

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA
FENOLOGIA DA VEGETAÇÃO NA TRANSIÇÃO DO
CERRADO E PANTANAL MATO-GROSSENSE**

TONNY JADER DE MORAES

PROF^a. DR^a. IRAMAIA JORGE CABRAL DE PAULO
Orientadora

**Cuiabá, MT
Julho de 2019.**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA
FENOLOGIA DA VEGETAÇÃO NA TRANSIÇÃO DO
CERRADO E PANTANAL MATO-GROSSENSE**

TONNY JADER DE MORAES

*Tese apresentada ao Programa de Pós-
graduação em Física Ambiental da
Universidade Federal de Mato Grosso,
como parte dos requisitos para o grau de
Doutor em Física Ambiental.*

PROF^a. DR^a. IRAMAIA JORGE CABRAL DE PAULO
ORIENTADORA

Cuiabá, MT
Julho de 2019.

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

D278v de Moraes, Tonny Jader.
VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA FENOLOGIA
DA VEGETAÇÃO NA TRANSIÇÃO DO CERRADO E
PANTANAL MATO-GROSSENSE / Tonny Jader de Moraes. --
2019
xii, 84 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientadora: IRAMAIA JORGE CABRAL DE PAULO.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso,
Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física
Ambiental, Cuiabá, 2019.
Inclui bibliografia.

1. Fenologia da superfície. 2. NDVI. 3. precipitação. 4.
Variabilidade espacial. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

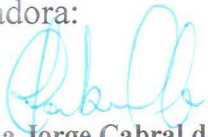
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental

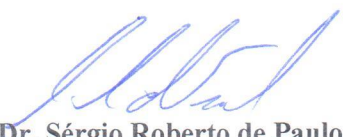
FOLHA DE APROVAÇÃO

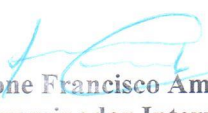
**TÍTULO: VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DA FENOLOGIA DA
VEGETAÇÃO NA TRANSIÇÃO DO CERRADO E PANTANAL
MATO-GROSSENSE**

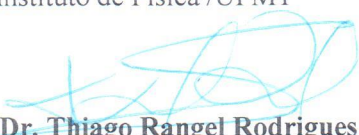
AUTOR: TONNY JADER DE MORAES

Tese de Doutorado defendida e aprovada em 19 de julho de 2019, pela
comissão julgadora:

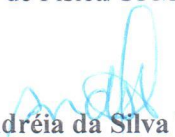

Prof. Dra. Iramaia Jorge Cabral de Paulo
Orientadora
Instituto de Física - UFMT


Prof. Dr. Sérgio Roberto de Paulo
Coorientador
Instituto de Física /UFMT


Prof. Dr. Leone Francisco Amorim Curado
Examinador Interno
Instituto de Física /UFMT


Prof. Dr. Thiago Rangel Rodrigues
Examinador Interno
Instituto de Física/UFMS


Prof. Dr. Higo José Dalmagro
Examinador Externo
Universidade de Cuiabá - UNIC


Profa. Dra. Andréia da Silva Tavares
Examinadora Externa
Centro Universitário de Várzea Grande
UNIVAG

DEDICATÓRIA

*A Deus pela vida, à minha esposa
Alessandra, a minha **filha Geovanna**
pelo amor, carinho e dedicação a minha
mãe Constança e irmãos Lívia, Celma e
Weber pelo companheirismo em todos
os momentos. .*

AGRADECIMENTOS

- A Deus, Pela dadiva da vida que me concedeu;
- A minha esposa Alessandra e filha Geovanna, por todo carinho e dedicação e apoio em todos os momentos, que me deu força e coragem para seguir mesmo nos momentos de maiores dificuldades;
- Aos meus Pais Constança e Francisco Ribeiro, por toda educação e carinho com que me instruíram para fazer o bem;
- Aos meus orientadores, Prof^a. Dr^a. Iramaia Jorge Cabral de Paulo e Prof. Dr. Sergio Roberto de Paulo, pela confiança, amizade, conhecimentos e ensinamentos compartilhados e ajuda no desenvolvimento da tese;
- Aos meus irmãos Livia, Celma e Weber por todo carinho, apoio e incentivo;
- Ao Programa de Pós Graduação em Física Ambiental (PPGFA) pela estrutura oferecida;
- Ao Coordenador Prof. Dr. José de Souza Nogueira (Paraná) e Prof^a. Dr^a Marta C.J.A. Nogueira, confiança, companheirismo e ensinamentos;
- Aos colegas da Física Ambiental, Lucas Peres, Fernando Sallo, Nelson, Rafael Palácios, Anísio Alfredo, Keylyane, Roberta Moreti, Laís Braga, Gerson Kida, Igor Khunen e demais colegas por toda ajuda, conselhos e apoio;
- Aos amigos Cesário e Soilce pela grande colaboração e serviços prestados ao PPGFA.
- A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, que compartilharam seus conhecimentos;
- A professor Dr. Raphael Souza e aos colegas Lucas Angelini, Anísio Alfredo, Keylyane, pela ajuda com os Softwares e análise de dados.
- A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.
- A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro;

EPÍGRAFES

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.” (Arthur Schopenhauer)

.....

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	V
1. RESUMO	X
2. ABSTRACT	XI
1. INTRODUÇÃO	12
1.1 PROBLEMÁTICA.....	12
1.2 JUSTIFICATIVA.....	14
1.3 OBJETIVO GERAL	16
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2. REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 VEGETAÇÃO DO CERRADO.....	17
2.2 VEGETAÇÃO DO PANTANAL	19
2.3 SATÉLITE LANDSAT	20
2.4 A MISSÃO TRMM	24
2.5 FENOLOGIA DA VEGETAÇÃO	25
2.5.1 <i>O monitoramento da fenologia</i>	27
2.5.2 <i>Monitoramento da fenologia por satélite</i>	28
2.5.3 <i>Metodologia na análise da fenologia por imagem de satélite</i>	30
3. MATERIAL E MÉTODO	34
3.1 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	34
3.2 BASES DE DADOS MICROMETEOROLÓGICOS E DE SENSORIAMENTO REMOTO.....	37
3.2.1 <i>DADOS DE PRECIPITAÇÃO DAS ESTAÇÕES MICROMETEOROLÓGICAS</i>	37
3.2.2 <i>Produto de precipitação de TRMM</i>	37
3.2.3 <i>Dados orbitais dos sensores OLI e TRIS</i>	38
3.3 CÁLCULO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO	39
3.3.1 <i>Série temporal de NDVI</i>	41
3.3.2 <i>Extração dos parâmetros da sazonalidade</i>	41
3.3.3 <i>Análise da variabilidade espacial do NDVI</i>	42
3.4 ANÁLISES DOS DADOS	44
3.4.1 <i>Validação do Produto TRMM</i>	44
4. RESULTADO E DISCUSSÃO.....	46
4.1 VALIDAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO MENSAL ESTIMADA PELO PRODUTO 3B43V7 TRMM	46
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DO NDVI NA TRANSIÇÃO DO PANTANAL E CERRADO	49
4.3 PERFIL DA VARIABILIDADE ESPAÇO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO E ÍNDICE DE VEGETAÇÃO	51
4.4 PERFIL DA VARIABILIDADE ESPAÇO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO E ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR ESTAÇÃO ..	53
4.5 PADRÃO FENOLÓGICO DA VEGETAÇÃO EM ÁREAS DE CERRADO E PANTANAL	59
4.5.1 <i>Variabilidade interanual NDVI</i>	59

4.5.2	<i>Variabilidade anual de NDVI</i>	61
4.6	FASES DE TRANSIÇÃO DO CICLO FENOLÓGICO DA VEGETAÇÃO.....	64
4.7	MAPEAMENTO DO CICLO FENOLÓGICO	68
5.	CONCLUSÃO	72
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Os limites oficiais do bioma Cerrado (em cinza). Os pontos representam diferentes fisionomias do Cerrado (floresta, pastagem e arbustiva). O símbolo * indica sites de savanas na Amazônia. Adaptado de: DE MIRANDA, S. D. C et al., 2014..	17
Figura 2 Descrição das fisionomias do Cerrado em gradientes de altura (adaptado de MESQUITA JUNIOR (2000)).	18
Figura 3: vegetação natural e mapa de uso da terra para a Bacia do Alto Paraguai (adaptado de <i>Conservation International</i> 2009).	20
Figura 4: Lançamento e tempo de aquisição de dados dos Landsat.	21
Figura 5: Estimativa das variações na porcentagem e cobertura vegetal nativa do Cerrado e Pantanal no estado de Mato Grosso, Cada região representada pelas cenas do satélite LandSat. Adaptado de Machado, R. B. (2016) apud Mantovani & Pereira (1998).	23
Figura 6: Sensores do satélite TRMM	25
Figura 7: Exemplos de fotografia de repetição digital pelos sistemas de câmeras. De cima para baixo: galhos de árvore, copa das árvores; visão descendente do dossel; vista para cima do dossel, Adaptado de Tang et al (2016)	28
Figura 8: Localização das áreas de estudo. Floresta de pastagens e mata de savana (campo sujo) na Fazenda Miranda (FMI), <i>Brachiaria</i> pastagem humidicola na Fazenda Experimental (FEX), floresta arborizada sazonalmente na Baía das Pedras (BPE) e a floresta ripícola de <i>Vochysia divergens</i> (CAM) no Pantanal.	36
Figura 9: Fluxograma das etapas de processamento para obtenção e análise dos dados de NDVI e precipitação.	40
Figura 10: Cálculo dos parâmetros de fenológicos: (a) início da temporada, (b) final da temporada, (c) 20% à esquerda e 20% à direita, (d) 80% à esquerda e 80% à direita	

(e) pico, (f) amplitude, (g) duração da estação e (h) mínimos a esquerda e a direita. Adaptado de Mountford, G. L., et al.2017. 42

Figura 11: Método para o cálculo de NDVI médio dos pixels na horizontal, ao longo dos pixels na vertical. 43

Figura 12: a) Média e b) desvio padrão das imagens (mosaicos das imagens dos quadrantes 071 e 072) de índice de vegetação (NDVI) calculadas para o período de 2007 a 2017, na região sul Mato-grossense. 50

Figura 13: Média do NDVI (linha cor preta, Resolução espacial 0,0027° ao longo da latitude) e desvio padrão (cor cinza) e precipitação acumulada anual (Resolução espacial 0,25° ao longo da latitude) por latitude, compreendida entre as longitudes 54° e 57°. 52

Figura 14: Série espacial de precipitação acumulada anual e média do NDVI ao longo das latitudes, compreendida entre as longitudes 54° e 57°, selecionadas para o período chuvoso. a) Precipitação acumulada anual (Resolução espacial 0,25° ao longo da latitude) e Média do NDVI (linha cor preta, Resolução espacial 0,0027° ao longo da latitude) por latitude. O eixo x representa as latitudes analisadas e linhas em cores representando cada ano no período de 1994 a 2017. 55

Figura 15: Série espacial de precipitação acumulada anual e média do NDVI ao longo das latitudes, compreendida entre as longitudes 54° e 57°, selecionados para o período seco. a) Precipitação acumulada anual (Resolução espacial 0,25° ao longo da latitude) e Média do NDVI (linha cor preta, Resolução espacial 0,0027° ao longo da latitude) por latitude. O eixo x representa as latitudes analisadas e linhas em cores representando cada ano no período de 1994 a 2017. 57

Figura 16: Média anual (cor cinza) e média do período (linha cor preta) e desvio padrão do NDVI (1994-2017) Para os locais de estudo: a) Baía das pedras (BPE), b) Cambarazal (CAM), c) Fazenda Experimental (FEX) e d) Fazenda Miranda (FMI), na região transição Cerrado-Pantanal sul Mato-Grossense. 60

Figura 17: Variabilidade mensal do NDVI analisados nos gráficos de caixa (dados de NDVI de 1994-2017) com a mediana como marca central (em Preto) e quartis inferior

de 25% e superior de 75% (caixa cinza). Baia das pedras (BPE), Cambarazal (CAM), Fazenda Experimental (FEX) e Fazenda Miranda (FMI), na região sul Mato-grossense.

..... 63

Figura 18: Perfil fenológico da vegetação representada pelas series dos índices de vegetação de diferença normalizada (NDVI), em quatro áreas de estudo: a) Baia das pedras (BPE), b) Cambarazal (CAM), c) Fazenda Experimental (FEX) e d) Fazenda Miranda (FMI). O eixo x representa a data em dia do ano (DJ). O período considerado nas análises se estendeu de 1994 a 2017 (linhas em cores representando cada ano e linha em preto a média)..... 66

Figura 19: Gráficos de caixa (dados de NDVI de 1994-2017) dos parâmetros a) Taxa de *Greenup* (TG) e b) taxa de senescência (TS), com a mediana como marca central (em Preto) e quartis inferior de 25% e superior de 75% (caixa cinza), dos parâmetros taxa de aumento e decréscimo dos locais Baia das pedras (BPE), Cambarazal (CAM), Fazenda Experimental (EXP) e Fazenda Miranda (MIR)...... 68

Figura 20: Distribuição espacial da variabilidade anual para a média mensal do NDVI na região sul Mato-grossense (2007-2017)...... 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do sensor do Landsat 5. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 2: Características do sensor do Landsat 8. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 3: Datas das imagens utilizadas na análise são referentes a passagem dos satélites Landsat 5 e 8 para cada ano entre 1994 a 2017 satélite Landsat 5 e 8 sensores TM, OLI e TIRS respectivamente, em dia Juliano (DJ), utilizadas no período de estudo 1994 a 2017 (análise temporal) e espacial (2007 a 2017) da vegetação para a região de transição Cerrado-Pantanal em Mato Grosso, Brasil. 38

Tabela 4: Índices de Correlação Spearman (ρ), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE), Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático Normalizado Pela Média dos Valores Observados (NRMSE), Erro Relativo (Errv), Probabilidade de Detecção (POD), Falso Alarme (FAR) E Índice de Sucesso (CSI) na Validação do Produto 3B43 com os dados da estação do INMET (OMM: 83364) de 2007 a 2017. Os asteriscos indicam o nível de significância dos coeficientes: (*) p-valor $\leq 0,001$ 46

Tabela 5: Índices de Correlação Spearman (ρ), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE), Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático Normalizado Pela Média dos Valores Observados (NRMSE), Erro Relativo (Errv), Probabilidade de Detecção (POD), Falso Alarme (FAR) E Índice de Sucesso (CSI) na Validação do Produto 3B43 com os dados da estação pluviométrica do ANA (Cod: 1757001) de 2007 a 2017. Os asteriscos indicam o nível de significância dos coeficientes: (*) p-valor $\leq 0,001$ 47

Tabela 6: Estimativas para métricas da série temporal média de NDVI (1994-2017), em quatro áreas de estudo: a) Baía das pedras (BPE), b) Cambarazal (CAM), c) Fazenda Experimental (FEX) e d) Fazenda Miranda (FMI). *Greenup*, início é o começo da estação de crescimento, Ampl. É a amplitude, Dorm. São os meses do valor mínimo de NDVI, Mat. São os meses do valor máximo de NDVI, Comp. é a duração da estação (meses), TG. é a taxa de aumento do verde (taxa de *greenup*), TS. é a taxa de decréscimo (taxa de senescência). Entre parênteses a quinzena (primeira ou segunda no mês). 67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

Ampl	Amplitude de NDVI
BPE	Área de estudo (Baía das Pedras)
CAM	Área de estudo (Cambarazal)
Comp	Comprimento da estação
DJ	Dia juliano
Dorm	Dormência
ESPA	<i>Center Science Processing Architecture</i>
FEX	Área de estudo (Fazenda Experimental)
FMI	Área de estudo (Fazenda Miranda)
LANDSAT	Satélite americano para observação da Terra
LSP	<i>Land Surface Phenology</i>
Mat	Maturidade
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
OLI	<i>Operational Land Imager</i>
PPT	Precipitação Acumulada Anual
RPPN	Reserva Particular do Patrimônio Natural
TG	Taxa de <i>Greenup</i>
TIRS	<i>Thermal Infrared Sensor</i>
TM	<i>Thematic Mapper</i>
TRMM	<i>Tropical Rainfall Measuring Mission</i>
TS	Taxa de Senescência
UFMT	Universidade Federal de Mato Grosso
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VI	Índice de vegetação
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ρ_4	Refletividade no infravermelho próximo
ρ_5	Refletividade no vermelho

1. RESUMO

MORAES, T. J. **Variabilidade espaço-temporal da fenologia da vegetação na transição do Cerrado e Pantanal Mato-grossense**. Cuiabá, 2019, 89f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

O uso racional e a conservação dos recursos naturais dependem de um monitoramento, caracterização e compreensão da dinâmica fenológica de vegetação. Com observações de satélite frequentes e de longo prazo, é possível monitorar as mudanças e características da fenologia da superfície. Sendo assim, o objetivo desse trabalho é contribuir para a compreensão da variabilidade fenológica da vegetação e sua relação com a sazonalidade das chuvas nas regiões de transição do Pantanal e Cerrado Mato-grossense ao longo das latitudes -15° a -18° . Foram utilizadas imagens do satélite Landsat e dados do radar meteorológico TRMM, usados na obtenção de séries temporais de precipitação e o índice de vegetação NDVI. Os dados de Precipitação foram obtidos na plataforma Giovanni da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), de estações meteorológicas das redes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e da Agência Nacional de Águas (ANA) e o índice de vegetação NDVI foi coletado de dados dos satélites Landsat 05 e 08 foi obtido do Serviço Geológico Norte Americano (USGS). Os resultados revelaram menor intensidade de precipitação nas latitudes que compreendem o Pantanal e maior variabilidade na dinâmica da fenologia da vegetação do Cerrado. Além disso, os padrões fenológicos variaram de acordo com as características de cada região, com as mudanças de uso e ocupação da superfície. Por último, as tendências observadas pelos parâmetros fenológicos diferiram ao longo da transição Cerrado e Pantanal. Além disso, a chuva aparenta possuir maior influência na variabilidade fenológica em áreas de vegetação nativa e terras agrícolas nas regiões do Cerrado em comparação ao Pantanal. Com os resultados desta pesquisa foi possível caracterizar espacialmente e temporalmente a variabilidade da fenologia da vegetação da transição entre o Cerrado e Pantanal, através dos mapas e gráficos, que podem fornecer uma representação da fenologia da superfície podendo servir como uma alternativa para preencher outras lacunas de pesquisa da região.

Palavras-chave: Fenologia da superfície, NDVI, precipitação, Variabilidade espacial.

2. ABSTRACT

MORAES, T. J. **Spatio-temporal variability of vegetation phenology in the transition from Cerrado and Pantanal Mato-grossense**. Cuiabá, 2019, 89f, Thesis (Doctorate of Environmental Physics) - Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso.

