CERES, após serem reamostrados, foram extraídos espacialmente pela máscara de uma imagem MODIS-MAIAC, de mesma projeção e *Datum*, o que resultou em imagens de 1196x1205 pixels. Só assim todas as imagens orbitais puderam ser inseridas no MATLAB para realização das etapas seguintes.

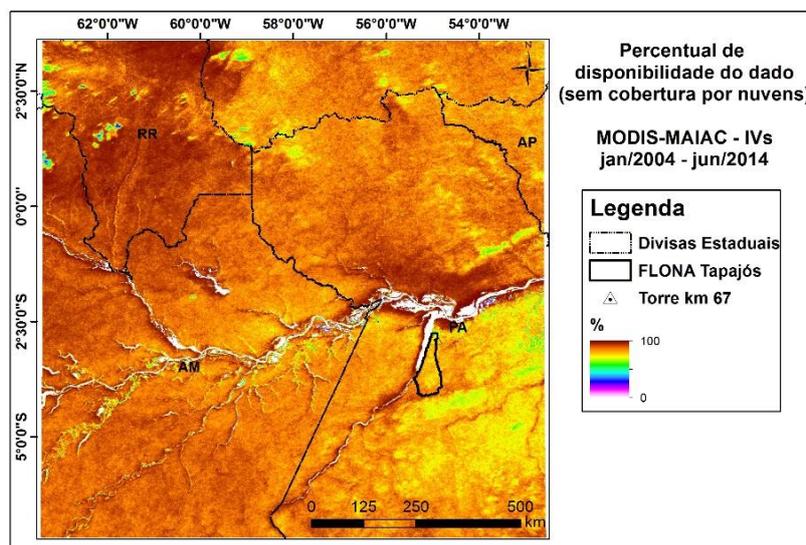
Para a análise mensal, de janeiro de 2004 a junho de 2014, as imagens MODIS-MAIAC também tiveram sua resolução temporal reamostrada de oito para 30 dias, totalizando 126 imagens (bandas individuais, NDVI e EVI). Esta etapa foi realizada no MATLAB, por meio da média do valor do pixel (desconsiderando os valores de *NoData*), aplicada primeiro para acumular as imagens em 16 dias e em seguida em 32 dias. As imagens mensais possuem uma maior disponibilidade espacial de pixels contendo dados de qualidade mais aceitável do que os mosaicos de oito dias. Este processamento facilita a análise, principalmente por esta região possuir grande cobertura por nuvens, devido aos altos índices de precipitação. A

Figura 4.2 apresenta o percentual de dados disponíveis por pixel para as imagens mensais MODIS-MAIAC, de janeiro de 2004 a junho de 2014, sendo que as regiões em vermelho escuro são aquelas com menor cobertura de nuvens em todo o período. A região da FLONA Tapajós teve uma média aproximada de 81 % dos dados mensais disponíveis no período. Segundo Maeda et al. (2016) a disponibilidade do dado MAIAC na Amazônia central, de 2001 a 2012, varia de 60 a 80 %, sendo maior que a do MODIS original, ou seja, o algoritmo também melhora o estudo da sazonalidade da floresta por viabilizar uma maior quantidade de dados para análise.

Com as imagens mensais de reflectância de superfície MODIS-MAIAC foram calculados os índices GC e EG (Equação 2.3 e 2.4, respectivamente). O índice PRI (Equação 2.5) também foi calculado, porém, foi adaptado ao dado MODIS, como realizado por Hilker et al. (2010), utilizando a reflectância (ρ) das bandas 11 e 12 (Equação 4.1).

$$PRI_{MODIS/MAIAC} = \frac{\rho_{11} - \rho_{12}}{\rho_{11} + \rho_{12}} \quad (4.1)$$

Figura 4.2 - Percentual por pixel de disponibilidade do dado mensal MODIS-MAIAC (jan/2004-jun/2014).



O percentual foi calculado para todo o período de estudo, com os dados mensais dos IVs MODIS-MAIAC, sendo que as cores mais quentes representam maior disponibilidade de dado sem cobertura por nuvens.

Fonte: Produção da autora.

Segundo HILKER et al. (2009) o PRI é associado à eficiência das plantas em absorver a radiação, para então produzir biomassa, e essa relação pode ser obtida de forma satisfatória pela razão da reflectância de bandas espectrais finas, centradas em 531 e 570 nm, obtidas com sensores hiperespectrais posicionados logo acima dos dosséis vegetativos. Porém, para acessar essa informação através dos sensores orbitais é necessária a generalização do PRI, um desafio devido aos demais fatores que influenciam no índice, como a geometria Sol-sensor, o espalhamento atmosférico e o substrato (HILKER et al., 2010). De acordo com Hilker et al. (2009) a formulação do PRI utilizando como referência a banda 12 do sensor MODIS-MAIAC (centrada em 546,8 nm) mostrou forte correlação com a eficiência da vegetação em absorver a radiação, em relação ao uso das bandas 10 (486,9 nm) e 13 (665,5 nm), que podem ser mais ruidosas em geometrias de aquisição com alto ângulo zenital, além de apresentarem dependência das espécies presentes nos dosséis. O uso da correção com o algoritmo MAIAC retirou os efeitos direcionais e de sombreamento do dado MODIS, dessa forma, a abordagem multiangular implementada no MAIAC pode ser mais adequada em detectar mudanças sutis na reflectância de bandas estreitas, como o PRI requer (HILKER et al., 2009).

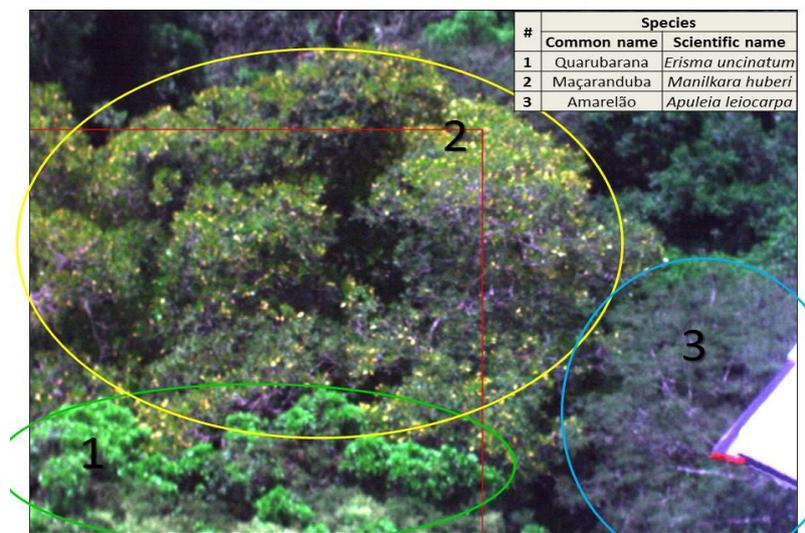
As imagens diárias do MODIS-MAIAC, utilizadas para avaliar a correlação com os dados locais, foram selecionadas para os mesmos dias das 17 imagens hiperespectrais (Tabela 4.2). No entanto, a cobertura por nuvens na região permitiu que somente nove dias fossem utilizados na análise comparativa.

4.3 Processamento e análise dos dados locais

Imagens mensais dos sensores orbitais mostraram detecção de mudanças da estrutura de densos dosséis florestais na Amazônia, sendo necessária a validação dessas informações (ANDERSON, 2012), que foi o objetivo desta etapa do trabalho. Dessa forma, o imageamento por meio de sensores hiperespectrais é um tipo singular de sensoriamento remoto, pois a radiância da superfície é amostrada em bandas espectrais finas e contínuas. Isso fornece um dado espectral adequado ao estudo da contribuição relativa dos componentes (folhas, madeira e serrapilheira) e da estrutura dos dosséis na reflectância da vegetação, em escala da imagem (ASNER, 1998).

A metodologia para estudar as copas individuais se baseou no método utilizado por Lopes et al. (2016). Esta metodologia baseou-se em séries individuais de copas sempre iluminadas, para cada espécie. Dentro do projeto GoAmazon já havia sido realizada a prévia identificação das copas e das espécies registradas no campo de visada da imagem HVIS, como mostra a Figura 4.3, no qual pode-se observar que a espécie Maçaranduba (*Manilkara huberi*) ocupa a maior parte da imagem HVIS, seguida da Quarubarana (*Erisma uncinatum*) e do Amarelão (*Apuleia leiocarpa*), que se encontra próximo à placa, com uma pequena área imageada. As duas espécies perenes (Maçaranduba e Quarubarana) são bem representativas da área de estudo, já a espécie decídua Amarelão ocorre com menor frequência (WU et al., 2016).

Figura 4.3 - Identificação das espécies registradas nas imagens da câmera HVIS.



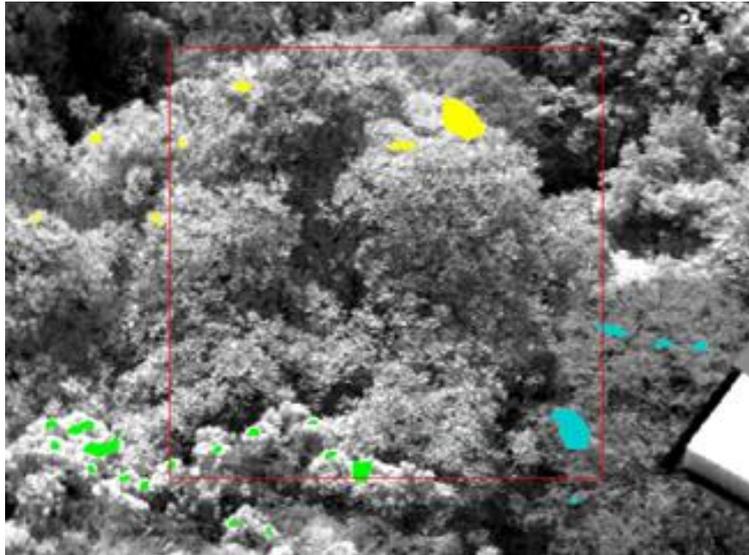
Fonte: Projeto GoAmazon.

Manualmente foram selecionadas áreas de maior brilho, das três espécies, comparando visualmente a primeira imagem da série (29/07/12) com a última (25/09/12), referentes à banda 80 no NIR (centrada em 791 nm), adquirindo no total aproximadamente 1500 pixels para cada espécie, como pode ser observado na Figura 4.4. Esses pixels foram amostrados dentro de polígonos distribuídos aleatoriamente nas áreas iluminadas das copas de cada espécie.

Os polígonos da Figura 4.4 foram agrupados por espécie em uma única máscara, que foi utilizada para extração das séries temporais dos índices calculados. A espécie Amarelão visivelmente sofreu perda de folhas em sua copa nas últimas

imagens HVIS utilizadas, portanto, a seleção da sua área de copa iluminada na última imagem acabou sendo prejudicada. Além disso, durante o período de obtenção das imagens a placa de referência teve sua posição alterada, portanto, a área considerada dessa espécie foi ainda mais reduzida. Esta etapa foi realizada no software ENVI 4.8.

Figura 4.4 - Máscaras das copas sempre iluminadas identificadas para as três espécies.



As máscaras de cada espécie foram obtidas de áreas sempre iluminadas em todo o período, agrupando aproximadamente 1.500 pixels no total. Na cor verde observa-se a máscara da Quarubarana (Copa 1), em amarelo a máscara da Maçaranduba (Copa 2) e em ciano do Amarelão (Copa 3).

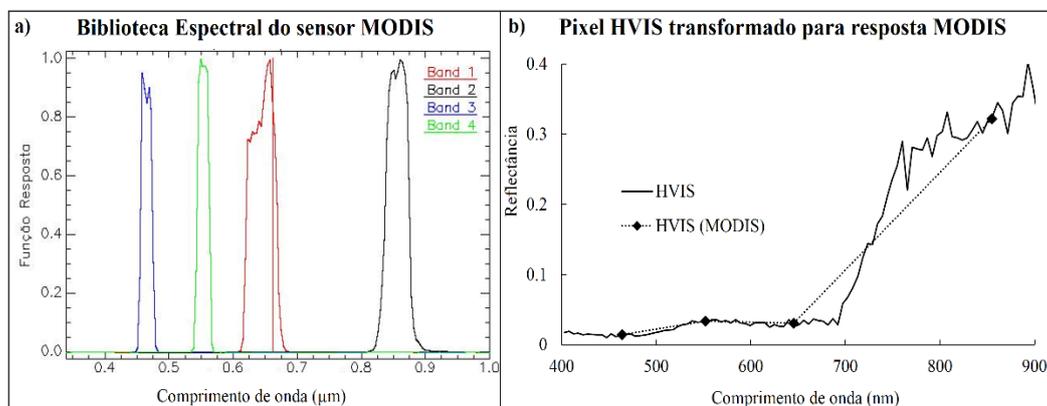
Fonte: Produção da autora.

Também foi criada uma máscara para recortar a borda das imagens e a área da placa de referência, para então aplicar o MLME (seção 4.4), considerando assim as 95 bandas espectrais (Tabela 4.1). O índice PRI foi obtido com as bandas hiperespectrais HVIS: b30 (centrada em 532,9 nm) e b37 (centrada em 568,5 nm). No entanto, para o cálculo dos demais IVs, além do recorte, as bandas hiperespectrais foram transformadas radiometricamente de acordo com a função resposta do sensor MODIS (Figura 4.5-a), com a ferramenta *Spectral Resampling* e a biblioteca espectral do MODIS, disponíveis no software ENVI 4.8. A função resposta é um parâmetro que descreve a sensibilidade espectral e radiométrica do sensor, em faixas específicas do espectro eletromagnético, de forma que a radiância medida é uma média ponderada por esta sensibilidade, que em

condições ideais é máxima no centro da banda espectral (PONZONI et al., 2015). Portanto, foram criadas as quatro bandas novas HVIS para cada imagem da Tabela 4.2 (Figura 4.5-b), ponderadas pela função resposta do MODIS, utilizadas para calcular no MATLAB os índices NDVI, EVI, GC e EG, de acordo com as Equações presentes na seção 2.1.2.

As séries temporais das espécies, presentes na imagem HVIS (Figura 4.3), foram obtidas com a média zonal de cada variável fenológica para a área das três máscaras (Figura 4.4). A ocorrência de mudanças bruscas nos padrões das séries temporais e a significância do coeficiente de regressão linear dos índices espectrais foram relacionadas com o brotamento e perda de folhas. Tal procedimento é importante para compreender a resposta do sensor MODIS-MAIAC, pois o sensor orbital captura uma mistura de todos os componentes dentro do pixel, dentre eles frações de vegetação não iluminada e copas que ganharam ou perderam folhas, além de incluir diferentes espécies.

Figura 4.5 - Função resposta do sensor MODIS para as bandas utilizadas (a). Pixel aleatório HVIS transformado com a resposta espectral do MODIS (b).



A função resposta do sensor MODIS representada aqui (a) está disponível na biblioteca espectral do ENVI 4.8.

Fonte: Produção da autora.

4.4 Seleção de *endmembers* e aplicação do MLME

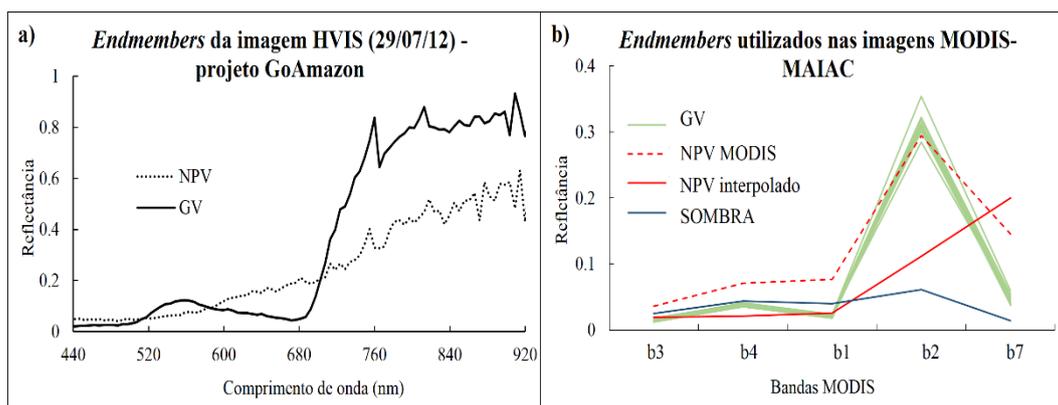
O MLME foi aplicado para os dados MODIS-MAIAC e para as imagens hiperespectrais HVIS, utilizando os componentes GV, NPV e sombra. A fração solo não foi considerada pois a região é uma área densa de floresta, sendo mais interessante estudar a fração NPV, avaliando a perda de estrutura dos dosséis,

afinal, os dois componentes apresentam um comportamento espectral semelhante (Figura 2.4) o que pode prejudicar o ajuste do MLME.

Para aplicar o MLME nas imagens orbitais foi considerada somente a área da FLONA Tapajós, com o intuito de facilitar o processamento, sendo que as bandas MODIS-MAIAC consideradas foram: 1, 2, 3, 4 e 7. Nas imagens locais foram utilizadas as bandas HVIS de 11 a 105 (437 a 925 nm), assim, a imagem hiperespectral não registra o infravermelho médio, relativo à banda 7 do MODIS, que se trata de uma informação importante para avaliar a perda de água.

Dentro do projeto GoAmazon já havia sido realizada uma metodologia de seleção dos *endmembers* GV e NPV para os dados da câmera HVIS (retirados da imagem do dia 29/07/12), por meio da transformação MNF, da aplicação do PPI e da análise do gráfico de espalhamento das bandas de maior ordem do MNF. Estes *endmembers* também foram utilizados no presente trabalho para aplicar o MLME e estão apresentados na Figura 4.6-a. O modelo foi rodado no ENVI 4.8 para todas as imagens HVIS com os componentes GV e NPV, sendo que a fração sombra foi obtida pela seguinte relação entre as frações GV e NPV: Sombra = (1 - GV - NPV).

Figura 4.6 - Espectros de *endmembers* utilizados nas imagens HVIS (a) e nas imagens MODIS-MAIAC (b).



Em (a) estão os *endmembers* das imagens hiperespectrais, selecionados no projeto GoAmazon. Em (b) estão: os espectros GV, de janeiro a dezembro, utilizados para aplicar o modelo nas imagens de cada mês; o espectro fixo de sombra para todas as imagens; um espectro teste NPV gerado somente com a imagem MODIS-MAIAC; e o espectro fixo de NPV aplicado em todas as imagens, gerado com a interpolação do NPV hiperespectral.

Fonte: Produção da autora.

Para a seleção dos *endmembers* GV e sombra nas imagens MODIS-MAIAC foi utilizado o índice de pureza do pixel (PPI). Os espectros de PPI foram analisados com o gráfico de espalhamento das bandas 1 (vermelho) e 2 (NIR), atribuindo: GV com alta reflectância na banda 2 e baixa na banda 1; sombra com baixa reflectância em ambas. Os *endmembers* de GV foram gerados para cada mês, utilizando as imagens de 2004 (12 no total), com o intuito de diminuir a influência da alteração do SZA durante o ano, pois quanto menor o SZA mais componentes dos dosséis podem estar iluminados, influenciando na radiação refletida diretamente para o sensor (GALVÃO et al., 2011). O *endmember* de sombra foi obtido com a média dos 12 espectros mensais, porém, como mostra a Figura 4.6-b, este ainda apresentou mistura espectral dos componentes, com alta reflectância na banda 2. Já a identificação do *endmember* NPV, nas imagens MODIS-MAIAC, foi mais complexa. Alguns testes foram realizados atribuindo alta reflectância nas bandas 1 e 2 no gráfico de espalhamento, porém, os espectros encontrados aparentavam ser bastante influenciados pela vegetação (Figura 4.6-b), provavelmente pelo tamanho do pixel MODIS (1 km). Assim, o *endmember* de NPV foi gerado com base nos espectros da câmera HVIS (Figura 4.6-a), no entanto, a resposta da floresta para o sensor HVIS é muito maior que para o MODIS (por exemplo, a reflectância da vegetação no infravermelho próximo é em média de 80% - HVIS, contra 30% - MODIS). Portanto, o espectro de NPV do MODIS foi interpolado do NPV hiperespectral, através da relação: GV hiperespectral *versus* GV MODIS. Como o sensor hiperespectral não tem a informação no SWIR (banda 7 MODIS) para a interpolação, a reflectância do NPV nesta banda foi atribuída como a maior dentre os espectros de teste gerados. Foi atribuído então 20 % de reflectância no SWIR para o *endmember* de NPV interpolado, superior aos demais, pois o NPV é um componente que perde água em relação ao GV, fazendo com que a reflectância seja mais alta nesta faixa espectral.

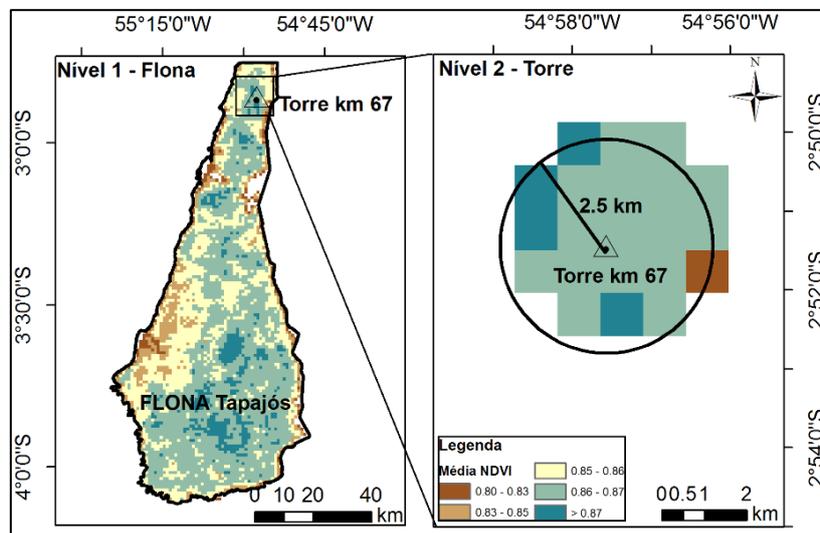
O modelo foi rodado também no ENVI 4.8 para as imagens MODIS-MAIAC, com os três *endmembers* (GV, NPV e sombra), na região da FLONA Tapajós. Em seguida as imagens fração foram exportadas para o MATLAB para realizar a análise espacial e extração das séries temporais.

4.5 Análise dos dados orbitais

As séries temporais dos dados orbitais, relativos tanto à fenologia quanto à disponibilidade de água e radiação, foram extraídas por meio da média zonal em dois níveis de análise, apresentados na Figura 4.7.

Com o dado MODIS-MAIAC de NDVI foi criada uma máscara de floresta para a área da FLONA Tapajós, correspondendo aos pixels com o valor médio anual de NDVI (2004-2014) acima de 0,8, representado em escala de cor na Figura 4.7. Anderson (2005) encontrou um limiar de 0,86 de NDVI médio anual para Floresta Ombrófila Aberta no Estado do Mato Grosso, utilizando os dados do sensor MODIS, e média de 0,82 para áreas de contato da floresta com a classe de Savana. Aqui foi utilizado o limiar de 0,8 por englobar uma área maior da FLONA Tapajós, sendo mais próxima também da classe de floresta do dado TerraClass de 2014, como explicado na seção 4.5.2. Maeda et al. (2016) consideraram como floresta intacta a média em longo prazo do EVI para os meses de julho-agosto, utilizando o limiar de 0,4.

Figura 4.7 - Níveis de análise dos dados orbitais.



Toda a região colorida dentro da FLONA Tapajós foi considerada como floresta, sendo atribuída como o Nível 1 de análise. Em cores frias estão as regiões com maior NDVI médio (2004-2014). O Nível 2 de análise corresponde à área dentro do raio de 2,5 km da Torre do km 67.

Fonte: Produção da autora.

Assim, o Nível 1 de análise foi a área de floresta dentro do contorno da FLONA e o Nível 2 foram os pixels extraídos com o raio de 2,5 km da torre, totalizando 21 pixels, semelhante ao realizado por Lopes et al. (2016), que consideraram uma janela de 3x3 km centrada na torre. Maeda et al. (2016) utilizaram um raio de 5 km ao redor das torres para extrair os pixels de floresta intacta do dado MODIS. Esta etapa de extração das séries temporais foi realizada no MATLAB.

4.5.1 Análise de séries temporais

A identificação de mudanças nas séries temporais orbitais, de janeiro de 2004 a junho de 2014, foi avaliada utilizando o pacote BFAST do software R. O algoritmo foi inicializado com os parâmetros padrão e modelo de ajuste harmônico. O objetivo foi verificar se as séries fenológicas apresentam quebras de tendência (*breakpoints*) nas séries das variáveis fenológicas, que combinem temporalmente, com mudanças bruscas nas variáveis ambientais.

Além disso, as componentes de sazonalidade de cada série (oscilação média das variáveis de janeiro a dezembro) foram extraídas e correlacionadas entre si, de forma a identificar a influência da disponibilidade de água e radiação na fenologia da floresta. Esta etapa foi realizada para ambos os níveis de aquisição mostrados na Figura 4.7 e reduziu a dimensionalidade do dado de todo o período (2004-2014). Na Figura A.6 em anexo é possível observar um exemplo da saída do BFAST para o índice EVI no Nível 2-torre: no primeiro quadro pode ser observada a série original (Y_t); no segundo quadro está a componente sazonalidade (S_t), que se repete em todos os anos; em seguida está a componente de tendência (T_t) e os *breakpoints*, quando existentes; e por último a série residual (e_t) sem tendência.

4.5.2 Análise espacial

As séries de imagens dos três temas estudados (Tabela 4.1), contendo as variáveis fenológicas e ambientais, foram analisadas também espacialmente (pixel a pixel).

A análise espacial foi realizada de forma a compreender a diferença no comportamento das variáveis durante a estação seca, em relação à média de todo o período estudado. Assim, a estação seca foi considerada aqui como os meses que

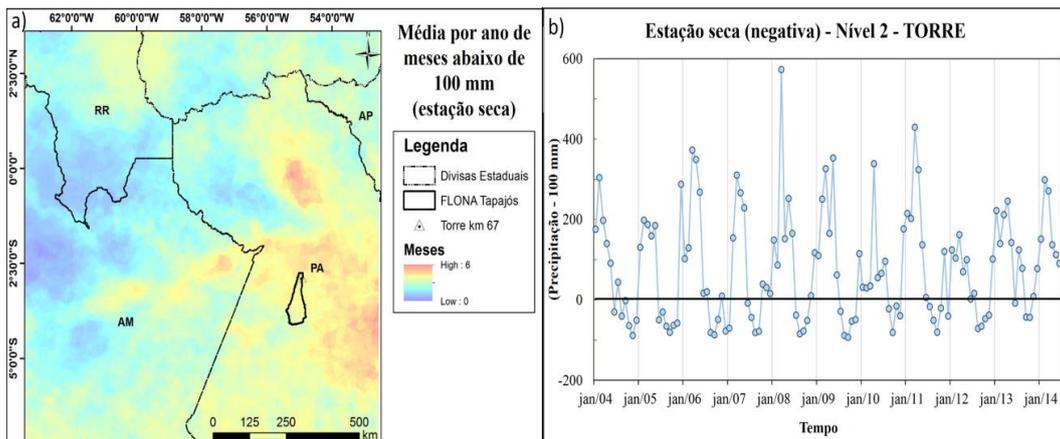
apresentaram déficit hídrico, ou seja, precipitação abaixo de 100 mm (ARAGÃO et al., 2007; MOURA et al., 2015). Os meses relativos à estação seca foram calculados por pixel, também no MATLAB. Esta etapa foi realizada para não limitar o período de pouca disponibilidade de água somente de julho a setembro, considerando que a duração da estação seca pode variar anualmente e espacialmente, devido à extensão da área de estudo. Um exemplo disso é observado na Figura 4.8-a, que apresenta a quantidade média de meses com déficit hídrico por ano, de 2004 a 2014, sendo possível verificar que toda a área do Tapajós apresenta uma estação seca mais longa. Portanto, fixar os meses abaixo de 100 mm objetivou forçar a limitação por água, para então verificar a resposta da vegetação em função das variações das demais variáveis. A Figura 4.8-b apresenta a série mensal de precipitação, extraída do Nível 2 - Torre. Com o intuito de destacar a estação seca, foi retirado o total de 100 mm de cada valor mensal, mostrando os meses de déficit hídrico com valores negativos no gráfico. Isso foi realizado para cada pixel da área de estudo e observou-se, por exemplo, que em 2005 (ano de forte seca na região Amazônica) a área da torre apresentou estação seca com duração de 6 meses. Já em 2010, ano em que também ocorreu uma forte seca, a duração foi de somente 4 meses, no entanto, foi uma estação seca que sucedeu meses com precipitação relativamente mais baixa que os demais anos (Figura 4.8-b).

Para todas as variáveis estudadas ao nível orbital foi calculado o percentual de alteração líquida (δ), baseado na metodologia realizada por (HILKER et al., 2014), com algumas modificações. A alteração líquida foi obtida com a Equação 4.2, por pixel, e pode ser interpretada como a média das anomalias, de uma determinada variável, nos meses de déficit hídrico em relação à média global de todo o período (2004-2014), normalizada em percentual (segunda parte da Equação 4.2). Esta etapa foi realizada no MATLAB.

$$\delta_{VAR} = \frac{\sum_1^n VARs - VAR_{média_{2004-2014}}}{n} \left(\frac{100}{VAR_{média_{2004-2014}}} \right) \quad (4.2)$$

onde, VAR é a variável estudada, VARs é o valor da variável em cada mês da estação seca, VAR_{média 2004-2014} é a média da variável de 2004 a 2014 e n é o número de meses considerados da estação seca no pixel.

Figura 4.8 - Média dos meses consecutivos relativos à estação seca por ano (2004 a 2014) (a) e meses abaixo de 100 mm para o Nível 2 - Torre (b).



Em (a) está a duração média da estação seca por pixel, sendo maior nas regiões representadas em cores quentes. Em (b) está a série de precipitação extraída dos pixels do Nível 2 - Torre, subtraindo o valor de 100 mm, de forma que os meses da estação seca aparecem com valores negativos, exemplificando o que foi realizado para definir a estação seca por pixel.

Fonte: Produção da autora.

Também foi realizada, no MATLAB, a correlação de Pearson (R) por pixel entre o NDVI, EVI e frações MLME e as variáveis ambientais, considerando somente os meses da estação seca. Assim, como a duração e início deste período teve uma variabilidade interanual (ver Figura 4.8) considerou-se a não dependência temporal nas séries de cada pixel, o que permitiu aplicar a estatística *t* para analisar a significância das correlações. O R é um coeficiente adimensional que mede o grau e a direção da correlação linear, é utilizado como medida de correlação, através da regressão linear das variáveis, podendo variar de -1 a 1, no qual, o valor zero significa correlação nula entre as duas variáveis.

Os resultados da alteração líquida e da correlação por pixel foram avaliados também considerando o uso e cobertura da Terra (UCT) da área de estudo, de forma a verificar se o comportamento da floresta é significativamente diferente dos demais UCT, como reportado por Huete et al. (2006) e Saleska et al. (2009). Essa etapa foi importante para entender se realmente a floresta demonstra uma maior resiliência ao passar por períodos críticos de disponibilidade de água. Dessa forma, ao analisar as classes de pastagem e agricultura, por exemplo, é esperado

um comportamento mais claro de queda nos índices de vegetação, indicando claramente a perda de água e de componentes fotossintetizantes. Portanto, estes padrões serviram de base ao comparar com o comportamento da floresta.

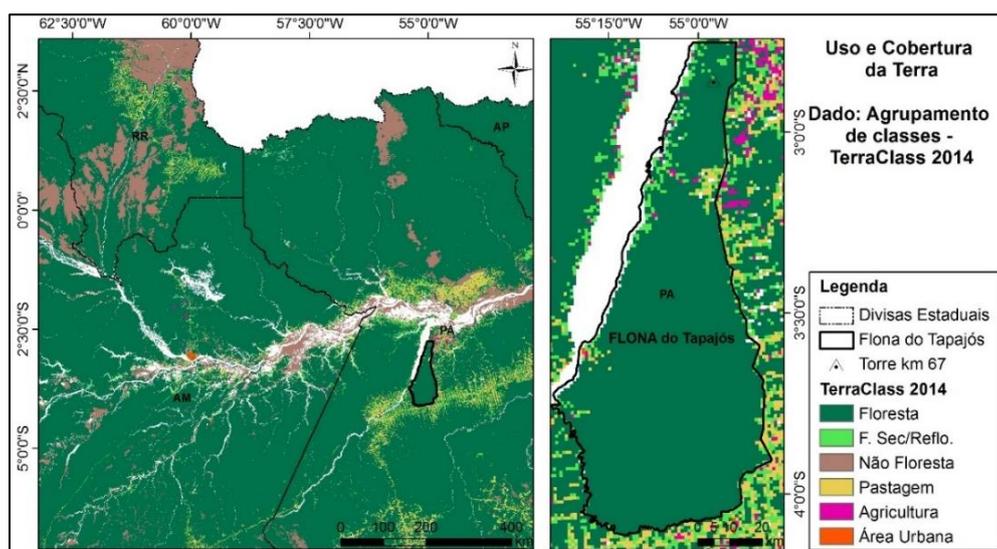
Para tanto, as classes do dado TerraClass foram compiladas para o ano de 2014. A reclassificação foi realizada de acordo com a Tabela 4.3, resultando na imagem de UCT observada na Figura 4.9. É possível verificar o domínio da classe Floresta dentro da área da FLONA Tapajós, principalmente com a presença das classes de Floresta Secundária/Reflorestamento e Pastagem nas bordas.