Rational use and conservation of natural resources depend on monitoring, characterization and understanding of the phenological dynamics of vegetation. With frequent and long-term satellite observations, it is possible to monitor changes and characteristics of surface phenology. Thus, the objective of this work is to contribute to the understanding of the phenological variability of the vegetation and its relationship with rainfall seasonality in the transition regions of Pantanal and Cerrado Mato-grossense along latitudes -15° to -18° . Landsat satellite images and TRMM weather radar data were used to obtain precipitation time series and the NDVI vegetation index. Precipitation data were obtained from the National Aeronautics and Space Administration (NASA) Giovanni platform, from the National Meteorological Institute (INMET) and the National Water Agency (ANA) network weather stations and the NDVI vegetation index was collected from Landsat 05 and 08 satellite data were obtained from the US Geological Survey (USGS). The results revealed lower precipitation intensity in the latitudes that comprise the Pantanal and greater variability in the dynamics of the Cerrado vegetation phenology. In addition, phenological patterns varied according to the characteristics of each region, with changes in surface use and occupation. Finally, the trends observed by phenological parameters differed throughout the Cerrado and Pantanal transition. In addition, rainfall appears to have a greater influence on phenological variability in native vegetation areas and agricultural lands in the Cerrado than in the Pantanal. With the results of this research it was possible to characterize spatially and temporally the variability of the vegetation phenology of the transition between the Cerrado and Pantanal, through the maps and graphs, which can provide a representation of the surface phenology and can serve as an alternative to fill other gaps of vegetation region research.

Keywords: Surface phenology, NDVI, precipitation, Spatial variability..

1. INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA

A fenologia da vegetação é importante porque é um indicador sensível das mudanças climáticas e regula os fluxos de carbono, energia e água entre a superfície e a atmosfera. O Brasil tem cerca de 68% de cobertura florestal, contribuindo, portanto, significativamente para o orçamento global de carbono, e é considerada como potencialmente vulnerável aos impactos das mudanças climáticas. Apesar disso, muito pouco se sabe sobre a fenologia e os fatores que regulam o crescimento e a dinâmica da vegetação dos biomas em todo o país.

Na perspectiva da importância dos bens e serviços ecossistêmicos essenciais, como alimentos, polinizadores, armazenamento de carbono e água, fornecidos pelos biomas como o Cerrado, que é a segunda maior ecorregião do Brasil, com cerca de 2 milhões de km² ou pelo Pantanal caracterizado por ser a maior área alagável do planeta, faz com que a compreensão da dinâmica fenologia da vegetação seja um fator importante.

Os padrões climáticos das regiões Mato-grossenses exibem uma forte variabilidade espaço-temporal, com frequentes eventos extremos, como inundações e secas, que tem um impacto significativo sobre a fenologia nessa região. Além disso, as paisagens são mosaicos de pequenas manchas de diferentes usos e coberturas da superfície, o que representa desafios para a compreensão da fenologia em escala regional. Os ecossistemas do Cerrado e Pantanal são altamente dependentes da chuva para desenvolver o aparecimento de folhas verdes e controlar a duração do crescimento da vegetação. Por fim, a prática de manejo da terra, como a agricultura e pastagem, apresenta uma heterogeneidade espacial que resulta em padrões complexos de fenologia. As regiões de Mato Grosso passaram por mudanças muito rápidas no uso e ocupação do solo, devido ao desenvolvimento econômico, tornando ainda mais desafiador compreender as dinâmicas fenológicas.

Existem inúmeras incertezas com relação a variabilidade e aos mecanismos regulatórios da fenologia tanto de plantas individuais, como à fenologia a nível do

ecossistema. As dificuldades para compreensão são ainda maiores, considerando a complexidade dos padrões fenológicos das plantas que podem ser por vezes irregulares, com ciclos de vida plurianuais e impulsionadas por uma combinação de fatores abióticos como os climáticos (Precipitação, temperatura, radiação solar e etc...).

Conforme os estudos sobre a fenologia da vegetação em todo o mundo, como relatado pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), há um maior conhecimento da fenologia, e dos seus possíveis impactos causados pelas mudanças climáticas na vegetação, na Europa, Ásia, Australásia e América do Norte. No entanto, essa mesma confiança na compreensão dos impactos das alterações climáticas na fenologia da vegetação não pode ser atribuída às regiões do Brasil ou mesmo de toda América do Sul.

Alguns estudos baseados na fenologia da vegetação do Cerrado e Pantanal foram realizados, sobretudo utilizando observações *in loco*, e forneceram informações fenológicas úteis ao nível da espécie. No entanto, esses estudos em geral concentram-se em poucos indivíduos em áreas geográficas restritas, o que muitas vezes limita sua aplicabilidade a escalas espaço-temporais maiores.

Entre outras substanciais lacunas de pesquisa estão: a avaliação do efeito da variabilidade natural do clima nos ecossistemas, o monitoramento de longo prazo para avaliação de mudanças do ciclo da vegetação e os impactos das mudanças climáticas na fenologia da vegetação. Portanto, mais estudos de maior abrangência são indispensáveis para o melhor entendimento, por exemplo, da relação complexa entre os regimes de chuva e a dinâmica da vegetação da transição Cerrado-Pantanal.

Alguns estudos que avaliaram a vegetação por sensoriamento remoto focaram somente em abordagens metodológicas na estimativa, mapeamento, classificação e caracterização da cobertura vegetal. Entretanto, poucas pesquisas contribuíram para uma maior compreensão da fenologia da vegetação e seus forçantes, especialmente nas regiões da transição Cerrado e Pantanal.

Nos estudos de monitoramento da fenologia da superfície terrestre (*land surface phenology* - LSP), as variáveis biofísicas e parâmetros fenológicos são geralmente obtidos por sensoriamento remoto a partir do cálculo dos índices de

vegetação (IVs). Estes índices são geralmente estimados a partir de uma combinação aritmética de diferentes valores de refletância espectral, principalmente na região vermelha (R) e próxima do infravermelho (NIR) do espectro eletromagnético. O NDVI foi o IV mais utilizado mundialmente para estudos de vegetação (cerca de 90% dos estudos de longo prazo de 20 a 30 anos), mas a minoria das observações por satélite avaliou a fenologia da vegetação na escala regional ou continental, além disso, usando conjuntos de dados de baixa resolução espacial.

Assim, a falta de monitoramento da LSP com melhor resolução espacial para a região de transição Cerrado-Pantanal impossibilita: uma caracterização mais precisa da fenologia da vegetação; uma descrição detalhada das tendências fenológicas, especialmente em escalas locais ou regionais; um conhecimento mais amplo da variabilidade interanual do LSP e outros fatores ambientais. Portanto, existe um limitado conhecimento das propriedades fenológicas da vegetação de Mato Grosso, como o tempo e a taxa de crescimento, a amplitude e a duração do crescimento da vegetação, e o tempo e a taxa de senescência da vegetação que podem ser usados como indicadores emergentes de mudanças ambientais globais ou em regiões com poucos estudos sobre a vegetação.

1.2 JUSTIFICATIVA

O conhecimento da fenologia vegetal pode contribuir para a compreensão dos gatilhos que regulam e controlam os ciclos de diferentes espécies, populações e comunidades de plantas. Sendo possível também, auxiliar na avaliação e minimizar os efeitos da mudança do uso do solo nas interações ecológicas, incluindo a fragmentações das vegetações. Portanto, a utilização de novos recursos para o monitoramento da LSP, possibilita importantes avanços na compreensão da variabilidade espacial e temporal da vegetação, em muitas regiões, antes praticamente inacessíveis.

Além disso, o desenvolvimento de estudos de monitoramento do LSP em regiões ainda pouco estudadas pode facilitar a caracterização dos parâmetros fenológicos da vegetação, o entendimento do papel da fenologia da vegetação nos mecanismos de *feedback* vegetação-clima e a relação entre mudanças climáticas e

mudanças fenológicas da vegetação. Abordar estas questões poderá auxiliar na maior compreensão do papel da vegetação do Cerrado e Pantanal no ciclo global do carbono e no sistema climático, contribuindo em última análise para as atuais estratégias de adaptação e mitigação das mudanças climáticas.

Os dados dos sensores abordo do Landsat podem ser utilizados para descrever o LSP dos principais tipos de vegetação na transição do Cerrado e Pantanal. Com décadas de imagens do Landsat, é possível quantificar as mudanças fenológicas através do tempo e do espaço, permitindo assim o monitoramento em escalas local, regional e global.

A determinação de eventos fenológicos a partir de séries temporais de índices de vegetação, tal como o NDVI, pode ser determinada por um valor limiar do índice, no qual um evento fenológico é assumido (por exemplo a senescência ou dormência das plantas) quando o NDVI atinge um limiar pré-estabelecido na primeira vez. Dessa forma algumas métricas fenológicas importantes da vegetação podem ser estimadas, como a duração do período da LSP, a "verdura" (*greenness*) mínimo e máximo. Com tais métricas, pode-se avaliar algumas características fenológicas com as propriedades distintivas da vegetação (mistura relativa das vegetações arbóreas, arbustivas e gramíneas) ou do solo de cada região, que por sua vez, podem ser usadas para o melhor conhecimento sobre a dinâmica da vegetação dos ecossistemas de Cerrado e Pantanal.

Acredita-se que algumas propriedades das vegetações e do solo atuam para que características fenológicas de alguns tipos de vegetação, sejam mais dinâmicas em resposta à precipitação, como a mistura relativa de árvores e gramíneas desempenha um papel primordial desta dinâmica. Por exemplo, com sistemas radiculares densos e rasos, as pastagens (gramíneas) do Cerrado fazem uso de água momentaneamente disponível na camada superior do solo, enquanto as áreas arbustivas do Pantanal, que possuem sistemas radiculares que penetram nas camadas superficiais e profundas do solo, têm um suprimento mais contínuo de água no solo. Em relação às vegetações arbóreas, as gramíneas exibem uma maior expansão da biomassa em resposta às chuvas nos ecossistemas das savanas. Para melhor compreensão da fenologia dessas vegetações e sua resposta às mudanças climáticas, os fatores abióticos e bióticos

devem ser diferenciados e acrescentados ao desenvolvimento de novos estudos e modelos.

A resolução espacial (30 m) do sensor abordo do satélite Landsat 5 e 8, é potencialmente eficiente para obter informações detalhadas para análise e mapeamento dos gradientes complexos de vegetação. Dessa forma, com melhor resolução radiométrica e espacial, maior será a acurácia para obter informações dos parâmetros fenológicos durante as principais fases da estação de crescimento.

1.3 OBJETIVO GERAL

Com o propósito de melhorar a compreensão regional das características fenológicas da vegetação, o objetivo geral deste trabalho é caracterizar a variabilidade espaço-temporal da dinâmica fenológica da vegetação na transição Cerrado-Pantanal.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Constituíram os seguintes objetivos específicos:

- i) avaliar se parâmetros fenológicos podem ser obtidos de dados de monitoramento por sensoriamento remoto a uma resolução espacial de 30 m
- ii) identificar quais diferenças fenológicas entre a vegetação em locais da região de Cerrado e Pantanal podem ser reveladas com base nesses parâmetros
- (iii) identificar o período de transição das fases do ciclo anual de fenologia da vegetação a partir da série temporal de índice de vegetação (NDVI).
- (iv) avaliar o perfil da variabilidade espaço temporal do índice de vegetação (NDVI médio) e da precipitação ao longo das latitudes que compreendem a transição da vegetação Cerrado-Pantanal.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 VEGETAÇÃO DO CERRADO

A savana brasileira conhecido como Cerrado ocupa a região central do Brasil, é composta por diferentes tipos de vegetação, isto é, a paisagem do Cerrado é um mosaico de vegetações, variando de pradarias a florestas, correspondendo a um gradiente de cobertura lenhosa (EITEN, 1972; CASTRO & KAUFFMAN, 1998; DE MIRANDA, S. D. C. et al., 2014). O Cerrado possui elevada complexidade ecológica (figura 1), em parte devido à sua grande extensão geográfica (FURLEY, 1999) e adjacência a outros biomas tropicais, como a Floresta Amazônica, a Mata Atlântica, a Caatinga (floresta sazonalmente seca) e áreas húmidas, o Pantanal. (FELFILI & SILVA JÚNIOR, 2005; DE MIRANDA, S. D. C et al., 2014).

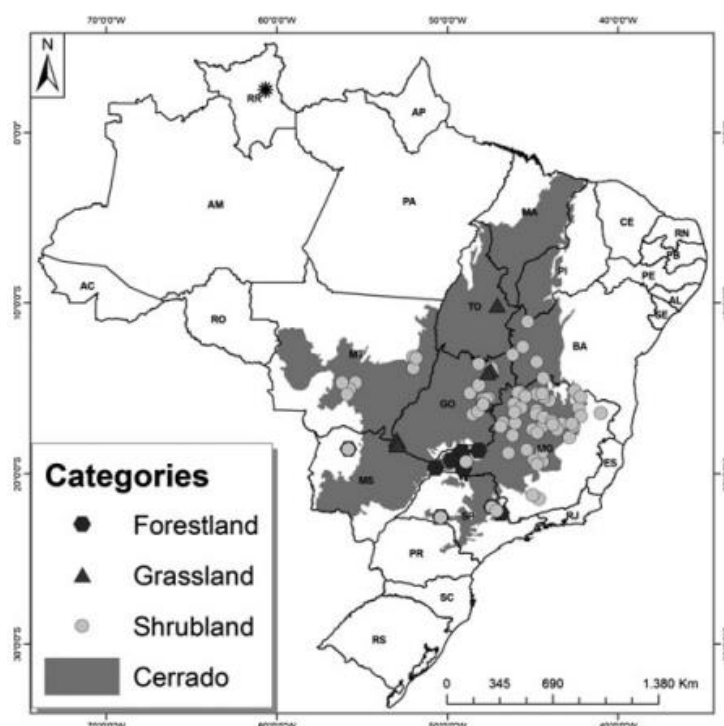


Figura 1: Os limites oficiais do bioma Cerrado (em cinza). Os pontos representam diferentes fisionomias do Cerrado (floresta, pastagem e arbustiva). O símbolo * indica sites de savanas na Amazônia. Adaptado de: DE MIRANDA, S. D. C et al., 2014.

Em Mato Grosso de um total de 906806,9 km², cerca de 39% (353654,7 km²) são ocupadas por vegetação de Cerrado (figura 2), sendo este o terceiro maior estado do Brasil em cobertura florestal de Cerrado remanescente e de estoques de carbono (SILVA, J. F. et al., 2006). No entanto, entre 2001 e 2012, de acordo com o conjunto

de dados do Global Forest Cover (GFC), mais de 83.000 km² de floresta foram perdidos em Mato Grosso (RICHARDS & LEAH VANWEY, 2015). Onde uma das principais causas da perda de floresta, é a conversão para a agricultura, nas regiões sul e de 38%, sudeste 23% e 45% no centro-sul, das terras foram convertidas em pastagens e plantações (RICHARDS & LEAH VANWEY, 2015).

A classificação das fisionomias baseia-se principalmente na altura e densidade da vegetação (figura 2). Em um gradiente de fisionomias do cerrado, como campos limpos, campos sujos, cerrados com algumas árvores, cerrado sensu stricto, cerrado denso (floresta com arbustos densos e árvores), cerradão (floresta densa com árvores altas) e mata de galeia (mata ciliar com vegetação densa e árvores altas ao longo dos rios e corpos de água) (RIBEIRO & WALTER, 2008).

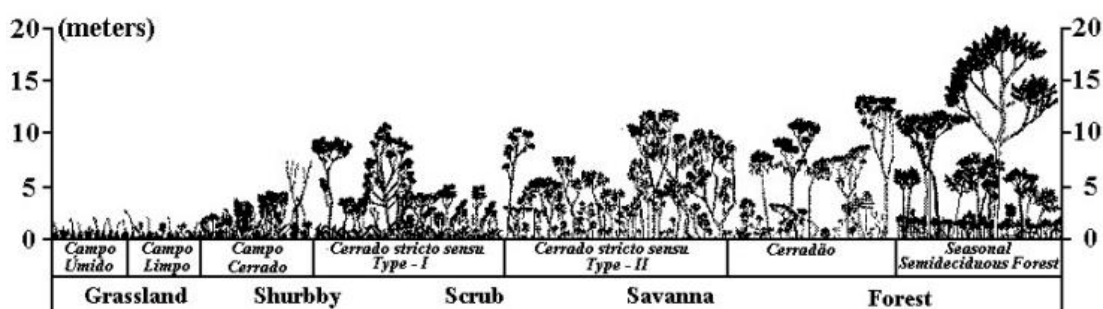


Figura 2 Descrição das fisionomias do Cerrado em gradientes de altura (adaptado de MESQUITA JUNIOR (2000)).

Na figura 2 está representada as características da vegetação de cada um dos tipos fisionômicos da vegetação. No campo limpo encontramos uma predominância de herbáceas, com raras ocorrências de arbustos e ausência de árvores e pode ser encontrado em diversas posições topográficas, com diferentes graus de umidade, profundidade e fertilidade do solo e conhecido também como “Campo de Várzea”, “Várzea” ou “Brejo” (figura 2).

O Campo sujo tem uma estrutura composta exclusivamente por vegetações herbáceas arbustivas, com arbustos esparsos e subarbustos. Formado também pelos tipos menos desenvolvidos do Cerrado Stricto Sensu. A vegetação lenhosa apresenta altura média de 2 m e cobertura na faixa de 5%. Esta fisionomia pode ocorrer em solos rasos, como cambissolos ou plintossolos pétricos, eventualmente com pequenos

afloramentos rochosos de pouca extensão, ou ainda em solos profundos e de pouca fertilidade (RIBEIRO & WALTER, 2008).

O campo Cerrado é a formação campestre composta principalmente de espécies herbáceas, algumas arbustivas e um subtipo da vegetação arbórea-arbustiva, com cobertura na faixa de 2 a 20% e altura média de 2 a 3 m. Está vegetação pode encontrada em solos rasos, com presença de afloramentos rochosos (MESQUITA JUNIOR, 2000).

2.2 VEGETAÇÃO DO PANTANAL

O Pantanal é a maior área sazonalmente inundada da América do Sul e um dos maiores sistemas de zonas úmidas do mundo (JUNK, WOLFGANG J. et al., 2014). As áreas úmidas do Pantanal estão situadas no centro da América do Sul, principalmente no Brasil, com aproximadamente 10% chegando à Bolívia e ao Paraguai (EVANS, T. et al., 2013).