Tabela 4.3 - Reclassificação do dado TerraClass 2014.

Nova classe	Classes originais
0- NoData	NoData; Área não classificada; Hidrografia; Mineração; e Outros
1- Floresta	Floresta
2- F. Sec./Reflo.	Floresta Secundária; Reflorestamento
3- Não Floresta	Não Floresta
4- Pastagem	Desmatamento no ano; Pasto com Solo Exposto; Pasto Limpo; Pasto Sujo; Regeneração com Pasto
5 - Agricultura	Agricultura Anual; Mosaico de Ocupações
6- Área Urbana	Área Urbana

Fonte: Produção da autora.

Figura 4.9 - Classes de uso e cobertura da terra reclassificados do TerraClass 2014, com destaque para a FLONA Tapajós.



Fonte: Produção da autora.

Para testar se existe uma diferença significativa entre as classes de UCT foi aplicado o teste de Kruskal-Wallis (KW), seguido do teste de comparação múltipla, no software MATLAB. O teste de Kruskal-Wallis é uma extensão do teste de Wilcoxon-Mann-Whitney, sendo um teste não-paramétrico utilizado para comparar três ou mais populações. Este testa a hipótese nula de que todas as populações possuem funções de distribuição iguais contra a hipótese alternativa de que ao menos duas possuem funções de distribuição diferentes. A hipótese nula sendo rejeitada é necessário aplicar o teste de comparação múltipla para verificar quais distribuições se diferenciam, testando a significância dos pares de diferenças (PORTAL ACTION, 2016). Para aplicar os testes estatísticos nos resultados espaciais, foi considerado somente a área do retângulo onde se situa a FLONA (Figura 4.9), selecionando 100 pixels aleatórios de cada UCT.

4.6 Conciliação das séries temporais orbitais e locais

A avaliação entre as séries temporais orbitais e locais foi realizada para os dias correspondentes às imagens HVIS, de 29/07/12 a 25/09/12. Os mesmos índices espectrais e fração MLME foram extraídos das imagens MODIS-MAIAC diárias, correspondentes aos dias de obtenção das imagens HVIS, para o Nível 2-Torre (ver Figura 4.7), com exceção do índice PRI que não pôde ser calculado pela não disponibilidade das bandas 11 e 12 diárias, processadas com o algoritmo MAIAC. Porém, devido à grande cobertura de nuvens na região somente nove dias, dentre os 17, puderam ser utilizados na análise orbital *versus* local. Assim, esses índices foram correlacionados com as séries HVIS extraídas das três copas (Figura 4.4).

Também foi realizada uma análise dos dados orbitais *versus* locais de forma a verificar em média a ocorrência de *greening* e *browning* de agosto para setembro de 2012. Isso partiu do fato de que muitos trabalhos que estudaram o *Green-up* de toda a Floresta Amazônica, por meio de dados orbitais, considerarem uma escala de tempo mensal, subtraindo as variáveis fenológicas do final com o início da estação seca (HUETE et al., 2006; MOURA et al., 2015; SALESKA et al., 2016). O que torna interessante entender como o dado local hiperespectral responde nesta escala.

De acordo com a análise sazonal da seção 5.3.2 a estação seca na FLONA Tapajós inicia em média em junho, ou seja, setembro corresponde ao meio da estação seca, sendo também o mês de máxima radiação disponível. Além disso, de acordo com Moura et al. (2015) no início da estação seca observa-se *greening* na floresta, porém, após em média 2 meses o padrão se inverte e a floresta apresenta *browning*. Assim, o objetivo foi indicar a tendência do comportamento da vegetação ao entrar em um período mais crítico de disponibilidade de água, e, verificar se a resposta em ambos os níveis de análise é a mesma.

Para as variáveis do nível local (HVIS) foi realizada uma média dos dias correspondentes de cada mês, ao nível total da imagem e ao nível das três copas iluminadas (Figura 4.4). Já no nível orbital foram selecionadas as variáveis obtidas com as imagens mensais do MODIS-MAIAC, de agosto e setembro de 2012, para o nível da torre km 67. Foi calculada então a diferença média (Δ) dos índices de agosto para setembro em ambos os níveis.

5 RESULTADOS

As análises realizadas buscaram compreender o comportamento da floresta em resposta à disponibilidade de água e radiação, mas objetivaram principalmente associar os padrões fenológicos ao *greening/browning* durante a estação seca. Ou seja, por meio das variáveis fenológicas estudadas aqui, buscou-se entender se durante a estação seca a floresta apresenta ganho no vigor da vegetação (*greening*); ou se apresenta indícios de perda estrutural dos dosséis, perda da capacidade fotossintética e senescência (*browning*).

Assim, teve-se como base o comportamento espectral da vegetação, descrito na seção 2.1.1.3 e na literatura (ASNER, 1998; HILKER et al., 2009; PONZONI; SHIMABUKURO, 2010; GALVÃO et al., 2011), que foi o ponto de partida para interpretar as análises. De forma geral, para poder associar os resultados ao *greening* foram consideradas todas as análises realizadas, ocorrendo: aumento dos índices de vegetação (NDVI, EVI, GC, EG); aumento do índice fotoquímico PRI; aumento da fração GV e sombra; queda na fração NPV; aumento na reflectância no infravermelho próximo; e queda na reflectância no visível e no infravermelho médio.

5.1 Padrões espaço-temporais intra-anuais médios

Nesta seção foi realizada a análise trimestral, de janeiro de 2004 a junho de 2014, das variáveis ambientais e dos índices EVI e PRI. Esta análise prévia objetivou compreender os padrões espaço-temporais médios da disponibilidade de água e radiação, assim como da capacidade fotossintética da floresta, para em seguida (nas próximas seções) compreender o comportamento dessas variáveis especificamente durante a estação seca.

A Figura 5.1 apresenta as médias trimestrais da precipitação, umidade do solo e radiação para o *tile* MODIS-MAIAC estudado, permitindo analisar seu comportamento espacial em valores absolutos durante o ano. As médias foram calculadas por pixel e os trimestres foram separados da seguinte forma: janeiro, fevereiro e março (JFM); abril, maio e junho (AMJ); julho, agosto e setembro (JAS); e outubro, novembro e dezembro (OND).

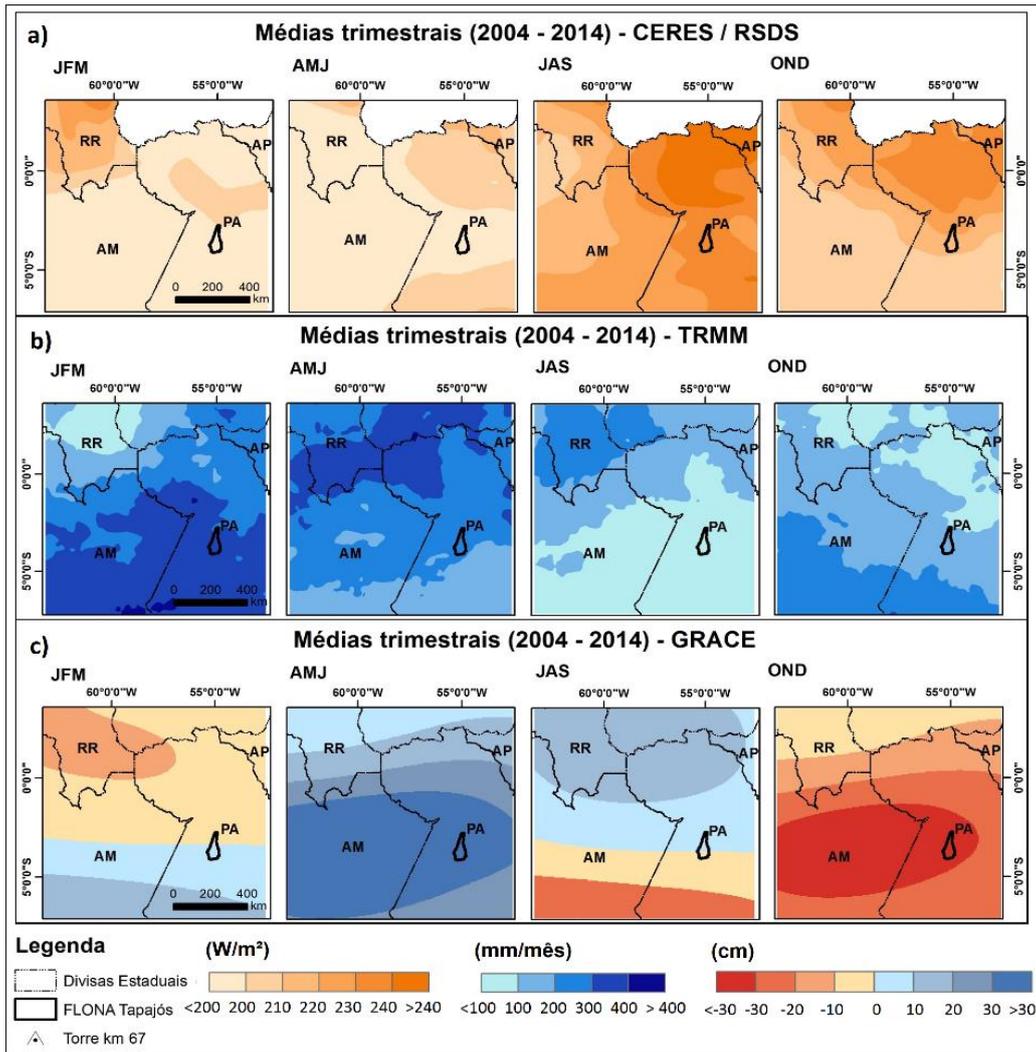
Na Figura 5.1-a pode-se observar a média trimestral do dado CERES, relativo à disponibilidade de radiação solar de ondas curtas incidente na superfície (RSDS). Este dado representa a radiação disponível para a vegetação realizar o processo de fotossíntese. O RSDS considera somente a parcela que atinge a superfície e é transmitida através da atmosfera e das nuvens, enquanto o dado *Surface Downwelling Shortwave Radiation - Clear Sky* (RSDSCS) (Figura A.1-a) tem os valores de radiação corrigidos considerando uma condição de céu limpo.

As médias trimestrais do dado RSDSCS (Figura A.1-a), em anexo, mostram maior radiação incidente no primeiro trimestre do ano (JFM), podendo ultrapassar 300 W.m^{-2} , enquanto a menor ocorre no trimestre seguinte (AMJ), com valores abaixo de 260 W.m^{-2} . Essa variação, de aproximadamente 14 % do primeiro ao segundo trimestre, é causada pela posição da Terra em relação ao Sol e ao seu movimento de translação. Como consequência deste processo, a partir do terceiro trimestre do ano (JAS) a disponibilidade de radiação aumenta, relativa à diminuição da distância Sol-Terra e da declinação solar, saindo do solstício de inverno no hemisfério sul (junho) até o solstício de verão (dezembro) e equinócio de março (BORCHERT et al., 2015). Já as médias trimestrais do dado RSDS (Figura 5.1-a), que não contabiliza a radiação interceptada pelas nuvens, apresentam valores maiores em JAS, podendo ultrapassar 240 W.m^{-2} , e menores em JFM, abaixo de 200 W.m^{-2} , trimestres de menor e maior precipitação, respectivamente (Figura 5.1-b). Dessa forma, nos quatro trimestres existe uma diferença média entre os dois dados CERES de disponibilidade de radiação, mas tal divergência é maior em JFM, de até 100 W.m^{-2} , e menor em JAS, predominantemente inferior a 40 W.m^{-2} (Figura A.1-b). Ou seja, no trimestre que mais chove a cobertura de nuvens tem maior influência, podendo interceptar cerca de 1/3 da radiação solar que iria atingir a superfície.

A variação entre o trimestre de máxima radiação solar disponível (JAS) e mínima (JFM) é próxima a 18 % quando se considera a cobertura de nuvens (dado RSDS - Figura 5.1-a), maior que a variação do dado RSDSCS (14 %). Assim, a disponibilidade de radiação durante o ano, nesta região, é mais influenciada pela cobertura de nuvens do que pela variação natural, acompanhando os padrões de precipitação (Figura 5.1-b). Isso foi apontado por Saleska et al. (2009), que

mencionou que por esta ser uma região equatorial, a variação da disponibilidade de radiação, somente devido ao montante incidente no topo da atmosfera, é pequena em relação à que ocorre nos trópicos. Na parte oriental da Amazônia Equatorial, o fator que aumenta o ganho de radiação de ondas curtas nos dois últimos trimestres do ano (JAS e OND) é a diminuição da cobertura por nuvens, devido à estação seca mais longa (SALESKA. et al., 2009).

Figura 5.1 - Médias trimestrais das variáveis ambientais.



Nos quadros em colunas estão as médias dos dados para o *tile* MODIS-MAIAC, para os quatro trimestres: JFM, AMJ, JAS e OND. A disponibilidade de radiação considerada nas análises foi obtida com o produto RSDS (W.m⁻²), com os valores médios representados na escala de cor laranja (a). A precipitação mensal (mm/mês) possui os valores médios representados em escala de cor azul (b). A variação do armazenamento de água no solo (cm) possui valores médios negativos em cores quentes e positivos em cores frias (c).

Fonte: Produção da autora.

Como pode ser observado na Figura 5.1-b, que apresenta as médias trimestrais do dado TRMM de precipitação mensal, grande parte da região tem índices baixos de precipitação em JAS, com média inferior a 100 mm. Esse valor não sofre grande alteração no trimestre seguinte (OND) e boa parte da região ainda fica com média mensal entre 100 e 200 mm. Já em JFM a mesma área pode receber em média até 400 mm ao mês. Portanto, grande parte da região onde está inserida a FLONA Tapajós recebe em JAS menos de 25 % da precipitação de JFM.

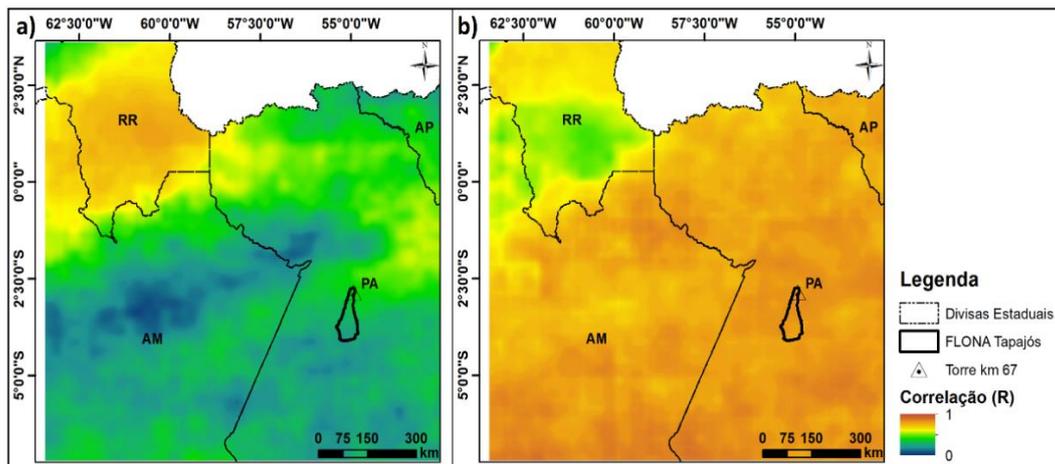
Quando a precipitação mensal não alcança os 100 mm, a perda de água pela evapotranspiração ultrapassa a entrada de água pela precipitação pluviométrica. Assim, a floresta entra em um processo acumulativo de déficit hídrico. Para caracterizar os meses da estação seca, no presente estudo, foi utilizado o limiar de 100 mm, seguindo a metodologia proposta por Moura et al. (2015). Segundo os autores, grandes áreas da Amazônia Central, que se estendem pelo estado do Amazonas não apresentam estação seca definida, contudo, saindo dessas regiões centrais na direção sudeste e nordeste a duração da estação seca aumenta, com início em julho/agosto e término em janeiro/fevereiro na região do Tapajós (MOURA et al., 2015). Este mesmo padrão também foi observado nos índices de precipitação gerados neste trabalho (Figura 5.1-b).

Em relação ao coeficiente EEA, obtido pela missão GRACE e relacionado ao armazenamento de água na superfície terrestre (Figura 5.1-c), observa-se que nas regiões próximas da FLONA Tapajós, que possui o trimestre mais seco em JAS, a maior perda de armazenamento de água ocorre em média no trimestre seguinte (OND), podendo representar menor disponibilidade de umidade no solo. O mesmo ocorre nesta região para o trimestre de maior armazenamento, com valores positivos acima de 30 cm de espessura equivalente de água, ocorrendo no trimestre seguinte ao de maior precipitação. Essa defasagem pode significar que essa região é capaz de armazenar a água no solo após o período mais chuvoso, mas também pode demorar para recuperar o armazenamento. No entanto, o mesmo padrão não é observado para outras regiões, como a área onde se encontra o Estado de Roraima, no qual o EEA aparenta acompanhar o padrão de disponibilidade de precipitação durante os trimestres. Essas características podem estar relacionadas aos domínios hidrogeológicos no qual essas regiões estão

inseridas (ver seção 3). Além disso, saindo da região equatorial para a direção norte, dentro da área de estudo, existe uma menor amplitude de armazenamento durante o ano, em relação à área central, e, segundo Almeida Filho (2010), a região Amazônica tem as maiores amplitudes de EEA do mundo, podendo chegar a 125 cm na área central.

A descontinuidade apresentada entre os dados TRMM e GRACE na região da FLONA Tapajós foi atribuída ao seu domínio hidrogeológico (Figura A.2) (descrito na seção 3), que favorece o armazenamento de água. Almeida Filho (2010) avaliou a correlação entre a EEA do GRACE com medições da vazão de águas superficiais na bacia Amazônica. De acordo com o autor, chuvas intensas e locais refletem diretamente na vazão das águas superficiais, e conseqüentemente na umidade do solo, não necessariamente sensibilizando o dado mensal GRACE. Além disso, ao longo da bacia existem defasagens entre as medidas de vazão e a profundidade do lençol freático, que são correlacionadas com diferenças nas velocidades dos deslocamentos verticais de massa d'água, influenciadas por barragens e pelas características de permeabilidade e porosidade dos domínios hidrogeológicos. Nos domínios sedimentares, nos quais está inserida a FLONA Tapajós, foram observadas algumas defasagens nos períodos de cheia, onde as cotas dos leitos dos rios subiram antes do nível do lençol freático, devido à rápida propagação das chuvas intensas locais, também ocorrendo atraso na subida do nível subterrâneo pela grande capacidade de absorção de massa d'água destes domínios (ALMEIDA FILHO, 2010). A defasagem entre o dado GRACE e TRMM pode ser melhor verificada na Figura 5.2, que apresenta a correlação mês a mês por pixel (Figura 5.2-a) e a correlação defasada em dois meses (Figura 5.2-b), ou seja, a chuva de janeiro refletindo no EEA de março, etc. É possível verificar que praticamente toda a área de estudo teve um aumento na correlação por pixel com a defasagem do dado GRACE, com exceção da região que se estende pelo Estado de Roraima. Outras defasagens foram testadas com as séries obtidas ao nível da FLONA, porém, a máxima correlação ocorreu com dois meses.

Figura 5.2 - Coeficiente de correlação (R) entre os dados GRACE e TRMM mensal.



Em (a) está a correlação por pixel (R) entre o dado mensal GRACE e o dado TRMM, de janeiro de 2004 a junho de 2014. Em (b) o dado GRACE foi defasado em 2 meses para então realizar a regressão linear. As cores quentes representam áreas de maior correlação.

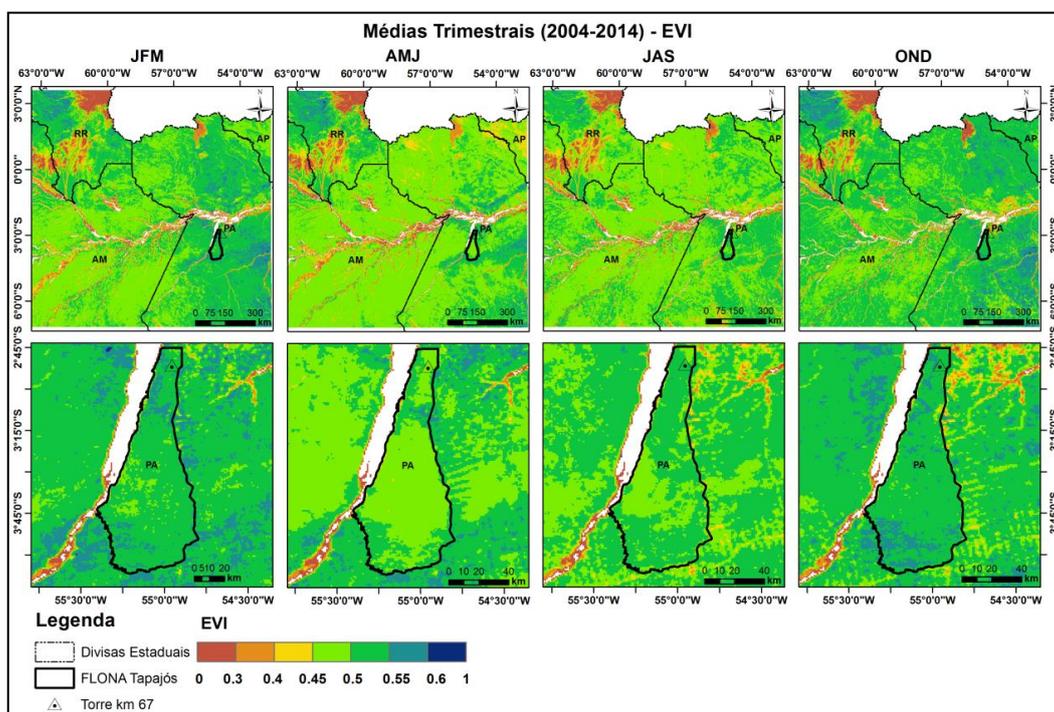
Fonte: Produção da autora.

As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam as médias trimestrais dos índices EVI e PRI, respectivamente, obtidas da mesma forma que as médias da Figura 5.1, permitindo avaliar em valor absoluto a sazonalidade destas variáveis fenológicas. Estes índices, assim como todas as outras variáveis fenológicas orbitais, foram gerados com o dado MODIS-MAIAC, que possui em suas bandas, além da correção atmosférica, a normalização da geometria de aquisição e do SZA. Este dado permite uma melhor análise fenológica da Floresta Amazônica, reduzindo os possíveis artefatos gerados pelo sensor orbital, que podem ter influenciado nos trabalhos de Huete et al. (2006), Myneni et al. (2007) e Saleska et al. (2007), por exemplo. O ângulo zenital solar possui uma tendência de junho a setembro na Amazônia Central e essa tendência não é removida dos produtos originais do sensor MODIS de reflectância de superfície, que são ajustados ao nadir e possuem ângulo solar zenital normalizado ao meio dia (LOPES et al., 2016).

É possível verificar que existe grande amplitude do EVI para as diferentes classes de UCT presentes na área de estudo (ver Figura 4.9), em todos os trimestres. Os valores mais discrepantes ocorrem principalmente nas áreas de “Não Floresta” (que podem compreender áreas alagadas, áreas de Cerrado e outras), com EVI médio abaixo de 0,4, representado em cores quentes (Figura 5.3). As áreas de floresta (predominantes dentro do *tile*) apresentam grande variação do EVI

durante o ano, ficando em média entre 0,45 e 0,83. É interessante notar que do primeiro para o segundo trimestre, em que a FLONA Tapajós recebe os maiores índices pluviométricos e tem baixa disponibilidade de radiação em ambos (ver Figura 5.1), ocorre uma queda no EVI da floresta, enquanto outros UCTs apresentam EVI superior. Já indo para o terceiro e quarto trimestres, espera-se que o EVI diminua ainda mais devido à queda na disponibilidade de água, porém, a área de floresta apresenta uma tendência de aumento do EVI, contrária à dos outros UCTs, que apresentam seus valores mais baixos.

Figura 5.3 - Médias trimestrais do índice EVI, de 2004 a 2014.



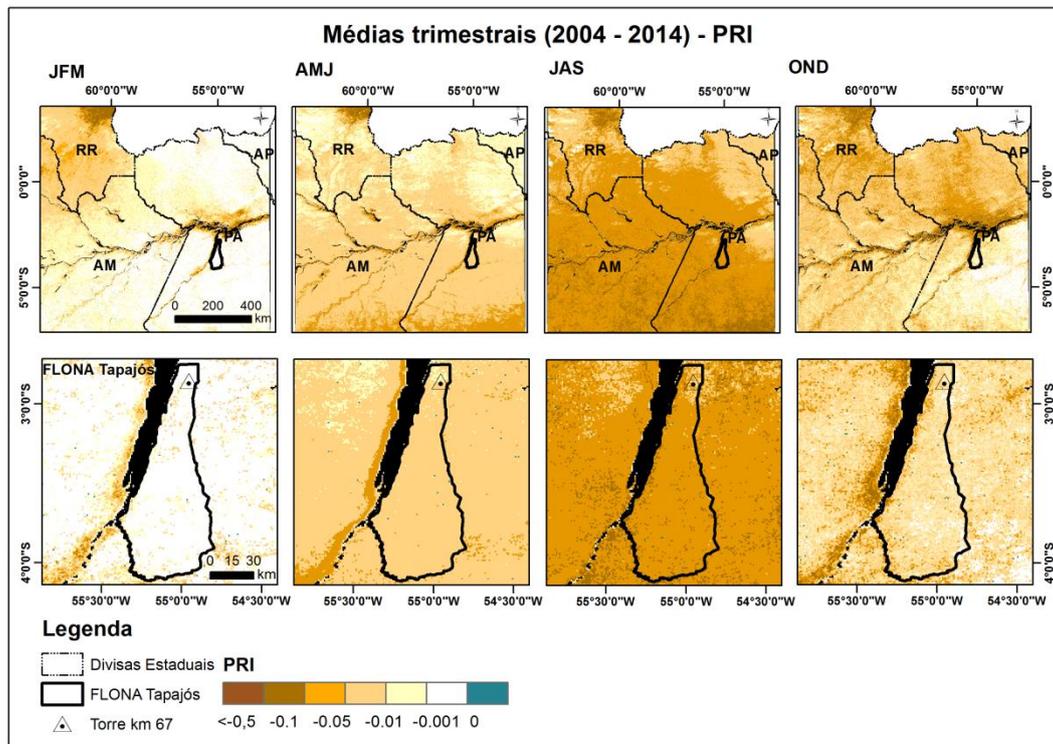
Nos quadros em colunas estão as médias de EVI, para o *tile* MODIS-MAIAC, para os quatro trimestres: JFM, AMJ, JAS e OND. Nos quadros da segunda linha está destacada a área onde se situa a FLONA Tapajós. Os valores mais altos de EVI médio estão representados em escala de cor verde.

Fonte: Produção da autora.

O padrão trimestral do EVI da floresta (Figura 5.3), observado até então, remete a uma dependência da disponibilidade de radiação, que é maior em JAS e OND. Porém, ao observar as médias trimestrais do índice PRI - que quanto mais negativo se associa a um maior estresse hídrico da vegetação e perda de sua

eficiência em utilizar a radiação na fotossíntese (HILKER et al., 2009) - é possível verificar também a limitação da floresta pela disponibilidade de água.

Figura 5.4 - Médias trimestrais do índice PRI, de 2004 a 2014.



Nos quadros em colunas estão as médias de PRI, para o *tile* MODIS-MAIAC, para os quatro trimestres: JFM, AMJ, JAS e OND. Nos quadros da segunda linha está destacada a área onde se situa a FLONA Tapajós. Os valores mais negativos do PRI médio estão representados em cores quentes, referentes à perda da eficiência fotossintética da vegetação.

Fonte: Produção da autora.

A partir do segundo trimestre, a região começa a apresentar índice PRI mais negativo, acompanhando os índices pluviométricos que começam a diminuir, da fronteira sudeste às áreas centrais. Os valores mais negativos de PRI para a floresta ocorrem em JAS, trimestre de menor precipitação, mas de ganho no EVI. Porém, ao longo dos períodos mais secos as áreas correspondentes ao demais UCTs tendem a sofrer maior estresse hídrico do que a floresta, com valores de PRI extremos e mais persistentes. Contudo, para a área de floresta existe uma tendência de suavização do PRI de OND a JFM, acompanhando o retorno das chuvas, o que reflete a recuperação de sua eficiência fotossintética. Assim, em JFM a FLONA Tapajós praticamente não apresentou perda da eficiência

fotossintética, ou seja, os valores de PRI são próximos de 0. Sousa et al. (2017) observaram um padrão semelhante do PRI sobre a Amazônia. De acordo com os autores existe um padrão de perda da capacidade fotossintética a partir de julho, de sentido sudeste-centro, podendo chegar a -0,12 nas áreas mais extremas, e que se reestabelece a partir de outubro. Próximo à região da FLONA Tapajós, de outubro a junho, o PRI ficou em média acima de -0,07 (SOUSA et al., 2017).

Tal divergência no padrão espacial médio dos dois índices (EVI e PRI) demonstra a complexidade em interpretar a sazonalidade dos dados orbitais.

5.2 Padrões espaço-temporais durante a estação seca

5.2.1 Mudanças no padrão fenológico em relação à média

O percentual de alteração líquida (δ) foi calculado para as variáveis fenológicas e ambientais, de forma a verificar sua anomalia média durante a estação seca, em relação à média global de 2004 a 2014. Este cálculo foi realizado por pixel de acordo com a Equação 4.2 (ver seção 4.5.2), sendo que a estação seca definida para cada pixel incluiu os meses de precipitação abaixo de 100 mm. Assim, a alteração líquida não contrapõe a estação seca com a chuvosa, mas sim com a média por pixel de todo o período estudado. Portanto, um alteração positiva significa que durante a estação seca houve ganho em relação à média de todo o período, mas isso não exclui a possibilidade de existir uma queda em relação à estação chuvosa.

A Figura 5.5 apresenta o δ das variáveis ambientais, que permitiu verificar o percentual de alteração da disponibilidade de água e radiação durante a estação seca. Como já esperado, o δ da precipitação mensal, apresentado na Figura 5.5-a, possui valores negativos expressivos, sendo que nas regiões mais escuras chega a chover menos de 80 % da média (2004-2014). O padrão espacial do δ também é próximo à duração da estação seca observada por Moura et al. (2015), no qual as regiões saindo das áreas centrais da Amazônia, na direção sudeste, possuem estação seca mais severa.

Em consequência dos baixos índices pluviométricos nos meses da estação seca, a alteração líquida do EEA, relacionada à disponibilidade de água no solo (Figura

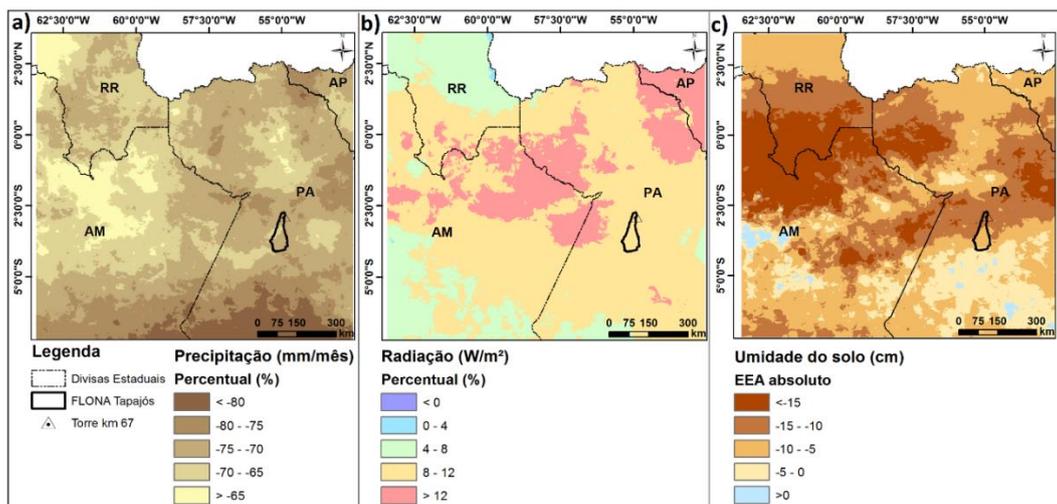
5.5-c), também apresenta, em quase toda a área de estudo, valores negativos. Como os coeficientes de EEA são uma variação do armazenamento de água na superfície terrestre (ver seção 4.1.1), a média global (2004-2014) para qualquer região fica próxima a zero. Assim, quando o cálculo do percentual é realizado ele retorna valores muito altos, podendo ocorrer valores abaixo de -1.000 %. Por isso, a alteração líquida da Figura 5.5-c está em valores médios absolutos de EEA (em centímetros), calculados com a Equação 4.2, excluindo o termo que normaliza os valores pela média. A região centro-oeste da área de estudo apresentou alteração líquida de EEA mais negativa, com valores acima de 15 cm de perda de armazenamento de água (Figura 5.5-c em cores fortes). Porém, essa região em média não possui estação seca bem definida como mostra a Figura 4.8 e como indicado por Moura et al. (2015), assim, os poucos meses entre 2004 e 2014 que tiveram precipitação abaixo de 100 mm nessa região geraram grande perda de armazenamento de água e influenciaram o resultado de alteração líquida. Já a região sudeste da área de estudo, que possui estação seca mais longa e δ de precipitação mais negativa, mostrou uma alteração líquida de EEA não tão expressiva, com alguns valores positivos (Figura 5.5-c em cores claras). Este padrão também pode estar relacionado com a defasagem entre o dado GRACE e TRMM, já comentada na seção 5.1 e melhor analisada na Figura 5.2, portanto, ao selecionar somente os meses da estação seca no cálculo do δ de umidade do solo, os meses de menor EEA podem não estar sendo contabilizados, devido à defasagem.

Ao contrário do δ de disponibilidade de água, o δ da radiação predominantemente foi positivo em todo o *tile* estudado, com regiões acima de 12 % de aumento da disponibilidade de radiação durante a estação seca, representadas em vermelho (Figura 5.5-b). As regiões noroeste e sudoeste do *tile* apresentaram valores mais baixos de alteração líquida. Grande parte do Estado do Pará e do Amazonas, situados dentro da área de estudo, e onde está inserida a FLONA Tapajós, apresentam δ de radiação entre 8 e 12 %, em relação à média global (2004-2014).

Em relação à variação da disponibilidade das variáveis ambientais dentro da área da FLONA Tapajós, durante a estação seca, pode-se observar na Figura 5.5: δ de precipitação mensal predominantemente negativa, entre -75 e -70 %; δ de

radiação incidente mensal positiva, entre 8 e 12 %; e alteração líquida absoluta de armazenamento de água negativa, entre -5 e -15 cm de perda. Ou seja, a estação seca definida por pixel, de janeiro de 2004 a junho de 2014, gera em média perda significativa na disponibilidade de água, tanto em forma de precipitação quanto como umidade do solo, e ganho na disponibilidade de radiação para a FLONA Tapajós, sendo necessário então entender o que ocorre com a fenologia da vegetação.

Figura 5.5 - δ das variáveis ambientais no *tile* MODIS estudado, durante a estação seca.



Alteração líquida dos meses da estação seca em relação à média global (2004-2014) para o *tile* MODIS-MAIAC. Em (a) está o δ de precipitação mensal, com os valores mais negativos em cores escuras. Em (b) observa-se o δ de radiação incidente, com os valores positivos em cores quentes. O δ EEA (c) está em valores absolutos de alteração, tendo os valores negativos em cores escuras e as áreas com valores positivos em azul.

Fonte: Produção da autora.

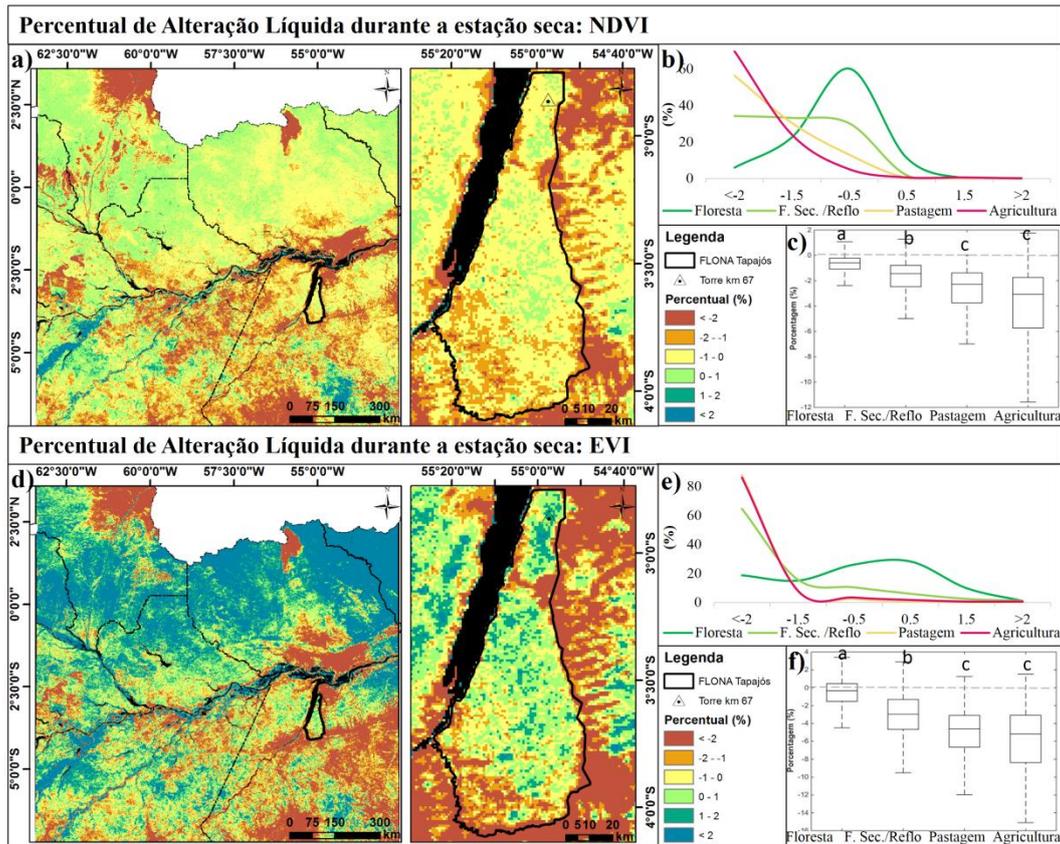
A Figura 5.6 apresenta o δ dos índices NDVI e EVI, sobre o *tile* estudado e para a FLONA Tapajós, associados à estrutura dos dosséis florestais e à capacidade fotossintética da vegetação, assim como as análises estatísticas da distribuição espacial. As cores quentes em (a) e (d) representam δ negativa, já as cores frias representam δ positiva, como realizado por Moura et al. (2015), ou seja, podem indicar a perda e o ganho no vigor da vegetação, respectivamente. Na Figura 5.6 são apresentados ainda os histogramas de distribuição de cada UCT, criados com os pixels do retângulo onde a FLONA Tapajós está inserida (compreende uma

área de 152x69 pixels), divididos nas classes de percentual utilizadas nas imagens de δ . Também se observam os *boxplots* dos pixels utilizados nos histogramas e o resultado do teste de Kruskal Wallis (KW) - Comparação Múltipla, representado pelas letras. O teste de diferença significativa foi realizado retirando 100 pixels de cada UCT da área da FLONA Tapajós, com nível de significância de 5 %. Esta análise estatística espacial foi realizada da mesma forma para todas as outras variáveis fenológicas e também para os resultados de correlação por pixel da seção 5.2.2. Além disso, a estatística descritiva das imagens encontra-se na tabela B.1 em anexo, assim como os p-valores dos testes de hipótese, com destaque em vermelho para os resultados significativos.

O δ NDVI apresentou valores baixos nas regiões de floresta, dentro do *tile* MODIS-MAIAC, alterando entre -1 e 1 % durante a estação seca (Figura 5.6-a). Já o δ EVI apresentou valores mais expressivos, com extensas regiões de $\delta > 2$ % (Figura 5.6-d). Porém, ambos os índices apresentaram valores extremos negativos, inferiores a -2 %, nas áreas que compreendem os demais UCT. O EVI e o NDVI mostraram maior área com δ positivo na região Equatorial da Amazônia, porém, ao analisar somente a área da FLONA Tapajós, é possível verificar que não houve predominância de δ positivo durante a estação seca, ocorrendo esporadicamente nas regiões centrais e ao norte, próximo à torre km 67 (Figura 5.6-a e 5.6-d). Os histogramas de distribuição (Figura 5.6-b e 5.6-e) mostram a floresta se deslocando em direção às classes positivas de alteração líquida, acompanhada da curva de floresta secundária/reflorestamento, mas não com a mesma magnitude. Isso faz com que ambos sejam significativamente diferentes entre si e da pastagem/agricultura, que apresentaram mesma distribuição (Figura 5.6-c e 5.6-f).

A média e a mediana do δ NDVI e δ EVI foram negativas para as quatro classes de UCT e o percentual de área com δ negativo também foi superior em todas. O NDVI apresenta percentual de δ positivo na floresta próximo a 11 % com valores não ultrapassando 1 % de alteração, enquanto do EVI foi de 40 %, com valores de δ mais expressivos (ver Tabela B.1). Esses resultados indicam que a maior parte dos pixels de floresta apresenta queda no EVI e NDVI durante a estação seca, e, corroboram com os resultados do PRI, que indicam queda da eficiência fotossintética durante a estação seca.

Figura 5.6 - δ NDVI e δ EVI na FLONA Tapajós, durante a estação seca.



Alteração líquida dos meses da estação seca em relação à média global (2004-2014). Em (a) e (d) estão o δ NDVI e o δ EVI, para o tile e para a área da FLONA, sendo que as áreas em verde representam ganho de alteração líquida durante a estação seca. Em (b) e (e) estão os respectivos histogramas de distribuição para os UCTs: floresta, floresta secundária/reflorestamento, pastagem e agricultura. Em (c) e (f) estão os *boxplots* indicando a mediana, os percentis (5 e 95) e os valores máximos e mínimos significativos. As letras diferentes representam diferença significativa entre as distribuições de cada UCT e a linha tracejada horizontal marca $\delta=0$.

Fonte: Produção da autora.

A Figura A.3 em anexo apresenta o δ PRI em valores absolutos, sem a normalização com a média global (2004-2014), por esta também ser muito próxima de zero. As parcelas sul/sudoeste do tile apresentaram valores mais negativos de δ PRI, inferiores a -0,05. Dentro da FLONA, o δ PRI ficou predominantemente entre -0,05 e -0,025 durante a estação seca (Figura A.3). Não houve um padrão claro de diferença no δ PRI nos UCTs diferentes de floresta, como ocorreu no δ EVI e NDVI. Algumas pequenas regiões da área total tiveram δ PRI positivo (em verde), principalmente referentes às demais classes de uso e

cobertura da terra. Mas, de forma geral, toda a área apresentou δ PRI negativo na estação seca, em relação à média do período, indicando perda da capacidade fotossintética da vegetação.

Assim, a alteração líquida do EVI sugere que os dosséis florestais podem estar ganhando estrutura durante a estação seca, ou modificando a demografia das folhas, apenas em pequenas regiões centrais da FLONA, devido ao δ positivo e ao comportamento extremamente diferente dos demais UCTs.

As evidências de alteração líquida podem refutar a hipótese H0 do presente trabalho (ver seção 1.1), fundamentada no trabalho de Morton et al. (2014), de que os dosséis florestais da Amazônia mantêm sua estrutura constante na estação seca. No entanto, existe a incerteza da significância do percentual de alteração, além disso, a floresta mostra padrão espacial tanto de ganho quanto de perda em seu vigor. Por isso, como proposto nos objetivos específicos, foram analisados também outros índices e parâmetros relativos à fenologia para testar esta hipótese.

As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam o percentual de alteração líquida das bandas espectrais individuais do MODIS-MAIAC e das imagens fração GV, NPV e Sombra, geradas com o MLME para a área da FLONA Tapajós. Tais variáveis também foram associadas à fenologia dos dosséis florestais e as análises estatísticas são as mesmas que as apresentadas na Figura 5.6. Na Figura A.4 está exemplificada as frações do MLME mensais de 2004 a 2014, em composição colorida RGB.

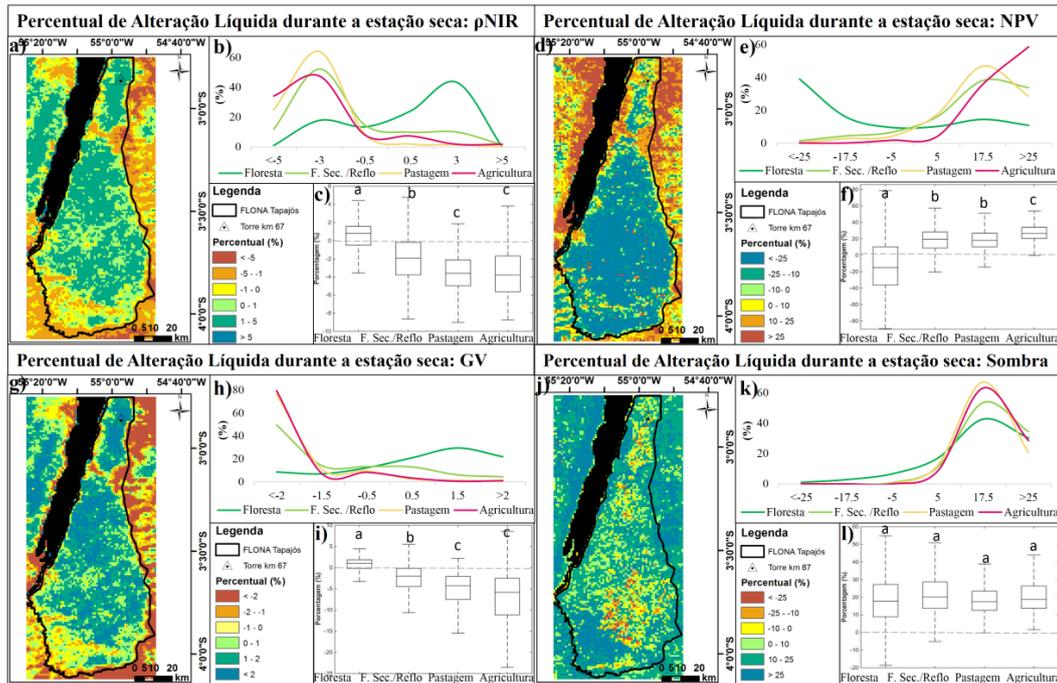
Como é possível verificar na Figura 5.7-a grande parte da floresta apresentou δ ρ NIR positivo (67,7 % dos pixels) e δ médio de 0,4 % (Tabela B.1). Essas regiões positivas ficaram predominantemente na classe entre 1 e 5 % de alteração líquida, sendo que o padrão espacial foi semelhante ao do δ EVI, porém, com uma considerável expansão na área dos valores positivos, do centro em direção às bordas da FLONA. O mesmo padrão foi observado para o δ GV, referente ao aumento da fração de vegetação verde (Figura 5.7-g). Contudo, a fronteira sudoeste da FLONA Tapajós apresentou δ negativo no EVI, ρ NIR e GV, durante a estação seca. A média e a mediana do δ GV e δ ρ NIR foram positivas para o UCT de floresta e negativas para os demais, sendo que este padrão também pode

ser identificado na Figura 5.7-b e 5.7-h, pois os histogramas referentes à floresta se deslocam em direção às classes positivas de alteração líquida, seguida pelo UCT de floresta secundária. O teste de hipótese mostrou também que as classes de agricultura e pastagem novamente não apresentaram diferença significativa para ambas as variáveis fenológicas (Figura 5.6-c e 5.6-i).

O δ positivo de NPV foi relacionado inicialmente à perda do vigor da vegetação na Figura 5.7-d, sendo representado em cores quentes, pois corresponde: à vegetação seca; ao aumento de serrapilheira, causado por perda de folhas; e à exposição de galhos e substrato. Porém, nas discussões (seção 6) também são apresentadas hipóteses indicando alteração demográfica dos dosséis relacionada ao aumento de NPV, assim, essa é uma interpretação prévia dos resultados. Portanto, a alteração líquida do NPV (Figura 5.7-d), durante toda a estação seca, foi predominantemente negativa, podendo indicar perda de matéria seca, o que vai a favor dos padrões espaciais da fração GV e ρ NIR, mas contra os resultados predominantes de δ EVI, δ NDVI e δ PRI. O comportamento da área de floresta, novamente foi completamente divergente das demais classes de UCT, com δ médio de -13,4 % (Tabela B.1), enquanto os demais tiveram δ médio positivo. O teste de comparação múltipla do δ NPV (Figura 5.7-f) mostrou que a floresta secundária e a pastagem não apresentaram diferenças significativas entre si e ambas ganham NPV durante a estação seca, da mesma forma que a agricultura.

Já a fração sombra teve um comportamento diferente das demais variáveis fenológicas, pois as classes de UCT não foram significativamente diferentes entre si, segundo o teste de KW. A floresta teve o maior desvio padrão (Figura 5.7-l) e os quatro UCTs tiveram δ médio positivo (Tabela B.1). Porém, a pequena área central da FLONA Tapajós (distante das bordas), que são regiões de floresta mais densa (ver Figura 4.7), indicou um padrão inverso, com δ negativo (Figura 5.7-j). Este padrão também pode ser consequência da complexidade em selecionar um *endmember* de sombra na área de floresta, com o dado MODIS. Assim, a aplicação do MLME pode inserir ainda as incertezas em relação ao modelo.

Figura 5.7 - δ das frações do MLME e δ ρ Nir na FLONA Tapajós, durante a estação seca.



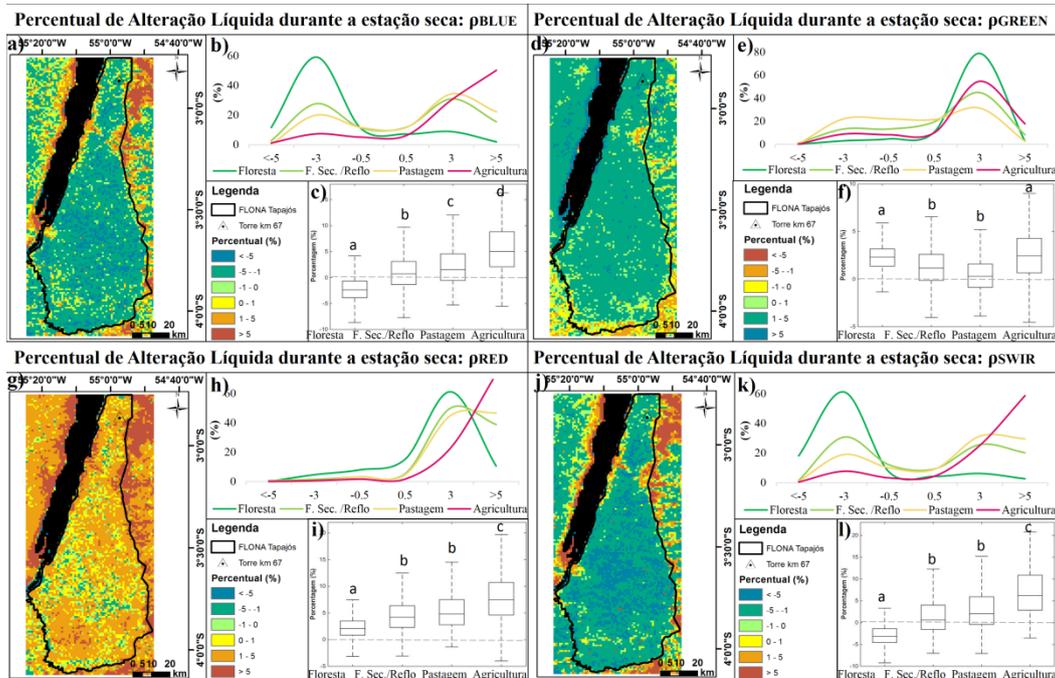
Alteração líquida dos meses da estação seca em relação à média global (2004-2014). Em (a), (d), (g) e (j) estão o δ das frações do MLME e o δ ρ NIR para a FLONA Tapajós, sendo que as áreas em verde representam δ positivo durante a estação seca, exceto em (d) que representam δ negativo. Em (b), (e), (h) e (k) estão os respectivos histogramas de distribuição para os UCTs: floresta, floresta secundária/reflorestamento, pastagem e agricultura, criados para a área da FLONA. Em (c), (f), (i) e (l) estão os *boxplots* indicando a mediana, os percentis (5 e 95) e os valores máximos e mínimos significativos. As letras diferentes representam diferença significativa entre as distribuições de cada UCT e a linha tracejada horizontal marca $\delta=0$.

Fonte: Produção da autora.

A Figura 5.8 apresenta a alteração líquida das demais bandas espectrais individuais do MODIS-MAIAC, durante a estação seca, em relação à média do período (2004-2014). Novamente, como realizado nas Figuras 5.6 e 5.7, as cores utilizadas para as classes de alteração líquida das bandas espectrais estão de acordo com seu possível significado para o vigor da vegetação. A alteração líquida positiva da ρ Green foi representada em verde porque o ganho nesta banda, em relação às bandas do azul e do vermelho, pode ser associado ao brotamento de folhas novas nos dosséis florestais (LOPES et al., 2016), porém, esse seria um ganho relativo. Então, essa foi somente uma interpretação prévia da alteração líquida das bandas individuais, pois outras hipóteses podem gerar interpretações

diferentes. Por exemplo, o ganho na reflectância em toda a faixa do visível pode ser associado à troca de matéria viva por matéria seca, à troca de componentes foliares por lenhosos e à mudança na orientação das folhas nos dosséis florestais (ASNER, 1998).

Figura 5.8 - δ das bandas espectrais na FLONA Tapajós, durante a estação seca.



Alteração líquida dos meses da estação seca em relação à média global (2004-2014). Em (a), (d), (g) e (j) estão o δ das demais bandas individuais MODIS-MAIAC para a FLONA Tapajós, sendo que as áreas em verde representam δ negativo durante a estação seca, exceto em (d) que representam δ positivo. Em (b), (e), (h) e (k) estão os respectivos histogramas de distribuição para os UCTs: floresta, floresta secundária/reflorestamento, pastagem e agricultura. Em (c), (f), (i) e (l) estão os *boxplots* indicando a mediana, os percentis (5 e 95) e os valores máximos e mínimos significativos. As letras diferentes representam diferença significativa entre as distribuições de cada UCT e a linha tracejada horizontal marca $\delta=0$.

Fonte: Produção da autora.

O δ ρ Blue e δ ρ SWIR apresentaram padrão espacial semelhante, com predominância de δ negativo na área de floresta dentro da FLONA, ficando com média igual a -2,1 e -2,6 %, com 81,7 e 86,5 % de área negativa, respectivamente (Tabela B.1). O oposto ocorreu para os demais UCT, como mostra os histogramas e *boxplots* nas Figuras 5.8-b, (c), (k) e (l). O resultado do δ ρ Red apresentou

predominância de δ positivo em toda a região, sendo que somente 12,8 % da área de floresta teve δ negativo, se estendendo nas áreas centrais da FLONA. Os quatro UCTs tiveram δ médio positivo, porém, a floresta teve o menor valor, de 2,3 % contra a maior média de 7,9 % da agricultura (Tabela B.1). Assim, a distribuição da floresta se deslocou para as classes menores de alteração líquida, sendo significativamente diferente das demais classes de UCT, mas ainda assim demonstrou aumento durante a estação seca (Figura 5.8-h e 5.8-i). O δ ρ Green apresentou valores positivos na floresta durante a estação seca (Figura 5.8-d), porém, os demais UCTs tiveram o mesmo padrão, ou seja, a floresta não teve distribuição significativamente diferente, se assemelhando ainda com a agricultura (Figuras 5.8-e e 5.8-f). Dessa forma, a ρ Green não aumenta concomitante à perda de ρ Red, podendo então representar diminuição da capacidade fotossintética dos dosséis durante a estação seca, afinal todos as demais classes de UCT também tiveram alteração líquida positiva.

A Figura 5.9 apresenta uma análise de correlação entre as imagens de alteração líquida, das variáveis ambientais e fenológicas, sendo interpretada pelo cruzamento linha/coluna. Para realizar a correlação foram selecionados 100 pixels aleatórios somente do UCT floresta, localizados dentro do contorno da FLONA Tapajós, e a significância da correlação foi obtida com o teste *t*. Essa análise permitiu verificar a correlação entre o padrão espacial da floresta e a limitação pela disponibilidade de água e radiação. Na parte inferior da Figura 5.9 também estão os gráficos de dispersão das variáveis. Estão destacadas em azul as correlações significativas negativas e em vermelho as positivas.

A alteração líquida de nenhuma variável fenológica teve correlação significativa com a precipitação, como mostram os valores de R e as dispersões dos gráficos. Somente o NDVI teve correlação negativa com o δ de radiação, ou seja, se a radiação aumenta neste período o padrão do NDVI é de queda (1ª e 2ª coluna). Porém, 70 % das variáveis fenológicas apresentaram correlação significativa com o δ de umidade, com exceção do ρ Blue, ρ SWIR e Sombra. Destas, 42 % indicam que a vegetação está respondendo ao estresse hídrico (*browning*) e 58% indicam *greening* (NDVI, EVI, GV e ρ NIR). A resposta do ρ Green, ρ Red e o NPV indicam secamento da vegetação, fugindo do padrão que associa o ganho do vigor

da vegetação concomitante à perda da umidade, pois todos aumentam com a queda de umidade do solo.

Figura 5.9 - Correlação entre as imagens de δ para a área de floresta da FLONA.

	Prec.	Rad.	Umid.	NDVI	EVI	ρ_{blue}	ρ_{green}	pred	ρ_{nir}	ρ_{swir}	GV	NPV	Som.
Prec.	1	0,11	-0,10	0,12	0,18	0,03	0,18	-0,02	0,18	-0,04	0,10	-0,05	0,13
Rad.		1	-0,09	-0,24	-0,15	0,06	0,09	0,06	-0,06	0,03	-0,04	-0,08	0,14
Umid.			1	-0,25	-0,39	-0,16	-0,28	-0,21	-0,37	-0,18	-0,33	-0,39	-0,04
NDVI				1	0,79	-0,52	0,09	-0,52	0,55	-0,48	0,63	-0,32	-0,41
EVI					1	-0,27	0,49	-0,28	0,93	-0,30	0,89	-0,31	-0,42
ρ_{blue}						1	0,33	0,81	-0,21	0,80	-0,47	0,69	0,67
ρ_{green}							1	0,44	0,60	0,09	0,41	-0,02	0,25
pred								1	-0,17	0,65	-0,36	0,56	0,71
ρ_{nir}									1	-0,26	0,93	-0,35	-0,42
ρ_{swir}										1	-0,45	0,79	0,51
GV											1	-0,50	-0,54
NPV												1	0,53
Som.													1

Correlação e teste t entre as imagens de δ para 100 pixels aleatórios do UCT floresta (inserido no contorno da FLONA Tapajós). A interpretação da tabela é feita através do cruzamento linha/coluna, sendo que na parte superior estão os valores de R e na parte inferior observam-se os gráficos de dispersão. Em preto as correlações não apresentam significância, em vermelho são significativamente positivas e em azul negativas.

Fonte: Produção da autora.

A correlação da fração sombra foi significativa e inversamente proporcional ao EVI, NDVI, ρ_{NIR} e GV. Ou seja, existe uma tendência de que a sombra nos dosséis diminua onde essas variáveis mostraram *greening*. Além disso, existe

tendência de que a fração sombra aumente nas regiões que apresentaram *browning*.

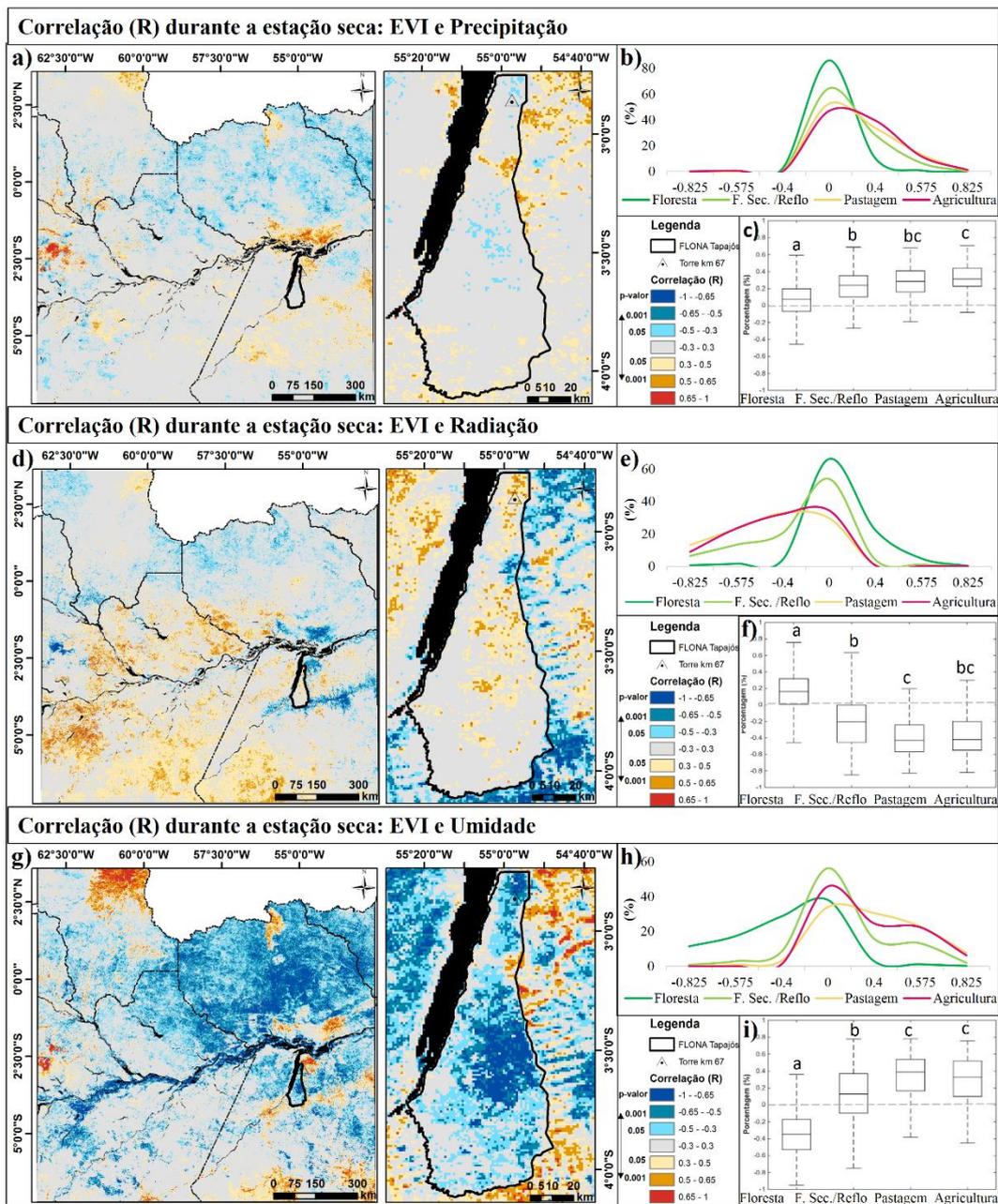
Mesmo ocorrendo correlações significativas com a variável de umidade do solo, os gráficos da Figura 5.9 ainda apresentam pontos bastante dispersos, distantes das linhas de tendência, o que conferiu as fracas correlações. É o caso também das correlações com a variável ρ_{Green} . Já as correlações da ρ_{NIR} com o EVI e a fração GV, por exemplo, apresentam uma dispersão de pontos igualmente distribuída sobre a linha de tendência (Figura 5.9).

Por não ser um índice normalizado o EVI demonstrou dependência da ρ_{NIR} muito superior a ρ_{Red} ($R=0,93$ e $R=-0,28$ respectivamente), sendo que o mesmo ocorreu para a fração GV, mostrando que essas duas variáveis fenológicas podem ser equivalentes ($R=0,89$). Esperava-se também uma correlação inversa significativa entre a ρ_{NIR} e a ρ_{Red} , ou seja, se ocorre aumento da reflectância no infravermelho próximo relativo ao *Green-up* da vegetação, ocorre aumento da absorção no vermelho, mas esse padrão não foi significativo. A fração NPV teve alta correlação significativa positiva com a ρ_{SWIR} e com a ρ_{Red} . Este resultado confirma a dependência do NPV às variações no SWIR do MODIS e confirma a redução da capacidade fotossintética, observada a partir do aumento da ρ_{Red} (ver Figura 2.4).