A planície do Pantanal está situada em uma grande depressão de origem pós-cretáceo (JUNK, WOLFGANG J., et al 2011), e consiste de uma bacia sedimentar composta por um mosaico de leques aluviais de origem pleistocênica (ALHO, 2008; CORRADINI e ASSINE, 2012). Este rico complexo hidrológico, é formado por vários grandes afluentes do rio Paraguai, com baixa variação topográfica que resulta em uma inundação de lenta liberação de água da bacia de drenagem das planícies mais altas, que corre ao norte e ao sul ao longo da fronteira oeste (HAMILTON, 2002; EVANS, T. et al., 2013)

A região é composta por um mosaico de distintos tipos de habitats, intensamente dependentes dos pulsos de inundação. No entanto, o Pantanal brasileiro não é homogêneo, apesar de toda a planície tenha uma gênese regional comum, sua fisionomia vegetacional exibe características distintas em várias sub-regiões (figura 3), subdivididas de acordo com características naturais intrínsecas, como vegetação, inundação e sedimentação (MIOTO et al., 2012). Considerando apenas a flora da planície pantaneira, existe quase 2.000 espécies (FERREIRA-JUNIOR, W. G. et al., 2016) com uma proeminência de espécies herbáceas, em torno de 1.000, devido à sua adaptação a áreas alagáveis (POTT et al., 2011).

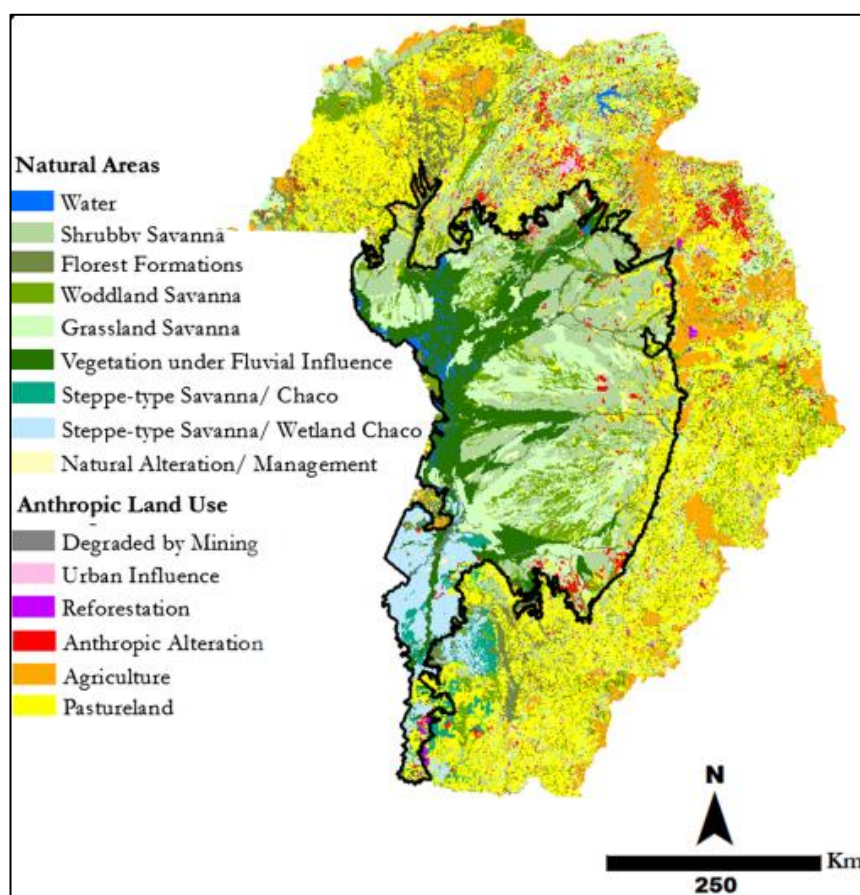


Figura 3: vegetação natural e mapa de uso da terra para a Bacia do Alto Paraguai (adaptado de *Conservation International* 2009).

Área de pantanal em Mato Grosso é de 63,476.5 km² (aproximadamente 7%), esta áreas é basicamente uma paisagem de savana (cerrado), tomando emprestado do bioma do cerrado para o leste, em larga escala, as unidades de paisagem no Pantanal são caracterizadas por floresta, savana e terreno frequente ou permanentemente aquático ou pantanoso (figura 3), embora nem sempre haja um limite definitivo entre essas três paisagens, e algumas classes de floresta e savana também periodicamente inundam (EVANS, T. et al., 2013).

2.3 SATÉLITE LANDSAT

O empenho para a observação da dinâmica da vegetação por sensoriamento remoto utilizando as propriedades eletromagnéticas das ondas emitidas, refletidas ou difracionadas pelos objetos (LIU, W. T. H, 2015), iniciou-se na era Landsat (HENEERY, G. M. & DE BEURS, K. M., 2013). Para esse fim, a NASA lançou o primeiro satélite civil de observação da Terra em 23 de julho de 1972, chamado de

ERTS-1, que mais tarde foi renomeado como Landsat 1. Os demais lançamentos do Landsat 2, Landsat 3 e Landsat 4 ocorreram em 1975, 1978 e 1982, respectivamente. Posteriormente, o Landsat 5 lançado em 1984, foi o satélite com o maior tempo de fornecimento dados globais de alta qualidade das superfícies terrestres, que durou 28 anos e 10 meses, o Landsat 8 lançado em 2013, continua a adquirir dados (LANDSAT, 2013).

Em seguida, o Landsat 9 está sendo desenvolvido para uma data de lançamento em dezembro de 2020.). A figura 4 mostra um resumo da série histórica do programa, incluindo as datas de lançamentos e os sensores presentes em cada um deles, sendo o primeiro satélite lançado em 1972 (JENNER, 2017; LANDSAT, 2018).

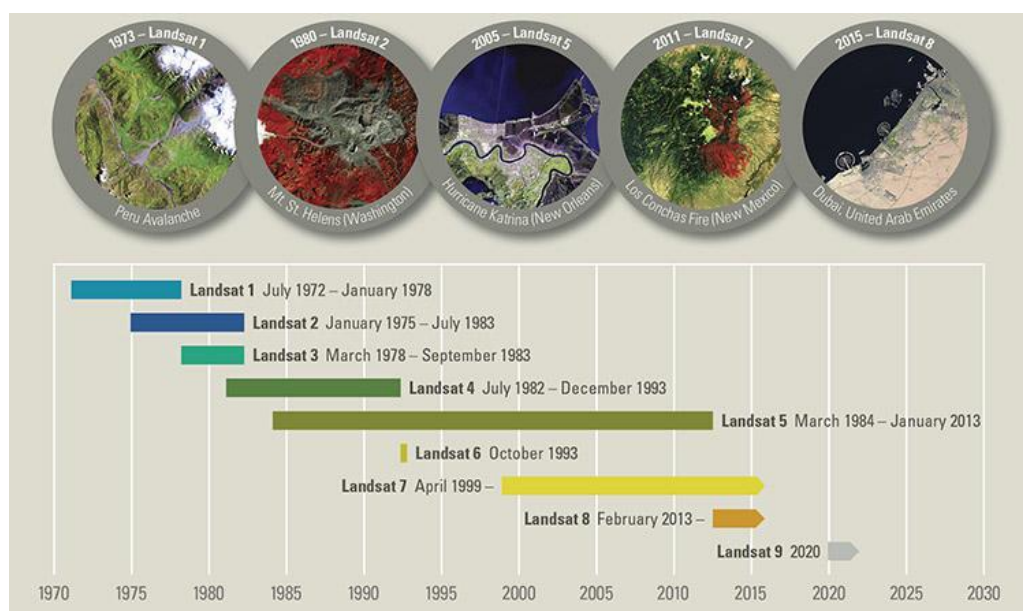


Figura 4: Lançamento e tempo de aquisição de dados dos Landsat.

O sensor *Thematic Mapper* (TM), esteve a bordo dos satélites Landsat 4 e Landsat 5, e as imagens constituem em seis bandas espectrais com uma resolução espacial de 30 metros para as bandas 1 a 5 e 7 (tabela 1), e uma banda térmica (banda 6) e o tamanho aproximado da cena é de 170 km ao norte-sul por 183 km leste-oeste. (KRAMER, H. J. 2002; MASEK, 2019).

Landsat 4-5	Bandas	Comprimento de onda (micrômetros)	Resolução (metros)
<i>Mapeador Temático</i> (TM)	Banda 1 - Azul	0,45-0,52	30
	Banda 2 - Verde	0,52-0,60	30

Banda 3 - Vermelho	0,63-0,69	30
Banda 4 - Infravermelho Próximo (NIR)	0,76-0,90	30
Banda 5 - Infravermelho de ondas curtas (SWIR) 1	1,55-1,75	30
Banda 6 - térmica	10,40-12,50	120 * (30)
Banda 7 - Infravermelho de ondas curtas (SWIR) 2	2,08-2,35	30

*A banda 6 foi adquirido a uma resolução de 120 metros, mas os produtos são reamostrados para pixels de 30 metros.

Os sensores *Operational Land Imager* (OLI) e Infravermelho Térmico (TIRS), embarcados no satélite Landsat 8, possuem nove bandas espectrais com uma resolução espacial de 30 metros para as Bandas 1 a 7 e 9 (tabela 2). A Banda 1 azul é útil para estudos costeiros e de aerossóis. A banda 9 é útil para a detecção de nuvens cirrus. A resolução da Banda 8 (pancromática) é de 15 metros. As bandas térmicas 10 e 11 são úteis para fornecer temperaturas de superfície mais precisas e são coletadas a 100 metros. O tamanho aproximado da cena é de 170 km ao norte-sul por 183 km leste-oeste (LANDSAT, 2013; GARNER, 2017).

Landsat 8	Bandas	Comprimento de onda (micrômetros)	Resolução (metros)
Sensor de			
Terra Operacional (OLI)	Banda 1 - Ultra Azul (costeira / aerossol)	0,435 - 0,451	30
e Sensor Infravermelho Térmico (TIRS)	Banda 2 - Azul	0,452 - 0,512	30
	Banda 3 - Verde	0,533 - 0,590	30
	Banda 4 - Vermelho	0,636 - 0,673	30
	Banda 5 - Infravermelho Próximo (NIR)	0,851 - 0,879	30
	Banda 6 - Infravermelho de ondas curtas (SWIR) 1	1,566 - 1,651	30
	Banda 7 - Infravermelho de ondas curtas (SWIR) 2	2,107 - 2,294	30
	Banda 8 - Pancromática	0,503 - 0,676	15
	Banda 9 - Cirrus	1,363 - 1,384	30
	Banda 10 - Infravermelho Térmico (TIRS) 1	10,60 - 11,19	100 * (30)
	Banda 11 - Infravermelho Térmico (TIRS) 2	11,50 - 12,51	100 * (30)

Uma das principais aplicações das imagens do Landsat em estudos ambientais, é o cálculo de índices de vegetação, sendo o índice mais conhecido a divisão de bandas visando o realce das variações de densidade da cobertura vegetal, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) que é amplamente utilizado na determinação e avaliação de diversos parâmetros biofísicos (figura 5), como cobertura

vegetal, biomassa, fração da radiação fotossinteticamente ativa (HUETE et al., 2002) e variações fenológicas (MIRANDA, C. S. et al., 2018).

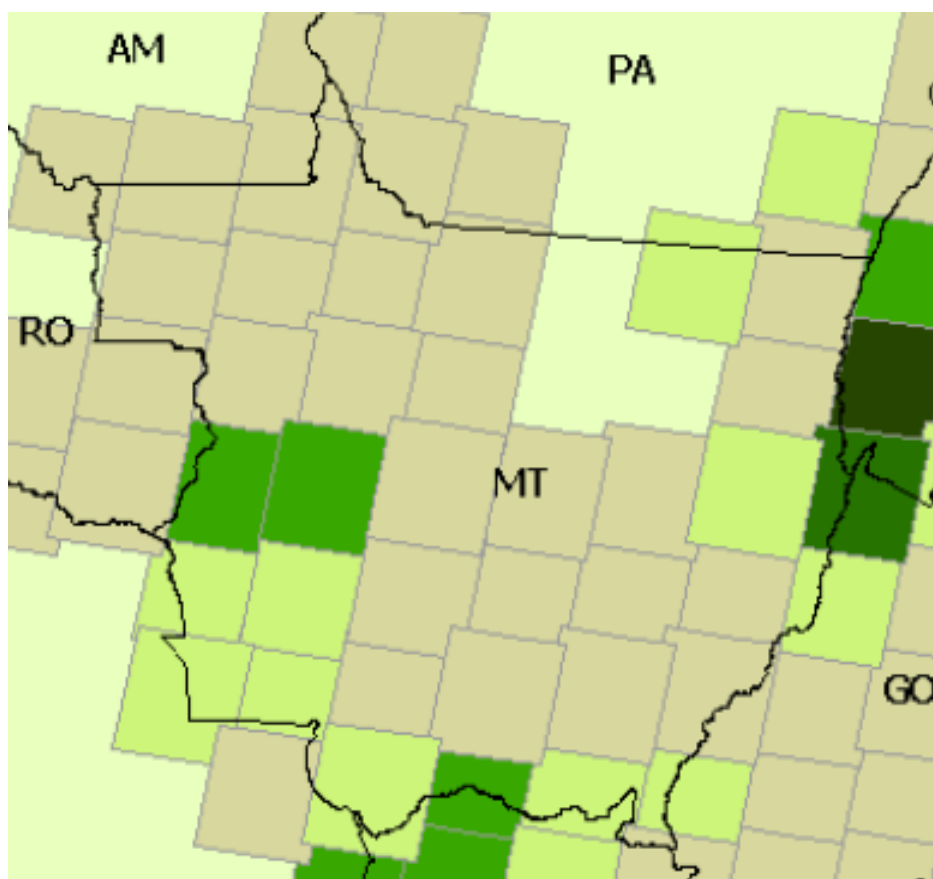


Figura 5: Estimativa das variações na porcentagem e cobertura vegetal nativa do Cerrado e Pantanal no estado de Mato Grosso, Cada região representada pelas cenas do satélite LandSat. Adaptado de Machado, R. B. (2016) apud Mantovani & Pereira (1998).

Uma maneira complementar de monitoramento da vegetação é a observação (figura 5) de mudanças na fenologia da planta podem ser detectadas em grandes escalas espaciais através dos índices de vegetação (YANG et al., 2017). Através das imagens do Landsat é possível obter um mapeamento de informações fenológicas da vegetação (figura 5) por longos períodos de tempo com resolução espacial apropriada média e grande escala. (SCHWIEDER. M. et al., 2016).

2.4 A MISSÃO TRMM

O TRMM foi um satélite de pesquisa projetado para melhorar a compreensão da distribuição e variabilidade da precipitação nos trópicos como parte do ciclo hídrico terrestre no atual sistema climático (MISSION, 2016). O lançamento do satélite TRMM em um foguete H-II do centro espacial Tanegashima no dia 27 de novembro de 1997, foi uma missão conjunta da Administração Nacional Aeronáutica e Espacial (*National Aeronautics and Space Administration*) em parceria com a Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA - *Japan Aerospace Exploration Agency*), com a finalidade de medir a precipitação nos trópicos e fornecer dados para a previsão de Ciclones, previsões atmosféricas em tempo real e análise de mudanças climatológicas (MISSION, 2016).

O satélite TRMM possuía uma órbita circular, com inclinação de 35° em relação a linha do equador e de altitude de 400 km. Os instrumentos utilizados para detecção da chuva (figura 6) são: 1) o Radar de precipitação (*Precipitation Radar - PR*), foi o primeiro do tipo no espaço e é um instrumento de varredura eletrônica desenvolvido para mapear a estrutura de tempestades em três dimensões; 2) o imageador de microondas (*Microwave Imager - TMI*), é um radiômetro de micro-ondas passivo multicanal, desenvolvido para prover informação quantitativa de chuva, como o conteúdo de precipitação da coluna vertical integrada, o conteúdo de água na nuvem, a intensidade de chuva e os tipos de precipitação (extratiforme ou convectiva); 3) o radiômetro de varredura (*Visible and Infrared Scanner - VIRS*), é um instrumento que captura a radiação advinda da Terra em cinco regiões espectrais, do visível ao infravermelho próximo, que fornece dados sobre a cobertura de nuvens, tipos de nuvens e as temperaturas de nuvens; 4) o sistema de energia radiante de nuvens e da Terra (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System - CERES*), é um instrumento que mede a energia do topo da atmosfera, estima os níveis de energia no interior da atmosfera e na superfície terrestre, o CERES determina também as propriedades das nuvens como a quantidade de nuvens, a altitude, a espessura e o tamanho das partículas da nuvem; 5) sensor imageador de raios (*Lightning Imaging Sensor - LIS*), que detecta e localiza raios em regiões tropicais do planeta (ADLER. R.F & IDA. M. H, 1991; INSTRUMENTS, 2016).

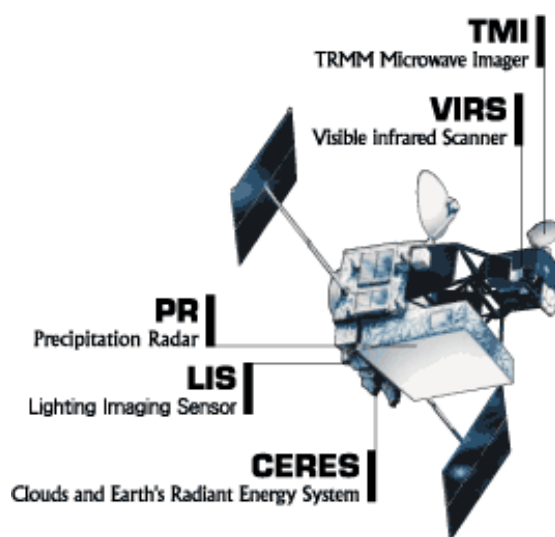


Figura 6: Sensores do satélite TRMM

A missão TRMM foi finalizada oficialmente em 2015, após o veículo espacial esgotar as suas reservas de combustível e realizar a reentrada na atmosfera sobre o Oceano Índico. O satélite forneceu dados por 17 anos e diversos produtos (estimativas) são gerados pela combinação de instrumentos usada no algoritmo de cálculo pelo projeto TRMM, atualmente a missão global de medição de precipitação GPM (*Global Precipitation Measurement*) realizam o monitoramento da precipitação por uma rede internacional de satélites. (TRMM, 2016).

2.5 FENOLOGIA DA VEGETAÇÃO

A palavra “fenologia” se origina do grego *φαίνω* (*phainō*), que significa: “para mostrar e trazer à luz”, referindo-se a mudanças visíveis no desenvolvimento biológico (TANG et al., 2016). Assim, a Fenologia é o estudo da ocorrência de eventos biológicos repetitivos e das causas de sua ocorrência em relação às forças seletivas bióticas e abióticas, dentro de uma ou várias espécies (LIETH, 1974). Isto é, a fenologia da vegetação pode ser definida também como, o estudo de padrões recorrentes de crescimento e desenvolvimento da vegetação, bem como sua conexão com o clima (HENEGBRY, G. M., & DE BEURS, K. M., 2013).