5.2.2 Correlação entre as variáveis fenológicas e ambientais

O coeficiente de correlação de Pearson (R) por pixel, entre as variáveis fenológicas e ambientais, considerou somente os meses da estação seca (déficit hídrico). A análise da distribuição espacial dos resultados também considerou as quatro classes de UCT. A estatística descritiva das imagens de correlação encontra-se em anexo na Tabela B.2. As classes dos valores de R nos mapas das Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 foram divididas de acordo com o p-valor, sendo que as duas cores mais quentes/frias representam áreas com nível de significância abaixo de 1 %, indicando forte correlação com a variável ambiental em questão.

Figura 5.10 - Coeficiente de correlação (R) entre o EVI e as variáveis ambientais.



Correlação por pixel durante a estação seca (2004-2014). Em (a), (d) e (g) estão as imagens de R EVI, para o *tile* e para a área da FLONA. As em cores quentes representam R positivo, as cores frias R negativo e em cinza estão as correlações nulas. Em (b), (e) e (h) estão os respectivos histogramas de distribuição para os UCTs: floresta, floresta secundária/reflorestamento, pastagem e agricultura. Em (c), (f) e (i) estão os *boxplots* indicando a mediana, os percentis (5 e 95) e os valores máximos e mínimos significativos. As letras diferentes representam diferença significativa entre as distribuições de cada UCT e a linha tracejada horizontal marca R=0.

Fonte: Produção da autora.

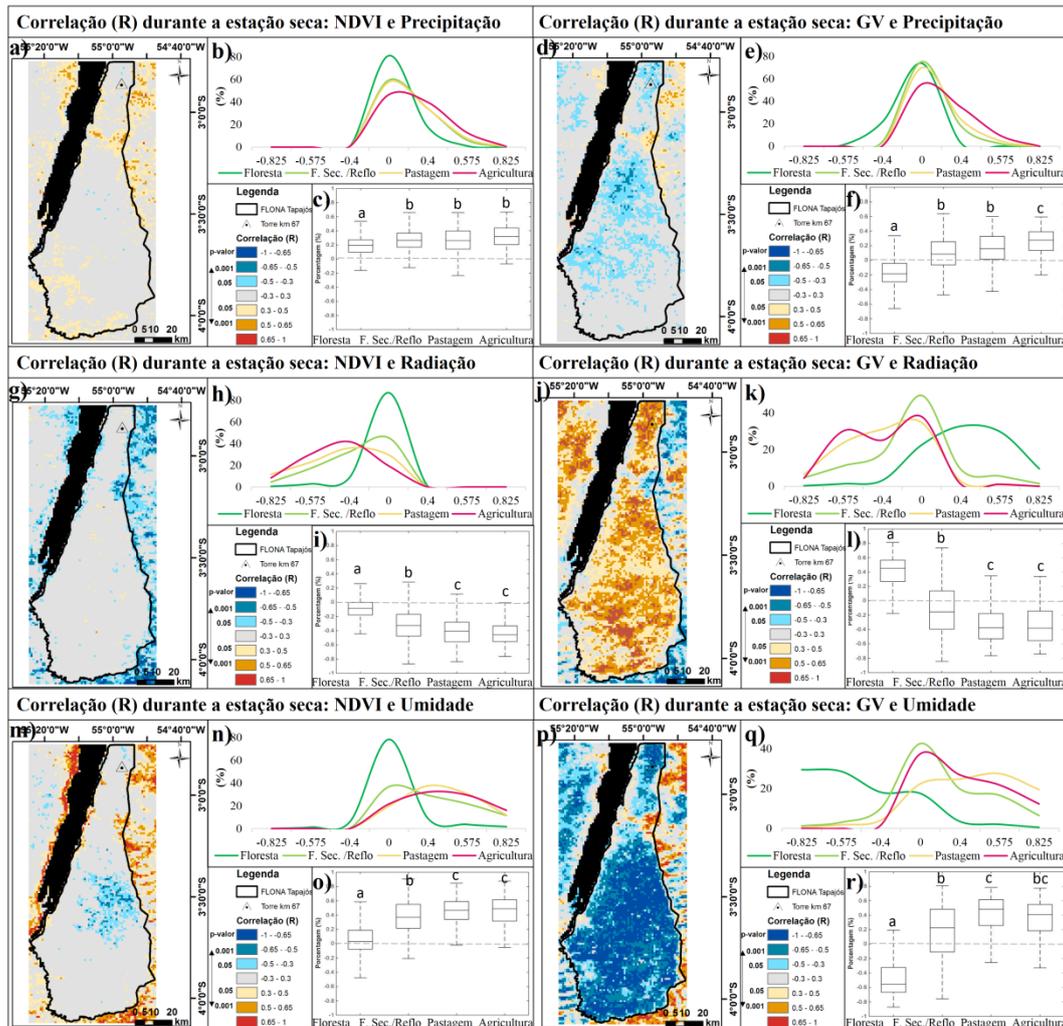
O padrão espacial da correlação entre o EVI e as variáveis ambientais pode ser observado na Figura 5.10, para a área do *tile* e da FLONA Tapajós. Grandes parcelas da área de estudo não apresentam correlação significativa com a disponibilidade de água e radiação, em cinza. Nas regiões da Amazônia Equatorial Oriental ocorreu maior significância nas correlações, predominando correlação negativa com a precipitação e com a umidade do solo. Saindo dessas regiões, na direção sudoeste do *tile*, predominam áreas de floresta com correlação positiva com a disponibilidade de radiação.

Para a área da FLONA, o EVI da floresta teve pouca correlação com a precipitação (Figura 5.10-a) e com a radiação (Figura 5.10-d), ao contrário dos demais usos, no entanto, algumas regiões centrais apresentaram significância. Esse padrão fez com que os histogramas da floresta ficassem centralizados próximo ao $R=0$ (correlação nula) e os histogramas dos demais usos fossem deslocados para as classes de correlação positiva (precipitação) e negativa (radiação). Já o R do EVI com a umidade do solo (Figura 5.10-g), mostrou forte significância durante a estação seca, se estendendo por uma área mais expressiva que as demais variáveis ambientais. Isso fez com que o histograma da floresta se deslocasse para as classes negativas do R, então conforme a umidade do solo diminui o EVI aumenta, enquanto o contrário ocorre para os demais usos. O R médio do EVI *versus* umidade foi de -0,32, sendo que aproximadamente 86,2 % da área de floresta teve R negativo. Para o EVI *versus* radiação estes valores foram de $R=0,14$ e 75,9% da área de floresta teve R positivo (Tabela B.2).

É interessante notar que algumas variáveis fenológicas apresentaram um padrão diferente nas áreas centrais da FLONA Tapajós (distantes das bordas). Este comportamento pode estar relacionado à vegetação que é mais densa (ver Figura 4.7), pois o NDVI médio (2004-2014) é mais alto, ou então pela irregularidade do terreno e características pedológicas (ver Figura 4.1-b). De forma a testar a influência da declividade e do tipo de solo no padrão espacial do R (EVI *versus* variáveis ambientais) foram gerados os *boxplots* da Figura A.5 em anexo. O teste de KW foi aplicado para as diferentes classes de solo e de declividade, mostrando que a declividade não gerou diferença significativa no padrão de R. Já o tipo de solo apresentou resultado significativo, sendo que os valores de R,

correlacionados com a precipitação e com a umidade do solo, sobre o latossolo amarelo tiveram em média distribuição mais negativa (Figura A.5-a e A.5-c). Este padrão pode estar relacionado à maior capacidade de armazenamento de água do latossolo, permitindo que o EVI aumentasse concomitante à queda na disponibilidade de água.

Figura 5.11 - Coeficiente de correlação (R) entre o NDVI, GV e as variáveis ambientais.



Correlação por pixel durante a estação seca (2004-2014). Em (a), (d), (g), (j), (m) e (p) estão as imagens de R NDVI e GV para a área da FLONA. As em cores quentes representam R positivo, as cores frias R negativo e em cinza estão as correlações nulas. Em (b), (e), (h), (k), (n) e (q) estão os respectivos histogramas de distribuição para os UCTs: floresta, floresta secundária/reflorestamento, pastagem e agricultura. Em (c), (f), (i), (l), (o) e (r) estão os *boxplots* indicando a mediana, os percentis (5 e 95) e os valores máximos e mínimos significativos. As letras diferentes representam diferença significativa entre as distribuições de cada UCT e a linha tracejada horizontal marca R=0.

Fonte: Produção da autora.

O NDVI apresentou correlações significativas com as variáveis ambientais somente em regiões de pastagem, agricultura e floresta secundária (Figura 5.11-a), ou seja, conforme a disponibilidade de água diminuiu nestes UCTs o NDVI diminuiu. Alguns pixels da parcela sudoeste da FLONA também tiveram este padrão, divergindo das áreas centrais, sugerindo limitação pela disponibilidade de água. Porém, os histogramas da floresta se deslocaram em direção às correlações nulas ($R=0$), fazendo com que sua distribuição fosse significativamente diferente das demais (Figura 5.11-c), com exceção de uma pequena área central da FLONA Tapajós, que teve correlação negativa com a umidade do solo.

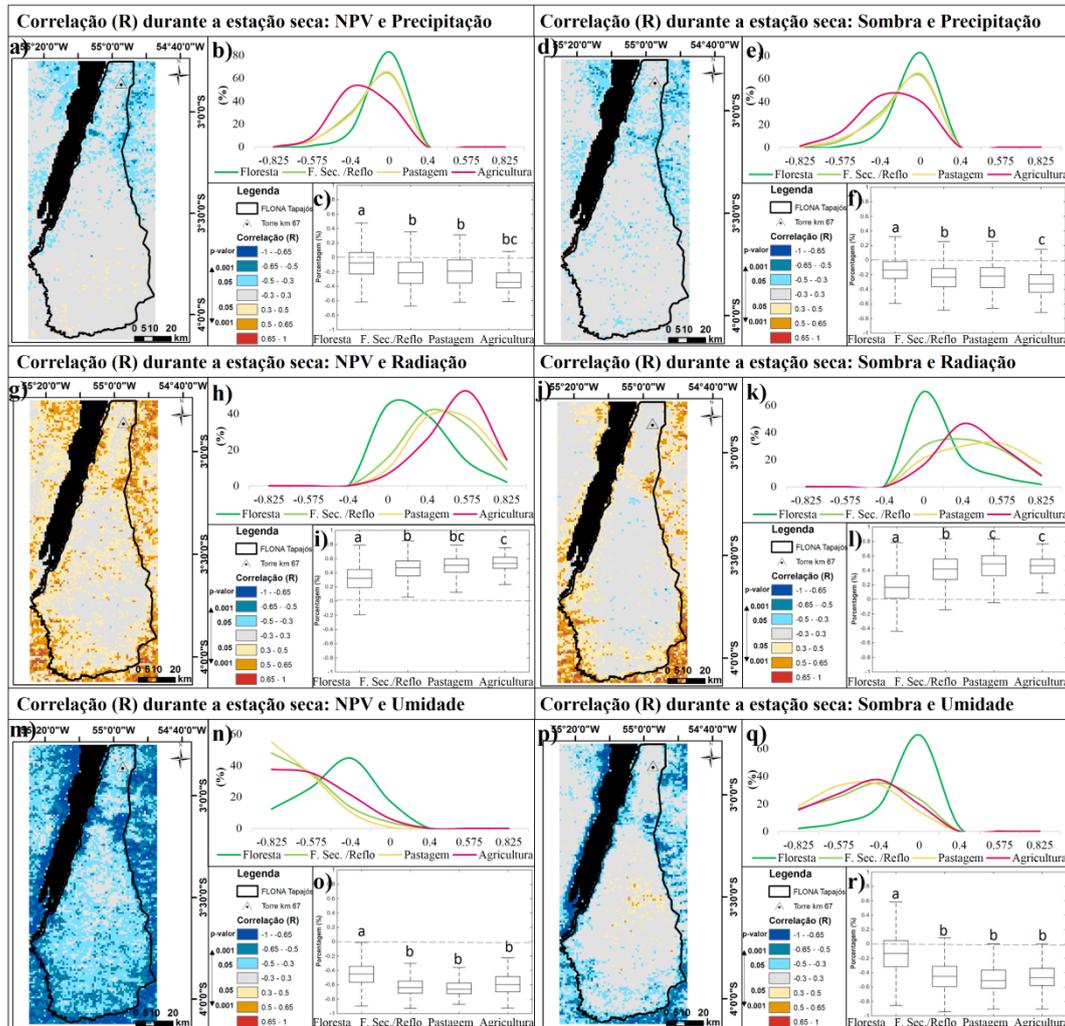
A fração GV apresentou novamente um padrão muito próximo ao das correlações do EVI, mas com correlações ainda mais significativas, como mostra a Figura 5.11. A floresta teve comportamento significativamente diferente dos demais UCTs tanto em relação à disponibilidade de água quanto de radiação, indicando forte limitação pela radiação. Aproximadamente 87,7 % da área de floresta teve correlação positiva entre GV e radiação, e 86,8 % foi negativa entre GV e umidade do solo (Tabela B.2).

A correlação da fração NPV com as variáveis ambientais na floresta foi significativamente diferente dos demais usos, porém, tiveram o mesmo padrão (Figura 5.12). Dentro das áreas centrais da FLONA as correlações não foram significativas, mas saindo dessas regiões em direção às bordas (e às classes de UCT) o NPV demonstrou ganho concomitante ao aumento de radiação e à diminuição da disponibilidade de água, com correlações positivas e negativas, respectivamente. A floresta teve 94,3 % de sua área com correlações positivas entre NPV e radiação, com 62,9 % e 99,7 % da área com correlação negativa entre precipitação e umidade do solo, respectivamente (Tabela B.2).

A fração sombra apresentou um padrão espacial muito semelhante ao da fração NPV, como pode ser observado na Figura 5.12, mas as correlações apresentaram menor significância. Os testes de hipótese também indicaram a diferença significativa da floresta com as demais classes de UCT e a distribuição ficou centralizada nas correlações nulas. Pequenas regiões centrais da FLONA apresentaram correlação positiva entre a sombra e a umidade do solo, indicando

que a sombra diminuiu nessas áreas, durante a estação seca. O oposto foi observado nas bordas inferiores e nas demais coberturas da terra.

Figura 5.12 - Coeficiente de correlação (R) entre a fração NPV, Sombra e as variáveis ambientais.



Correlação por pixel durante a estação seca (2004-2014). Em (a), (d), (g), (j), (m) e (p) estão as imagens de R NPV e Sombra para a área da FLONA. As em cores quentes representam R positivo, as cores frias R negativo e em cinza estão as correlações nulas. Em (b), (e), (h), (k), (n) e (q) estão os respectivos histogramas de distribuição para os UCTs: floresta, floresta secundária/reflorestamento, pastagem e agricultura. Em (c), (f), (i), (l), (o) e (r) estão os *boxplots* indicando a mediana, os percentis (5 e 95) e os valores máximos e mínimos significativos. As letras diferentes representam diferença significativa entre as distribuições de cada UCT e a linha tracejada horizontal marca R=0.

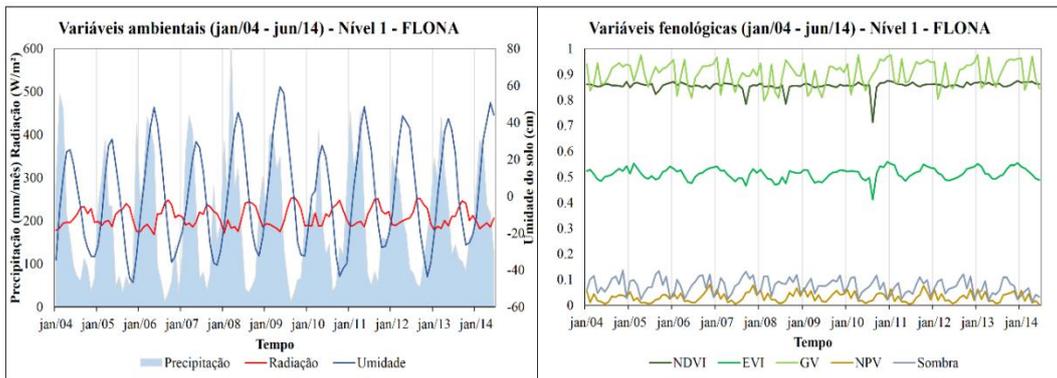
Fonte: Produção da autora.

Entre as três variáveis ambientais, a precipitação foi a que menos apresentou correlações significativas com as variáveis fenológicas. Ao contrário da radiação e da umidade do solo, que de forma geral tiveram influência inversa sobre a fenologia, indicando maior limitação da vegetação ao aumento de radiação. Porém, o padrão espacial também é característico, sendo que a ocorrência do aumento do vigor da vegetação, induzido pela radiação, se apresenta geralmente nas áreas centrais e distantes das bordas, onde floresta é mais densa, e também sobre a ocorrência do latossolo amarelo.

5.3 Análise das séries temporais orbitais

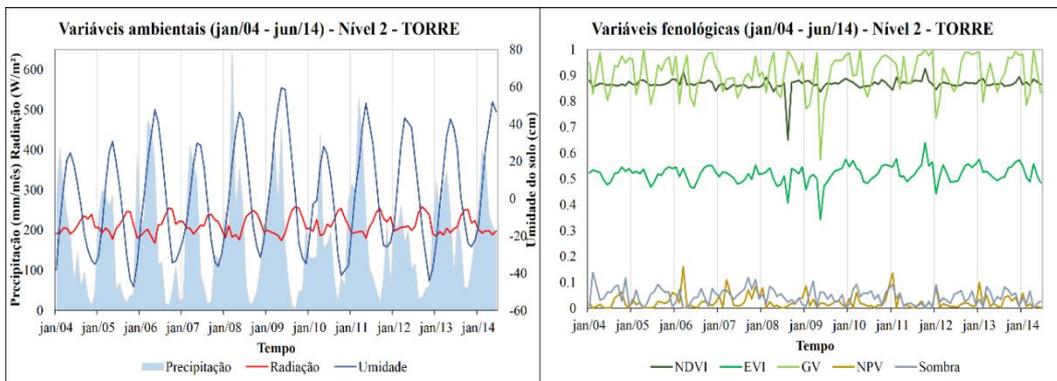
As séries temporais da FLONA Tapajós estão apresentadas na Figura 5.13 para o nível da FLONA (Nível 1) e na Figura 5.14 para o nível da Torre (Nível 2) (ver Figura 4.7). A maior precipitação média mensal foi de 678 mm em março de 2008 (Nível 2). No Nível 1 de análise os meses mais secos são julho, agosto e setembro, com precipitação abaixo de 100 mm em média, já os mais chuvosos são fevereiro, março e abril, com média mensal acima de 300 mm. A precipitação acumulada de julho a novembro foi mais expressiva em 2007 (623 mm), quase três vezes maior que a precipitação acumulada na estação seca de 2009 (241 mm). Em 2008 ocorreu o maior valor acumulado de janeiro a junho (2.011 mm) e em 2010 o menor (1.354 mm). A combinação das baixas precipitações consecutivas, na estação seca de 2009 e na estação chuvosa de 2010, podem ter causado os baixos coeficientes de EEA em 2010 e a forte queda nos índices EVI e NDVI em agosto de 2010 (Figura 5.13). De acordo com Xu et al. (2011) ocorreu perda intensa e generalizada na capacidade fotossintética da Amazônia durante a seca severa de 2010, mas que aqui só foi observada ao Nível da FLONA. A umidade do solo demonstrou defasagem com a precipitação nos dois níveis de análise, tanto nos picos de cheia quanto nos picos de vazante, sendo que os menores valores de armazenamento de água foram próximos a -40 cm, ocorrendo no final da estação seca dos anos de 2005 e de 2010. Já o maior EEA observado nas séries ocorreu na estação chuvosa de 2009, atingindo quase 60 cm de espessura equivalente de água. Os períodos de máxima disponibilidade de radiação incidente ocorreram nos meses de menor índice pluviométrico.

Figura 5.13 - Séries temporais das variáveis ambientais e fenológicas para a FLONA.



Fonte: Produção da autora.

Figura 5.14 - Séries temporais das variáveis ambientais e fenológicas para a Torre.



Fonte: Produção da autora.

O NDVI demonstrou menor oscilação que as demais variáveis fenológicas em ambos os níveis de análise, o que pode ser devido à sua saturação em regiões de floresta densa. As frações de NPV e Sombra apresentaram percentual médio baixo na área de estudo, tanto ao nível da FLONA quanto ao nível da Torre km 67, não ultrapassando 16 %. Já a fração GV teve um percentual médio alto, predominantemente acima de 80 %.

Ao comparar as séries extraídas ao nível da Torre km 67 (Figura 5.14) com as séries extraídas da área total da FLONA Tapajós (Figura 5.13) é possível verificar que as variáveis fenológicas apresentaram maior oscilação e algumas quedas abruptas nos índices não aparecem ao nível da FLONA, como nos meses de agosto de 2008 e maio de 2009. Assim como a forte queda nos índices em 2010 não foi observada ao nível da torre. Devido a tais divergências as análises estatísticas foram realizadas para os dois níveis, de forma a verificar se a análise

pontual (Torre km 67) é representativa de toda a FLONA, resultando no mesmo padrão sazonal.

5.3.1 Quebras de tendência interanuais

A Tabela 4.4 apresenta as quebras de tendência de todas as variáveis durante o período estudado, obtidas com o pacote BFAST. Dentre as variáveis ambientais, somente a série de umidade do solo apresentou *breakpoints*, possuindo uma única diferença entre os dois níveis de análise: no nível Torre um dos *breakpoints* ocorreu em fevereiro de 2009 e no nível FLONA ocorreu no mês seguinte. No nível Torre somente o EVI apresentou quebra de tendência, em maio de 2009, no qual houve uma queda abrupta na série temporal (Figura 5.14), no entanto, esse evento não foi explicado pelas outras variáveis.

Tabela 5.1 - *Breakpoints* obtidos com o BFAST em ambos os níveis de análise.

Variável – Nível 1 FLONA	<i>Breakpoints</i>	Variável – Nível 2 Torre	<i>Breakpoints</i>
Precipitação		Precipitação	
Umidade do solo	dez/05(-); jun/07(+) ; mar/09(-); set/10(+); abr/12(+)	Umidade do solo	dez/05(-); jun/07(+); fev/09(-); set/10(+); abr/12(+)
Radiação		Radiação	
NDVI		NDVI	
EVI	ago/07(+)	EVI	mai/09(+)
GV	jul/07(+) ; dez/11(+)	GV	
NPV	jan/06(-)	NPV	
Sombra		Sombra	

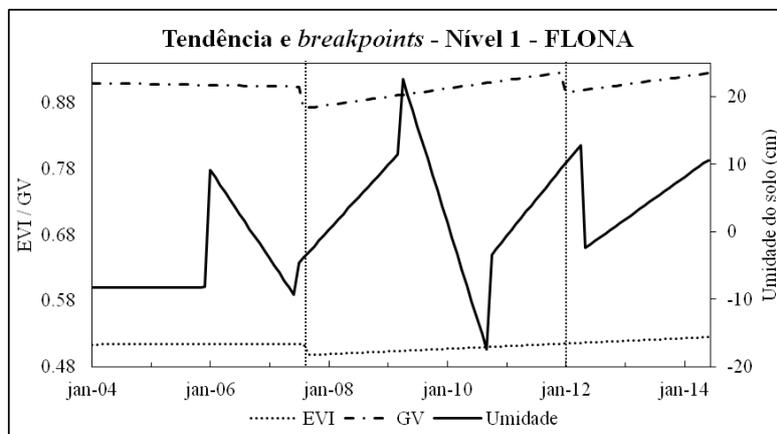
Ao lado das datas está a tendência após os eventos de *breakpoints*, se positiva (+) ou negativa (-). Em vermelho estão os meses com eventos próximos de *breakpoint*, representados na Figura 5.15.

Fonte: Produção da autora.

No Nível 1-FLONA o EVI apresentou *breakpoint* em agosto de 2007 e próximo a este evento ocorreram quebras de tendência em junho /2007, na umidade do solo, e em julho/2007 na fração GV (Tabela 4.4). Dessa forma essas ocorrências podem estar relacionadas entre si, como mostra a Figura 5.15, pois as três séries vieram

de uma tendência negativa e apresentaram tendência positiva após o *breakpoint*, sugerindo assim que em uma escala de tempo maior o aumento da umidade do solo pode ter influência positiva na fenologia da floresta. No entanto, os demais eventos que ocorreram na série de umidade não refletiram no EVI, principalmente a forte tendência negativa que ocorreu em 2009/2010 (Figura 5.15). O segundo evento que ocorre na série GV, em dezembro de 2011, se assemelhou às tendências da série de umidade, mesmo não ocorrendo *breakpoint* no mesmo mês, pois existe predomínio de tendências positivas nos dois últimos períodos da série, como observado na Figura 5.15.

Figura 5.15 - Quebras de tendência das séries de EVI, GV e Umidade do solo.



As linhas representam as componentes de tendência extraídas com o BFAST da série de EVI, GV e umidade do solo, no Nível 1. As quebras bruscas representam eventos de mudança de tendência. As linhas verticais marcam os meses de jul/2007 e dez/11.

Fonte: Produção da autora.

A pouca relação entre os *breakpoints* das variáveis fenológicas e ambientais pode ser consequência das séries temporais terem sido extraídas de uma área consideravelmente grande, além de representarem no tempo o mesmo uso e cobertura da terra. Por exemplo, Arantes (2014) realizou uma análise por pixel e identificou *breakpoints* através do BFAST, em imagens MODIS de 500 m de resolução espacial, identificando satisfatoriamente mudanças no uso da terra.

No entanto, Saatchi et al. (2013) utilizaram o BFAST em uma grande parcela de floresta, na região sudoeste da Amazônia (janela: 4°S-12°S e 76°W-66°W), para o dado do escaterômetro QuickSCAT, e identificaram uma quebra de tendência em junho de 2005, associado à seca severa que ocorreu. Após este evento as

anomalias do retroespalhamento foram negativas e a tendência não foi significativa até o final da análise, em 2009. Isso demonstrou a capacidade do BFAST em detectar perda significativa da estrutura da floresta para grandes regiões. Além disso, o resultado indicou uma lenta recuperação das propriedades estruturais dos dosséis (maior que quatro anos) após um evento extremo de seca, mesmo com a precipitação tendo oscilado de forma positiva e negativa (SAATCHI et al., 2013).

Os eventos apresentados na Figura 5.15 não foram observados na análise do Nível 2-Torre, o que reforça o resultado das análises espaciais, que mostraram existência de um padrão espacial divergente dentro da área da FLONA, com diferença na limitação pela disponibilidade de água e radiação, principalmente nas áreas a sudoeste do centro, que ficam distantes da Torre. Além disso, esperava-se observar *breakpoints* nas séries de precipitação, e conseqüentemente das variáveis fenológicas, em resposta às secas de 2005 e 2010, como observado por Saatchi et al. (2013). Porém, isso confirma que a parcela oriental da Amazônia Equatorial não foi tão afetada por tais eventos extremos de seca. No entanto, o início da série em 2004 pode não ter permitido a ocorrência de *breakpoint* em 2005, assim como a tendência positiva do EVI a partir de 2007 pode ter demonstrado a lenta recuperação da vegetação após o período seco.

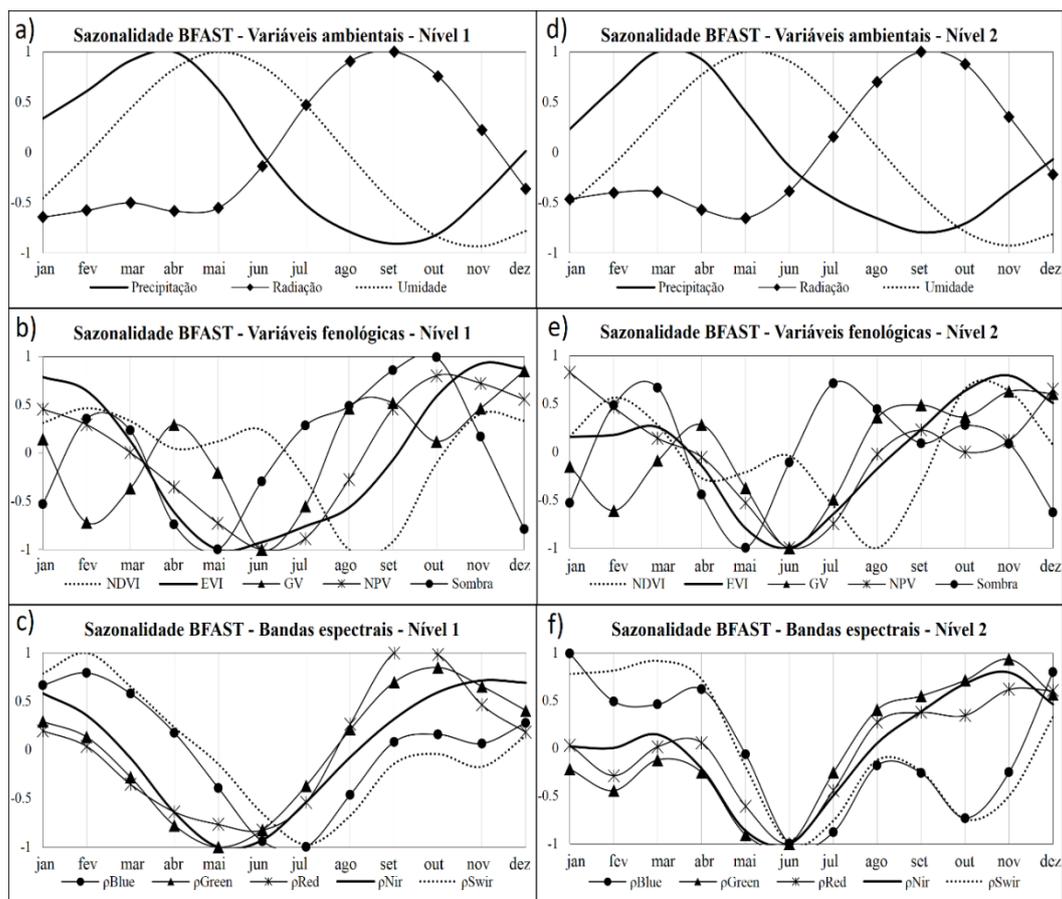
5.3.2 Comportamento intra-anual da vegetação em reposta à disponibilidade de água e radiação

A Figura 5.16 apresenta a componente sazonalidade extraída do BFAST para as variáveis fenológicas e ambientais, para o nível FLONA (Nível 1) e para o nível Torre (Nível 2). As curvas estão normalizadas pelo seu valor máximo em módulo. Nas Tabelas 5.2 e 5.3 estão as correlações (R) entre a curva de sazonalidade de todas as variáveis, uma forma de medir o quanto as curvas se assemelham, sendo que em vermelho e azul estão destacadas as correlações significativas, obtidas com a estatística *t* com 5 % de significância.

As variáveis relativas à disponibilidade de água e radiação apresentaram comportamento sazonal muito próximo nos dois níveis de análise. A precipitação máxima ocorre em março/abril e a mínima em setembro. Em contrapartida, o

máximo de radiação disponível ocorre em setembro e o mínimo em maio. Porém, em março a sazonalidade da radiação também tem um pico máximo não tão expressivo, que é resultado da posição da Terra em relação ao Sol, estando no equinócio. Esse resultado converge com o observado por Wu et al. (2016), no qual a PAR, medida na Torre km 67, aumenta de julho a outubro e então diminui, ficando com valores próximos nos meses seguintes.

Figura 5.16 - Componente sazonalidade/BFAST para as variáveis ambientais e fenológicas, em ambos os níveis de análise.



Componentes de sazonalidade (jan-dez) extraídas com o BFAST: séries temporais de janeiro de 2004 a junho de 2014, para os dois níveis de análise. Em (a) e (d) estão as variáveis ambientais. Em (b) e (e) estão os índices EVI, NDVI e as frações do MLME. Em (c) e (f) estão as bandas espectrais individuais. A sazonalidade representa a oscilação média durante o ano, assim, as curvas foram normalizadas pelo valor máximo em módulo, ficando entre -1 e 1.

Fonte: Produção da autora.

A curva da umidade do solo demonstrou defasagem com a de precipitação, confirmando a análise por pixel (ver Figura 5.2). Como observado na Tabela 5.2 e 5.3 este padrão faz com que a precipitação tenha forte correlação negativa com a radiação (-0,94 e -0,86), porém, correlação fraca com a umidade. No entanto, se a curva da umidade é defasada em dois meses a correlação em ambos os níveis de análise é de 0,99. Esse padrão pode influenciar a correlação entre a sazonalidade das variáveis fenológicas com a precipitação. De acordo com Saatchi et al. (2013) as anomalias negativas do retroespalhamento QuickSCAT mostrou defasagem de até três meses do dado de déficit hídrico do TRMM. Além disso, regiões de estação seca mais longa (como a FLONA Tapajós) demonstraram a maior defasagem, já as áreas centrais, com estação seca não definida, não apresentaram defasagem (SAATCHI et al., 2013).