Os fatores que controlam os padrões fenológicos podem ser divididos em duas categorias: bióticos e abióticos. Os fatores bióticos incluem adaptações morfológicas e fisiológicas, além da interação com polinizadores e dispersores (VAN SCHAIK et

al., 1993). Além dos fatores acima, a competição, limitação de recursos e genética, também controlam a fenologia, particularmente durante uma fase de estabilidade do ambiente estável (WOLKOVICH et al., 2014).

Entre os fatores abióticos que alteram o tempo de folhagem, a senescência e a floração são, o fotoperíodo (BASLER & KÖRNER, 2012), a temperatura (VITASSE et al., 2011), a irradiância (SALESKA et al., 2007) e a precipitação (SHEN et al., 2015; MORELLATO et al., 2000; LIEBSCH. D & MIKICH. S. B, 2009). O controle genético da fenologia limita a plasticidade dos desvios fenológicos e protege uma espécie ou população dos extremos climáticos (TANG et al., 2016).

Em geral as razões pelas quais a fenologia vegetal responde sensivelmente ao ambiente são: (1) alcançar a sincronia na reprodução entre indivíduos de uma dada população (fluxo gênico) e (2) de forma preventiva resguardar de estações desfavoráveis. Em outras palavras, como resultado do segundo motivo, os indivíduos de uma população evoluíram para evitar a exposição (de tecidos frágeis ou não endurecidos, como folhas e ramos) a condições ambientais prejudiciais, como temperaturas baixas e falta de água (TANG et al., 2016).

A resposta da fenológica da vegetação associadas a padrões climáticos, especificamente com os dados de precipitação foi observada por Zhang et al (2005), que analisou o *feedback* da fenologia da vegetação à precipitação. No Brasil estudos, tais como, Feng et al (2013), Hilker et al (2014), Penatti et al (2014), Vicente-Cerrano et al (2014) e Li. J. Fan. K & Xu. Z (2016), também têm identificado que a vegetação é altamente sensível a mudanças no ciclo hidrológico.

Acredita-se que fatores associados aos tipos de vegetação atuam para que a fenologia seja mais dinâmica em resposta à precipitação. Por exemplo, a mistura relativa de árvores e gramíneas desempenha um papel primordial na definição desse fenômeno observado (SCALON et al., 2002), visto que, em termos de estratégias para o uso da água, as gramíneas são consideradas exploradoras intensivas, enquanto as árvores e arbustos são extensos exploradores (BURGESS, 1995). Além disso, com sistemas radiculares densos e rasos, as gramíneas fazem uso de água momentaneamente disponível na camada superior do solo, enquanto as árvores, que

possuem sistemas radiculares que penetram nas camadas superficiais e profundas do solo, têm um suprimento mais contínuo de água no solo (DALMOLIN et al., 2014). Em relação às árvores, as gramíneas exibem uma maior expansão da biomassa em resposta às chuvas nos ecossistemas das savanas, e o aumento do verde (*greening*) de curto prazo das árvores é restrito em termos de extensão pela biomassa lenhosa acima do solo (SCALON et al., 2002).

Nas florestas de climas sazonais existe maior periodicidade em relação às fases fenológicas, devido à alternância entre as estações seca e úmida considerado como fator predominante na fenologia da vegetação. No contexto da agricultura, a fenologia tem sido usada no planejamento de práticas agrícolas, na escolha de espécies ótimas para determinadas condições bioclimáticas, na seleção de datas ótimas de semeadura e na previsão de datas de colheita. Portanto, para entender completamente a fenologia e sua resposta às mudanças climáticas, os fatores abióticos e bióticos devem ser diferenciados e integrados nos esforços de modelagem (SCHWARTZ & HANES 2010; WOLKOVICH et al., 2014).

2.5.1 O monitoramento da fenologia

Monitoramento fenológico da vegetação de longo prazo é realizada por medidas, que incluem a observação do brotamento, expansão e maturação da folha, tempo de floração, senescência (ou coloração da folha) (LIEBSCH. D & MIKICH. S. B, 2009) e abscisão foliar (DALMOLIN et al., 2014). A metodologia para tais observações inclui o registro de eventos fenológicos por observação visual, fotografia periódica, fotografia de repetição automática (ALBERTON et al., 2017) e imagem de satélite (ZHANG et al., 2008; MORISETTE et al., 2009).

As medições fenológicas baseadas pelo monitoramento por câmeras permitem a observação direta da vegetação terrestre de diversos habitats e essas câmeras atualmente podem ser localizadas em muitos locais, como o NEON (Rede Nacional de Observatórios Ecológicos dos Estados Unidos; <http://www.neoninc.org/>), AmeriFlux (<http://ameriflux.lbl.gov/>), EUROFLUX, AsiaFlux (<http://asiaflux.net/>). Em florestas do Brasil encontra-se o projeto *e-phenology* (<http://www.recod.ic.unicamp.br/e-phenology/>), este sistema de monitoramento, estão

localizadas em alguns locais nas regiões do Cerrado, Mata Atlântica, Floresta Amazônica, Caatinga (MARIANO. G.C., et al., 2016). Dentro dessas redes, as câmeras digitais são montadas em torres de observação (Figura 7), para monitorar a fenologia das folhas, galhos, dossel e paisagem (MORELLATO, L. P. C et al., 2013).

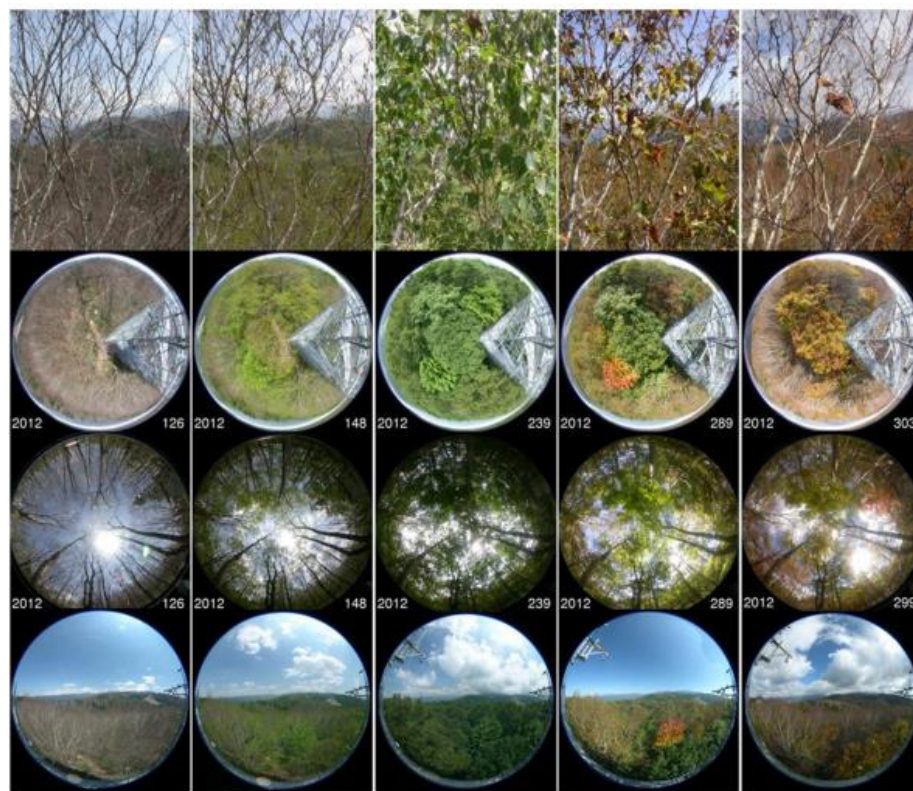


Figura 7: Exemplos de fotografia de repetição digital pelos sistemas de câmeras. De cima para baixo: galhos de árvore, copa das árvores; visão descendente do dossel; vista para cima do dossel, Adaptado de Tang et al (2016)

Uma alternativa para o monitoramento da fenologia, são os espectrorradiômetros que podem capturar a refletância espectral tanto das folhas individuais quanto das copas inteiras (ASNER & MARTIN, 2008), esses dados podem ser obtidos da refletância em escalas espaciais maiores medidas por espectrorradiômetros abordos de satélite (MURAOKA et al., 2012b).

2.5.2 Monitoramento da fenologia por satélite

O processo de observação da fenologia da superfície com vegetação por sensoriamento remoto (*land surface phenology* - LSP) descreve a sazonalidade das características de refletância associadas aos estágios de desenvolvimento da

vegetação. No entanto, este processo é fundamentalmente diferente da observação da transição da fenofases da vegetação ao nível do solo, que estão relacionados a fenômenos biológicos associados a eventos específicos da história de vida de uma planta, como os eventos de brotamento (CHUINE, 2000), floração ou senescência foliar usando observações *in-situ* de plantas ou espécies individuais (DE BEURS, K. M., & HENEGBRY, G. M., 2010). Portando a fenologia da superfície terrestre é parte integrante de um contínuo de processos, assim, a fenologia da superfície terrestre é definida como o padrão sazonal de variação em superfícies de terra com vegetação observadas a partir de sensoriamento remoto (TANG et al., 2016).

Nas observações da LSP utiliza-se dados de imagens, explorando o contraste espectral entre a região vermelha do espectro eletromagnético, que a vegetação verde absorve fortemente, e a região do infravermelho próximo, cuja vegetação verde reflete fortemente. É esse contraste espectral que forma a base para muitos índices de vegetação (IVs), como por exemplo, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) (TUCKER, 1979), Enhanced Vegetation Index (EVI) (HUETE et al., 2002), e o Índice de Área Foliar (LAI) (MYNENI et al., 2002) entre outros.

As observações da superfície com vegetação, iniciou-se com satélite inicialmente denominado ERTS (Earth Resources Technology Satellite) e em 1975 passou a se denominar LANDSAT. Assim, o LANDSAT-1 foi o primeiro desenvolvido para atuar diretamente em pesquisas de recursos naturais, foi lançado em 1972 e possuía dois instrumentos a bordo, como as câmeras RBV e MSS. O objetivo da missão e capturar tanto a “onda verde” de início e desenvolvimento da folhagem como a “onda castanha” de coloração senescente da folhagem, secagem e/ou abscisão (FREDENT et al., 1973; KNAPP & DETHIER, 1976). Nos anos seguintes concentrou-se no uso da fenologia das culturas para avançar no monitoramento agrícola e na estimativa de produtividade (TUCKER et al., 1979; BADHWAR, 1984).

Apesar da resolução espacial relativamente alta desses dados multiespectrais (80 m), uma limitação importante foi o longo período de retorno do satélite (18 dias) para capturar repetidamente a dinâmica da vegetação, isto é, a resolução temporal das imagens. A partir do sensor radiômetro imageador (*Advanced Very High Resolution*

Radiometer - AVHRR) lançado a bordo dos satélites da série NOAA de órbita polar, ofereceram uma resolução temporal muito maior (sub-diária) ao custo de uma resolução espacial mais grosseira (1–4 km) (YATES et al. 1986). Essa troca espaço-por-tempo tornou possível capturar a dinâmica da vegetação sazonal na escala continental (GOWARD et al., 1985; JUSTICE et al., 1985; TUCKER et al., 1985). Assim, os AVHRRs tornaram-se a plataforma de trabalho para o estudo das fenologias da superfície terrestre (LLOYD, 1990; REED et al., 1994; MOULIN et al., 1997), até o advento da era MODIS, que trouxe muitos dados gerados a partir de sensores com maior resolução espacial (250 m) e espectral (12 bits) (JUSTICE et al. 1989; ZHANG et al. 2003). A vantagem de uma melhor resolução espacial, como dos sensores abordo do Landsat (de 30 m), é que o dossel ainda é significativamente distinguível como um objeto na imagem e assim a fenologia do dossel pode ser observada, mas para uma resolução espacial de 1 km os detalhes da paisagem normalmente são muito desfocados para permitir que as copas sejam bem definidas.

No Brasil alguns estudos de monitoramento de fenologia foram realizados para regiões do Pantanal utilizando imagens do satélite MODIS (DE ALMEIDA et al., 2015), no Cerrado foi mapeada a fenologia com imagens do Landsat 8 (SCHWIEDER. M. et al., 2016), no Rio Grande do Sul foi realizada identificação da fenologia em ciclos ou padrões sazonais de algumas tipologias vegetais com o índice de vegetação EVI (KUPLICH. T.M. et al. 2013) e na Amazônia foi analisado o impacto da extração seletiva da madeira fenologia florestal na Amazônia brasileira (JOHNSON. M. O. et al., 2009).

Com o aumento na acessibilidade dos dados do Landsat, as pesquisas do LSP tronaram-se uma área a ser explorada, como a comparação das métricas de LSP com outros indicadores de fenologia, entretanto, são necessárias observações coordenadas em múltiplas escalas para vincular a heterogeneidade da paisagem à variabilidade de pixels (LIANG & SCHWARTZ, 2009; LIANG et al. 2011).

2.5.3 Metodologia na análise da fenologia por imagem de satélite

As métricas de fenologia da superfície normalmente visam observar: aumento do verde, início da senescência, tempo máximo da estação de crescimento e duração

da estação de crescimento com base na análise da curva do IV (REED et al. 1994; ZHANG et al., 2008). Além destas, outras medidas fenológicas, tais como, taxa de *green-up* (aumento do verde), taxa de senescência (taxa decréscimo do verde), estação de crescimento, tempo integrado NDVI já foram utilizadas (REED et al., 1994, JÖNSSON, P., & EKLUNDH. L, 2003).

Em geral, os métodos de análise dos dados da fenologia da superfície, com o uso de séries temporais, obtidas de imagens de satélite podem ser divididos nas principais categorias: limiar, derivativo, algoritmos de suavização e ajustes de modelos. O método mais simples e mais frequentemente aplicado determina as estações de crescimento e senescência com base nos valores limite (ou limiares) de índice de vegetação. Alguns autores (LLOYD, 1990, FISCHER et al. 2007) arbitrariamente ajustaram um valor de limite em um determinado nível ou amplitude, (por exemplo 0.09, 0.099, 0.17 ou a escala de valores de 0.1 a 0.35). Assim, o início da estação de crescimento é determinado como o dia do ano que o NDVI cruza o limite na direção ascendente; da mesma forma, a estação de decréscimo é determinada como o dia em que o NDVI cruza o mesmo limite na direção descendente (ZHANG et al., 2003; CHEN et al. 2016).

Os limites baseados em proporções de NDVI como os de White et al. (1997) determinaram o limiar da estação de crescimento como o ponto de 50% da curva de NDVI, isto é, definiu-se a estação de crescimento como a época do maior aumento no NDVI (WHITE et al., 1997). A justificativa para a escolha do limiar de 50%, é que se acredita que o aumento do verde seja mais rápido neste limiar e além disso, com índices de vegetação menores, estes podem ser mais facilmente confundidos com outras refletâncias da superfície (TATEISHI & EBATA, 2004), como solo exposto, áreas construídas.

A limitação no critério proposto por White et al. (1997), é que este limiar pode não ser o mesmo dependendo dos eventos anteriores que podem ter influenciado no desenvolvimento da vegetação (SCALON et al. 2002). Assim de acordo com Goward e Prince (1995), que analisou séries temporais de NDVI e dados pluviométricos na África, sugeriu que há alguma "memória" no sistema a partir de anos anteriores, de tal forma que a resposta NDVI de um determinado ano é influenciada pela precipitação

no ano anterior. Entretanto, outro conceito foi utilizado por Beurs, K. M. & Henebry, G. M. (2010), que considera que esses sistemas exibem histerese, isto é, existe a tendência de um sistema de conservar suas propriedades na ausência de um estímulo que as gerou. Por exemplo, a vegetação em que o desenvolvimento foi desencadeado por eventos de precipitação, pode existir a tendência dessa vegetação conservar dada medida, por exemplo, de tempo de permanência e a capacidade de retenção de folhas, dependendo da influência causada pela intensidade precipitada em uma fase fenológica anterior (SCALON et al., 2002).

No método da média móvel autorregressiva proposta por Reed et al. (1994) pode-se determinar as estações de crescimento e decréscimo como as datas em que uma série temporal suavizada cruza uma curva estabelecida a partir de modelos de média móvel. Outro método semelhante usado por Tucker et al. (2001), utilizam-se de modelo de suavização, denominados modelos logísticos, desenvolvido para parametrizar os perfis temporais do NDVI, assim o perfil da série temporal é dividido a partir do valor máximo de NDVI em duas séries temporais. Portanto, esses métodos admitem que uma determinada função matemática, como as funções logísticas por partes (ZHANG et al., 2003), aproxima-se do verdadeiro desenvolvimento fenológico. Entretanto, em aplicações globais ou mesmo regionais destes métodos, esta suposição pode ser imprecisa, especificamente em casos de alguma perturbação, com uma repentina queda generalizada das folhas ou curvas de NDVI com picos agudos (POTTER et al., 2003). Além disso, estes métodos podem não funcionar bem em sistemas que respondem forte e rapidamente a eventos de chuva e exibem uma estação de crescimento mais irregular e até multimodal (ZHANG et al., 2008).

Jönsson & Eklundh (2002) desenvolveram um modelo baseado em uma função local Gaussiana, esse modelo permite que a função ajustada siga o comportamento complexo da série temporal que não é possível com um modelo simples (JÖNSSON & EKLUNDH, 2002). Assim o início da estação é determinado a partir do modelo global como o ponto no tempo para o qual o valor aumentou 10% acima do nível base (menor valor de índice de vegetação) (JÖNSSON & EKLUNDH, 2002). Assim, os autores retornaram a um método de limite para determinar as fases ou estações de crescimento decréscimo. As limitações deste método são a dificuldade de ajuste das

funções do modelo, uma vez que, são necessário pelo menos quatro e ou até oito parâmetros devem ser estimados e a obtenção destes parâmetros pode ser uma substancial dificuldade, especialmente se considerar fonte de dados com um número limitado de observações por ano, por exemplo alguns produtos de imagens de satélite de baixa resolução temporal (DE BEURS, K. M., & HENEERY, G. M, 2010).

Por último, o método de análise de componentes principais (PCA) é outra transformação que às vezes é aplicada a séries de imagens plurianuais, originalmente proposta e formulada por Pearson (1901) (HALL-BEYER, 2003). O objetivo da PCA é contabilizar uma porção máxima de variância presente em todo o conjunto de dados através de uma combinação linear das observações originais, como foi utilizada por de Almeida et al., (2015), que analisou a variabilidade espaço-temporal da cobertura vegetal do Pantanal, aplicando a análise de componentes principais (PCA) a um conjunto de dados anual de EVI2.

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este estudo foi realizado em uma região de transição entre o Cerrado e o Pantanal que abrange os municípios do sul do estado de Mato Grosso e a capital, Cuiabá. Sua extensão refere-se área coberta pelas imagens dos satélites Landsat 5 e 8, órbita 226 e quadrantes 71 e 72 (figura 7).

Foram também selecionados dentro de um recorte no quadrante 71, quatro pontos para análise sazonal do índice de vegetação (NDVI): dois pontos em área de Cerrado, na Fazenda Experimental e na Fazenda Miranda da UFMT, localizadas no município de Santo Antônio de Leverger – MT; e outras duas localizadas próximos ao Centro avançado de Pesquisas da Universidade Federal de Mato Grosso (16° 29' 52,0" S. 56° 24' 44,0"), no local denominado Parque Baía das Pedras da Estância Ecológica SESC-Pantanal (RPPN) e Cambarazal no município de Poconé acerca de 160 km de Cuiabá (figura 8).

A vegetação da Fazenda Experimental (FEX) é uma pastagem não nativa é dominada pela *Brachiaria humidicola* (BIUDES et al., 2012). O tipo de solo regional é o *Latossolo* vermelho-amarelo distrófico, também conhecido como *Plinthosol* (RADAMBRASIL, 1982). E na Fazenda Miranda (FMI) a fitofisionomia predominante é o campo sujo e a vegetação é dominada por gramíneas nativas e não-nativas e pelas espécies arbóreas semi-decíduas *Curatella americana* L. e *Diospyros hispida* A.DC. (VOURLITIS et al., 2013), e de solo é PLANOSSOLO HÁPLICO *Eutrófico gleissólico* (EMBRAPA, 1982).

No local denominado Parque Baía das Pedras da Estância Ecológica SESC-Pantanal consiste de uma vegetação predominante composta por estande monodominante de *Combretum lanceolatum* Pohl chamado de Pombeiro (SANTOS et al., 2006). O outro local selecionado dentro da RPPN possui vegetação monodominante de Cambará (*Vochysia divergens* Pohl), em uma configuração de faixa contínua de aproximadamente 25 km de extensão e 4 km de largura, com altura do dossel variando entre 28 e 30 m e paralela ao rio Cuiabá, conhecida localmente como Cambarazal, (ARIEIRA & NUNES DA CUNHA, 2006; VOURLITIS et al.,

2011). O solo da RPPN é classificado como GLEISSOLO HÁPLICO Ta Distrófico (VOURLITIS et al., 2011; MACHADO et al., 2015).

Segundo a classificação de Köppen, o clima regional é tipo Aw (PEEL et al., 2007), a precipitação média anual está entre 1200 e 1400 mm e contendo sazonalidade característica, com uma estação chuvosa (outubro-abril) e outra seca (maio-setembro) (CHIARANDA et al., 2012). A temperatura média mensal da região está entre 25°C e 26°C (BIUDES et al., 2012, 2014a).

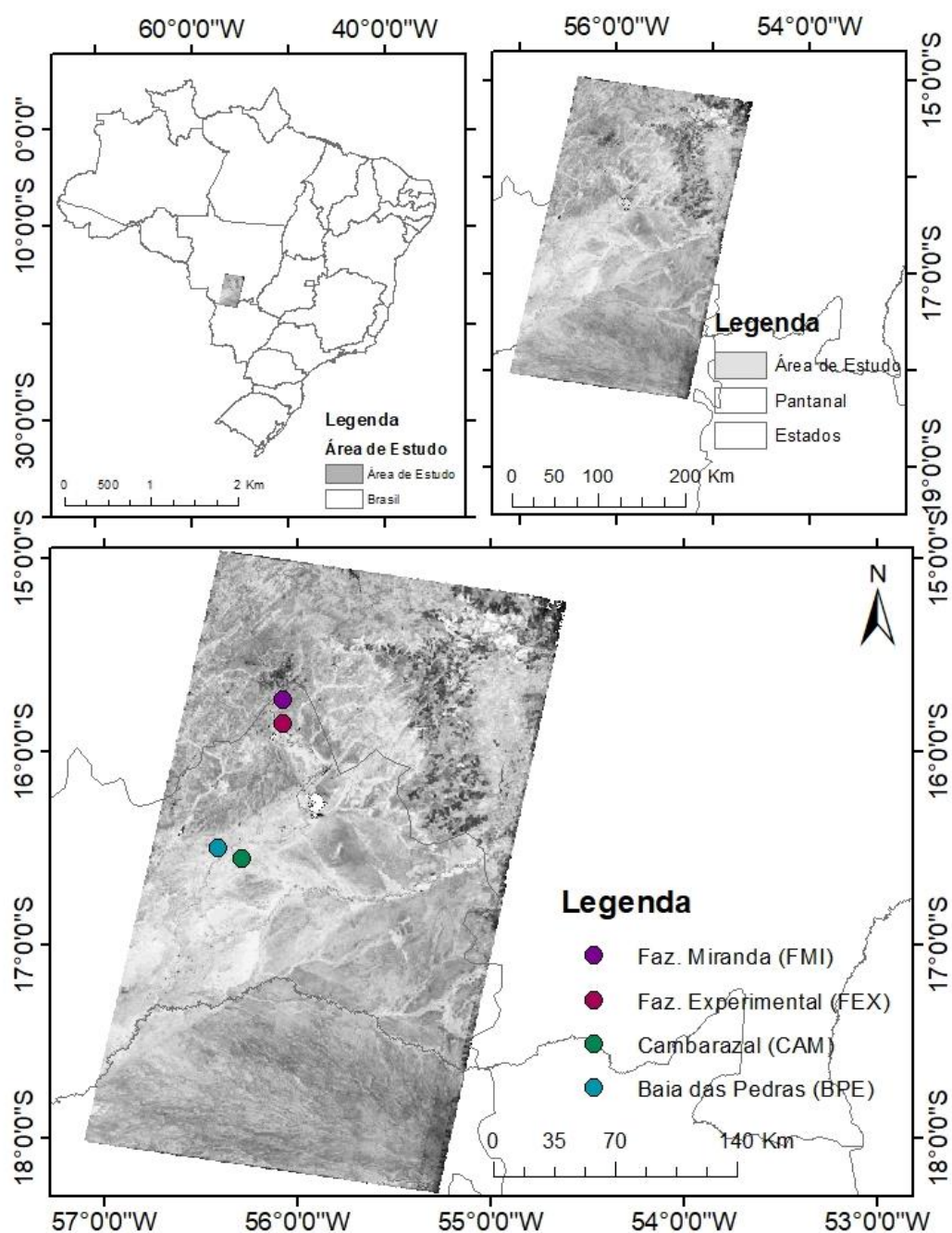


Figura 8: Localização das áreas de estudo. Floresta de pastagens e mata de savana (campo sujo) na Fazenda Miranda (FMI), *Brachiaria* pastagem humídica na Fazenda Experimental (FEX), floresta arborizada sazonalmente na Baía das Pedras (BPE) e a floresta ripícola de *Vochysia divergens* (CAM) no Pantanal.

3.2 BASES DE DADOS MICROMETEOROLÓGICOS E DE SENSORIAMENTO REMOTO

3.2.1 DADOS DE PRECIPITAÇÃO DAS ESTAÇÕES MICROMETEOROLÓGICAS

Neste trabalho utilizou-se dados mensais de precipitação medidos na estação meteorológica de Porto Conceição, do período de 2007 a 2017, pertencentes a rede da Agência Nacional de Águas (ANA), na localidade do município de Poconé-MT (coordenadas, -17°08'35, -57°21'33) foram adquiridos pelo site: www.ana.gov.br/PortalSuporte/frmDadosEstacao.aspx?estacao=1757001&Ano=2007&Ano2007&tipo=Chuvas. Foram utilizados também dados da estação meteorológica convencional Padre Ricardo Remetter - MT (OMM: 83364), da rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada na Fazenda experimental da UFMT, no município de Santo Antônio de Leverger/MT, que foram obtidos em <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>.

3.2.2 Produto de precipitação de TRMM

Para o estudo foi utilizado o produto (TRMM 3B43 7) da missão TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) proveniente da plataforma Giovanni da NASA ([site: https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/](https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/)). Os dados de precipitação possuem uma resolução espacial de 0.25° X 0.25° e resolução temporal mensal (de 2007 a 2017). Estes dados foram selecionados de forma a sobrepor a área de estudo (polígono de vértice -15.23° S; -54.60° W -18.00° S; -57.00° W), isto é, os dados de Precipitação acumulada mensal correspondem a área referente as cenas do Landsat dos quadrantes 071 e 072. Posteriormente, a cada 25° de latitude dentro da área de estudo, obteve-se uma série temporal de precipitação acumulada mensal (2007-2017).

O produto (TRMM 3B43 7) foi obtido no formato de arquivo CSV (*Comma-Separated Values*), e os dados foram organizados utilizando planilha eletrônica e programa estatísticos. Posteriormente, os dados de precipitação do produto (TRMM 3B43 7) para os quadrantes que sobrepoem as estações meteorológica de Porto Conceição e Padre Ricardo Remetter foram comparados com os dados medidos das destas estações, com o objetivo de verificar a qualidade das estimativas do produto.

2003							186-202	234	250-266	298	314-330	
2004			61-77	93-109	147	157-173	189-205	237	253			349
2005	15	47	63		127	159-175	191	223-239	271	287	319	
2006				114	130-146		194-210	226-242	258		322	354
2007			69-85	101	133	165-181	197	229	245-261	277		
2008			72-88	104-120	136			232	248			344
2009	10	42	90	106	138	154	186-202	218-234		282	314	
2010			77	109	125-141	157-173	205	253	269	285	301	317
2011		32	112				192	224	272			
2013						165-181	197	213-229	245	293		
2014	8	40			136		184	216-232	248			360
2015	11		75	91		155		219-235	251	299	315-331	347
2016			78	94-110	126		190-206	222-238	254-270	302	334	
2017		32			128-114	176	192-208	224-240	256	288	320	352

(-) representa duas imagens para o mês.

O processamento das imagens do Landsat 5 e 8 foi realizado com o uso do Software ERDAS IMAGINE – versão 14 e o Esri@ ArcMap™ versão 10.3.0.4284, utilizando-os para o empilhamento das bandas, recortes para se obter imagens das subáreas alvo (FMI, FEX, BPE, CAM).

3.3 CÁLCULO DO ÍNDICE DE VEGETAÇÃO

Foi calculado o índice de vegetação da superfície repetidamente para todas as imagens inteiras e as recortadas, que abrangem a toda a área de estudo do período de 1994 a 2017, calculando pixel a pixel nas imagens o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) com o uso do Software ERDAS IMAGINE – versão 14 e o Esri@ ArcMap™ versão 10.3.0.4284, de acordo com as etapas de processamento da figura 9.

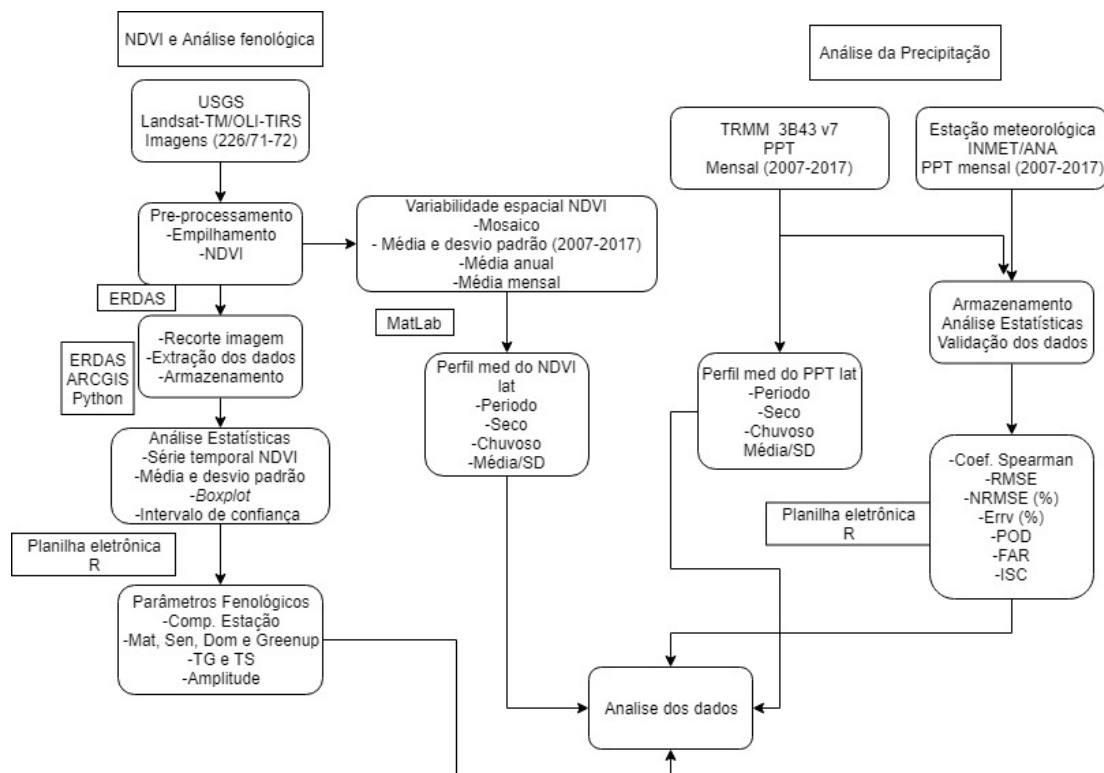


Figura 9: Fluxograma das etapas de processamento para obtenção e análise dos dados de NDVI e precipitação.

Na primeira etapa do processamento das imagens do Landsat, foi realizado o empilhamento das bandas de refletância (junção dos arquivos) utilizadas no cálculo do índice (NDVI), e em seguida foi feito o recorte das imagens para se obtenção das cenas das subáreas alvo (FMI, FEX, BPE, CAM), com objetivo de reduzir o tempo de processamento e tamanho dos arquivos e por fim realizou-se o cálculo do índice de vegetação (NDVI) utilizando as bandas de refletância de acordo com as equações 1 e 2 por meio do algoritmo para o software ERDAS IMAGINE – versão 14.

O índice de vegetação de Diferença Normalizada foi calculado através da razão entre a diferença das refletividades do infravermelho próximo e do vermelho e a soma entre elas. A expressão é dada por:

$$NDVI = \frac{(\rho_4 - \rho_3)}{(\rho_4 + \rho_3)} \quad (1)$$

onde: ρ_4 é a refletância no infravermelho próximo, e ρ_3 é a refletância no vermelho. Já para o Landsat 8, utiliza-se a refletância monocromática do infravermelho próximo (banda 5) e vermelha (banda 4) Allen et al. (2002a), conforme apresentado na equação 2:

$$NDVI = \frac{(\rho_5 - \rho_4)}{(\rho_5 + \rho_4)} \quad (2)$$

Os valores do NDVI variam de -1 a +1, mas, em superfícies vegetadas esses valores são sempre positivos, variando de 0 a +1.

3.3.1 Série temporal de NDVI

Após o termino do cálculo de NDVI das 209 imagens recortadas, extraiu-se dos pixels de coordenadas referentes aos pontos: FMI, FEX, BPE e CAM, os dados com valores de NDVI de cada uma das imagens. Para esta etapa foi utilizado uma rotina em linguagem de programação Python 2.7, através do compilador IDLE e pelo software ArcMap, assim, a rotina de programação seleciona automaticamente em cada arquivo de imagem o valor do NDVI da coordenada referente aos pixels previamente escolhido e com a respectiva data da imagem, dessa forma possibilitou-se obter um conjunto de dados de NDVI dos pontos FMI, FEX, BPE e CAM referente ao período de 1994 a 2017.

Estes dados da série temporal de cada ponto de referência (FMI, FEX, BPE, CAM), foram concatenados (organizados) em grupos mensais (jan, fev, mar, ..., dez), com o uso do software R, e em seguida exclui-se os valores atípicos (*outliers*) de cada mês, com o objetivo de observar o comportamento sazonal do NDVI.

3.3.2 Extração dos parâmetros da sazonalidade

As transições do ciclo da fenologia da vegetação das regiões FMI, FEX, BPE e CAM da série temporal de NDVI (1994-2017) foi determinado por 8 parâmetros sazonais para cada ano, seguindo a metodologia de Jönsson, P., & Eklundh, L. (2002) e Zhang et al. (2003), de acordo com a figura 10, os parâmetros foram: (a) *greenup*: a data de início do aumento do verde, definida como o valor no tempo (dia juliano) para o qual o NDVI aumentou em 10% da distância da esquerda (antes do valor máximo) entre o mínimo e o máximo; (b) dormência, a data em que o verde do dossel atinge um mínimo, é definido de maneira similar para o lado direito depois do máximo; taxa de aumento, calculado como a razão da diferença entre os níveis de (c) 20% e (d) 80% (a esquerda do valor máximo) e correspondente diferença de tempo; taxa de decréscimo, calculada como o valor absoluto da razão da diferença entre os níveis de (c) 20% e (d)

80% à direita e a diferença de tempo correspondente (a taxa de decréscimo é dada como uma quantidade positiva); (e) maturidade: a data em que o verde do dossel se aproxima do seu máximo sazonal; (f) amplitude, é obtida como a diferença entre o valor de pico e a média dos valores mínimos esquerdo e direito; (g) duração da estação, definido como o tempo entre o início e fim da estação; (h) dormência, a data em que o verde do dossel atinge um mínimo (figura 10). Utilizou-se índice de vegetação (NDVI) (ou seja, não mediu-se variáveis de dossel diretamente), a terminologia refere-se especificamente à fenologia do verde do dossel (ZHANG et al., 2006).

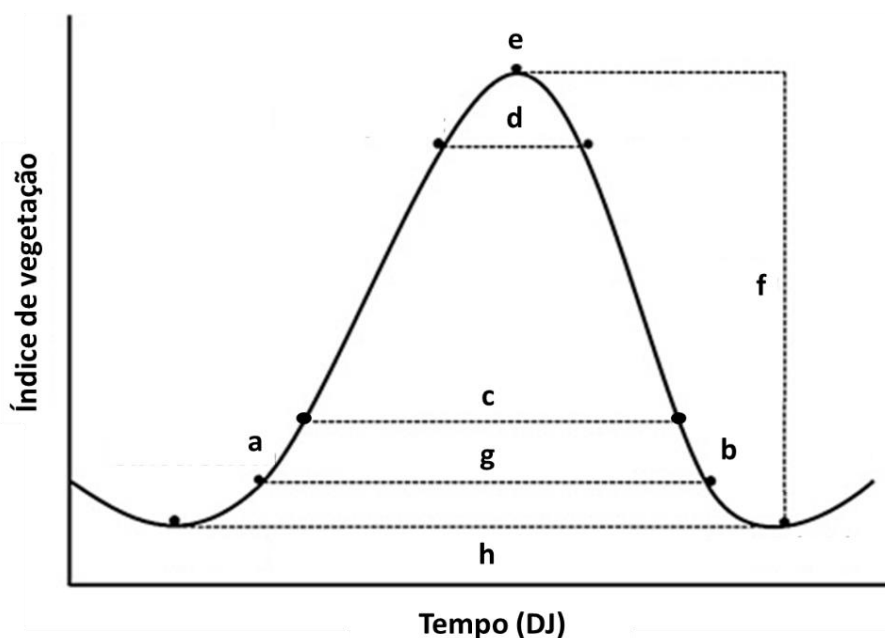


Figura 10: Cálculo dos parâmetros de fenológicos: (a) início da temporada, (b) final da temporada, (c) 20% à esquerda e 20% à direita, (d) 80% à esquerda e 80% à direita (e) pico, (f) amplitude, (g) duração da estação e (h) mínimos a esquerda e a direita. Adaptado de Mountford, G. L., et al.2017.