A partir de junho a curva da precipitação entra em sua fase negativa de oscilação, por consequência a radiação entra em sua fase positiva. É interessante notar que em ambos os níveis de análise grande parte das variáveis fenológicas apresentam seu mínimo também em junho, seguido de um repentino aumento, sendo exemplo: NPV, GV, ρ_{Red} no Nível 1; EVI, GV, NPV e todas as bandas espectrais no Nível 2. O mínimo do EVI, Sombra, ρ_{Green} e ρ_{NIR} no Nível 1 ocorreu em maio, mesmo mês que ocorreu o mínimo de radiação. As bandas espectrais em geral apresentam aumento de reflectância nos últimos meses do ano, com exceção das bandas ρ_{Blue} e ρ_{SWIR} que mostraram uma queda característica em outubro (Nível 2) sendo este o mês que a radiação começa a diminuir e a precipitação aumentar. O NDVI foi mínimo em agosto para os dois níveis de análise, mas em abril ele também sofre uma considerável queda. Da mesma forma as frações do MLME apresentam mais de um pico de máximo e mínimo durante o ano. Segundo Wu et al. (2016) a curva de capacidade fotossintética, medida na Torre de fluxo do km 67, tem seu mínimo em julho e agosto, tendo um aumento repentino que dura toda a estação seca.

De acordo com Maeda et al. (2016) as medições em campo da serrapilheira na Torre km 67 mostram aumento ao entrar na estação seca e máximo em agosto/setembro, o que converge com o aumento de NPV mostrado na Figura

5.16, porém, a serrapilheira é mínima durante a estação chuvosa, o que não foi observado na componente de sazonalidade do NPV.

Os padrões da serrapilheira e da capacidade fotossintética, medidas em campo (WU et al., 2016; MAEDA et al., 2016), já denotam a sazonalidade da floresta, contrária à hipótese de manutenção da estrutura dos dosséis durante a estação seca. A componente sazonalidade do BFAST foi capaz de revelar o aumento das variáveis indicadoras, de ambas, no início da estação seca.

De acordo com a Tabela 5.2 e 5.3 a sazonalidade do NDVI apresentou correlação negativa com a radiação (-0,81) e positiva com a precipitação (0,66), porém, essas correlações são fracas ao nível da Torre km 67. Já o EVI só apresentou correlação significativa com a umidade do solo, sendo negativa em ambos os níveis de análise (-0,85 e -0,89), da mesma forma que as frações GV e NPV. A reflectância nas bandas do vermelho e do NIR apresentaram forte correlação negativa com a umidade do solo, ou seja, as duas aumentam na estação seca, mas a correlação no NIR é relativamente mais forte, o que explica o aumento do EVI e não necessariamente do NDVI, por ser um índice normalizado.

Tabela 5.2 - Correlação entre as componentes sazonalidade para o Nível 1 de análise.

	Prec.	Rad.	Umi.	NDVI	EVI	ρ_{blue}	ρ_{green}	pred	ρ_{nir}	ρ_{swir}	GV	NPV	Som.
Prec.	1	-0,94	0,56	0,66	-0,07	0,41	-0,63	-0,66	-0,34	0,63	-0,32	-0,23	-0,66
Rad.		1	-0,39	-0,81	-0,10	-0,41	0,53	0,61	0,20	-0,64	0,29	0,14	0,77
Umi.			1	0,05	-0,85	-0,44	-0,97	-0,90	-0,96	-0,19	-0,63	-0,91	-0,44
NDVI				1	0,41	0,39	-0,21	-0,36	0,10	0,55	-0,32	0,12	-0,50
EVI					1	0,76	0,78	0,66	0,95	0,61	0,41	0,92	0,20
ρ_{blue}						1	0,43	0,40	0,65	0,95	0,29	0,75	0,03
ρ_{green}							1	0,96	0,93	0,17	0,57	0,89	0,62
pred								1	0,84	0,14	0,60	0,85	0,66
ρ_{nir}									1	0,43	0,56	0,95	0,39
ρ_{swir}										1	0,03	0,53	-0,15
GV											1	0,60	-0,02
NPV												1	0,35
Som.													1

A correlação foi feita de janeiro a dezembro, entre todas as variáveis no nível FLONA. A interpretação é feita pelo cruzamento linha/coluna. Em vermelho estão as correlações significativas positivas e em azul negativas.

Fonte: Produção da autora.

A reflectância no infravermelho médio (ρ SWIR) apresentou correlação positiva com a precipitação e negativa com a radiação no nível da FLONA. Na área da Torre a fração Sombra não apresentou correlação significativa com nenhuma outra variável, mas em toda a FLONA ela teve correlação forte positiva com a radiação.

O comportamento da reflectância do vermelho e do verde foi equivalente à reflectância no infravermelho próximo, da mesma forma que a reflectância do azul foi equivalente à reflectância do infravermelho médio, em ambos os níveis de análise.

Tabela 5.3 - Correlação entre as componentes sazonalidade para o Nível 2 de análise.

	Prec.	Rad.	Umi.	NDVI	EVI	ρ blue	ρ green	pred	Pnir	ρ swir	GV	NPV	Som.
Prec.	1	-0,86	0,44	0,23	-0,12	0,64	-0,55	-0,29	-0,30	0,76	-0,33	0,15	-0,21
Rad.		1	-0,53	-0,13	0,40	-0,50	0,75	0,53	0,57	-0,51	0,54	0,04	0,46
Umi.			1	-0,49	-0,89	-0,22	-0,85	-0,82	-0,91	-0,05	-0,67	-0,73	-0,10
NDVI				1	0,59	0,17	0,18	0,19	0,45	0,15	0,03	0,36	0,01
EVI					1	0,38	0,84	0,89	0,98	0,30	0,75	0,78	0,16
ρ blue						1	0,02	0,35	0,24	0,93	0,26	0,80	-0,38
ρ green							1	0,94	0,93	-0,09	0,90	0,50	0,24
pred								1	0,93	0,21	0,95	0,70	0,05
Pnir									1	0,16	0,82	0,70	0,24
ρ swir										1	0,10	0,70	-0,12
GV											1	0,53	-0,09
NPV												1	-0,11
Som.													1

A correlação foi feita de janeiro a dezembro, entre todas as variáveis no nível Torre. A interpretação é feita pelo cruzamento linha/coluna. Em vermelho estão as correlações significativas positivas e em azul negativas.

Fonte: Produção da autora.

De forma geral o Nível 2-Torre apresenta uma menor ocorrência de correlações significativas entre as variáveis fenológicas e ambientais. Em termos de comportamento espacial essa região se assemelhou com as áreas centrais, onde as correlações por pixel foram menos significativas, demonstrando menor limitação pela disponibilidade de água e radiação, sendo representativa de uma área com floresta mais densa (ver Figura 4.7). Mas nas bordas da FLONA Tapajós o padrão espacial nas correlações por pixel se mostra mais limitado pelas variáveis

ambientais, sendo então regiões com padrões próximos às outras classes de UCT, e que estão inseridas na série temporal do Nível 1, o que pode ter gerado essa diferença na sazonalidade dos dois níveis.

Considerando então somente as correlações presentes na Tabela 5.3, do Nível 2-Torre, representando áreas de floresta mais densa, é possível concluir que durante a estação seca podem sim ocorrer mudanças estruturais nos dosséis, pois existiram correlações significativas com as variáveis ambientais, o que refuta a hipótese H0 deste trabalho. Além disso, não somente o EVI foi inversamente proporcional à umidade do solo, mas também o GV e a ρ NIR. Dessa forma, diversas situações podem estar ocorrendo dentro da floresta, incluindo uma alteração demográfica das folhas. Estes resultados, somados ao aumento do NPV conforme a umidade diminui ($R=-0,73$), combinam com o brotamento de folhas novas e perda de folhas velhas, que aumentariam a serrapilheira, como observado por Doughty e Goulden (2008) e Brando et al. (2010) na FLONA Tapajós. Porém, o ganho da reflectância no vermelho e no verde não indicam aumento da fotossíntese. A mortalidade de árvores também pode favorecer o aumento do EVI, como observado por Anderson et al. (2010) durante a seca de 2010, concordando com os resultados aqui observados, de forma que: a abertura de clareiras e a maior disponibilidade de radiação podem impulsionar o brotamento de folhas jovens, fotossinteticamente mais eficientes, aumentando ao mesmo tempo o percentual de NPV.

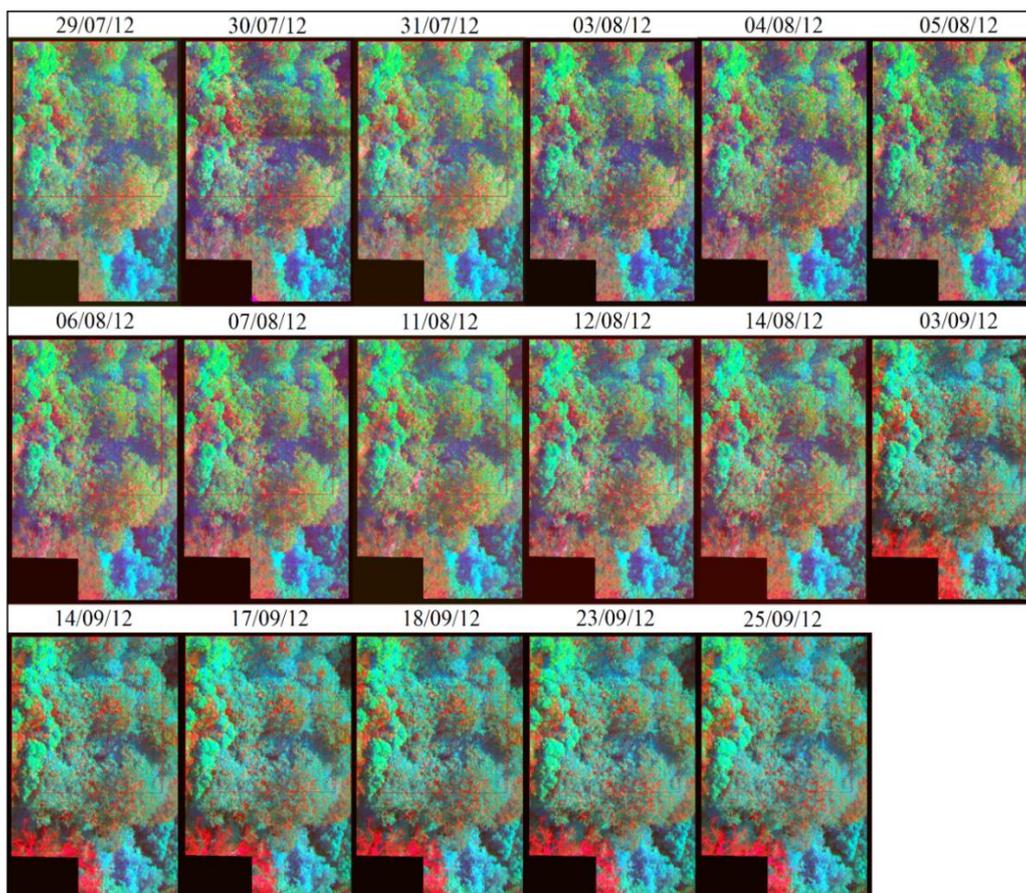
5.4 Fenologia dos dosséis ao nível local

Na análise realizada com as imagens hiperespectrais, localizadas na Torre km 67, é possível avaliar o comportamento dos dosséis do início para o meio da estação seca (julho a setembro), de forma a verificar se existe a tendência de ganho e posterior perda da capacidade fotossintética. Infelizmente não foi possível estudar o comportamento dos dosséis da FLONA Tapajós na transição estação seca/chuvosa, pela não disponibilidade dos dados do sensor HVIS.

A Figura 5.17 apresenta a composição colorida (RGB) das frações NPV, GV e Sombra, obtidas por meio da aplicação do MLME nas 17 imagens hiperespectrais, de julho a setembro de 2012. A metodologia de seleção dos *endmembers* e de

aplicação do MLME está descrita na seção 4.4. É possível identificar visualmente que houve uma alteração na estrutura dos dosséis no período estudado, no qual a copa referente à espécie decídua Amarelão (*Apuleia leiocarpa*), aqui identificada como copa 3 (ver Figura 4.3), claramente perde suas folhas, diminuindo a fração GV e aumentando a fração NPV. As demais copas referentes às espécies perenes Maçaranduba (*Maniikara huberi*) e Quarubarana (*Erisma uncinatum*) não apresentam um padrão de brotamento ou perda de folhas tão claro.

Figura 5.17 - MLME aplicado às imagens HVIS.



As imagens correspondem às frações do MLME aplicado nos dados HVIS. A composição colorida foi aplicada com equalização do histograma de cada imagem fração: R-NPV, G-GV e B-Sombra.

Fonte: Produção da autora.

As séries das variáveis fenológicas extraídas com as máscaras de copas sempre iluminadas de cada espécie, como observado na Figura 4.4, estão apresentadas nas Tabelas B.3 a B.6, em anexo. As séries com as variáveis fenológicas do MODIS-MAIAC diário estão descritas na Tabela B.7.

A Figura 5.18 e 5.19 apresentam então as séries das variáveis fenológicas obtidas com as imagens hiperespectrais, de cada copa individual e da média de toda a imagem HVIS, e com as imagens MODIS-MAIAC diárias disponíveis. Também é possível observar a precipitação diária durante o período, medida na estação pluviométrica da ANA, aproximadamente 54 km da Torre km 67.

No início do período estudado há uma maior disponibilidade de imagens HVIS em relação ao final dos meses de agosto e setembro. Em geral, as variáveis fenológicas apresentam um sinal de *greening* a partir do dia 5 de agosto, sendo o início das chuvas diárias, após este período cada nível de análise teve um comportamento característico. Todos os níveis (copas, imagem HVIS e MODIS-MAIAC) indicaram queda no índice GC após os seis dias de chuvas consecutivas. Já para os índices NDVI e EVI este padrão ocorreu somente na Copa 3.

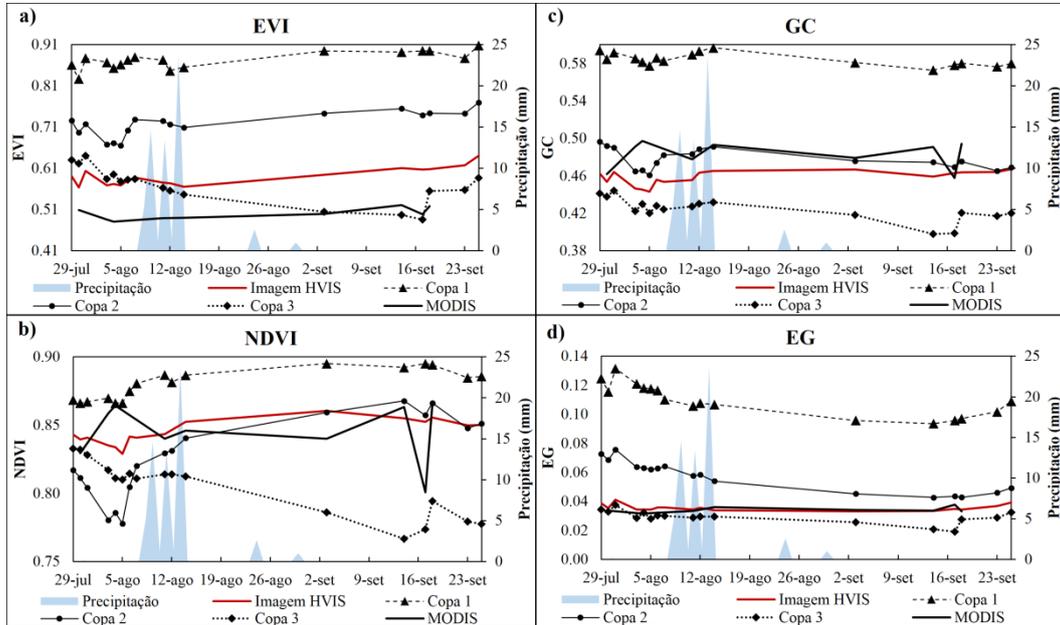
A curva referente à Copa 3 foi a que apresentou maior indício de perda na estrutura fenológica conforme terminam as chuvas em agosto, indicada pela queda nos índices da Figura 5.18. Além da queda na fração GV e aumento na fração NPV (Figura 5.19), como já esperado devido ao observado visualmente nas imagens da Figura 5.17. Porém, o índice PRI, que quanto mais negativo indica maior estresse hídrico da vegetação, apresentou aumento durante o período, tanto ao nível das copas como da imagem HVIS.

A fração Sombra não apresentou um comportamento característico no período estudado. Na Copa 3, que houve perda de folhas, a fração sombra aparenta aumentar após o término das chuvas. Já nos demais níveis esse padrão não fica tão evidente.

Ocorreu um sinal nas séries das Copas individuais na segunda quinzena de setembro que não fica aparente ao nível médio da imagem HVIS, mas que pode ter gerado resposta na imagem orbital. O evento indica queda nos índices espectrais, seguido de um rápido aumento no dia 18 de setembro, principalmente para a Copa 3 e em menor proporção para a Copa 2 (NDVI e GC). Este evento foi acompanhado por um máximo no PRI e por uma mudança brusca no índice NDVI e GC do MODIS-MAIAC.

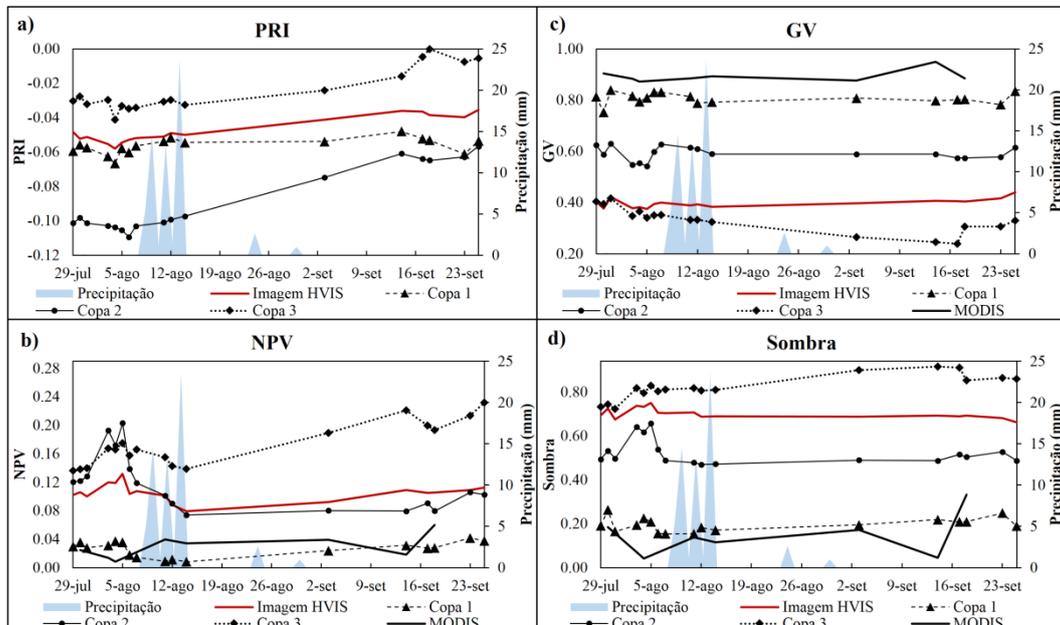
O índice EG não possuiu o mesmo padrão das demais variáveis fenológicas. De acordo com LOPES et al. (2016) este índice se mostrou ruidoso nas séries de imagem RGB e não representou satisfatoriamente os eventos de brotamento.

Figura 5.18 - Índices EVI, NDVI, EG e GC: imagens HVIS e MODIS-MAIAC diárias.



Fonte: Produção da autora.

Figura 5.19 - Índice PRI e frações MLME: imagens HVIS e MODIS-MAIAC diárias.



Fonte: Produção da autora.

5.5 Fenologia dos dosséis ao nível orbital *versus* local

A Tabela 5.4 apresenta o coeficiente angular da regressão de todas as séries apresentadas nas Figuras 5.18 e 5.19, além das bandas espectrais individuais, utilizadas para o cálculo dos índices. Em vermelho estão destacados os valores significativamente diferentes de zero (teste *t* - 5 % de significância). As séries HVIS tiveram a regressão para os 17 dias e as séries MODIS-MAIAC para os nove dias correspondentes ao período.

Tabela 5.4 - Coeficiente angular da regressão linear.

Variável fenológica	Coeficiente Angular				
	LOCAL				ORBITAL
	Imagem	Copa 1	Copa 2	Copa 3	MODIS
EG	-8,99E-06	-0,0004	-0,0004	-0,0001	4,20E-05
GC	0,0002	-0,0002	-0,0002	-0,0004	-0,0001
NDVI	0,0003	0,0004	0,0011	-0,0009	-0,0001
EVI	0,0008	0,0007	0,0011	-0,0013	0,0005
PRI	0,0003	0,0001	0,0009	0,0005	-
ρ Blue	1,03E-05	-3,90E-05	-3,84E-05	0,0001	2,97E-05
ρ Green	-2,77E-05	-0,0003	-0,0005	0,0001	0,0001
ρ Red	-0,0001	-0,0001	-0,0004	0,0001	0,0001
ρ NIR	0,0005	0,0003	-0,0004	-0,0009	0,0004
GV	0,0005	-0,0001	-0,0001	-0,0018	0,0008
NPV	-9,90E-06	0,0001	-0,0010	0,0013	0,0002
Sombra	-0,0006	0,0004	-0,0009	0,0022	0,0008

Regressão das séries locais de todas as variáveis fenológicas, para os dias amostrados de julho a setembro de 2012, em cada nível de análise. Em vermelho estão as regressões significativas.

Fonte: Produção da autora.

A única variável extraída do dado orbital que apresentou coeficiente angular significativo foi a ρ NIR, com tendência de aumento durante o período. Ao nível da imagem HVIS também ocorreu tendência de aumento nesta faixa espectral, mas para a Copa 3 o coeficiente angular foi negativo, referente à perda na estrutura do dossel. Os demais índices de vegetação e a fração GV da Copa 3

também apresentaram queda, sendo razoável com a tendência de aumento da ρ_{Red} e da fração NPV.

A reflectância na faixa espectral do vermelho mostrou tendência de queda durante o período, tanto ao nível da imagem HVIS quanto ao nível das copas individuais. Como mostra a Tabela 5.4 as Copas 1 e 2 apresentam tendência positiva para alguns índices espectrais e negativa para outros, mas ambas mostram tendência de aumento do EVI e NDVI, o que causou a mesma resposta para o nível da imagem hiperespectral. Além disso, o PRI gerado com a imagem HVIS não demonstrou aumento do estresse hídrico da vegetação e perda da eficiência fotossintética em nenhum nível de análise. Assim, a série extraída considerando a imagem HVIS inteira demonstra maior semelhança com as séries da Copa 1 e 2, que ocupam maior área imageada e não indicam perda significativa de estrutura, como a Copa 3 apresentou.

A Tabela 5.5 apresenta a correlação de Pearson (R), e o respectivo p-valor, entre os níveis orbital e local. As únicas correlações significativas, destacadas em vermelho, foram: índice EVI da Copa 2 ($R=0,72$); ρ_{Green} da Copa 3 ($R=-0,69$). A correlação com o EVI da imagem HVIS também foi alta, mas não significativa, o que também pode ser resultado do número baixo e limitado de amostras para a regressão.

A resposta do sensor MODIS-MAIAC, para os mesmos dias de obtenção das imagens HVIS, e com mesma geometria de aquisição/iluminação, demonstrou ser mais correlacionada com a série da Copa 2 e da imagem hiperespectral inteira. Já com a Copa 3, que visivelmente perdeu estrutura no período, o comportamento foi oposto na ρ_{Green} e ρ_{NIR} (Tabela 5.4 e 5.5). Contudo, a Copa 2, como mostra a Figura 4.3 ocupa maior área da imagem HVIS, e os resultados da Tabela 5.4 indicam que esse dossel pode estar ganhando estrutura no início da estação seca. O EVI da Copa 2 tem forte correlação positiva significativa com o EVI da Copa 1 ($R=0,7$) e com o EVI da Imagem total HVIS ($R=0,83$), mas não tem correlação significativa com o EVI da Copa 3. Assim, a resposta do sensor orbital revela o sinal predominante na imagem local hiperespectral. De acordo com Wu et al. (2016) a espécie da Copa 3 (Amarelão) é menos comum na área de estudo do que as outras duas espécies estudadas.

É importante lembrar que não necessariamente esses níveis são correlacionáveis, afinal, o dado local tem capacidade de imagear três indivíduos somente, com uma resolução submétrica, enquanto o dado orbital é relativo a centenas de copas dentro de um mesmo pixel. Além das demais interferências que formam a mistura espectral no nível orbital, relacionadas a outros alvos presentes no pixel e à geométrica de aquisição e iluminação. Portanto, essa análise objetivou somente verificar se ambos os níveis possuem o mesmo padrão fenológico no período.

Tabela 5.5 - Correlação de Pearson (R) entre as variáveis fenológicas ao nível local e orbital.

Variável	Imagem x MODIS		Copa 1 x MODIS		Copa 2 x MODIS		Copa 3 x MODIS	
	R	p-valor	R	p-valor	R	p-valor	R	p-valor
EG	0,005	0,991	-0,539	0,134	-0,477	0,194	-0,573	0,107
GC	-0,201	0,605	0,108	0,782	-0,253	0,511	0,157	0,687
NDVI	-0,156	0,688	-0,208	0,591	-0,197	0,611	0,106	0,787
EVI	0,662	0,052	0,358	0,344	0,716	0,030	-0,320	0,401
ρBlue	-0,036	0,927	-0,234	0,544	-0,235	0,542	-0,008	0,984
ρGreen	-0,214	0,581	-0,410	0,274	-0,335	0,379	-0,686	0,041
ρRed	-0,281	0,464	-0,379	0,314	-0,331	0,384	-0,377	0,317
ρNIR	0,492	0,178	-0,040	0,919	-0,444	0,231	-0,469	0,203
GV	0,514	0,157	-0,138	0,723	0,132	0,734	-0,269	0,485
NPV	-0,506	0,165	-0,478	0,193	-0,444	0,232	0,010	0,979
Sombra	-0,286	0,455	0,039	0,920	-0,261	0,498	0,207	0,593

Fonte: Produção da autora.

A Tabela 5.6 apresenta a diferença média (Δ) entre as variáveis fenológicas obtidas no meio e no início da estação seca (setembro menos agosto). De agosto para setembro de 2012 as variáveis fenológicas obtidas com o MODIS-MAIAC identificaram predominância de *greening* nos dosséis da FLONA Tapajós, ou seja, os valores de Δ indicam uma mudança estrutural e/ou demográfica dos dosséis. Com exceção do PRI e do NPV, que demonstraram *Browning*, da mesma forma que a fração sombra, pois o aumento de componentes iluminados e a diminuição da fração sombra no dossel foram associados a artefatos (GALVÃO et al., 2011). O *greening* foi associado então: ao ganho do NDVI, EVI, EG, GC, fração GV e ρ NIR; e à perda de ρ Red. Porém, o aumento da fração NPV, associado à perda de

folhas e aumento de serrapilheira, pode também conferir maior iluminação dos componentes dos dosséis, causando a perda da fração sombra.

Aproximadamente o mesmo padrão de *greening* orbital, obtido com o Δ , foi observado em média na imagem hiperespectral HVIS inteira, como mostra células em verde da segunda coluna da Tabela 5.6. Além disso, a fração sombra, em ambos os níveis, também demonstra queda de agosto pra setembro. No entanto, ao nível da imagem HVIS existe uma tendência de queda do NPV, que só combinou com o padrão da Copa 2. O PRI local não combinou com o padrão de PRI orbital, de agosto para setembro, mas ao nível da imagem HVIS e das três copas houve tendência de aumento da capacidade fotossintética.

Tabela 5.6 - Diferença entre as variáveis fenológicas de agosto e setembro de 2012, para o nível local e orbital.

Variável	ORBITAL	LOCAL			
	MODIS	Imagem HVIS	Copa 1	Copa 2	Copa 3
Δ NDVI	0,011	0,014	0,015	0,049	-0,033
Δ EVI	0,030	0,039	0,030	0,051	-0,043
Δ PRI	-0,009	0,015	0,004	0,039	0,024
Δ EG	0,001	0,000	-0,014	-0,016	-0,004
Δ GC	0,005	0,010	-0,008	-0,005	-0,015
Δ GV	0,035	0,025	-0,005	0,001	-0,062
Δ NPV	0,004	-0,001	0,011	-0,047	0,050
Δ Sombra	-0,040	-0,030	0,031	-0,043	0,073
Δ ρ Blue	0,000	0,001	-0,001	-0,001	0,005
Δ ρ Green	0,000	-0,001	-0,010	-0,017	0,003
Δ ρ Red	-0,001	-0,002	-0,004	-0,018	0,004
Δ ρ NIR	0,018	0,022	0,015	-0,013	-0,028

A tabela apresenta o valor de Δ que é relativo à variação dos índices de agosto a setembro de 2012, para o nível orbital e local. Em verde são as células que tiveram Δ associado ao *greening* e em laranja ao *browning*.

Fonte: Produção da autora.

A Copa 3 apresentou *browning* segundo todas as variáveis fenológicas estudadas, exceto com o PRI e a fração sombra. As bandas do visível e o NPV mostraram aumento de agosto para setembro, associado à perda de componentes

fotossintetizantes, enquanto a ρ NIR e os demais índices espectrais sofreram queda. A predominância de *browning* na Copa 3 confirma os resultados anteriores de regressão e a análise visual, sendo que os valores de Δ tiveram sinal oposto aos valores de Δ do MODIS e da imagem HVIS inteira. E como pode ser visto na Figura 5.17 a contribuição relativa da área desse dossel é pequena.

As Copas 1 e 2 não apresentaram resultados de um comportamento predominante relativo ao *greening* ou *browning*. Com os índices EVI, NDVI e a ρ Red ambas concordaram com o MODIS e com a imagem HVIS. Porém, A Copa 1 mostra ganho na ρ NIR, enquanto a Copa 2 teve diminuição, e ambas têm queda nos índices EG e GC. Entre si as duas tiveram também o comportamento inverso em relação às frações do MLME.

6 DISCUSSÃO

Existe um grande debate na comunidade científica a respeito do aumento do índice de área foliar (IAF) da Floresta Amazônica, induzido pela maior disponibilidade de radiação na estação seca, ser real ou um mero artefato (TANG; DUBAYAH, 2017). Os trabalhos de Galvão et al. (2011) e de Morton et al. (2014) indicam que o *Green-up*, observado por meio do sensoriamento remoto passivo, é um aumento artificial na reflectância no NIR, resultante de variações sazonais na geometria Sol-sensor. De acordo com Maeda et al. (2016), devido a estas inferências, ainda é incerto se tais técnicas fornecem uma descrição confiável da fenologia da Amazônia.

Outro aspecto relevante é o fato do trabalho de Morton et al. (2014) ter indicado que os dosséis da Floresta Amazônica mantém sua estrutura durante a estação seca. De acordo com vários trabalhos não só o oposto ocorre como também o IAF e a capacidade fotossintética diminuem durante a estação chuvosa (SALESKA et al., 2003; BI et al., 2015). Isso é contraditório à hipótese de invariância durante a estação seca proposta por Morton et al. (2014), pois se a floresta perde suas folhas no período chuvoso, precisa ocorrer brotamento em algum momento. Portanto, ou a floresta não teria sazonalidade ou completaria seu ciclo inteiro durante a estação chuvosa, argumentos que não possuem apoio empírico (BI et al., 2015).

Dessa forma, as análises realizadas no presente trabalho buscaram compreender a fenologia da floresta, durante a estação seca, e conciliar as evidências obtidas ao nível orbital com um dado local, contribuindo também com esta discussão. O uso do dado MODIS-MAIAC buscou minimizar a ocorrência de artefatos na interpretação dos resultados, pois o MAIAC corrige a geometria de iluminação e aquisição nas imagens (SALESKA et al., 2016). Assim como a metodologia de copas sempre iluminadas nas imagens locais HVIS (LOPES et al., 2016). Além disso, a associação da estação seca aos meses de déficit hídrico buscou considerar a variabilidade espaço-temporal da disponibilidade de água na Amazônia (MOURA et al., 2015).

Um fator importante observado neste trabalho, e que pode ter forte influência na resposta da fenologia da floresta, é que o dado associado à umidade do solo possui

uma defasagem de 2 meses com a precipitação, em grande parte da área de estudo (Figura 5.2, 5.13 e 5.14). Tal defasagem, como descrito na seção 5.1, pode ser resultante das características hidrogeológicas locais, favorecendo o armazenamento de água na superfície e garantindo que as raízes profundas da floresta acessem a água após o término do período chuvoso. Assim, durante a estação seca, que foi em média de junho a novembro na FLONA Tapajós, este atraso na série de umidade garantiu que ela ficasse com uma tendência constante de queda (Figura 5.16), ao contrário das curvas de precipitação e radiação, pois ambas oscilaram entre declínio e progresso. Isso é importante ao considerar que todas as variáveis fenológicas apresentaram maior dependência da umidade do solo, do que da precipitação e radiação. Este padrão se confirma com o trabalho de Saatchi et al. (2013), no qual as anomalias negativas da estrutura dos dosséis mostraram defasagem de um a três meses do dado de déficit hídrico do TRMM, sendo que quanto mais longa é a estação seca maiores foram as defasagens.