3.3.3 Análise da variabilidade espacial do NDVI

A análise da variabilidade espacial de NDVI do período (2007-2017) referentes a transição do Cerrado e Pantanal, foi realizado calculando-se a média e desvio padrão de NDVI mensal, anual e do período 2007-2017) ao longo da área de estudo, em seguida estes valores de NDVI foram organizados em mapas com o uso do software ERDAS IMAGINE. Primeiramente, realizou-se o cálculo das médias do NDVI (mensais, anuais e do período) para todas as imagens do quadrante 71 e 72 utilizando a função *Model Maker*, em seguida realizou-se a junção (mosaico) destes mapas de

NDVI médios por meio da função *MosaicPro* e por fim os pixels da imagem foram reamostrados de 30 x 30 m para 300 x 300 pela função *Resample pixel Size*, assim este procedimento foi repetido gerando mapas de NDVI médio (mensal, anual e do período).

Com a finalidade de analisar o perfil do NDVI médio ao longo da latitude, calculou-se a média do NDVI dos pixels da imagem direção Leste-Oeste (todos os pixels na horizontal), obtendo-se ao longo dos pixels na latitude valores médios de NDVI de Norte a sul (pixels na vertical), (figura 11).

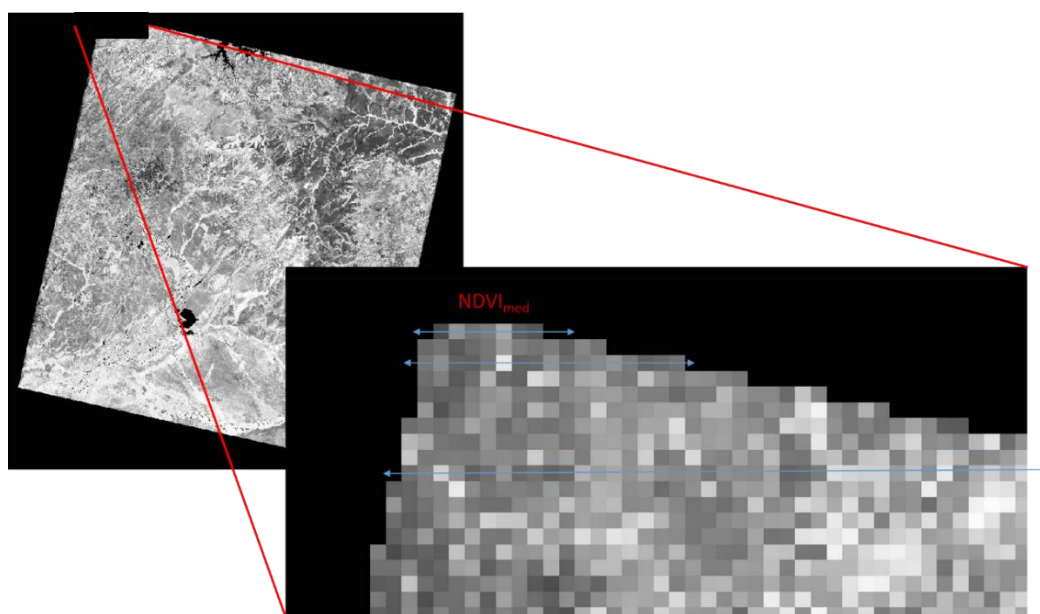


Figura 11: Método para o cálculo de NDVI médio dos pixels na horizontal, ao longo dos pixels na vertical.

Primeiramente, foi realizada a conversão (função *pixel to ASCII*) das imagens de NDVI em arquivo “.asc” e organizada em banco de dados e posteriormente importado para o software Matlab, e em seguida os dados foram processados com o uso do *script* para Matlab, que seleciona em cada linha de pixels na horizontal os valores maiores ou iguais aos valores mínimos de NDVI pré-estabelecido, calculados nos pontos de referência para análise sazonal do índice de vegetação (NDVI) (FMI, FEX, BPE, CAM), em seguida determina a média desses valores, por fim, gerando uma matriz de valores de NDVI e a respectiva coordenada na latitude.

3.4 ANÁLISES DOS DADOS

Nesta etapa de análise consistiu da realização de estatística descritiva das variáveis NDVI e precipitação, dessa forma foi observado a dispersão em torno da média calculando-se o desvio padrão e o Coeficiente de variação. As médias de NDVI e precipitação foram calculadas com o intervalo de confiança de $\pm 95\%$, as demais análises estatísticas foram: amplitude valores máximos e mínimos e probabilidade de ocorrência (*boxplot*).

3.4.1 Validação do Produto TRMM

Os dados do TRMM foram analisados mediante alguns parâmetros estatísticos a fim de avaliar e verificar se as estimativas detectam de forma equivalente a precipitação medidas na estação meteorológica no período de estudo. Inicialmente, o foi realizado o teste de normalidade de Shapiro-Wilk com grau de significância de 95%. Segundo o teste, os dados não apresentaram uma distribuição normal onde o p-valor = 0,001. Em seguida, foi utilizado o coeficiente de correlação de Spearman (ρ) (equação 3), que descreve a relação entre duas variáveis, sem fazer suposições sobre a distribuição de frequências das variáveis.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{(n^3 - n)} \quad (3)$$

onde $d_i = rg(x_i) - rg(y_i)$, é a diferença entre cada posto de valor correspondente de x e y , do qual rg representa que as variáveis x e y foram ranqueados e n equivale ao número dos pares dos valores.

O NRMSE que é a raiz quadrada do erro médio quadrático normalizado pela média dos valores observados (equação 4) foi aplicado com a finalidade de avaliar a magnitudes dos erros da estimativa de satélite, determinada com base no erro médio quadrático (RMSE). Este cálculo é adequado para estimar a precipitação quando o NRMSE é menor que 50% (ADEYEWA & NAKAMURA, 2003), representado pela equação 3:

$$NRMSE = \frac{RMSE}{\bar{y}} \quad (3)$$

E para indicar com que intensidade de erros os dados que estão sendo estimados pelo satélite apresentam em relação aos dados observados, utilizou-se o RMSE e o erro relativo (Errv (%)) equação (4) e (5) respectivamente:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (4)$$

$$Errv(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{\sum_{i=1}^n y_i} \quad (5)$$

Na qual, x é a precipitação acumulada mensal estimada pelo TRMM; y é a precipitação acumulada mensal medida na estação meteorológica, e $\bar{y}$ é a média do acumulado de precipitação observado nos postos pluviométricos.

Para observação de eficácia do produto TRMM 3B43 7 do satélite em registrar os meses em que foram observados precipitação, utilizou-se três índices categóricos. A probabilidade de detecção (POD) (equação 6), indica o cociente do número de meses com precipitação detectados pelo satélite e o número de meses com precipitações observadas a partir dos postos pluviométricos. Dessa forma, caso o satélite detectar corretamente os dias e meses em que houve precipitação observada pelo pluviômetro o resultado será igual a 1.

$$POD = \frac{H}{H+F} \quad (6)$$

O índice de alarme falso (FAR) (equação 7) determina a fração de precipitação que é falsamente detectada pelo satélite, caso o valor do índice for igual a 0, indicará que todas as precipitações observadas pelo satélite foram detectadas pelos pluviômetros, e quando o resultado é igual a 1 as detecções são falsas, isto é, nos momentos em que o satélite identificou a precipitação não houve registro no posto pluviométrico.

$$FAR = \frac{F}{H+F} \quad (7)$$

E por último, o índice de sucesso (CSI) (equação 8) define a fração total de precipitação que foram corretamente detectados pelo satélite, assim, se CSI for igual a 1, significa que a precipitação detectada pelo satélite são as mesmas observadas pelos pluviômetros e conjuntamente não produzir nenhum alarme falso.

$$CSI = \frac{H}{H+M+F} \quad (8)$$

onde H nas equações 6,7 e 8 é precipitação pluviométrica observada pela estação meteorológica e detectada pelo satélite TRMM; M é a precipitação observada

pela estação meteorológica, mas não detectada pelo satélite; F é a precipitação detectada pelo satélite, mas não observada pela estação meteorológica.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 VALIDAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO MENSAL ESTIMADA PELO PRODUTO 3B43V7 TRMM

A correlação entre os dados de precipitação do produto TRMM 3B43 e a precipitação medida na estação meteorológica convencional Padre Ricardo Remetter - MT do INMET (tabela 4) foi de 0,85 a 0,89, dessa forma pode-se considerar significativa a correlação entre os dados estimados pelo TRMM e medidos pela estação meteorológica na região de Cerrado, no entanto no período anual observou-se a maior correlação. A maior correlação entre os dados do período anual pode estar relacionada ao maior tempo de acumulação de dados, pois em um período maior de acumulação de dados, os erros entre os dados estimado e medido podem ser menos aparentes (SOARES et al., 2016). De acordo com Maggioni, V et al. (2016), em regiões caracterizados por acentuados gradientes de precipitação ocorrência de erros são dependentes de suas magnitudes, devidos a baixa capacidade dos sensores de infravermelho do TRMM para distinguir as nuvens chuvosas e não-chuvosas. Resultados semelhantes foram observados por Sun et al. (2014) e Tostes, J. O., et al. (2017), que justificaram o pior desempenho pode ser explicado pela maior ocorrência de erros sistemáticos na medida durante a estação chuvosa.

Tabela 2: Índices de Correlação Spearman (ρ), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE), Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático Normalizado Pela Média dos Valores Observados (NRMSE), Erro Relativo (Errv), Probabilidade de Detecção (POD), Falso Alarme (FAR) E Índice de Sucesso (CSI) na Validação do Produto 3B43 com os dados da estação do INMET (OMM: 83364) de 2007 a 2017. Os asteriscos indicam o nível de significância dos coeficientes: (*) p-valor $\leq 0,001$.

Período	ρ	RMSE	NRMSE (%)	Errv (%)	POD	FAR	CSI
Anual	0,89*	58,34	51,23	23,45	1	0,08	0,92
Chuvoso	0,83*	72,74	41	21,56	1	0	1
Seco	0,85*	25,58	109,34	42,19	1	0,21	0,79

Observa-se (tabela 4) nos resultados do RMSE (variou entre 25,58 a 72,74) e o NRMSE (variou entre 41 a 109,34), o nível de erro do satélite em estimar a

precipitação mensal é considerável para os períodos de análise. Com relação a o Errv (tabela 4) os resultados demonstram que os dados produto TRMM superestimou as medidas de precipitação do INMET em até 42,19 %. Estas discrepâncias entre estes dados estimados pelo produto e medidos na estação pode estar relacionado a diferença entre *footprint* da estação meteorológica e a área abrangida pelo produto TRMM selecionada para este estudo, como também observado por Maggioni, V et al. (2016), no entanto, esta discrepância não compromete a observação da variabilidade da precipitação das áreas de estudo, devido ao nível de correlação observado entre os dados medidos e estimados.

Os resultados dos índices categóricos da tabela 4 indica que o produto do TRMM apresentou bons resultados em detectar o número de dias em que houve precipitação estimada e observados em superfície, pois os valores do índice POD (1) foram satisfatórios, dado que o índice indica que o satélite foi eficiente em detectar corretamente a mesma quantidade de eventos de chuva estimada comparados com o que foi observada em superfície. Com relação ao índice FAR, os valores foram relativamente baixos (0 a 0,21), indicando que os dados do satélite apresentaram bom desempenho quanto a não detectar falsamente a precipitação. Por último, os valores do CSI variaram de 0,79 a 1, sendo o pior resultado no período seco (0,21), diante deste resultado, pode-se justificar que nos períodos com maiores volumes de chuva o satélite detecta melhor as ocorrências de precipitação. Nesse caso o ideal é que quanto mais próximo de 1, os dias com precipitação seriam detectados corretamente e ao mesmo tempo sem alarme falso, o que ocorreu apenas para período chuvoso.

Também foi realizada a comparação das estimativas do satélite TRMM com os dados medidos da estação meteorológica na região do Pantanal, observada pela correlação entre os dados de precipitação do produto TRMM 3B43 e da estação meteorológica de Porto Conceição (ANA) (tabela 5) foi de 0,525 a 0,802, estas correlações foram inferiores aos observados para a estação do INMET (tabela 4), entretanto pode-se ainda considerar significativa a correlação entre os dados estimados pelo TRMM e medidos na estação pluviométrica.

Tabela 3: Índices de Correlação Spearman (ρ), Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE), Raiz Quadrada do Erro Médio Quadrático Normalizado Pela Média dos Valores Observados (NRMSE), Erro Relativo (Errv), Probabilidade de Detecção (POD), Falso Alarme (FAR) E Índice de Sucesso (CSI) na Validação

do Produto 3B43 com os dados da estação pluviométrica do ANA (Cod: 1757001) de 2007 a 2017. Os asteriscos indicam o nível de significância dos coeficientes: (*) p-valor $\leq 0,001$.

Período	ρ	RMSE	NRMSE (%)	Errv (%)	POD	FAR	CSI
Anual	0,802*	85,38	92,21	27,55	1	0,15	0,85
Chuvoso	0,525*	107,33	77,00	26,71	1	0	1
Seco	0,742*	35,15	135,25	34,16	1	0,37	0,63

Observa-se os resultados do (tabela 5) RMSE (variou entre 35,15 a 107,33) e o NRMSE (variou entre 77 a 135,25), demonstra que os níveis de erro do satélite em estimar a precipitação mensal foram maiores em comparação com os resultados da tabela 4. Com relação ao Errv os resultados demonstram que os dados produto TRMM superestimou as medidas de precipitação do INMET em até 42,19 %. Contudo, pode-se reiterar que estes resultados entre os dados estimados pelo produto e medidos na estação pode estar relacionado a diferença entre *footprint* da estação meteorológica e a área abrangida pelo produto TRMM selecionada para este estudo, no entanto, pode-se considerar que embora existam diferença entre os dados medidos e estimados, é possível a observação da variabilidade da precipitação dos dados do TRMM para a área de estudo.

Quanto aos resultados dos índices categóricos da tabela 5, do mesmo modo que a os resultados anteriores (tabela 4), observou-se que o produto do TRMM apresentou bons resultados em detectar o número de dias em que ocorreu precipitação e que também foram observados em superfície apenas para o período anual e o período chuvoso, dado que os valores do índice POD apresentaram resultados satisfatórios, dado que o índice indica que o satélite foi eficiente em detectar corretamente a mesma quantidade de eventos de chuva estimada comparados com o que foi observada em superfície.

Com relação ao índice FAR, os valores do foram de 0 a 0,37 nos períodos analisados, representando que a estimativa da precipitação observada pelo do satélite TRMM apresentou melhor desempenho quanto a não detectar falsamente a precipitação na estação chuvosa. Do mesmo modo, o maior índice CSI foi observado para o período chuvoso, similarmente como o que foi observado na tabela 4, justifica-se que nos períodos com maiores volumes de chuva o satélite detecta melhor as

ocorrências de precipitação. Por fim, o produto TRMM 3B43 apresentou um desempenho razoável em detectar a quantidade de dias com chuvas observados em superfície, da mesma maneira que detectou precipitação. Resultados semelhantes foram observados por Pessi et al. (2019) que considerando que o uso dos dados estimados via satélite podem ser uma alternativa aos das estações meteorológicas, sendo possível utilizar dados de satélite em situações onde não existem estações meteorológicas convencionais.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA VARIABILIDADE ESPACIAL DO NDVI NA TRANSIÇÃO DO PANTANAL E CERRADO

Com base na média (figura 12a) e desvio padrão (figura 12b) do NDVI obtido pelo conjunto das imagens do período de 2007 a 2017, é possível a identificação de áreas homólogas, quanto níveis e variabilidades do índice de vegetação. As regiões com valores de NDVI entre 0,7 a 0,9 (em verde claro), estão localizados nas áreas norte e centrais do mapa e possui desvio padrão entre 0,01 a 0,11, aproximadamente entre 12 a 15% da média. Entretanto as médias do NDVI na faixa de 0,2 a 0,6 (em verde escuro a amarelo) tem maior desvio padrão, em até 31% da média (0,14 a 0,19 em azul claro).

Esses padrões espaciais de grande escala das médias do NDVI são consistentes com que é conhecido geograficamente e ecologicamente para a região do Cerrado e Pantanal, e alinhados com os mapas de referência disponíveis (MMA, 2011). As diferentes médias por região podem estar relacionadas as diferentes classes de uso e ocupação da cobertura do solo, conforme o manual técnico da vegetação Brasileira do IBGE (2004) o NDVI entre -1 a 0,25 podem ser classificados como corpo d'água continentais; 0,25 a 0,56 Savana Gramíneo-lenhosa e Savana Parque; 0,65 a 0,76 savana Florestada; 0,76 a 1 Floresta estacional Semidecidual Aluvial.

A identificação e caracterização distribuição e variabilidade média do NDVI (de 2007 a 2017) desde a região central ao sul do mapa (figura 12a) estão de acordo com a classificação de Silva & Abdon, (1998), que classificou a vegetação dominante encontrada na região norte do Pantanal como: Savana arbustiva, Savana lenhosa, Savana gramínea e vegetação sob influência fluviais. Enquanto que, na área norte e

nordeste do mapa (figura 12a) existe maior quantidade áreas urbanizadas e de pastagens plantadas e naturais com relação a região sul do mapa (IBGE, 2004; MMA, 2011).