O índice EVI foi bastante associado na literatura ao aumento de IAF e da capacidade fotossintética da Floresta Amazônica, dentro da discussão do *Green-up*, (HUETE et al., 2006; MYNENI et al., 2007; BRANDO et al., 2010; MAEDA et al., 2016; SALESKA et al., 2016). Na análise espacial realizada, a alteração líquida do EVI foi positiva durante a estação seca somente nas áreas centrais da FLONA Tapajós (Figura 5.6-d), chegando a aumentar mais de 2 % em relação à média de longo prazo (2004-2014). Contudo, devido à formulação do percentual de alteração líquida (δ), valores negativos não necessariamente representam queda em relação à estação chuvosa, portanto, o EVI pode aumentar durante a estação seca nas áreas de δ negativo, como mostraram as demais análises.

Pequenas áreas centrais na FLONA também apresentaram correlações positivas significativas do EVI com a radiação (Figura 5.10-d), sendo que um aumento considerável dessa área mostrou fortes correlações negativas do EVI com a umidade do solo (Figura 5.10-g). Se a floresta tivesse apresentado predominância de correlação nula com as variáveis ambientais, durante a estação seca, seria mais fácil afirmar que os dosséis mantêm sua estrutura. Mas, principalmente o EVI e as frações GV/NPV, apresentaram forte correlação negativa com a umidade do solo (Figura 5.10, 5.11 e 5.12). Da mesma forma que os resultados de correlação entre

as componentes de sazonalidade do BFAST (Tabela 5.2 e 5.3). Isso denota uma defasagem com o dado de radiação, que é inversamente proporcional à precipitação, ou seja, o fato das variáveis fenológicas serem melhor explicadas pela variável umidade do solo pode representar um lento aumento da estrutura dos dosséis. No trabalho de Tang e Dubayah (2017) as mudanças de IAF do dossel mostraram correlação negativa com a precipitação e correlação fraca com a radiação, ou não significativa.

Brando et al. (2010) também observaram correlação negativa entre o EVI MODIS e medições em campo da umidade do solo, em até 2 metros de profundidade, na FLONA Tapajós. De acordo com os autores, o fato de se obter correlações mais significativas entre o EVI e a disponibilidade de água/radiação quando se considera os demais UCTs (pastagem, floresta secundária e cerrado) deve-se à capacidade da floresta em resistir aos períodos mais secos (BRANDO et al., 2010), ou seja, as correlações nulas indicam menor limitação pelas variáveis ambientais.

Os padrões sazonais do EVI são mais expressivos que do NDVI em áreas de floresta densa, devido à sua formulação matemática o tornar mais sensível à reflectância no NIR, porém, a forma da curva de sazonalidade do NDVI e EVI pode ser diferente (MAEDA et al., 2016). Este padrão também pode ser observado: na Figura 5.6, com a menor magnitude dos valores de δ NDVI; nas Figuras 5.10 e 5.11, com as correlações menos significativas do NDVI; e na Figura 5.16, com as formas das curvas de sazonalidade, no qual o NDVI só aumenta na metade da estação seca. Então, segundo Maeda et al. (2016), apesar de ambos serem utilizados para estudar o vigor da vegetação, eles podem estar fornecendo informações divergentes. Talvez o EVI represente uma característica mais estrutural dos dosséis, enquanto o NDVI seja mais sensível à eficiência fotossintética, pois, a curva de capacidade fotossintética na Torre km 67 aumenta a partir de agosto/setembro (SALESKA et al., 2016). De acordo com Saleska et al. (2016) na região da torre km 67 o EVI-MAIAC mostra um aumento médio de aproximadamente 10 % de junho a outubro, acompanhando a curva de porcentagem de árvores que possuem aumento de IAF e de brotamento. A sazonalidade do EVI-MAIAC mostra mínimo em maio, aumentando até outubro e

voltando a cair em novembro/dezembro (SALESKA et al., 2016). Este padrão é o mesmo que ocorre nas componentes de sazonalidade do EVI ao Nível 1-FLONA (Figura 5.16-b), já ao Nível 2-Torre esse comportamento defasa em um mês (Figura 5.16-e).

Ao nível local tanto o EVI quanto o NDVI mostram tendência significativa nas séries HVIS, aumentando na imagem, nas Copas 1 e 2, e diminuindo na Copa 3 (Tabela 5.4). Não ocorreu predominância de regressão linear significativa das variáveis fenológicas, obtidas com as imagens diárias MODIS-MAIAC, provavelmente como resultado de uma menor disponibilidade de dados, contando somente com 9 dias de análise. O mesmo fato pode ter interferido na correlação entre as imagens diárias locais e orbitais, embora ambos os níveis não sejam diretamente correlacionáveis. Assim, com relação ao *greening*, somente o EVI teve correlação significativa entre as imagens diárias, para a Copa 2 (Tabela 5.5), que foi a copa de maior área na imagem local. A série extraída com a média da imagem HVIS inteira teve máxima correlação com a Copa 2 para todas as variáveis fenológicas estudadas, ou seja, isso mostra que a resposta do sensor hiperespectral é mais correlacionada à copa de maior contribuição relativa em área. O EVI orbital também concorda com o dado local quando a resolução temporal diária é degradada para mensal, assim como as demais variáveis fenológicas.

Ficou evidente que as classes de pastagem e agricultura sofrem maior queda nos valores de IV durante a estação seca (Figura 5.6, 5.7, 5.8, 5.10, 5.11 e 5.12), e que a classe de floresta secundária/reflorestamento tem um comportamento intermediário. Ou seja, a floresta responde de forma plenamente diferente à menor disponibilidade de água. Isso pode indicar que conforme a estrutura dos dosséis vegetativos se torna mais complexa, ganhando biomassa, ocorre uma tendência menor de estresse hídrico. Esse padrão converge com o proposto por Saleska et al. (2009), de que as raízes profundas das árvores garantem acesso à água na estação seca, afinal, como observado na Figura 5.5-c, a alteração líquida de EEA na superfície não é tão extrema como em outras regiões da área de estudo.

A Tabela 6.1 traz um resumo dos resultados principais observados na seção 5 ao nível orbital e local, sendo que as células não preenchidas se referem a análises

que não foram realizadas. As associações ao *greening* ou *browning* durante a estação seca foram feitas considerando o resultado predominante de cada variável (perda ou ganho), em cada nível de análise, e então contabilizando as evidências. Na coluna da alteração líquida (δ) foi considerada a maior porcentagem da Tabela B.1 para o UCT floresta. Para a Correlação por pixel (R) foi considerada também a maior porcentagem de correlação, se positiva ou negativa, entre as três variáveis ambientais da Tabela B.2. Na análise de sazonalidade foi considerado o comportamento predominante da curva de cada variável, de junho a novembro, para o Nível 2-Torre. A sazonalidade do NDVI mostra queda até o meio da estação seca e então aumento a partir de setembro, por isso não existiu um comportamento predominante. Assim como a sazonalidade da ρ SWIR e ρ Blue, com aumento no início da estação seca e queda em outubro.

Na análise orbital com o dado MODIS-MAIAC, de janeiro de 2004 a junho de 2014, ocorreu predominância de *greening*, com 54 % das evidências. Contudo, considerando somente as variáveis que tiveram resultado convergente em todas as análises não há predominância nem de *greening* ou *browning*. Além disso, como já comentado, e como também pode ser observado na Tabela 6.1, existe grande incerteza na interpretação da reflectância do azul e infravermelho médio. Ambas não possuem um comportamento predominante de sazonalidade (Figura 5.16), o azul não seguiu o comportamento das demais bandas do visível (que apresentaram *browning*) e a diminuição do SWIR, na faixa detectada pelo sensor, também pode representar queda no IAF (ASNER, 1998). Assim, se as bandas do azul e do infravermelho médio forem desconsideradas o resultado final fica com 55 % das evidências apontando *browning* e 45 % *greening*. O *greening* foi indicado pelas variáveis fenológicas fortemente dependentes da ρ NIR, já as variáveis dependentes da ρ Red apresentaram *browning* (Tabela 6.1). Na análise de julho a setembro de 2012, os resultados observados apontam predominância de *greening*, do início para o meio da estação seca, associado ao ganho na estrutura dos dosséis e da capacidade fotossintética. Isso foi verificado com 64 % das evidências, enquanto somente 18 % indicaram *browning*.

Tabela 6.1 - Resumo dos principais resultados observados no trabalho.

Variável Fenológica ¹	Comportamento predominante da floresta durante a estação seca								
	(2004-2014)				(jul-set/2012)				
	Alteração Líquida (δ)	Correlação por pixel ³ (R)	Sazonalidade BFAST ⁴	Total	Diferença mensal MODIS (Δ)	Diferença mensal ² HVIS (Δ)	Regressão diária MODIS	Regressão diária HVIS ²	Total
EVI (+)	Perda	Ganho	Ganho	<i>Greening</i>	Ganho	Ganho	Não existe	Ganho	<i>Greening</i>
NDVI (+)	Perda	Perda	Não existe	<i>Browning</i>	Ganho	Ganho	Não existe	Ganho	<i>Greening</i>
PRI (+)	Perda			<i>Browning</i>	Perda	Ganho		Ganho	<i>Greening</i>
GV (+)	Ganho	Ganho	Ganho	<i>Greening</i>	Ganho	Ganho	Não existe	Ganho	<i>Greening</i>
NPV (-)	Perda	Ganho	Ganho	<i>Browning</i>	Ganho	Perda	Não existe	Não existe	Não existe
Sombra (+)	Ganho	Ganho	Perda	<i>Greening</i>	Perda	Perda	Não existe	Perda	<i>Browning</i>
ρBlue (-)	Perda		Não existe	<i>Greening</i>	Não existe	Ganho	Não existe	Não existe	<i>Browning</i>
ρGreen (-)	Ganho		Ganho	<i>Browning</i>	Não existe	Perda	Não existe	Não existe	<i>Greening</i>
ρRed (-)	Ganho		Ganho	<i>Browning</i>	Perda	Perda	Não existe	Perda	<i>Greening</i>
ρNIR (+)	Ganho		Ganho	<i>Greening</i>	Ganho	Ganho	Ganho	Ganho	<i>Greening</i>
ρSWIR (-)	Perda		Não existe	<i>Greening</i>	Não existe				
Total	<i>Greening</i>				<i>Greening</i>				

Em vermelho estão as variáveis no qual os resultados foram convergentes para todas as análises, em cada período.

¹ Os sinais (-) e (+) representam a mudança necessária de cada variável para ocorrer *greening* de acordo com a literatura (ASNER, 1998; HILKER et al., 2009; PONZONI; SHIMABUKURO, 2010; GALVÃO et al., 2011), representando perda ou ganho, respectivamente.

² Considerando o nível da imagem HVIS.

³ Considerando o maior percentual de correlação com as variáveis ambientais.

⁴ Considerando o comportamento predominante da curva de sazonalidade de junho a novembro.

Fonte: Produção da autora.

6.1 Análise dos resultados e fontes de incerteza

De forma geral, as maiores evidências de *greening* são associadas ao aumento de ρ NIR. De acordo com Asner (1998) o NIR é a região espectral que controla as alterações estruturais nos dosséis florestais. A faixa do infravermelho próximo é muito sensível ao IAF, que indicaria aumento de densidade das folhas. No entanto, ela também é fortemente influenciada pela DAF, que só representa a orientação das folhas (ASNER, 1998), e conseqüentemente pela alteração sazonal do SZA e RAA. Isso denota a complexidade em analisar mudanças sutis na estrutura de dosséis florestais densos. Como mostra a Figura 2.2 a ρ NIR diminui com a perda de estrutura dos dosséis, associadas a valores mais baixos de IAF, mas, segundo Ponzoni e Shimabukuro (2010), ela não necessariamente diminui com a perda de água. A ocorrência desse padrão é dependente de cada espécie e de outros fatores, associados ao nível da folha até o nível do dossel. Pela complexa interação da REM com os dosséis, o aumento da ρ NIR também pode ser associado à troca de material lenhoso por material foliar em dosséis densos e à troca de matéria viva por matéria seca em dosséis de gramíneas (IAF=2) (ASNER, 1998).

Como mencionado existem incertezas em associar o *greening* à queda da reflectância no azul e no infravermelho médio. A faixa do SWIR é associada à absorção da REM pela água presente nos dosséis, ou seja, se a vegetação está senescente e sofre estresse hídrico, ocorre aumento da reflectância. As bandas de absorção de água se tornam mais pronunciadas conforme o dossel ganha biomassa (IAF), mas na região do SWIR, detectada pelo sensor orbital, existe aumento da reflectância. A diminuição da ρ SWIR pode também ser associada a uma troca relativa de componentes lenhosos por foliares (ASNER, 1998). Porém, o ganho da ρ SWIR detectada pelo MODIS (2105-2155 nm) pode estar associado com o aumento de lignina e celulose, representando folhas mais secas (KOKALY et al., 2009), e com o aumento de área foliar no dossel, devido ao espalhamento múltiplo (ASNER, 1998).

Já as bandas do azul e vermelho são associadas à absorção da REM devido aos pigmentos fotossintetizantes da vegetação (seção 2.1.1.3), de forma que se sua alteração for negativa, pode estar ocorrendo aumento da capacidade fotossintética

dos dosséis. Contudo, a banda do azul é muito influenciada pela a atmosfera, que varia da estação seca para chuvosa. Durante o período chuvoso existe mais água na atmosfera, já no período seco a atmosfera possui maior concentração de aerossóis, devido às queimadas (ARAGÃO et al., 2007), que pode favorecer o aumento do retroespalhamento da radiação. Toda a faixa do visível é muito pouco afetada pela estrutura dos dosséis (ASNER, 1998), então o aumento da ρ_{Red} na estação seca (Tabela 6.1, Figura 5.8 e 5.16) confronta a conclusão de aumento da capacidade fotossintética, mas não da mudança estrutural dos dosséis. Folhas novas, e fotossinteticamente mais eficientes, iriam absorver mais a radiação nesta faixa espectral (SALESKA et al., 2016), mas isso só é observado nas áreas centrais da Figura 5.8. Portanto, afirmar que ocorre predominância de folhas novas na estação seca vai contra o aumento da ρ_{Red} e a queda do PRI (Figura A.3). O aumento de reflectância nesta banda pode ser associado a artefatos na resposta do sensor orbital, causados pela arquitetura dos dosséis e pela posição da fonte de iluminação (GALVÃO et al., 2011), que quando posicionada exatamente atrás do sensor faz com que este detecte uma proporção maior de componentes da vegetação diretamente iluminados, assim as sombras dos dosséis são escondidas pela folhagem iluminada, conferindo uma reflectância maior (PONZONI; SHIMABUKURO, 2010). Porém, a fração sombra não apresentou predominância de queda nas análises (Tabela 6.1), mas seu aumento na estação seca não necessariamente remete a um ganho na estrutura dos dosséis, afinal a Copa 3 na análise local, por exemplo, visivelmente apresentou perda de IAF concomitante ao ganho na fração sombra (Tabela 5.4 e 5.6). Isso demonstra que o MLME também insere incertezas na análise, principalmente pela etapa de definição dos *endmembers*.

Todas essas análises podem ser associadas a uma mistura de processos ocorrendo nos dosséis florestais. Existem evidências de mudanças estruturais e da eficiência fotossintética, mas não suficientes para generalizar o comportamento da floresta durante a estação seca inteira. Ou seja, englobar toda a estação seca na análise espacial pode ter aumentado a complexidade dos resultados, pois se ocorreu brotamento de folhas novas elas irão entrar em senescência durante os meses seguintes, o que vai alterar seu comportamento espectral. Além disso, se houve estresse hídrico com o término do período chuvoso, conforme este retorna a

eficiência fotossintética também deve ser reestabelecida. Por isso as curvas de sazonalidade por vezes indicaram uma interpretação diferente das obtidas na análise espacial, a respeito do *greening*. Contudo, foi uma forma satisfatória de englobar o período mais seco do ano, por pixel, e verificar as anomalias médias em relação a todo o período de estudo (2004-2014). De acordo com Moura et al. (2015) os padrões de precipitação têm grande variação espacial em toda a extensão da Floresta Amazônica, o que causa grande diferença em sua sazonalidade, e a estimativa da sazonalidade da vegetação através do déficit hídrico se torna simples e efetiva.

Essa mistura de processos é clara até mesmo no curto período de análise local. De acordo com Maeda et al. (2016) a sazonalidade dos IVs orbitais podem ser conduzidos por uma combinação de mudanças estruturais e bioquímicas nos dosséis florestais, que são altamente dependentes das condições bioclimáticas locais. Assim, a não eficiência satisfatória dos aparatos fotossintéticos, em meio a uma mudança demográfica das folhas, pode ter tornado contraditória a interpretação dos resultados de reflectância no vermelho ao mudar a escala de observação.

De acordo com vários trabalhos, o que ocorre durante a estação seca, pelo menos em seu início, é uma mudança na idade das folhas, sem alterar o IAF (LOPES et al., 2016; MOURA et al., 2015; BRANDO et al., 2010), o que não significa manter a estrutura dos dosséis. Segundo Wu et al. (2016) o que ocorre é uma troca de folhas velhas por novas no início da estação seca, comprovado também com aumento de serrapilheira e explicando o aumento de fotossíntese no ecossistema.

Segundo Saleska et al. (2016) o trabalho de Morton et al. (2014) mostra uma correção dos dados MODIS que reduz o *Green-up* da Amazônia, porém, embora a variação do EVI diminua substancialmente, ela é significativamente diferente de zero. Saleska et al. (2016) observaram um aumento significativo de IAF medido em campo na região da FLONA Tapajós, como resultado de um brotamento coordenado de folhas novas, que possuem maior reflectância no NIR. As torres de fluxo de carbono mostram uma defasagem de um mês no aumento da capacidade fotossintética (captura de CO₂) com o EVI do MAIAC, sendo o tempo das folhas novas desenvolverem seu aparato fotossintético (SALESKA et al., 2016).

Um fator importante também é a mudança na estrutura vertical dos dosséis. De acordo com Tang e Dubayah (2017) o que explica o *Green-up* da Amazônia, como um todo, é uma mudança na estrutura vertical dos dosséis. Segundo os autores ocorre brotamento de folhas (aumento de IAF) no dossel superior no início da estação seca. Já do meio para o final da estação seca esses dosséis perdem suas folhas em resposta à limitação pela disponibilidade de água, após um longo período de estresse hídrico (TANG; DUBAYAH, 2017), concordando também com o trabalho de Moura et al. (2015). Porém, o sub-bosque apresenta um comportamento oposto. Para Tang e Dubayah (2017) o sub-bosque não ganha IAF no início da estação seca porque não consegue competir com as folhas novas do dossel superior, que são fotossinteticamente mais eficientes. Portanto, seu desenvolvimento é favorecido após a abertura de clareiras com a perda das folhas dos dosséis e pela existência de um microclima, que garante a umidade necessária para o brotamento de folhas (TANG; DUBAYAH, 2017). Esse padrão reportado pelos autores pode explicar: o ganho do EVI, ρ NIR e GV durante toda a estação seca; o aumento do NPV; a defasagem do NDVI e da ρ SWIR; e a defasagem da curva de capacidade fotossintética, indicada por Saleska et al. (2016).

Outra hipótese deste comportamento é indicada por Maeda et al. (2016), no qual em áreas de floresta menos densa a perda de folhas nos dosséis pode ser rapidamente detectada pelas mudanças no EVI. Já em áreas de floresta mais densa a sazonalidade do EVI é mais sensível ao brotamento de folhas novas. De acordo com Tang e Dubayah (2017) o brotamento de folhas no sub-bosque, no final da estação seca, é um comportamento característico da Amazônia, não sendo visto em florestas onde a água é fator limitante.

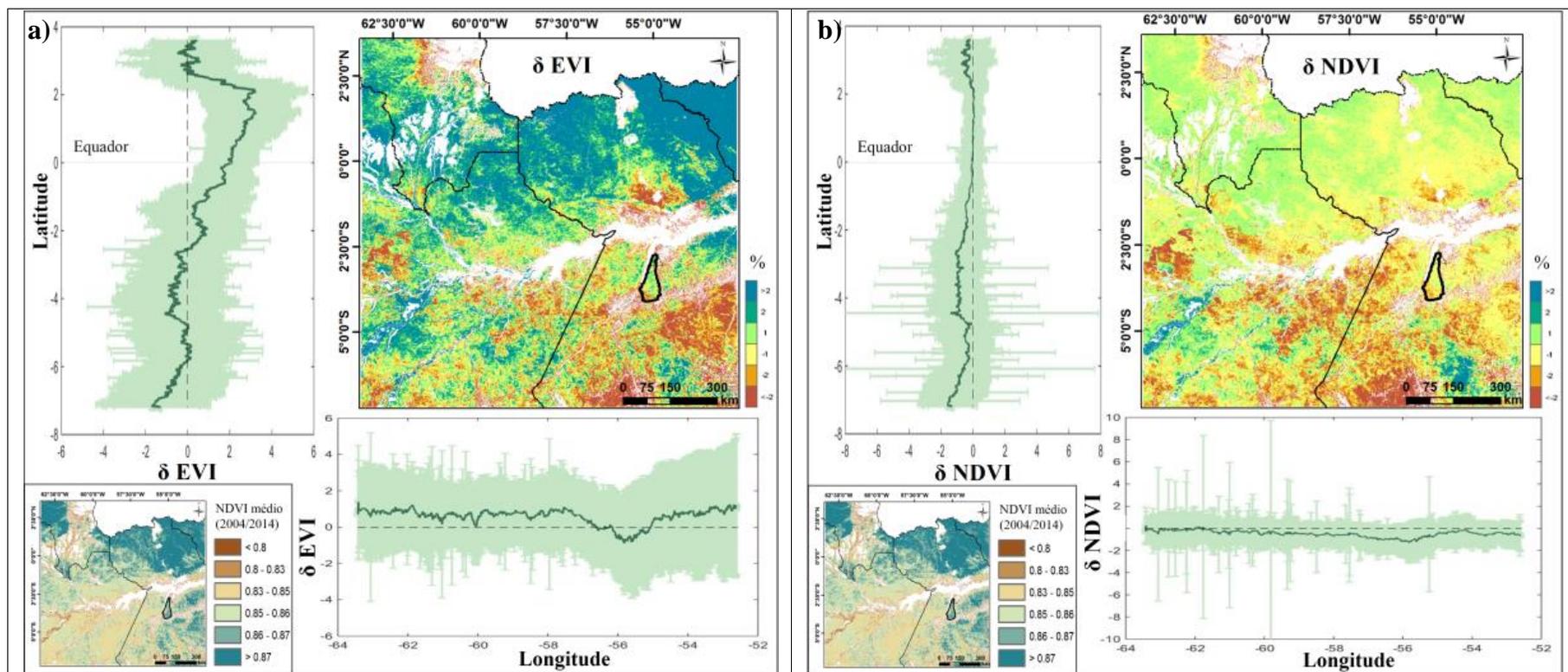
O padrão latitudinal do *greening* também é uma forma de avaliar a influência de artefatos nas imagens MODIS-MAIAC. Ou seja, nas regiões distantes do Equador existe maior variação do ângulo zenital solar, o que iria conferir maior influência da geometria Sol-sensor nas imagens. Além disso, menores valores de SZA e de RAA podem induzir o ganho na reflectância nas faixas do visível durante a estação seca (GALVÃO et al., 2011). Dessa forma, a Figura 6.1 apresenta as médias e desvios latitudinais e longitudinais do δ EVI e do δ NDVI, somente para a área de floresta, extraída com o dado TerraClass 2014. Também é destacada na

parte inferior esquerda a média do NDVI anual para todo o período de análise (2004-2014).

De acordo com Maeda et al. (2016) a sazonalidade dos IVs gerados com o MODIS-MAIAC em pequenas latitudes é controlada pela reflectância no NIR (MAEDA et al., 2016). E nessas regiões, como mostra a Figura 6.1, houve uma tendência de aumento do δ EVI e NDVI, assim como uma diminuição no desvio padrão. Grandes áreas abaixo de 2°30'S apresentam δ negativo, portanto, não há uma tendência de aumento no *greening* em maiores latitudes, o que indica que onde os valores são positivos realmente pode estar ocorrendo ganho na estrutura dos dosséis. De acordo com Maeda et al. (2016) no EVI MODIS original existe um claro gradiente latitudinal, com valores mais altos nas regiões ao sul da Amazônia, e esse gradiente desaparece no EVI MAIAC. Em latitudes maiores a correlação entre o dado MODIS original e o MAIAC se torna mais fraca, devido à correção da geometria Sol-sensor (MAEDA et al., 2016).

Tang e Dubayah (2017) sugerem que as florestas na Amazônia otimizam seu processo de fotossíntese com uma resposta antecipada às variáveis ambientais. Ou seja, as árvores maximizam a captura de carbono no final da estação chuvosa trocando sua estrutura demográfica para folhas mais eficientes. E diminuem a perda respiratória antes de entrar em um período crítico de estresse hídrico, por meio da queda no IAF (TANG; DUBAYAH, 2017). Existe um padrão de diminuição do δ EVI e NDVI ao se aproximar de regiões mais degradadas (Figura 6.1), portanto, se o *greening* for um processo de otimização da capacidade fotossintética, durante períodos de menor disponibilidade de água, ele pode estar sendo ameaçado. A análise espacial de correlação por pixel mostra isso também, pois as áreas mais distantes do centro da FLONA Tapajós tendem a ter aumento de NPV, conforme a umidade diminui (Figura 5.12), e apresentam menor padrão de *greening*.

Figura 6.1 - Médias latitudinais e longitudinais do δ EVI e δ NDVI no *tile* MODIS-MAIAC estudado.



δ EVI (a) e δ NDVI (b) durante a estação seca, somente para os pixels de floresta. Em cores quentes estão δ negativo e em cores frias δ positivo. Os gráficos representam as médias e desvios latitudinais e longitudinais, sendo que as linhas tracejadas indicam $\delta=0$. Na parte inferior esquerda é destacada em (a) e (b) a média do NDVI anual para todo o período (2004-2014), no qual em verde escuro o NDVI médio é superior a 0,87.

Fonte: Produção da autora.

As evidências de *greening* não podem ser então explicadas somente como resultado de artefatos nas imagens, tendo em conta também que os dados processados pelo MAIAC possuem um alto rigor na correção dos artefatos (LYAPUSTIN et al., 2012).

Segundo Maeda et al. (2016) nas bandas do visível os efeitos dos artefatos são totalmente reduzidos com o MAIAC e, de acordo com Saleska et al. (2016), mesmo ao utilizar os dados MODIS corrigidos com medições em campo, o *greening* da floresta é predominante na Amazônia, provavelmente refletindo um processo de aperfeiçoamento da fotossíntese de larga escala, por meio da dinâmica dos dosséis florestais.

Ter englobado as secas de 2005 e 2010 no estudo também pode ter influenciado na análise espacial e de séries temporais. Afinal, quando estudada somente parte da estação seca de 2012, que de acordo com Marengo e Espinoza (2016) foi um ano chuvoso e de cheia na Amazônia, o padrão de *greening* via nível orbital é convergente. Ao nível local esse padrão converge predominantemente ao nível da imagem, pois as copas individuais mostram diferente resposta à menor disponibilidade de água. Além disso, as séries da imagem HVIS mostram aumento da capacidade da floresta de agosto para setembro, enquanto as demais análises do PRI indicaram queda na eficiência fotossintética durante a estação seca. Isso também pode ser resultado da magnitude dos eventos de seca, como indicado por Guan et al. (2015).

É importante lembrar também que as fortes secas de 2005 e 2010 na Amazônia não necessariamente têm efeito sobre toda a área do bioma, muito menos sobre as demais localidades do país. Isso fica evidente na análise de quebras de tendência da Tabela 5.1, no qual a FLONA Tapajós (parcela oriental da Amazônia) não demonstrou sinal característico nos anos de 2005 e 2010, como observado por Saatchi et al. (2013), na região sudoeste da Amazônia. Da mesma forma, a Figura A.7-a, em anexo, apresenta as anomalias de precipitação na América do Sul, para os anos de 2005, 2010, 2012 e 2014. Em 2005 e 2010 ocorreu anomalia negativa de precipitação em parte da Amazônia, principalmente no período seco do ano, porém, nas demais regiões do país esse comportamento é oposto (MARENGO; ESPINOZA, 2016). O mesmo ocorre em 2012 e 2014, anos de cheia na Amazônia

e de forte seca na região sudeste, por exemplo. Consequência deste padrão foi a crise do sistema de abastecimento de água da Região Metropolitana de São Paulo em 2014, umas das regiões mais populosas e economicamente importantes do país, reflexo das anomalias negativas de precipitação observadas na Figura A.7-b (MACHADO; ARAGÃO, 2017, no prelo).

7 CONCLUSÃO

O objetivo principal desta pesquisa foi analisar a fenologia da FLONA Tapajós em resposta às variáveis ambientais e testar se há evidências de que os dosséis mantêm sua estrutura durante a estação seca. Esta proposta foi alcançada por meio dos objetivos específicos, sendo que: 1) o percentual de alteração líquida indicou aumento da estrutura dos dosséis nas áreas centrais da FLONA Tapajós, mas também perda da capacidade fotossintética, durante a estação seca; 2) as correlações por pixel foram fracas, mas indicaram predominância de correlações significativas de ganho na estrutura dos dosséis florestais com o aumento da disponibilidade de radiação e diminuição da disponibilidade de água; 3) os testes estatísticos indicaram que a floresta possui um comportamento significativamente diferente dos demais usos e cobertura da terra, com menor limitação pela disponibilidade de água; 4) os padrões interanuais podem indicar dependência da umidade do solo em longo prazo, já a sazonalidade das variáveis fenológicas não demonstrou predominância de dependência da disponibilidade de água, apresentando tendência de aumento concomitante ao ganho de radiação, assim como todas as bandas espectrais; 5) as copas individuais mostraram indícios tanto de perda quanto de ganho de IAF e ao nível da imagem HVIS predominaram as evidências de maior contribuição relativa em área; 6) os dados diários MODIS-MAIAC não apresentaram correlação significativa com os dados diários HVIS, embora não sejam necessariamente correlacionáveis, mas de agosto para setembro ambos apresentaram em média ganho na estrutura dos dosséis.

Como indicado por Bi et al. (2015), conciliar o debate a respeito da variação do metabolismo das florestas inseridas na Amazônia é crítico para compreender sua resposta às mudanças climáticas. Assim, o presente trabalho contribuiu para as discussões ainda atuais do *Green-up* da seguinte forma: 1) utilizando os dados MAIAC, que possuem alto nível de correção da geometria Sol-sensor; 2) considerando a variabilidade espacial e temporal da precipitação; 3) utilizando uma análise multitemporal, com padrões trimestrais, mensais e diários de variáveis relativas à fenologia; 4) utilizando métricas diferentes, e não tão abordadas na literatura, para avaliar a estrutura dos dosséis e a capacidade fotossintética da vegetação, como o índice PRI, os índices RGB e as frações do

MLME; 5) utilizando uma análise multiescala, que partiu do nível orbital ao local, do nível do *tile* para a FLONA/Torre km 67 e do nível da imagem para copas individuais; e 6) utilizando um dado local hiperespectral como base, que permitiu verificar o comportamento espectral de copas que perderam ou ganharam estrutura, para então compreender a resposta do sensor orbital.

Os resultados que apresentaram *greening* não são justificáveis apenas por artefatos nas imagens MODIS-MAIAC, provenientes da alteração do SZA e do RAA, devido aos seguintes fatores: 1) a alteração líquida do EVI não foi superior em latitudes maiores, pelo contrário, foram maiores próximas ao Equador, áreas com maior densidade florestal, porém, de estação seca relativamente mais curta; 2) a utilização das imagens MODIS, corrigidas com o algoritmo MAIAC, buscou minimizar a influência da geometria Sol-sensor; e 3) a aplicação do MLME também apresenta indícios de *greening* em determinadas regiões, sendo talvez uma métrica menos influenciada pelo NIR como o EVI, por considerar todo o espectro disponível da vegetação e ter utilizado *endmembers* mensais; 4) a análise local com o sensor HVIS, que empregou igualmente uma metodologia de minimização dos artefatos, também mostrou evidências de mudanças estruturais.

Enfim, considera-se aqui que as evidências levantadas, de acordo com a metodologia proposta, são suficientes para refutar a hipótese H0 do trabalho, ou seja, os dosséis não mantêm sua estrutura durante a estação seca. No entanto, a análise não é capaz de assumir exclusivamente a hipótese H1 ou H2, relacionadas à disponibilidade de água e radiação. Em 2012 que foi um ano bastante úmido o resultado de *greening* é convergente. Porém, de 2004 a 2014, isso não ocorre. As evidências sugerem em média um ganho estrutural dos dosséis, mas também uma perda da capacidade fotossintética, durante a estação seca.

Portanto, a hipótese final, acerca destes processos durante a estação seca, é que existe uma contribuição relativa de indivíduos que trocam folhas velhas por novas, e conseqüentemente vão ganhando estrutura dos dosséis ao passar do tempo, o que causou aumento de NPV e aumento de GV (e dos demais IVs). Tais eventos são simultâneos a indivíduos sofrendo por estresse hídrico e perda da capacidade fotossintética, sendo este talvez um fator dependente de cada espécie. Outra hipótese também é que a mudança na estrutura vertical do dossel, durante a

estação seca, tenha causado tais resultados, pela interação entre o ciclo fenológico do dossel superior e o do sub-bosque. Porém, essa hipótese não pode ser confirmada com a metodologia e dados utilizados aqui.

O comportamento da floresta é evidentemente diferente dos outros usos e cobertura da terra, o que suporta a hipótese de maior resistência a períodos de menor disponibilidade de água. Contudo, as características hidrogeológicas da região podem favorecer o armazenamento de água na superfície após o término das chuvas. Entretanto, quanto mais esparsa é a floresta, e mais próxima está de áreas degradadas, menor é a propensão ao *greening*, reforçando a pressão das atividades humanas sobre a Floresta Amazônica, principalmente nas regiões sul/sudeste da área de estudo.

Assim, certamente a conclusão mais segura deste trabalho é que diferentes processos ocorrem simultaneamente nos dosséis florestais, durante a estação seca. Considerando todas as variáveis, em média de 2004 a 2014, 54 % das evidências apontaram *greening*. Mas, como mencionado, esta interpretação deve ser cautelosa devido à incerteza do MLME e do significado da alteração dessas variáveis fenológicas, até mesmo da ρNIR , que por vezes é contraditória na literatura, justamente pela complexidade da interação da radiação eletromagnética com os dosséis florestais. Isso impede a generalização do comportamento da vegetação dentro da FLONA Tapajós, muito menos de toda a Floresta Amazônica. Avaliar diversas variáveis que se associam a um mesmo fenômeno, e analisá-las em diferentes escalas, gera o risco de não obter resultados que converjam diretamente para a mesma interpretação. É possível ter a mesma percepção ao revisar os estudos na literatura que abordam o tema. Isso reafirma a grandiosidade e a complexidade dos ecossistemas inseridos no bioma Amazônia, em conjunto com a importância de estudos que avaliem localmente a resposta da floresta às variáveis ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR, A.; ASNER, G. P.; KNAPP, D.; ZARIN, D. Temporal variability of forest fires in eastern amazonia. **Ecological applications**, v. 21, n. 7, p. 2397–2412, out. 2011.
- ALHO, C.; SILVA, J. Effects of severe floods and droughts on wildlife of the pantanal wetland (brazil)—a review. **Animals**, v. 2, n. 4, p. 591–610, 18 out. 2012.
- ALMEIDA FILHO, F. G. V. **Variação temporal do campo gravitacional detectada pelo satélite GRACE: Aplicação na bacia Amazônica**. 2009. 147 p. Tese de Doutorado em Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.
- ANDERSON, L. O. **Classificação e monitoramento da cobertura vegetal do Estado do Mato Grosso utilizando dado multitemporais do sensor MODIS**. 2005. 247 p. (INPE-12290-TDI/986). Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2005. Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZ3P8SECKy/DjRLr>>.
- ALENCAR, A.; ASNER, G. P.; KNAPP, D.; ZARIN, D. Temporal variability of forest fires in eastern amazonia. **Ecological applications**, v. 21, n. 7, p. 2397–2412, out. 2011.
- ANDERSON, L. O. Biome-scale forest properties in amazonia based on field and satellite observations. **Remote sensing**, v. 4, n. 12, p. 1245–1271, 4 maio 2012.
- ANDERSON, L. O.; MALHI, Y.; ARAGÃO, L. E. O. C.; LADLE, R.; ARAI, E.; BARBIER, N.; PHILLIPS, O. Remote sensing detection of droughts in amazonian forest canopies. **New phytologist**, v. 187, n. 3, p. 733–750, ago. 2010.
- ARAGÃO, L. E. O. C. Environmental science: the rainforest's water pump. **Nature**, p. 8–9, 5 set. 2012.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; BARBIER, N.; LIMA, A. A.; SHIMABUKURO, Y.; ANDERSON, L.; SAATCHI, S. Interactions between rainfall, deforestation and fires during recent years in the brazilian amazonia. **Philosophical transactions of the royal society of london. series b, biological sciences**, v. 363, n. 1498, p. 1779–85, 2008.
- ARAGÃO, L. E. O. C.; MALHI, Y.; ROMAN-CUESTA, R. M.; SAATCHI, S.; ANDERSON, L. O.; SHIMABUKURO, Y. E. Spatial patterns and fire response of recent amazonian droughts. **Geophysical research letters**, v. 34, n. 7, p. L07701, 3 abr. 2007.
- ASNER, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. **Remote sensing of environment**, NULL, v. 64, n. 3, p. 234–253, jun. 1998.
- BI, J. et al. Sunlight mediated seasonality in canopy structure and photosynthetic

activity of amazonian rainforests. **Environmental research letters**, v. 10, n. 6, p. 64014, 1 jun. 2015.

BOMFIM, E. P. **Utilização dos dados do GRACE para caracterização da variabilidade de massas de água do aquífero Guarani**. 2006. 157 p. Dissertação de Mestrado em Geociências. Instituto de Astronomia, Geofísica e C. Atmosféricas, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

BORCHERT, R.; CALLE, Z.; STRAHLER, A. H.; BAERTSCHI, A.; MAGILL, R. E.; BROADHEAD, J. S.; KAMAU, J.; NJOROGE, J.; MUTHURI, C. Insolation and photoperiodic control of tree development near the equator. **New phytologist**, v. 205, n. 1, p. 7–13, jan. 2015.

BRANDO, P. M.; GOETZ, S. J.; BACCINI, A.; NEPSTAD, D. C.; BECK, P. S. A.; CHRISTMAN, M. C. Seasonal and interannual variability of climate and vegetation indices across the amazon. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 107, n. 33, p. 14685–14690, 17 ago. 2010.

DE NYS, E.; ENGLE, N.L.; MAGALHÃES, A.R. **Secas no Brasil: política e gestão proativas**. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos- CGEE; Banco Mundial, 2016. 292 p.

DOUGHTY, C. E.; GOULDEN, M. L. Seasonal patterns of tropical forest leaf area index and CO_2 exchange. **Journal of geophysical research: biogeosciences**, v. 113, n. G1, p. n/a-n/a, 14 mar. 2008.

FERREIRA, M. E. **Análise do Modelo Linear de Mistura Espectral na Discriminação de Fitofisionomias do Parque Nacional de Brasília (Bioma Cerrado)**. Dissertação de mestrado em Geologia. Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. Brasília, 2003.

GALVÃO, L. S.; DOS SANTOS, J. R.; ROBERTS, D. A.; BREUNIG, F. M.; TOOMEY, M.; DE MOURA, Y. M. On intra-annual evi variability in the dry season of tropical forest: a case study with modis and hyperspectral data. **Remote sensing of environment**, v. 115, n. 9, p. 2350–2359, 2011.

GUAN, K.; PAN, M.; LI, H.; WOLF, A.; WU, J.; MEDVIGY, D.; CAYLOR, K. K.; SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F.; MALHI, Y.; LIANG, M.; KIMBALL, J. S.; SALESKA, S. R.; BERRY, J.; JOINER, J.; LYAPUSTIN, A. I. Photosynthetic seasonality of global tropical forests constrained by hydroclimate. **Nature geoscience**, v. 8, n. 4, p. 284–289, 9 mar. 2015.

HILKER, T.; HALL, F. G.; COOPS, N. C.; LYAPUSTIN, A.; WANG, Y.; NESIC, Z.; GRANT, N.; BLACK, T. A.; WULDER, M. A.; KLJUN, N. Remote sensing of photosynthetic light-use efficiency across two forested biomes: spatial scaling. **Remote sensing of environment**, v. 114, n. 12, p. 2863–2874, 15 dez. 2010.

HILKER, T.; LYAPUSTIN, A.; HALL, F. G.; WANG, Y.; COOPS, N. C.; DROLET, G.; BLACK, T. A. An assessment of photosynthetic light use efficiency from space: modeling the atmospheric and directional impacts on pri reflectance. **Remote sensing of environment**, NULL, v. 113, n. 11, p. 2463–

2475, 16 nov. 2009.

HILKER, T.; LYAPUSTIN, A. I.; TUCKER, C. J.; HALL, F. G.; MYNENI, R. B.; WANG, Y.; BI, J.; MENDES DE MOURA, Y.; SELLERS, P. J. Vegetation dynamics and rainfall sensitivity of the amazon. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 111, n. 45, p. 16041–16046, 11 nov. 2014.

HUETE, A. R.; DIDAN, K.; SHIMABUKURO, Y. E.; RATANA, P.; SALESKA, S. R.; HUTYRA, L. R.; YANG, W.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season. **Geophysical research letters**, v. 33, n. 6, p. L06405, 2006.

HUETE, A. R.; LIU, H. Q.; BATCHILY, K.; VAN LEEUWEN, W. A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. **Remote Sensing of Environment**. v. 59, n. 3, p. 440-451, 1997.

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J.; WOLFF, D. B.; ADLER, R. F.; GU, G.; HONG, Y.; BOWMAN, K. P.; STOCKER, E. F. The trmm multisatellite precipitation analysis (tmpa): quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. **Journal of hydrometeorology**, v. 8, n. 1, p. 38–55, fev. 2007.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente**. 2º Edição Traduzida. Editora Parêntese. 2011. 598 p.

KOKALY, R. F.; ASNER, G. P.; OLLINGER, S. V.; MARTIN, M. E.; WESSMAN, C. A. Characterizing canopy biochemistry from imaging spectroscopy and its application to ecosystem studies. **Remote sensing of environment**, v. 113, n. SUPPL. 1, p. S78–S91, set. 2009.

KUMAR, R. **Radiation from plants-reflection and emission: a review**. Lafayette. Purdue Research Foundation. (Research Project n: 5543), 1974. 88 p.

KUMAR, U.; KERLE, N.; RAMACHANDRA, T. . **Constrained linear spectral unmixing technique for regional land cover mapping using modis data**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. 416–423 p. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4020-8735-6_78>.

LOPES, A. P.; NELSON, B. W.; GRAÇA, P. M.; WU, J.; TAVARES, J. V.; PROHASKA, N.; SALESKA, S. R. Band combinations for detecting leaf amount and leaf age in quickbird satellite and rgb camera images. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 17., 2015, João Pessoa-PB, Brasil. **Anais...** São José dos Campos: Inpe, 2015. p. 1671–1677.

LOPES, A. P.; NELSON, B. W.; WU, J.; GRAÇA, P. M. L. DE A.; TAVARES, J. V.; PROHASKA, N.; MARTINS, G. A.; SALESKA, S. R. Leaf flush drives dry season green-up of the central amazon. **Remote sensing of environment**, v. 182, p. 90–98, set. 2016.

LORENZZETTI, J. A. **Princípios físicos do sensoriamento remoto**. São Paulo: Bluncher, 2015. 293 p.

LU, D.; BATISTELLA, M.; MORAN, E.; HETRICK, S.; ALVES, D.; BRONDIZIO, E. Fractional forest cover mapping in the brazilian amazon with a combination of modis and tm images. **International journal of remote sensing**, v. 32, n. 22, p. 7131–7149, 20 nov. 2011.

LU, D.; MORAN, E.; BATISTELLA, M. Linear mixture model applied to amazonian vegetation classification. **Remote sensing of environment**, v. 87, n. 4, p. 456–469, 15 nov. 2003.

LYAPUSTIN, A. I.; WANG, Y.; LASZLO, I.; HILKER, T.; G.HALL, F.; SELLERS, P. J.; TUCKER, C. J.; KORKIN, S. V. Multi-angle implementation of atmospheric correction for modis (maiac): 3. atmospheric correction. **Remote sensing of environment**, v. 127, p. 385–393, dez. 2012.

LYAPUSTIN, A.; WANG, Y.; FREY, R. An automatic cloud mask algorithm based on time series of modis measurements. **Journal of geophysical research**, v. 113, n. D16, p. D16207, 26 ago. 2008.

MACHADO, C. B.; ARAGÃO, L. E. O. C. Influência da pluviosidade na área superficial do sistema de abastecimento de água Cantareira. **Revista Brasileira de Cartografia**. 2017. No prelo.

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, out. 2016.

MALHI, Y.; ROBERTS, J. T.; BETTS, R. A.; KILLEEN, T. J.; LI, W.; NOBRE, C. A. Climate change, deforestation, and the fate of the amazon. **Science (new york, n.y.)**, v. 319, n. 5860, p. 169–72, 2008.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal droughts and floods in amazonia: causes, trends and impacts. **International journal of climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033–1050, mar. 2016.

MILTON, E. J. Review article principles of field spectroscopy. **International journal of remote sensing**, v. 8, n. 12, p. 1807–1827, dez. 1987.

MORTON, D. C.; NAGOL, J.; CARABAJAL, C. C.; ROSETTE, J.; PALACE, M.; COOK, B. D.; VERMOTE, E. F.; HARDING, D. J.; NORTH, P. R. J. Amazon forests maintain consistent canopy structure and greenness during the dry season. **Nature**, v. 506, n. 7487, p. 1–16, 2014.

MOURA, Y. M.; HILKER, T.; LYAPUSTIN, A. I.; GALVÃO, L. S.; DOS SANTOS, J. R.; ANDERSON, L. O.; DE SOUSA, C. H. R.; ARAI, E. Seasonality and drought effects of amazonian forests observed from multi-angle satellite data. **Remote sensing of environment**, v. 171, n. February 2016, p. 278–290, dez. 2015.

MYNENI, R. B. et al. Large seasonal swings in leaf area of amazon rainforests. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 104, n. 12, p. 4820–4823,

20 mar. 2007.

NASA. **Overview - Monthly Mass Grids**. 2017. GRACE Tellus Gravity Recovery and Climate Experiment. Jet Propulsion Laboratory. Disponível em: <<https://grace.jpl.nasa.gov/data/monthly-mass-grids/>> Acesso em: 23 de janeiro de 2017.

NOBRE, A. D. **O futuro climático da amazônia: relatório de avaliação científica**. São José dos Campos, SP: ARA CCST-INPE INPA, 2014.

NOVO, E. M. M. **Sensoriamento remoto: princípios e aplicações**. 4 ed. São Paulo: Bluncher, 2010. 387 p.

PHILLIPS, O. L. et al. Drought sensitivity of the amazon rainforest. **Science**, v. 323, n. 5919, p. 1344–1347, 6 mar. 2009.

PONZONI, F. J. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação: Diagnosticando a Mata Atlântica. In: RUDORFF, B. F. T., et al.: **Curso de uso de sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente**. São José dos Campos: INPE, 2002.

PONZONI, F. J. **Calibração absoluta de sensores orbitais: conceituação, principais procedimentos e aplicação**. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2007. 65 p.

PONZONI, F. J.; PINTO, C. T.; LAMPARELLI, R. A. C.; ZULLO JR, J.; ANTUNES, M. A. H. **Calibração de Sensores Orbitais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 96 p.

PONZONI, F. J.; SHIMABUKURO, Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2010. 127 p.

PORTAL ACTION. **Teste de Kruskal Wallis**. 2016. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/tecnicas-nao-parametricas/teste-de-kruskal-wallis>> Acesso em: 10 de setembro de 2016.

PYLE, E. H.; SANTONI, G. W.; NASCIMENTO, H. E. M.; HUTYRA, L. R.; VIEIRA, S.; CURRAN, D. J.; VAN HAREN, J.; SALESKA, S. R.; CHOW, V. Y.; CARMAGO, P. B.; LAURANCE, W. F.; WOFSY, S. C. Dynamics of carbon, biomass, and structure in two amazonian forests. **Journal of geophysical research: biogeosciences**, v. 113, n. G1, p. n/a-n/a, 14 mar. 2008.

RATHCKE, B.; LACEY, E. P. Phenological patterns of terrestrial plants. **Annual review of ecology and systematics**, v. 16, n. 1, p. 179–214, nov. 1985.

ROBERTS, D. A.; SMITH, M. O.; ADAMS, J. B. Green vegetation, nonphotosynthetic vegetation, and soils in aviris data. **Remote sensing of environment**, v. 44, n. 2–3, p. 255–269, maio 1993.

SAATCHI, S.; ASEFI-NAJAFABADY, S.; MALHI, Y.; ARAGAO, L. E. O. C.; ANDERSON, L. O.; MYNENI, R. B.; NEMANI, R. Persistent effects of a severe drought on amazonian forest canopy. **Proceedings of the national academy of sciences**, v. 110, n. 2, p. 565–570, 8 jan. 2013.

SALESKA, S.; DA ROCHA, H. R.; KRUIJT, B.; NOBRE, A. Ecosystem carbon fluxes and amazonian forest metabolism. **Amazonia and global change**, v. 186, p. 389–407, 2009.

SALESKA, S. R.; DIDAN, K.; HUETE, A. R.; DA ROCHA, H. R. Amazon forests green-up during 2005 drought. **Science**, v. 318, n. 5850, p. 612–612, 26 out. 2007.

SALESKA, S. R.; MILLER, S. D.; MATROSS, D. M.; GOULDEN, M. L.; WOFSY, S. C.; DA ROCHA, H. R.; DE CAMARGO, P. B.; CRILL, P.; DAUBE, B. C.; DE FREITAS, H. C.; HUTYRA, L.; KELLER, M.; KIRCHHOFF, V.; MENTON, M.; MUNGER, J. W.; PYLE, E. H.; RICE, A. H.; SILVA, H. Carbon in amazon forests: unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. **Science (new york, n.y.)**, v. 302, n. 5650, p. 1554–1557, 2003.

SALESKA, S. R.; WU, J.; GUAN, K.; ARAUJO, A. C.; HUETE, A.; NOBRE, A. D.; RESTREPO-COUBE, N. Dry-season greening of amazon forests. **Nature**, v. 531, n. 7594, p. E4–E5, 16 mar. 2016.

SAMANTA, A.; GANGULY, S.; HASHIMOTO, H.; DEVADIGA, S.; VERMOTE, E.; KNYAZIKHIN, Y.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. B. Amazon forests did not green-up during the 2005 drought. **Geophysical research letters**, v. 37, n. 5, p. 1–5, 2010.

SAMANTA, A.; GANGULY, S.; MYNENI, R. B. Modis enhanced vegetation index data do not show greening of amazon forests during the 2005 drought. **New phytologist**, v. 189, n. 1, p. 11–15, 2011.

SANTOS, M. G.; OLIVEIRA, M. T.; FIGUEIREDO, K. V.; FALCÃO, H. M.; ARRUDA, E. C. P.; ALMEIDA-CORTEZ, J.; SAMPAIO, E. V. S. B.; OMETTO, J. P. H. B.; MENEZES, R. S. C.; OLIVEIRA, A. F. M.; POMPELLI, M. F.; ANTONINO, A. C. D. Caatinga, the brazilian dry tropical forest: can it tolerate climate changes? **Theoretical and experimental plant physiology**, v. 26, n. 1, p. 83–99, 8 mar. 2014.

SOUSA, C. H. R.; HILKER, T.; WARING, R.; MOURA, Y. M.; LYAPUSTIN, A. Progress in Remote Sensing of Photosynthetic Activity over the Amazon Basin. **Remote Sensing**. v. 9, n.48, 7 jan. 2017.

SPRACKLEN, D. V.; ARNOLD, S. R.; TAYLOR, C. M. Observations of increased tropical rainfall preceded by air passage over forests. **Nature**, v. 489, n. 7415, p. 282–285, 5 set. 2012.

STEFFEN, C. A.; MORAES, E. C.; GAMA, F. F. Radiometria Óptica Espectral. In: **Anais VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Salvador, 1996.

SYED, T. H.; FAMIGLIETTI, J. S.; RODELL, M.; CHEN, J.; WILSON, C. R. Analysis of terrestrial water storage changes from grace and gldas. **Water resources research**, v. 44, n. 2, p. n/a-n/a, fev. 2008.

TANG, H.; DUBAYAH, R. Light-driven growth in amazon evergreen forests explained by seasonal variations of vertical canopy structure. **Proceedings of the**

national academy of sciences, v. 114, n. 10, p. 2640–2644, 7 mar. 2017.

THENKABAIL, P. S.; LYON, J. G.; HUETE, A. R. **Hyperspectral remote sensing of vegetation**. Boca Raton, London, New York: [S.N.], 2011. v. 1. .

VERBESSELT, J.; HYNDMAN, R.; ZEILEIS, A.; CULVENOR, D. Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series. **Remote sensing of environment**, v. 114, n. 12, p. 2970–2980, 15 dez. 2010.

VERBESSELT, J.; ZEILEIS, A.; HEROLD, M. Near real-time disturbance detection using satellite image time series. **Remote Sensing of Environment**, v. 123, p. 98-108, ago. 2012.

VIANA, D. R.; FERREIRA, N. J.; CONFORTE, J. C. Avaliação das estimativas de precipitação 3B42 e 3B43 do satélite TRMM na Região Sul do Brasil. **Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Belém, PA, 2010.

VIEIRA, S.; DE CAMARGO, P. B.; SELHORST, D.; DA SILVA, R.; HUTYRA, L.; CHAMBERS, J. Q.; BROWN, I. F.; HIGUCHI, N.; DOS SANTOS, J.; WOFSY, S. C.; TRUMBORE, S. E.; MARTINELLI, L. A. Forest structure and carbon dynamics in amazonian tropical rain forests. **Oecologia**, v. 140, n. 3, p. 468–479, 17 ago. 2004.

WRIGHT, S. J.; VAN SCHAIK, C. P. Light and the phenology of tropical trees. **The american naturalist**, v. 143, n. 1, p. 192, 1994.

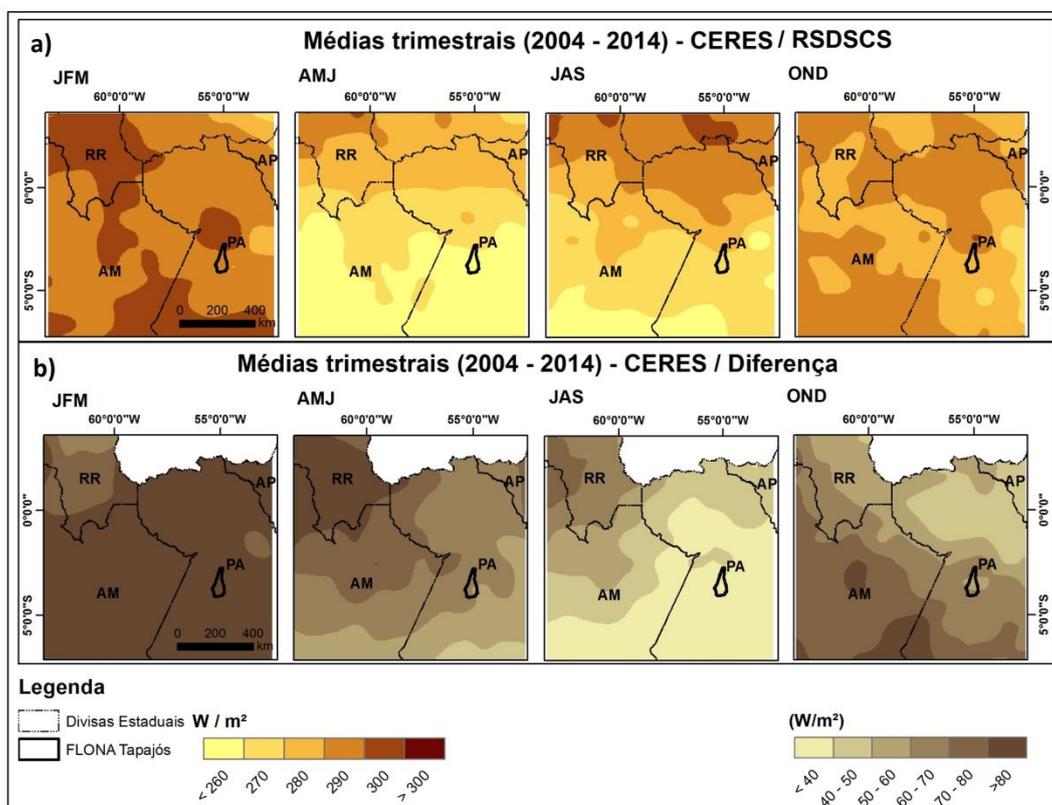
WU, J. et al. Leaf development and demography explain photosynthetic seasonality in amazon evergreen forests. **Science**, v. 351, n. 6276, p. 972–976, 26 fev. 2016.

XU, L.; SAMANTA, A.; COSTA, M. H.; GANGULY, S.; NEMANI, R. R.; MYNENI, R. B. Widespread decline in greenness of amazonian vegetation due to the 2010 drought. **Geophysical research letters**, v. 38, n. 7, p. n/a-n/a, abr. 2011.

YAN, H.; HUANG, J.; MINNIS, P.; WANG, T.; BI, J. Comparison of CERES surface radiation fluxes with surface observations over Loess Plateau. **Remote sensing of environment**, v. 115, n. 6, p. 1489-1500, 2011

APÊNDICE A - FIGURAS COMPLEMENTARES

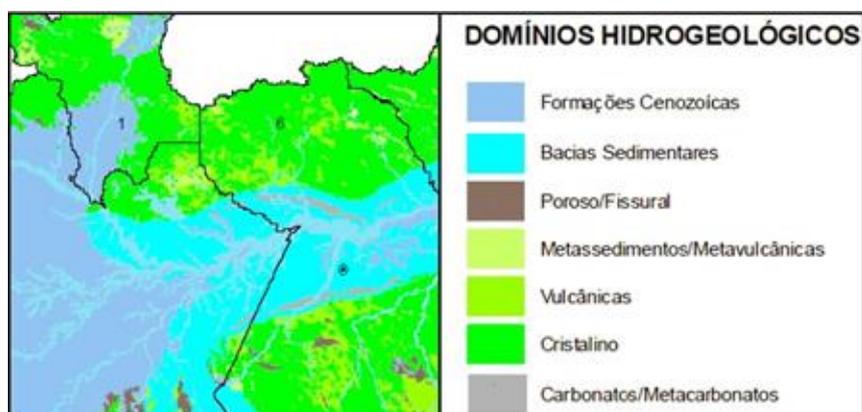
Figura A.1 - Médias trimestrais do dado CERES/RSDSCS *clear sky* (a) e a diferença com o dado RSDS (b).



Em (a) estão as médias trimestrais do dado RSDSCS, relativo à disponibilidade de radiação de ondas curtas, simulando uma condição de céu limpo. Este dado não foi utilizado nas análises, mas serviu para analisar a influência da cobertura de nuvens. Assim, em (b) está a diferença nas médias trimestrais dos dois fluxos de radiação.

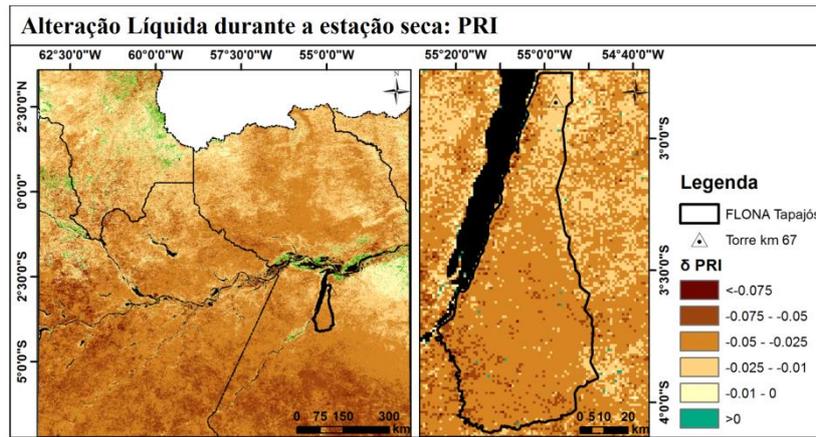
Fonte: Produção da autora.

Figura A.2 - Domínios hidrogeológicos sobre o *tile* MODIS-MAIAC.



Fonte: Adaptado de Almeida Filho (2010).

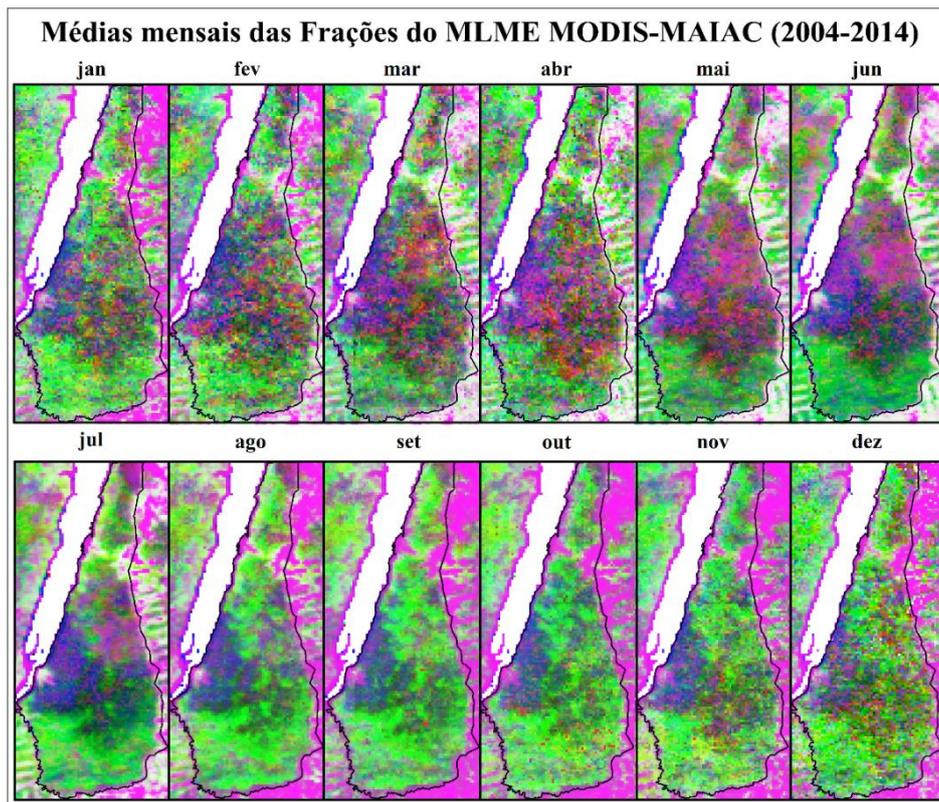
Figura A.3 - δ do PRI na FLONA Tapajós, durante a estação seca.



Alteração líquida dos meses da estação seca em relação à média global (2004-2014). O δ PRI está em valores absolutos, sem a normalização em percentual. As cores quentes representam alteração líquida negativa durante a estação seca.

Fonte: Produção da autora.