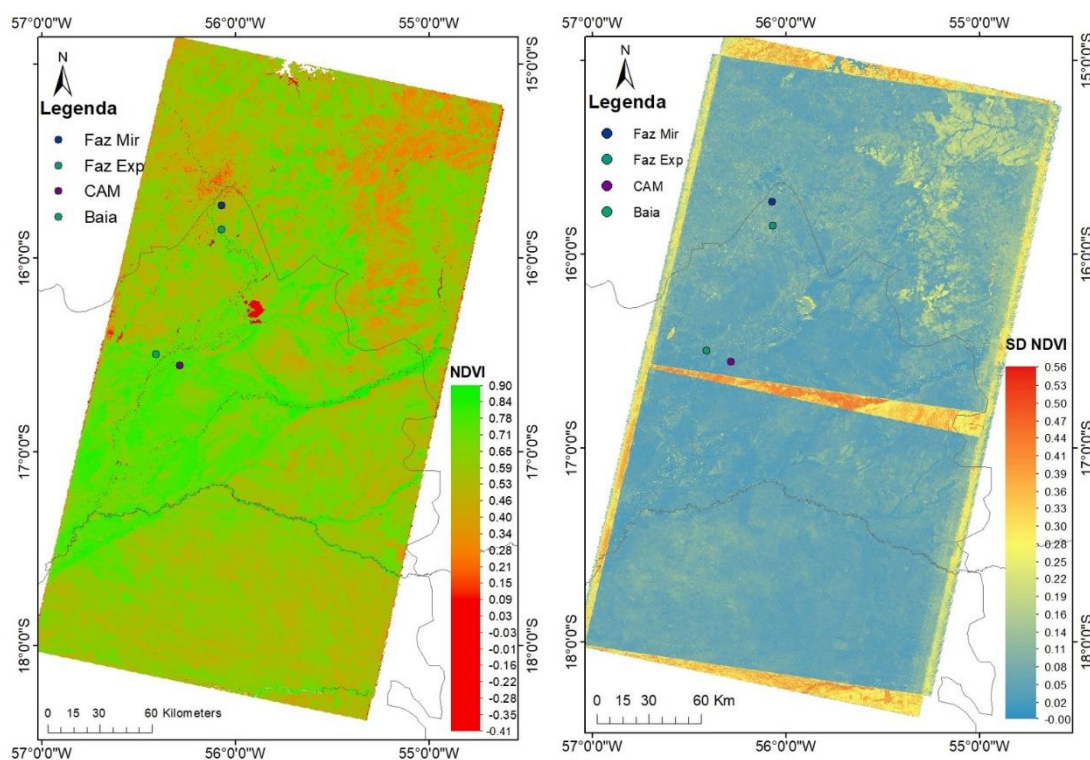


Figura 12: a) Média e b) desvio padrão das imagens (mosaicos das imagens dos quadrantes 071 e 072) de índice de vegetação (NDVI) calculadas para o período de 2007 a 2017, na região sul Mato-grossense.

Na região de índice de vegetação entre 0,7 a 0,9 e de localização oeste da figura 12a ($56^{\circ}0'0''$, $17^{\circ}0'0''$), conforme descrito por Corradini & Assine (2012), é compreendida por um megaleque fluvial que possui cerca de 16.000 km² descrito na bacia sedimentar do Pantanal (DE ALMEIDA et al., 2015), caracterizado por uma rede de drenagem complexa e sujeita a periódicas inundações (CORRADINI & ASSINE, 2012), que influenciam a fenologia da vegetação (PENATTI & ALMEIDA, 2012).

Áreas com maior média de NDVI (0,7 a 0,9) e de menor desvio padrão (figura 12b), ocorreram próximos aos fluxos fluviais e corpos d'água. No entanto, nas regiões de médias intermediárias de NDVI na faixa de 0,2 a 0,6, e com maior desvio padrão, que foi entre 10 a 20% (0,02 a 0,19 em azul claro), ocorreram em áreas de pastagens plantadas, naturais e zonas agricultáveis (desconsiderando a borda e a faixa próxima a áreas central da imagem). A distribuição da vegetação encontrada em regiões com

maior NDVI (0,7 a 0,9) pode ser explicada pela maior disponibilidade de água ser a principal força motriz na formação, composição e na distribuição da vegetação (SCALON et al., 2002). E a maior variabilidade (desvio padrão) encontrada em regiões com NDVI (0,2 a 0,6) intermediária pode ser explicada pela maior sensibilidade dos ecossistemas de Cerrado responderem a variabilidade climática em escala de tempo relativamente mais curtas (SCALON et al., 2002).

4.3 PERFIL DA VARIABILIDADE ESPAÇO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO E ÍNDICE DE VEGETAÇÃO

O perfil médio da precipitação ao longo das latitudes 15° a 18° com base na série temporal de precipitação (2007 a 2017) para cada 0,25° de latitude (figura 13), foi em geral decrescente de norte a sul, variando aproximadamente de 1720 a 1257 mm, e a maior diferença de 463 mm (26%) ocorreu entre as regiões no Cerrado e Pantanal, respectivamente. O maior desvio padrão (174,2 mm; 13,4 % da média) na latitude 18,09°, e o menor (130,6 mm; 7,9 %) na latitude -15,59°.

Baseando-se na precipitação total anual e na duração da estação chuvosa, pode-se classificar Mato Grosso em cinco regiões de chuva homogênea das quais a região Norte tem os maiores índices pluviométricos seguidos pelas regiões Central, Leste e Sul, respectivamente (FIETZ et al., 2008). Este gradiente de precipitação, está relacionado a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (ALVES, 2009), que corresponde à o principal sistema climatológico responsável por uma faixa de nebulosidade orientada da direção noroeste/sudeste e mais próxima do norte de Mato Grosso, associada a uma zona de convergência de umidade (RAO et al., 1996).

Similarmente, Biudes et al. (2015) evidenciou a existência um decréscimo de norte a sul de Mato Grosso como também nas regiões de Cerrado e Pantanal no acumulado anual de precipitação, que é consistente com a climatologia da região (VOURLITIS & DA ROCHA, 2011). Além disso, de acordo com Penatti et al. (2014), existem diferenças significativas na precipitação entre as porções norte e sul da bacia do Alto Paraguai que abrange o Pantanal, das quais as maiores quantidades de precipitação ocorrem nas porções norte e leste da bacia.

Em geral, nota-se no perfil da distribuição espacial do NDVI_{médio}/latitude para a média do período de 2007 a 2017 (figura 13), uma clara distinção nas regiões compreendidas entre as latitudes 15° a 16,1° (Cerrado) e a de 16,5° a 18° (norte do Pantanal). A diferença encontra-se no formato do perfil médio do NDVI nas latitudes 15° a 16,9° e na sua maior variabilidade, atingindo o índice mínimo de (NDVI) 0,61 na latitude 15,4° e a maior (0,67) na latitude 16,6°. Além disso, nessa região ocorreu o maior desvio padrão ao longo das latitudes analisadas (figura 13). No entanto, na região entre as latitudes 16,9° a 18° que compreendem o norte do Pantanal, o perfil foi praticamente constante, com um declínio sutil no perfil do NDVI variando o índice entorno 0,01 aproximadamente. Observou-se uma significativa correlação entre os perfis de precipitação acumulada anual e NDVI médio anual, entretanto a correlação foi negativa ($\rho = -0,705$), que pode ser explicado pela diferença nos formatos dos perfis ao longo da latitude.

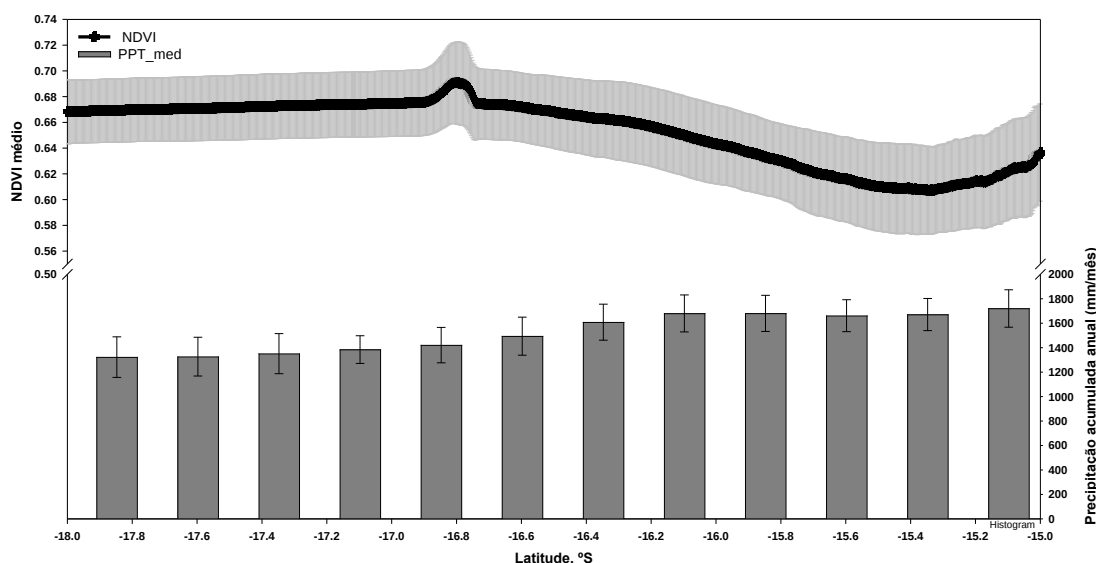


Figura 13: Média do NDVI (linha cor preta, Resolução espacial 0,0027° ao longo da latitude) e desvio padrão (cor cinza) e precipitação acumulada anual (Resolução espacial 0,25° ao longo da latitude) por latitude, compreendida entre as longitudes 54° e 57°.

O perfil observado da variação espacial do NDVI representa as diferentes características da cobertura da superfície vegetada ao longo das latitudes que compreendem a transição Cerrado-Pantanal (figura 13). Essa diferença, pode estar relacionada a maior preservação da vegetação natural das áreas do Pantanal em relação as do Cerrado, (DE ALMEIDA et al., 2015), como também ao maior índice de áreas

foliar (IAF) associados a copas das floresta arbóreo-arbustiva da região do pantanal (RENATA et al., 2005; BIUDES et al., 2015).

Além disso, conforme a Conservação Internacional (2009), em 2009, o Pantanal possuía 86,6% de sua área (ou 130.815 km²) de vegetação natural. Este maior grau de preservação é resultado da baixa densidade de presença humana que é resultado do caráter adverso da maioria das regiões sazonalmente alagadas (DE ALMEIDA et al., 2015). E também, de acordo com Filho et al., (2012) de todas as regiões do Pantanal a regiões norte houve o menor decréscimo na vegetação arbóreo-arbustiva.

O maior desvio padrão do NDVI nas latitudes referentes ao Cerrado (15° a 16,1°), pode estar relacionado ao desmatamento e a conversão da cobertura vegetal remanescente em pastagens, visto que Mato Grosso tem uma das maiores taxas de desmatamento do Brasil (SOARES-FILHO et al., 2006). Conforme o estudo de Richards & Leah VanWey, (2015), que analisou entre 2001 a 2012, a distribuição do desmatamento, a cobertura florestal remanescente e os estoques de carbono remanescentes e sua relação com o tamanho das propriedades, com base nos dados do Cadastro Ambiental de Propriedades Rurais do Mato Grosso (CAR), projeto *Global Forest Cover* (GFC) entre outros, mais de 83000 km² de florestas foram perdidas em Mato Grosso, e desses 20006 km² ocorreram no bioma Cerrado, que de acordo com o estudo as pequenas propriedade e assentamentos tiveram um papel significativo, entretanto as média e grande propriedades têm sido consistentemente responsáveis pela maioria da perda de florestas do estado (RICHARDS & LEAH VANWEY., 2015).

4.4 PERFIL DA VARIABILIDADE ESPAÇO TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO E ÍNDICE DE VEGETAÇÃO POR ESTAÇÃO

Em geral, os perfis do gradiente de precipitação acumulada anual (figura 14a), e da média anual de NDVI (figura 14b), analisado para a estação chuvosa, mantiveram semelhantes durante os anos de 2007 a 2017, diferindo-se apenas na intensidade a cada ano. A invariabilidade no perfil do NDVI pode significar que não houve grandes

mudanças na distribuição da densidade de árvores ou na cobertura de superfície ao longo do transecto, devido a mudanças no padrão da distribuição da precipitação, que por sua vez também se manteve constante no período de 10 anos.

Nos anos 2010 e 2017 a precipitação acumulada anual foi, respectivamente $1127,1 \pm 232,6$ e $1127,1 \pm 232,6$ ou seja, abaixo de 1320 mm (figura 14a), e foram registrados também nestes anos, os índices de vegetação (NDVI médio anual) abaixo de 0,7 (figura 14b). Já, nos anos de 2007, 2011 e 2016 precipitação acumulada anual foi, respectivamente $1337,7 \pm 232,6$; $1526,3 \pm 121,1$ e $1321,5 \pm 179,0$ isto é, acima de 1320 mm (figura 14a), mas nestes anos os índices de vegetação (NDVI médio) foram superiores a 0,7 (figura 14b). Portanto, a precipitação destes anos mencionados anteriormente, está diretamente relacionada a aumentos e decréscimos do vigor vegetativo ao longo da latitude analisada. Logo, o padrão da precipitação local é uma das condições ambientais que também definem um gradiente de densidade vegetal, forma de crescimento, estrutura vertical e biomassa (RIBEIRO & WALTER, 2008).

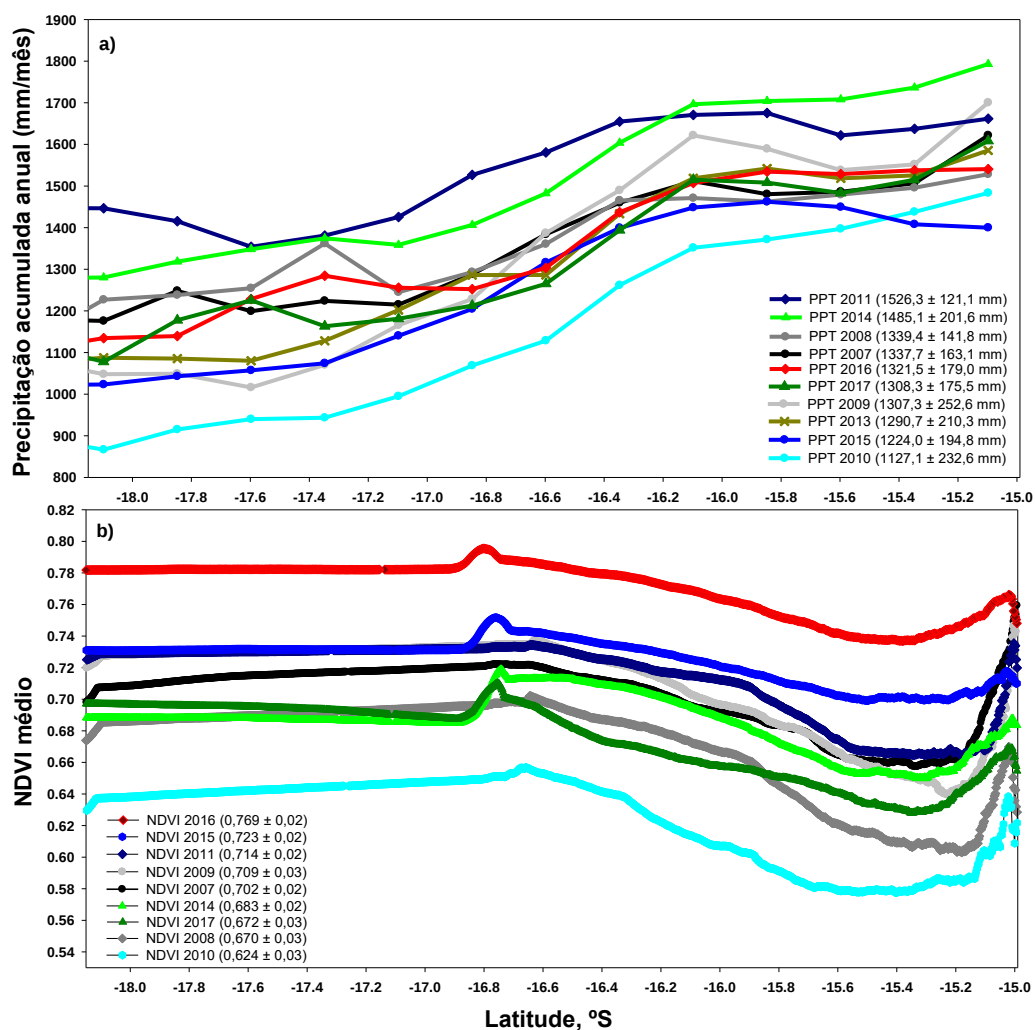


Figura 14: Série espacial de precipitação acumulada anual e média do NDVI ao longo das latitudes, compreendida entre as longitudes 54° e 57° , selecionadas para o período chuvoso. a) Precipitação acumulada anual (Resolução espacial $0,25^{\circ}$ ao longo da latitude) e Média do NDVI (linha cor preta, Resolução espacial $0,0027^{\circ}$ ao longo da latitude) por latitude. O eixo x representa as latitudes analisadas e linhas em cores representando cada ano no período de 1994 a 2017.

Os índices de vegetação de 2009 ($0,709 \pm 0,03$) e de 2015 ($0,723 \pm 0,02$) foram maiores em comparação com outros anos (figura 14b), mas estes anos apresentaram intensidades precipitadas inferiores a 1300 mm (respectivamente, $1307,3 \pm 121,1$ mm e $1224,0 \pm 194,8$) (figura 14a), assim possivelmente o NDVI destes anos foram afetados positivamente pelos anos anteriores de precipitação acima de 1300 mm, como os de 2008 ($1339,4 \pm 141,8$ mm) e 2014 ($1485,1 \pm 201,6$ mm). De acordo com estes resultados, pode-se considerar que essas vegetações tende a conservar suas propriedades, mesmo na ausência do estímulo que as gerou, isto é, de acordo com Beurs, K. M. & Henebry, G. M, (2010), as vegetações exibem histerese, ou seja, existe

a tendência de um sistema preservar suas propriedades na ausência de um estímulo que a gerou. Deste modo, a cobertura vegetal produzida por um cenário de chuvas na estação úmida alteraria o sistema, o que por sua vez, afetaria a cobertura vegetal do próximo ano (SCALON et al., 2002).

Em contraste, Goward & Prince, (1995) sugerem que há alguma "memória" no sistema a partir de anos anteriores, de tal forma que a resposta NDVI de um determinado ano é influenciada pela precipitação no ano anterior. Similarmente, foi utilizado por Ogle et al. (2015) em seu estudo o conceito de “memória exógena” para referir-se aos efeitos de fatores externos anteriores, com ambientais e abióticos, no estado do sistema ecológico. Essa abordagem para a compreensão de processos ecológicos encontra-se atualmente em desenvolvimento na ecologia (OGLE et al., 2015), como em outras áreas de pesquisa (LO & FAMIGLIETTI, 2010), dessa forma o conhecimento da dinâmica fenológica desses sistemas dinâmicos complexos é ainda insipiente.

Além disso, ocorreram anos que a precipitação do ano anterior influenciou o índice de vegetação do ano seguinte, proporcionalmente de acordo com a intensidade precipitada. Por exemplo, os índices de vegetação de 2011 ($0,714 \pm 0,02$) e de 2014 ($0,714 \pm 0,02$) foram menores em comparação com outros anos, mas estes anos apresentaram as maiores intensidades precipitadas (respectivamente, $1526,3 \pm 121,1$ mm e $1485 \pm 201,6$) (figura 14a), possivelmente afetados negativamente pelos anos anteriores de 2010 ($1127,1 \pm 232,6$ mm) e 2013 ($1290,7 \pm 210,3$ mm) de menor precipitação. Com precipitação abaixo de 1300 mm, a área de vegetação em potencial pode ser limitada pela chuva disponível e conseqüentemente, ocorrer uma menor dispersão de sementes, menor crescimento de biomassa afetando o potencial crescimento da vegetação do ano seguinte (ZHANG et al., 2008). Além de uma precipitação abaixo de um certo limite típico, Dalmolin et al. (2014) aponta que uma estação seca mais longa levaria a uma emergência mais tardia das folhas e uma abscisão mais precoce para determinadas espécies do Cerrado.