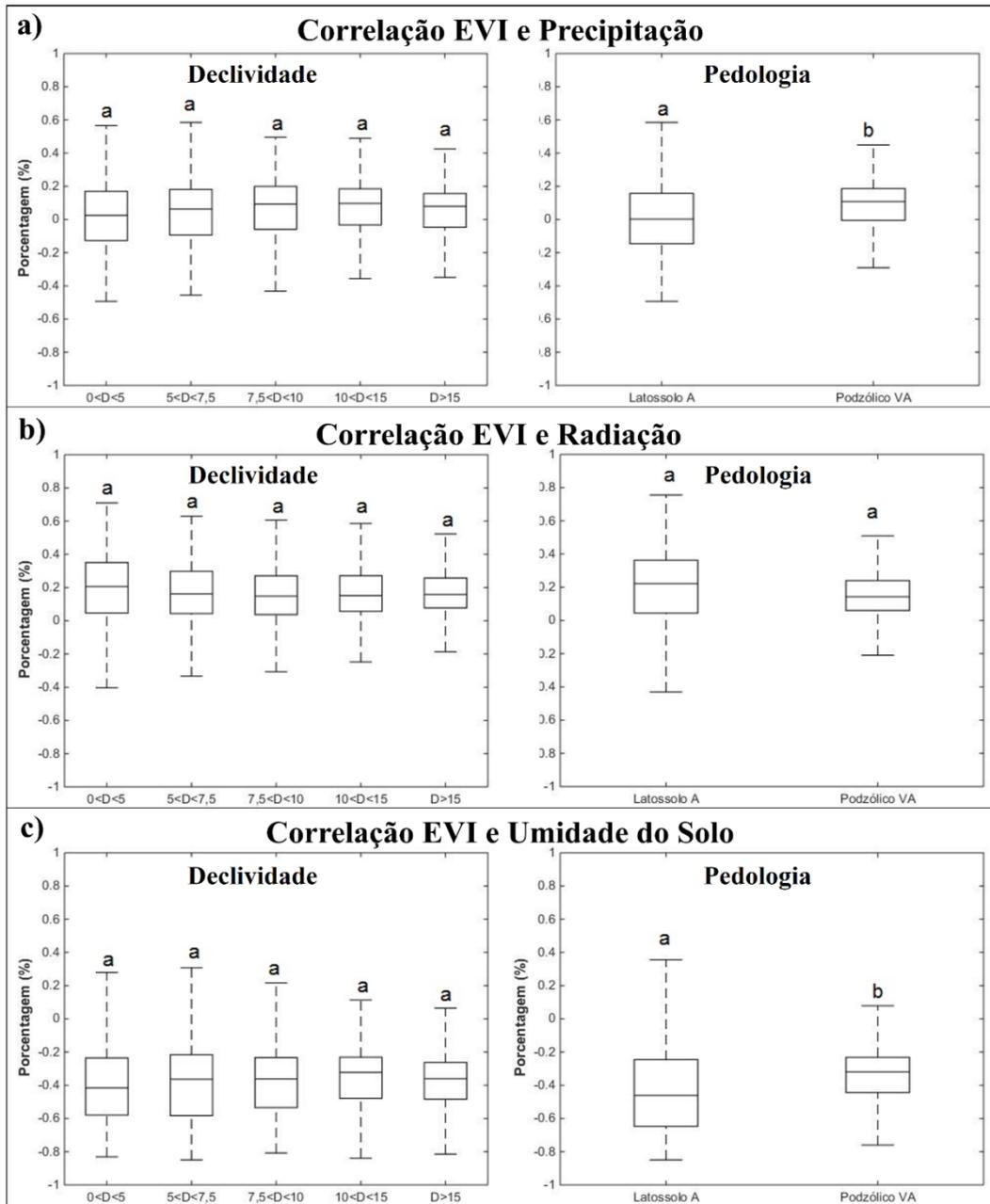
Figura A.4 - Composição RGB das frações MLME médias.



As imagens representam as médias mensais, de janeiro de 2004 a junho de 2014, das frações do MLME para a FLONA Tapajós. A composição colorida foi aplicada com equalização do histograma de cada imagem fração: R-NPV, G-GV e B-Sombra.

Fonte: Produção da autora.

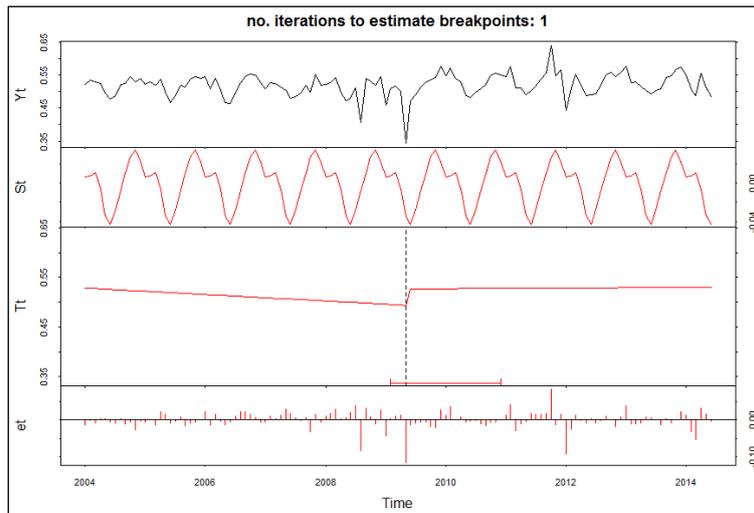
Figura A.5 - *Boxplot* da correlação por pixel entre EVI e as variáveis ambientais, de acordo com a declividade e pedologia.



A correlação por pixel entre o EVI e as variáveis ambientais corresponde à Figura 5.10. Foram selecionados os pixels de floresta, distribuídos sobre as faixas de declividade e tipos de solo da região (Figura 4.1). Os *boxplots* apresentam as distribuições do EVI com: precipitação (a); radiação (b); e umidade do solo (c). As letras correspondem ao teste de KW, significativamente correspondentes à mesma distribuição quando iguais.

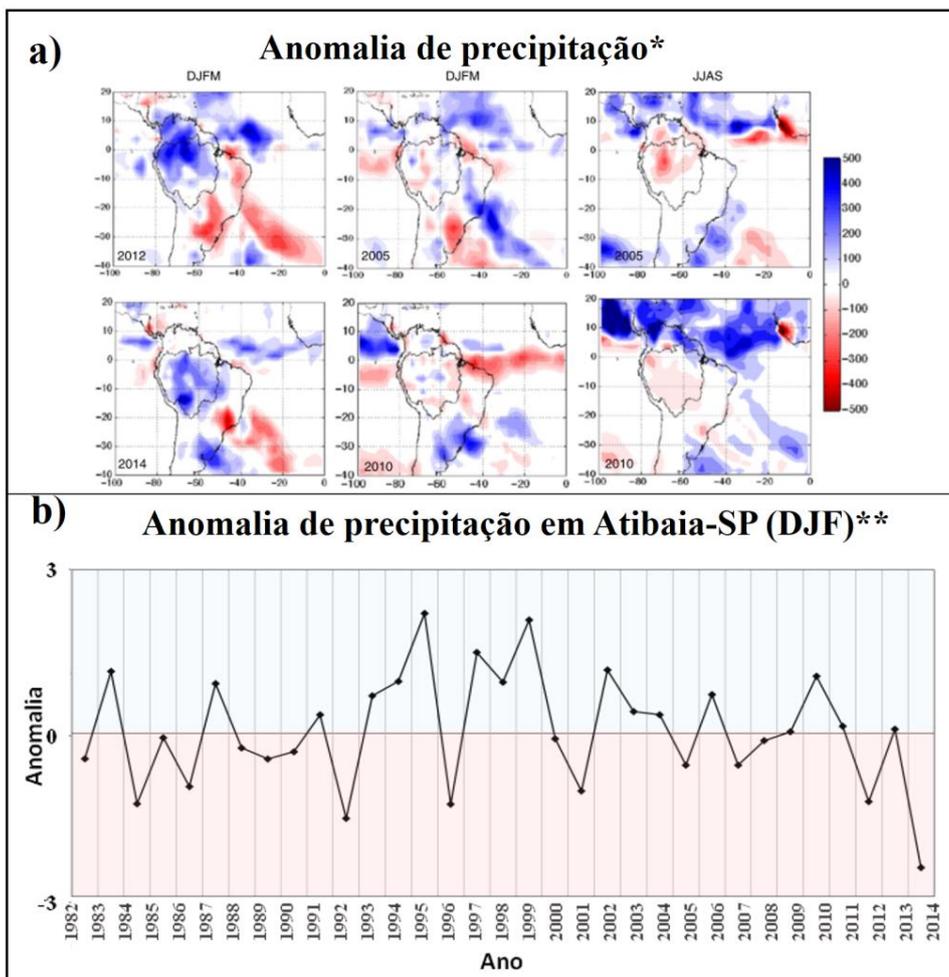
Fonte: Produção da autora.

Figura A.6 - Exemplo do BFAST para a série de EVI no Nível 2-Torre.



Fonte: Produção da autora.

Figura A.7 - Magnitude dos eventos extremos de precipitação em anos anômalos.



*Fonte: Adaptado de MARENGO e ESPINOZA (2016).

**Fonte: Adaptado de MACHADO e ARAGÃO (2017).

APÊNDICE B - TABELAS COMPLEMENTARES

Tabela B.1 - Estatísticas das imagens de alteração líquida das variáveis fenológicas, para a área da FLONA Tapajós.

Dado	UCT	Mín	Média	Mediana	Máx.	Desvio Padrão	% Negativa	% Positiva	p-valor KW (5%)	Floresta	F. Sec./ Reflo	Pastagem	Agricultura
δ NDVI (FLONA)	Floresta	-16,69	-0,75	-0,59	146,96	1,98	88,67	11,33	2,89E-30	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-9,93	-1,87	-1,44	4,98	1,63	97,53	2,47		0,000	x	0,001	0,000
	Pastagem	-9,33	-2,73	-2,28	0,02	1,80	99,80	0,20		0,000	0,001	x	0,406
	Agricultura	-13,79	-3,86	-3,08	1,77	2,72	98,88	1,12		0,000	0,000	0,406	x
δ EVI (FLONA)	Floresta	-19,54	-0,73	-0,33	6,62	1,86	60,38	39,61	8,01E-38	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-14,57	-3,18	-2,96	12,42	2,87	90,51	9,49		0,000	x	0,000	0,000
	Pastagem	-13,32	-5,01	-4,61	1,25	2,69	98,82	1,18		0,000	0,000	x	1,000
	Agricultura	-16,81	-5,82	-5,17	7,27	3,78	97,21	2,79		0,000	0,000	1,000	x
δ ρBLUE (FLONA)	Floresta	-40,96	-2,10	-2,39	38,94	2,95	81,74	18,26	1,89E-31	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-34,42	1,23	0,72	57,02	4,95	41,74	58,26		0,000	x	0,039	0,000
	Pastagem	-10,14	2,20	1,53	14,10	3,80	31,96	68,04		0,000	0,039	x	0,018
	Agricultura	-5,52	5,35	5,04	39,22	5,14	13,41	86,59		0,000	0,000	0,018	x
δ ρGREEN (FLONA)	Floresta	-65,75	2,23	2,31	32,93	1,90	7,90	92,10	9,64E-11	x	0,001	0,000	0,994
	F. Sec./ Reflo	-78,84	1,35	1,16	18,97	4,16	27,44	72,56		0,001	x	0,183	0,002
	Pastagem	-4,59	0,44	0,29	9,56	1,97	44,31	55,69		0,000	0,183	x	0,000
	Agricultura	-4,54	2,70	2,44	26,63	3,46	17,32	82,68		0,994	0,002	0,000	x

(continuação)

Dado	UCT	Mín	Média	Mediana	Máx.	Desvio Padrão	% Negativa	% Positiva	p-valor KW (5%)	Floresta	F. Sec./ Reflo	Pastagem	Agricultura
δ ρRED (FLONA)	Floresta	-41,05	2,33	2,08	37,52	2,57	12,77	87,23	8,04E-23	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-25,47	4,59	4,23	23,74	3,75	5,59	94,41		0,000	x	0,760	0,000
	Pastagem	-1,36	5,35	4,79	17,23	3,51	3,33	96,67		0,000	0,760	x	0,000
	Agricultura	-4,01	7,91	7,48	32,55	4,59	2,23	97,77		0,000	0,000	0,000	x
δ ρNIR (FLONA)	Floresta	-9,62	0,40	0,79	13,01	1,76	32,35	67,65	1,88E-29	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-11,83	-1,87	-1,92	23,54	2,89	78,70	21,30		0,000	x	0,007	0,001
	Pastagem	-9,00	-3,58	-3,59	2,68	2,06	96,86	3,14		0,000	0,007	x	0,955
	Agricultura	-8,73	-3,44	-3,79	11,12	2,99	89,39	10,61		0,000	0,001	0,955	x
δ ρSWIR (FLONA)	Floresta	-30,60	-2,64	-3,11	45,83	3,40	86,53	13,47	4,05E-38	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-7,02	1,81	0,60	34,36	5,15	44,60	55,40		0,000	x	0,234	0,000
	Pastagem	-11,21	3,06	2,06	24,58	4,83	30,00	70,00		0,000	0,234	x	0,000
	Agricultura	-29,45	6,70	6,21	33,85	6,50	11,73	88,27		0,000	0,000	0,000	x
δ GV (FLONA)	Floresta	-30,45	0,56	1,05	25,90	2,42	27,65	72,35	4,23E-32	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-20,87	-2,77	-1,97	30,66	4,11	76,85	23,15		0,000	x	0,006	0,000
	Pastagem	-18,69	-5,25	-4,27	2,19	4,20	96,27	3,73		0,000	0,006	x	0,749
	Agricultura	-25,83	-7,16	-5,82	8,57	5,97	94,97	5,03		0,000	0,000	0,749	x

(conclusão)

Dado	UCT	Mín	Média	Mediana	Máx.	Desvio Padrão	% Negativa	% Positiva	p-valor KW (5%)	Floresta	F. Sec./ Reflo	Pastagem	Agricultura
δ NPV (FLONA)	Floresta	-89,43	-13,42	-15,12	78,63	29,18	64,64	35,36	9,39E-28	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-46,22	18,39	19,33	107,77	17,03	12,09	87,91		0,000	x	0,283	0,005
	Pastagem	-33,59	18,07	17,95	60,15	13,15	7,06	92,94		0,000	0,283	x	0,000
	Agricultura	-3,25	27,21	26,43	94,98	12,33	1,68	98,32		0,000	0,005	0,000	x
δ Sombra (FLONA)	Floresta	-73,13	18,20	17,80	100,38	16,15	10,37	89,63	0,55	x	0,612	1,000	0,989
	F. Sec./ Reflo	-66,56	22,33	20,21	108,12	13,24	0,91	99,09		0,612	x	0,569	0,802
	Pastagem	-0,15	18,74	17,52	53,95	8,62	0,20	99,80		1,000	0,569	x	0,981
	Agricultura	1,63	20,78	18,80	57,73	9,64	0,00	100,00		0,989	0,802	0,981	x

Fonte: Produção da autora.

Tabela B.2 - Estatísticas das imagens de correlação entre as variáveis fenológicas e ambientais, para a área da FLONA Tapajós.

Dado	UCT	Mín	Média	Mediana	Máx.	Desvio Padrão	% Negativo	% Positiva	p-valor KW (5%)	Floresta	F. Sec./ Reflo	Pastagem	Agricultura
Correlação: NDVI e Precipitação (FLONA)	Floresta	-0,66	0,18	0,19	0,63	0,15	11,77	88,23	8,76E-07	x	0,004	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-0,32	0,26	0,27	0,69	0,16	6,63	93,37		0,004	x	0,491	0,499
	Pastagem	-0,23	0,26	0,26	0,66	0,18	7,65	92,35		0,000	0,491	x	1,000
	Agricultura	-0,32	0,31	0,32	0,67	0,17	2,79	97,21		0,000	0,499	1,000	x
Correlação: NDVI e Radiação (FLONA)	Floresta	-0,79	-0,10	-0,09	0,85	0,17	75,48	24,52	5,11E-38	X	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-0,87	-0,33	-0,33	0,32	0,20	96,36	3,64		0,000	X	0,000	0,000
	Pastagem	-0,84	-0,41	-0,41	0,11	0,19	98,82	1,18		0,000	0,000	X	0,919
	Agricultura	-0,76	-0,44	-0,46	0,01	0,16	99,44	0,56		0,000	0,000	0,919	X
Correlação: NDVI e Umidade (FLONA)	Floresta	-0,72	0,05	0,03	0,86	0,24	41,84	58,16	9,45E-33	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-0,43	0,37	0,37	0,90	0,23	6,76	93,24		0,000	x	0,041	0,019
	Pastagem	-0,09	0,45	0,47	0,85	0,17	0,39	99,61		0,000	0,041	x	0,993
	Agricultura	-0,05	0,46	0,49	0,88	0,20	1,12	98,88		0,000	0,019	0,993	x
Correlação: EVI e Precipitação (FLONA)	Floresta	-0,55	0,07	0,07	0,78	0,19	35,89	64,11	5,64E-16	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-0,56	0,22	0,24	0,69	0,19	12,35	87,65		0,000	x	0,495	0,018
	Pastagem	-0,35	0,28	0,29	0,68	0,18	8,04	91,96		0,000	0,495	x	0,420
	Agricultura	-0,62	0,31	0,31	0,71	0,18	5,59	94,41		0,000	0,018	0,420	x
Correlação: EVI e Radiação (FLONA)	Floresta	-0,81	0,14	0,16	0,76	0,25	24,13	75,87	4,85E-33	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-0,85	-0,21	-0,21	0,63	0,30	75,03	24,97		0,000	x	0,000	0,063
	Pastagem	-0,83	-0,39	-0,43	0,57	0,24	92,75	7,25		0,000	0,000	x	0,226
	Agricultura	-0,82	-0,37	-0,42	0,42	0,24	91,06	8,94		0,000	0,063	0,226	x

(continuação)

Dado	UCT	Mín	Média	Mediana	Máx.	Desvio Padrão	% Negativo	% Positiva	p-valor KW (5%)	Floresta	F. Sec./ Reflo	Pastagem	Agricultura
Correlação: EVI e Umidade (FLONA)	Floresta	-0,95	-0,32	-0,35	0,81	0,29	86,19	13,81	1,91E-31	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-0,75	0,12	0,13	0,78	0,33	35,37	64,63		0,000	x	0,000	0,001
	Pastagem	-0,66	0,32	0,39	0,78	0,28	13,53	86,47		0,000	0,000	x	0,948
	Agricultura	-0,45	0,29	0,33	0,76	0,27	16,20	83,80		0,000	0,001	0,948	x
Correlação: GV e Precipitação (FLONA)	Floresta	-0,73	-0,15	-0,18	0,60	0,20	80,13	19,87	1,44E-30	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-0,54	0,09	0,08	0,64	0,22	33,55	66,45		0,000	x	0,676	0,001
	Pastagem	-0,43	0,16	0,16	0,60	0,21	21,76	78,24		0,000	0,676	x	0,035
	Agricultura	-0,33	0,25	0,28	0,59	0,19	11,17	88,83		0,000	0,001	0,035	x
Correlação: GV e Radiação (FLONA)	Floresta	-0,97	0,37	0,45	0,81	0,29	12,27	87,73	3,60E-37	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-0,84	-0,11	-0,15	0,74	0,36	64,24	35,76		0,000	x	0,004	0,001
	Pastagem	-0,77	-0,32	-0,38	0,64	0,28	86,08	13,92		0,000	0,004	x	0,993
	Agricultura	-0,74	-0,33	-0,38	0,57	0,27	88,27	11,73		0,000	0,001	0,993	x
Correlação: GV e Umidade (FLONA)	Floresta	-0,87	-0,43	-0,55	0,79	0,34	86,76	13,24	7,79E-35	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-0,76	0,16	0,23	0,81	0,37	32,64	67,36		0,000	x	0,010	0,100
	Pastagem	-0,69	0,38	0,48	0,79	0,33	13,53	86,47		0,000	0,010	x	0,839
	Agricultura	-0,47	0,35	0,41	0,77	0,26	10,61	89,39		0,000	0,100	0,839	x
Correlação: NPV e Precipitação (FLONA)	Floresta	-0,62	-0,08	-0,07	0,73	0,20	62,93	37,07	3,51E-19	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-0,67	-0,21	-0,21	0,38	0,20	84,01	15,99		0,000	x	0,982	0,085
	Pastagem	-0,62	-0,20	-0,19	0,31	0,20	80,39	19,61		0,000	0,982	x	0,032
	Agricultura	-0,61	-0,32	-0,34	0,24	0,16	96,09	3,91		0,000	0,085	0,032	x

(conclusão)

Dado	UCT	Mín	Média	Mediana	Máx.	Desvio Padrão	% Negativo	% Positiva	p-valor KW (5%)	Floresta	F. Sec./ Reflo	Pastagem	Agricultura
Correlação: NPV e Radiação (FLONA)	Floresta	-0,35	0,31	0,32	0,97	0,18	5,66	94,34	1,15E-14	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-0,66	0,46	0,47	0,85	0,16	1,04	98,96		0,000	x	0,813	0,011
	Pastagem	-0,07	0,49	0,51	0,79	0,15	0,59	99,41		0,000	0,813	x	0,120
	Agricultura	0,00	0,53	0,53	0,75	0,13	0,56	99,44		0,000	0,011	0,120	x
Correlação: NPV e Umidade (FLONA)	Floresta	-0,92	-0,45	-0,45	0,83	0,16	99,68	0,32	1,13E-14	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-0,93	-0,62	-0,64	0,03	0,15	99,74	0,26		0,000	x	0,825	0,903
	Pastagem	-0,87	-0,64	-0,66	-0,12	0,11	100,00	0,00		0,000	0,825	x	0,410
	Agricultura	-0,92	-0,59	-0,60	-0,05	0,16	100,00	0,00		0,000	0,903	0,410	x
Correlação: Sombra e Precipitação (FLONA)	Floresta	-0,67	-0,14	-0,13	0,62	0,17	78,70	21,30	6,72E-18	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-0,69	-0,24	-0,24	0,27	0,17	91,29	8,71		0,000	x	0,950	0,002
	Pastagem	-0,66	-0,23	-0,22	0,26	0,18	89,41	10,59		0,000	0,950	x	0,000
	Agricultura	-0,72	-0,32	-0,32	0,25	0,17	96,09	3,91		0,000	0,002	0,000	x
Correlação: Sombra e Radiação (FLONA)	Floresta	-0,82	0,18	0,17	0,84	0,22	22,14	77,86	2,62E-24	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-0,78	0,40	0,42	0,84	0,21	3,64	96,36		0,000	x	0,000	0,018
	Pastagem	-0,04	0,46	0,49	0,83	0,18	0,78	99,22		0,000	0,000	x	0,417
	Agricultura	0,02	0,45	0,47	0,77	0,14	0,00	100,00		0,000	0,018	0,417	x
Correlação: Sombra e Umidade (FLONA)	Floresta	-0,93	-0,14	-0,13	0,63	0,25	69,09	30,91	1,68E-21	x	0,000	0,000	0,000
	F. Sec./ Reflo	-0,94	-0,44	-0,45	0,36	0,21	97,40	2,60		0,000	x	0,118	0,933
	Pastagem	-0,91	-0,49	-0,51	0,07	0,17	99,22	0,78		0,000	0,118	x	0,365
	Agricultura	-0,91	-0,46	-0,47	0,07	0,19	99,44	0,56		0,000	0,933	0,365	x

Fonte: Produção da autora.

Tabela B.3 - Série temporal extraída para a área total das imagens HVIS de 2012.

Data	EG	GC	NDVI	EVI	PRI	ρBLUE	ρGREEN	ρRED	ρNIR	GV	NPV	Sombra
29/jul	0,039	0,463	0,843	0,591	-0,044	0,016	0,044	0,033	0,387	0,404	0,102	0,694
30/jul	0,035	0,454	0,840	0,564	-0,048	0,016	0,042	0,033	0,365	0,376	0,106	0,725
31/jul	0,041	0,464	0,841	0,604	-0,047	0,017	0,047	0,035	0,401	0,421	0,100	0,675
03/ago	0,034	0,446	0,835	0,569	-0,051	0,016	0,043	0,034	0,373	0,377	0,120	0,738
04/ago	0,034	0,445	0,834	0,573	-0,054	0,017	0,043	0,035	0,376	0,382	0,119	0,732
05/ago	0,034	0,443	0,829	0,569	-0,050	0,017	0,044	0,036	0,376	0,375	0,132	0,751
06/ago	0,036	0,456	0,842	0,581	-0,049	0,016	0,042	0,033	0,379	0,394	0,104	0,706
07/ago	0,036	0,454	0,841	0,588	-0,048	0,016	0,043	0,033	0,385	0,400	0,107	0,703
11/ago	0,034	0,455	0,843	0,576	-0,047	0,016	0,041	0,032	0,374	0,389	0,101	0,706
12/ago	0,036	0,464	0,847	0,574	-0,045	0,015	0,041	0,031	0,371	0,393	0,088	0,688
14/ago	0,034	0,465	0,852	0,565	-0,046	0,014	0,039	0,029	0,359	0,383	0,080	0,689
03/set	0,033	0,467	0,861	0,595	-0,037	0,015	0,038	0,028	0,378	0,398	0,092	0,687
14/set	0,034	0,459	0,855	0,611	-0,032	0,016	0,040	0,030	0,394	0,406	0,109	0,693
17/set	0,035	0,463	0,852	0,608	-0,032	0,017	0,041	0,030	0,391	0,406	0,105	0,690
18/set	0,034	0,464	0,855	0,608	-0,035	0,016	0,040	0,030	0,390	0,404	0,106	0,692
23/set	0,037	0,464	0,850	0,617	-0,036	0,017	0,043	0,032	0,402	0,416	0,109	0,682
25/set	0,039	0,467	0,850	0,641	-0,031	0,018	0,045	0,034	0,423	0,440	0,112	0,662

Fonte: Produção da autora.

Tabela B.4 - Série temporal extraída para a Copa 1 das imagens HVIS de 2012.

Data	EG	GC	NDVI	EVI	PRI	ρBLUE	ρGREEN	ρRED	ρNIR	GV	NPV	Sombra
29/jul	0,125	0,594	0,868	0,861	-0,056	0,020	0,096	0,047	0,668	0,813	0,030	0,191
30/jul	0,115	0,585	0,866	0,827	-0,052	0,020	0,090	0,044	0,626	0,753	0,036	0,263
31/jul	0,131	0,592	0,867	0,877	-0,053	0,022	0,101	0,049	0,690	0,840	0,028	0,165
03/ago	0,121	0,585	0,870	0,867	-0,059	0,021	0,094	0,047	0,674	0,816	0,031	0,194
04/ago	0,118	0,581	0,866	0,853	-0,063	0,021	0,093	0,047	0,660	0,794	0,037	0,225
05/ago	0,118	0,577	0,866	0,862	-0,054	0,021	0,093	0,048	0,670	0,809	0,035	0,209
06/ago	0,117	0,586	0,875	0,873	-0,056	0,020	0,091	0,045	0,673	0,830	0,018	0,156
07/ago	0,110	0,583	0,881	0,880	-0,052	0,019	0,086	0,043	0,674	0,831	0,014	0,154
11/ago	0,106	0,589	0,887	0,873	-0,050	0,018	0,081	0,039	0,655	0,814	0,009	0,155
12/ago	0,108	0,593	0,881	0,847	-0,048	0,018	0,082	0,039	0,630	0,788	0,012	0,183
14/ago	0,107	0,597	0,887	0,855	-0,050	0,017	0,081	0,038	0,632	0,792	0,008	0,170
03/set	0,096	0,581	0,895	0,895	-0,050	0,018	0,075	0,037	0,668	0,808	0,024	0,195
14/set	0,094	0,573	0,892	0,892	-0,044	0,018	0,075	0,038	0,668	0,797	0,031	0,219
17/set	0,096	0,578	0,895	0,895	-0,048	0,018	0,075	0,037	0,669	0,801	0,027	0,209
18/set	0,097	0,580	0,894	0,895	-0,049	0,017	0,076	0,038	0,672	0,803	0,028	0,209
23/set	0,102	0,577	0,885	0,877	-0,057	0,019	0,080	0,041	0,663	0,782	0,042	0,249
25/set	0,109	0,580	0,886	0,908	-0,049	0,019	0,086	0,043	0,703	0,835	0,038	0,189

Fonte: Produção da autora.

Tabela B.5 - Série temporal extraída para a Copa 2 das imagens HVIS de 2012.

Data	EG	GC	NDVI	EVI	PRI	ρBLUE	ρGREEN	ρRED	ρNIR	GV	NPV	Sombra
29/jul	0,073	0,496	0,817	0,726	-0,097	0,019	0,075	0,058	0,572	0,624	0,121	0,494
30/jul	0,069	0,492	0,811	0,697	-0,094	0,020	0,072	0,057	0,539	0,587	0,122	0,532
31/jul	0,076	0,490	0,804	0,717	-0,097	0,021	0,080	0,063	0,580	0,629	0,128	0,497
03/ago	0,064	0,465	0,780	0,668	-0,099	0,022	0,077	0,068	0,542	0,547	0,193	0,642
04/ago	0,063	0,466	0,786	0,671	-0,100	0,022	0,075	0,065	0,536	0,554	0,172	0,617
05/ago	0,062	0,461	0,778	0,666	-0,101	0,023	0,077	0,069	0,541	0,542	0,203	0,657
06/ago	0,063	0,474	0,805	0,702	-0,105	0,020	0,072	0,061	0,560	0,599	0,139	0,538
07/ago	0,064	0,482	0,820	0,729	-0,099	0,019	0,070	0,057	0,573	0,628	0,119	0,488
11/ago	0,058	0,483	0,830	0,725	-0,097	0,018	0,064	0,052	0,554	0,614	0,101	0,479
12/ago	0,058	0,489	0,831	0,717	-0,095	0,017	0,063	0,051	0,544	0,610	0,090	0,470
14/ago	0,054	0,491	0,840	0,709	-0,093	0,016	0,058	0,045	0,519	0,590	0,074	0,472
03/set	0,045	0,476	0,859	0,743	-0,071	0,017	0,051	0,040	0,529	0,589	0,080	0,490
14/set	0,043	0,475	0,868	0,755	-0,057	0,017	0,048	0,037	0,530	0,589	0,079	0,487
17/set	0,044	0,469	0,857	0,739	-0,060	0,018	0,051	0,040	0,522	0,573	0,091	0,516
18/set	0,043	0,475	0,866	0,744	-0,061	0,017	0,048	0,037	0,518	0,573	0,080	0,504
23/set	0,046	0,465	0,848	0,743	-0,059	0,020	0,055	0,044	0,536	0,578	0,106	0,527
25/set	0,049	0,469	0,851	0,770	-0,053	0,020	0,057	0,045	0,564	0,614	0,103	0,487

Fonte: Produção da autora.

Tabela B.6 - Série temporal extraída para a Copa 3 das imagens HVIS de 2012.

Data	EG	GC	NDVI	EVI	PRI	ρBLUE	ρGREEN	ρRED	ρNIR	GV	NPV	Sombra
29/jul	0,034	0,441	0,833	0,631	-0,026	0,023	0,047	0,037	0,405	0,404	0,136	0,733
30/jul	0,033	0,438	0,832	0,622	-0,024	0,023	0,046	0,037	0,398	0,394	0,138	0,743
31/jul	0,038	0,444	0,828	0,641	-0,028	0,024	0,050	0,039	0,418	0,416	0,140	0,723
03/ago	0,028	0,423	0,817	0,584	-0,026	0,023	0,044	0,038	0,374	0,348	0,168	0,817
04/ago	0,032	0,430	0,811	0,595	-0,037	0,024	0,048	0,040	0,387	0,366	0,166	0,795
05/ago	0,028	0,420	0,810	0,578	-0,029	0,023	0,045	0,039	0,371	0,341	0,175	0,829
06/ago	0,030	0,428	0,814	0,583	-0,031	0,023	0,045	0,038	0,371	0,351	0,158	0,804
07/ago	0,030	0,424	0,811	0,584	-0,030	0,024	0,046	0,039	0,375	0,351	0,166	0,811
11/ago	0,029	0,427	0,814	0,563	-0,027	0,022	0,043	0,036	0,354	0,333	0,155	0,818
12/ago	0,029	0,430	0,814	0,556	-0,026	0,022	0,043	0,035	0,348	0,332	0,143	0,806
14/ago	0,030	0,432	0,812	0,547	-0,029	0,021	0,043	0,035	0,340	0,324	0,139	0,810
03/set	0,026	0,418	0,786	0,504	-0,020	0,024	0,044	0,037	0,314	0,265	0,189	0,900
14/set	0,021	0,398	0,767	0,497	-0,012	0,028	0,045	0,041	0,314	0,245	0,221	0,916
17/set	0,019	0,399	0,774	0,486	-0,001	0,026	0,041	0,038	0,298	0,238	0,200	0,911
18/set	0,027	0,421	0,794	0,555	0,004	0,027	0,048	0,040	0,351	0,306	0,193	0,854
23/set	0,029	0,417	0,779	0,557	-0,004	0,029	0,051	0,044	0,360	0,305	0,214	0,864
25/set	0,032	0,420	0,778	0,587	-0,002	0,032	0,056	0,048	0,388	0,330	0,232	0,860

Fonte: Produção da autora.

Tabela B.7 - Série temporal extraída das imagens diárias MODIS-MAIAC para a área da Torre km 67.

Data	EG	GC	NDVI	EVI	ρBLUE	ρGREEN	ρRED	ρNIR	GV	NPV	Sombra
30/jul	0,034	0,462	0,829	0,509	0,019	0,040	0,028	0,296	0,904	0,025	0,185
03/ago	0,032	0,491	0,859	0,486	0,014	0,033	0,021	0,271	0,884	0,014	0,071
04/ago	0,032	0,497	0,864	0,481	0,013	0,032	0,019	0,266	0,872	0,009	0,042
11/ago	0,033	0,478	0,840	0,490	0,016	0,037	0,024	0,279	0,884	0,040	0,138
14/ago	0,036	0,493	0,846	0,490	0,015	0,037	0,023	0,280	0,893	0,034	0,115
03/set	0,034	0,479	0,840	0,500	0,018	0,039	0,025	0,284	0,876	0,039	0,172
14/set	0,034	0,491	0,863	0,521	0,015	0,035	0,022	0,296	0,949	0,018	0,045
17/set	0,038	0,458	0,801	0,499	0,022	0,046	0,033	0,299	0,885	0,060	0,332
18/set	0,033	0,494	0,866	0,519	0,014	0,034	0,021	0,295	0,953	0,006	0,033

Fonte: Produção da autora.