Observa-se na figura 15b, uma clara distinção na ocorrência de menor variabilidade índice de vegetação (NDVI médio anual) entre as regiões compreendidas entre as latitudes 15° a $16,1^\circ$ (Cerrado) e a de maiores valores de NDVI nas $16,5^\circ$ a

18° (norte do Pantanal), além disso, esse padrão também foi observado anteriormente nas figuras 13 e 14b e em todo período analisado (2007-2017). Dessa forma, nota-se que a forte relação entre o verde e a precipitação depende também da água total disponível para a vegetação no início e no final da estação seca (PENATTI et al., 2015). Como concluiu Haase, (1999), a falta de água durante a seca é o que mais afeta a produtividade, especialmente em solos arenosos, menos capazes de reter umidade após a estação chuvosa (DE ALMEIDA et al., 2015).

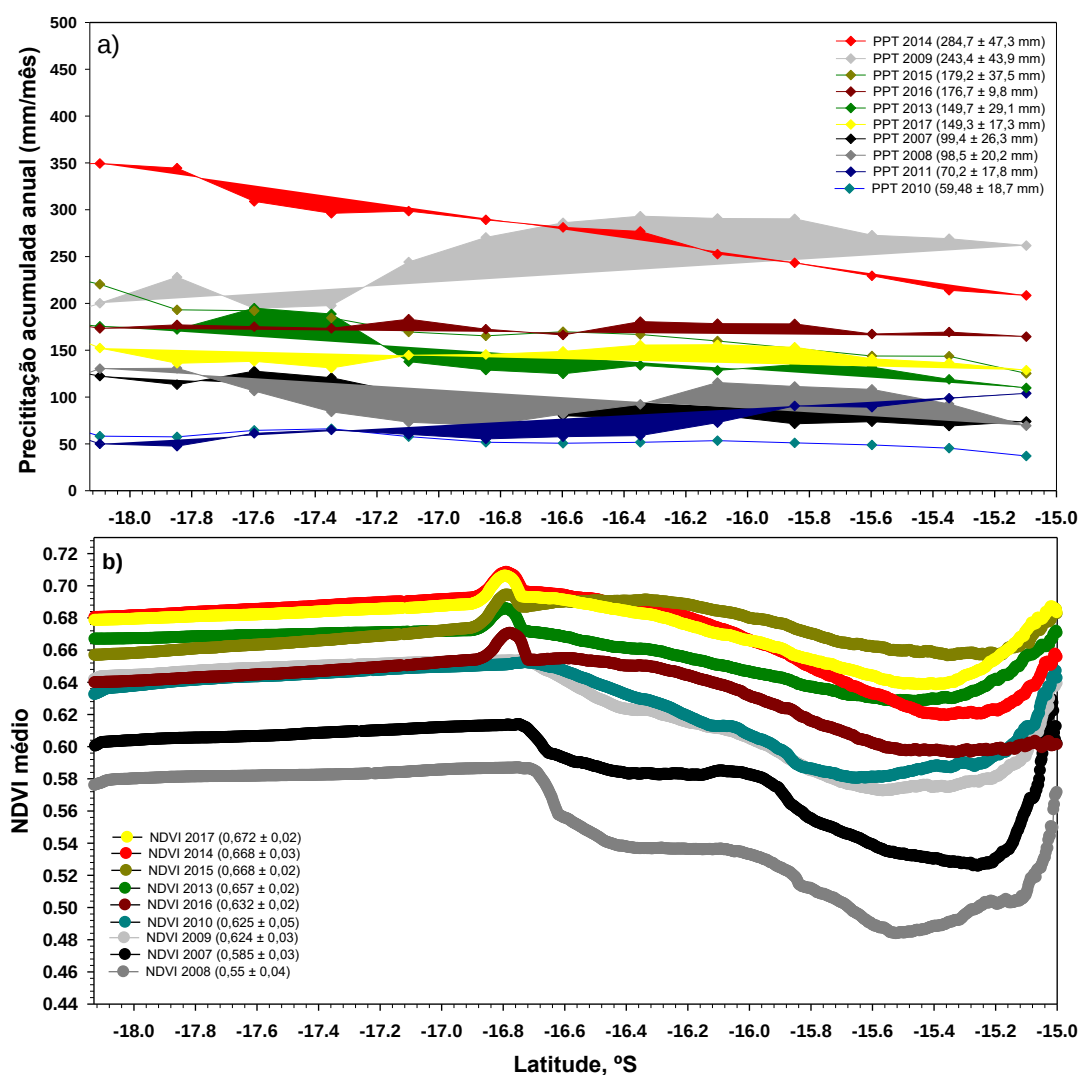


Figura 15: Série espacial de precipitação acumulada anual e média do NDVI ao longo das latitudes, compreendida entre as longitudes 54° e 57°, selecionados para o período seco. a) Precipitação acumulada anual (Resolução espacial 0,25° ao longo da latitude) e Média do NDVI (linha cor preta, Resolução espacial 0,0027° ao longo da latitude) por latitude. O eixo x representa as latitudes analisadas e linhas em cores representando cada ano no período de 1994 a 2017.

Ocorreram também as maiores amplitudes de índice de vegetação nos anos de 2007 e 2008 (figura 15b), respectivamente as amplitudes foram: 0,178 e 0,235 (uma

diferença entre máximo e mínimo ao longo da latitude, respectivamente de 28% e 32,7%). Em contraste, estes anos foram de precipitação acumulada anual abaixo de 100 mm, na estação seca, sendo eles, 2007 ($59,5 \pm 18,7$ mm) e 2008 ($70,2 \pm 17,9$ mm). Além disso, estes e menores e maiores índices NDVI ocorreram em todo período analisado (2007-2017), respectivamente entre as regiões compreendidas entre as latitudes 15° a $16,1^\circ$ (Cerrado) e a de maiores valores de NDVI nas $16,5^\circ$ a 18° (norte do Pantanal).

Entretanto, as menores amplitudes de índice de vegetação nos anos de 2016 e, 2017 (figura 15b), respectivamente foram: 0,13 e 0,09 (uma diferença entre máximo e mínimo respectivamente de 19.4% e 12.5%). Além disso, estes anos de 2016 e 2017 foram de precipitação acumulada anual acima de 100 mm, na estação seca, respectivamente $176.7 \pm 9,8$ mm e $149,3 \pm 17,3$ mm. De acordo com os resultados de Zhang et al., (2006), que comparou o tempo de aumento do verde (*greenness*) do MODIS contra o início da estação chuvosa estimada pelo TRMM para regiões áridas e semiáridas em escalas globais, observou uma forte dependência da fenologia nos regimes de precipitação nesses domínios climáticos.

Em geral, na região de latitude 15° a $16,1^\circ$ (Cerrado, longitudes 54° e 57°) a vegetação nativa dominante é a savana densa (cerrado), savana aberta (campo cerrado), e grandes áreas de pastagens e plantações (SILVA, J. F. et al., 2006). Enquanto que, na região $16,5^\circ$ a 18° (norte do Pantanal), as planícies mal drenadas dominam a paisagem (70 a 250 m), com savanas inundadas como a vegetação dominante, embora em algumas áreas elas formem mosaicos com florestas abertas. Esta unidade difere completamente das demais, em termos de solos, vegetação e no funcionamento do ecossistema. A sazonalidade da água é muito intensa, com grandes áreas sendo inundadas durante a estação chuvosa e tornando-se muito seco durante a estação seca (SILVA, J. F. et al., 2006).

Portanto, a maior diferença na intensidade e na variabilidade do NDVI destas regiões, pode estar relacionada a estratégias do uso da água, ou seja, as gramíneas como os da região de Cerrado, são consideradas exploradoras intensivas, enquanto as árvores e arbustos de florestas do Pantanal, são extensos exploradores (BURGESS, 1995). Assim, Com sistemas radiculares densos e rasos, as gramíneas fazem uso de

água provisória disponível na camada superior do solo, enquanto as árvores, que possuem sistemas radiculares que adentram nas camadas superficiais e profundas do solo, têm um suprimento mais constante de água no solo (SCALON et al., 2002).

De acordo com Biudes et al. (2015) em uma região de pastagem, as variações no conteúdo de água no solo foram altamente correlacionadas com as variações na precipitação, mas em locais do Pantanal tiveram a maior umidade média do solo de todos os outros locais. Visto que, no Pantanal mudanças no conteúdo de água no solo são mais afetadas pela dinâmica sazonal de inundação do que a precipitação (ARIEIRA & NUNES DA CUNHA, 2006; BIUDES et al., 2009, 2014a).

4.5 PADRÃO FENOLÓGICO DA VEGETAÇÃO EM ÁREAS DE CERRADO E PANTANAL

4.5.1 Variabilidade interanual NDVI

A variabilidade interanual representada pela série temporal de NDVI das áreas analisadas (BPE, CAM, FEX e FMI) (figura 16), correspondeu a um valor máximo de 0,83 em 2016, um mínimo de 0,629 em 1999 e um valor médio 0,724 em 1994. Foram 12 anos que o NDVI foi menor que a média e 9 anos acima da média, na área da BPE (figura 16a). Na área de CAM (figura 16b) o valor máximo de NDVI foi de 0,824 em 2016, o mínimo de 0,597 em 2010 e um valor médio 0,700 em 2008. Foram 10 anos que o NDVI foi menor (ou igual) que a média e 12 anos acima da média. Em FEX (figura 16c) o valor máximo de NDVI foi de 0,621 em 2009, o mínimo de 0,398 em 1995 e um valor médio 0,491 em 2001. Foram 12 anos que o NDVI foi menor (ou igual) que a média e 9 anos acima da média. Finalmente, a área de MIR (figura 16d) o valor máximo de NDVI foi de 0,539 em 2014, o mínimo de 0,248 em 2003 e um valor médio 0,491 em 1998. Foram 12 anos que o NDVI foi menor (ou igual) que a média e 9 anos acima da média.

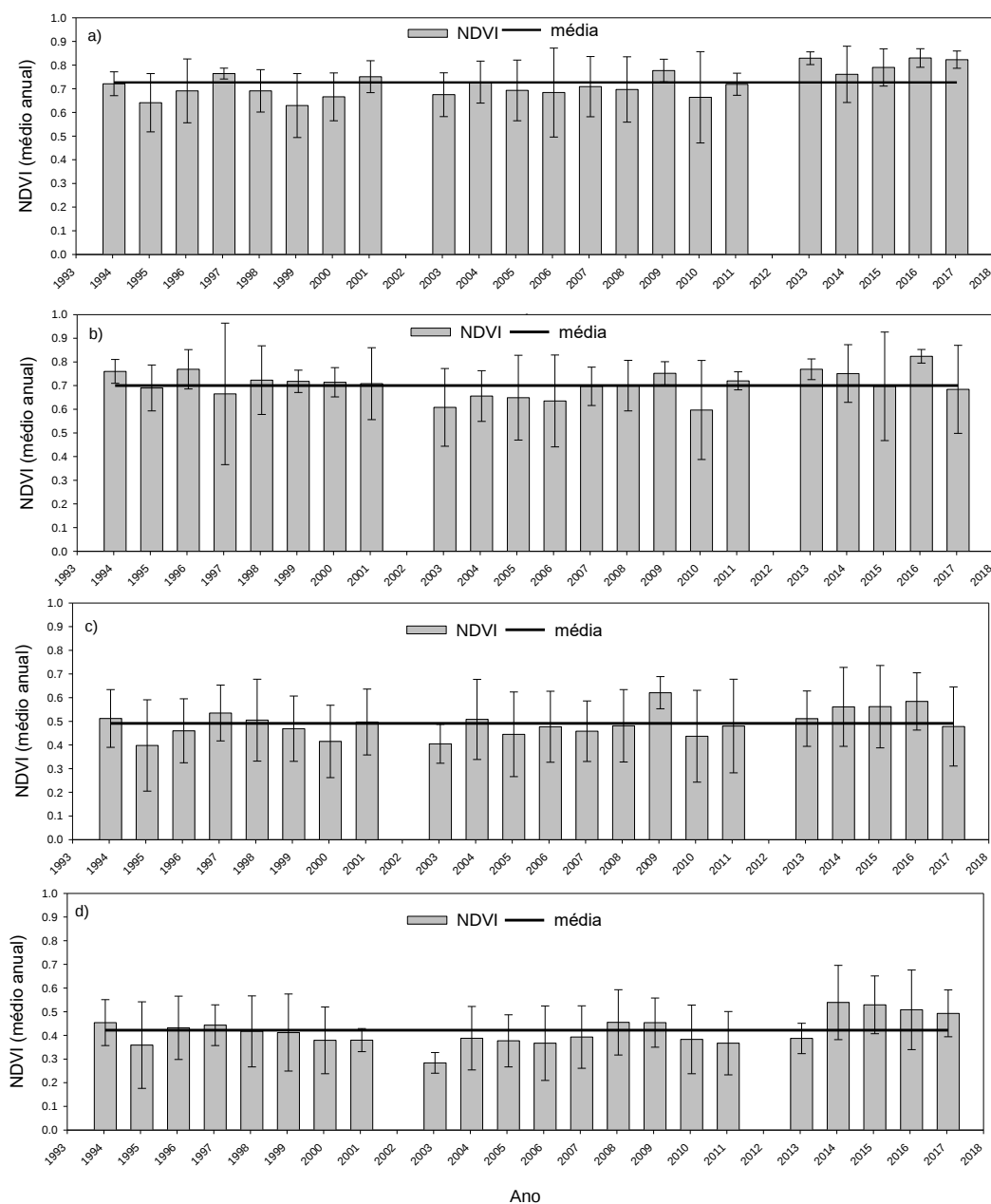


Figura 16: Média anual (cor cinza) e média do período (linha cor preta) e desvio padrão do NDVI (1994-2017) Para os locais de estudo: a) Baía das pedras (BPE), b) Cambarazal (CAM), c) Fazenda Experimental (FEX) e d) Fazenda Miranda (FMI), na região transição Cerrado-Pantanal sul Mato-Grossense.

Aparentemente, a média anual de NDVI das regiões (BPE, CAM, FEX e FMI) (figura 16) tiveram variações aleatórias em anos coincidentes e com predominância de índice de Vegetação abaixo da média ao longo do período do estudo. Provavelmente, esta variabilidade interanual está relacionada com fenômenos climatológicos, como à variabilidade interanual das chuvas (SCALON et al., 2002), uma vez que as tendências sazonais na precipitação, são das mais importantes para a tendência sazonal do índice

de vegetação, sobretudo para as regiões Cerrado Mato-Grossense (BIUDES et al., 2015).

As regiões BPE e CAM mantiveram maior média anual de NDVI em relação as áreas FEX e FMI em todo período da série (1994-2017). Esse maior índice de vegetação ao longo do período de 1994 a 2017 em BPE e CAM, justifica-se pela presença florestas com vegetação mais densas (Santos et al., 2006) e de áreas inundadas de CAM que conserva a umidade do solo a maior parte do ano (SEIXAS, 2013). Já os menores índices de FEX e MIR estão relacionados a uma vegetação dominada por gramíneas nativas e não nativas e pelas espécies de árvores semidecíduas, e o solo em ambos os locais possui altas taxas de infiltração de água, mas limitada capacidade de retenção de água (DOMINGUES et al., 2013). Além do que, florestas sazonalmente inundadas do Pantanal tem umidade do solo em uma ampla superfície durante a estação seca, que atua para manter tanto a alta evaporação quanto a transpiração das espécies de árvores dominantes, *Vochysia divergens*, durante a estação seca (BIUDES et al., 2009; DALMAGRO et al., 2014).

A média (do período 1994 a 2017) do NDVI das regiões (BPE, CAM, FEX e FMI) encontrados neste estudo (respectivamente, ($\pm$ intervalo de confiança) $0.727 \pm 0,01$; $0,7 \pm 0,02$; $0,49 \pm 0,02$; $0,42 \pm 0,02$), foram similares as de Danelichen et al. (2016) (CAM 0.77 ± 0.02 ; FEX 0.43 ± 0.02), Seixas, (2013) (CAM $0,82 \pm 0,04$; Cerrado $0,58 \pm 0,09$) entre outros (ANGELINI et al., 2017, ANDRADE et al., 2012). A semelhança dos valores dos índices reforça a diferença característica da vegetação destes locais.

4.5.2 Variabilidade anual de NDVI

Observa-se na (figura 17) na média mensal de NDVI, os perfis fenológicos médios das regiões analisadas (BPE, CAM, FEX e FMI), uma tendência sazonal, isto é, todos os locais tiveram valores maiores de NDVI durante a estação chuvosa e menores na estação seca. De acordo com de Almeida et al., (2015), o ciclo sazonal da vegetação tem o mesmo padrão de variabilidade anual de precipitação no Pantanal e a rebrota e esverdeamento (*greenness*) coincide com o início das chuvas. Além disso, muitas das espécies de plantas lenhosas no Cerrado são perenes, com menos variações

sazonais que desenvolvem novas folhas no final da estação seca e atingem seu pico na estação úmida (RATANA et al., 2005; SCHWIEDER. M. et al., 2016).

Entretanto, a sazonalidade foi mais evidente em FEX e FMI (figura 17c e 17d) que diferiram em forma e amplitude de BPE e CAM (figura 17a e 17b). As maiores médias mensais de NDVI em CAM e BPE ocorreram de Outubro a junho, com decréscimo a partir de julho e mínimo em setembro (figura 17a e 17b). Em FEX e FMI as maiores médias mensais de NDVI, ocorreram de novembro a junho, com decréscimo a partir de maio e mínimo de junho a outubro (figura 17c e 17d). Diferentemente da região de Cerrado (FEX e FMI) cuja sazonalidade é principalmente controlada pela sazonalidade de precipitação, o ciclo fenológico das regiões do Pantanal (BPE e CAM) pode ser explicado por dois fatores conjuntos do padrão sazonal de precipitação e pelo Padrão sazonal de inundações (DE ALMEIDA et al., 2015).

De acordo com Schwieder. M. et al. (2016) as fisionomias da vegetação podem ser distinguidas, baseando-se no valor base, que foi definido como a média dos mínimos sazonais (JÖNSSON, P., & EKLUNDH. L, 2002), observados na figura 17a e 17b no mês de setembro e na figura 17c e 17d em agosto e setembro, que associou a tendência de mínimos geralmente mais altos com fisionomias de vegetação mais densas.

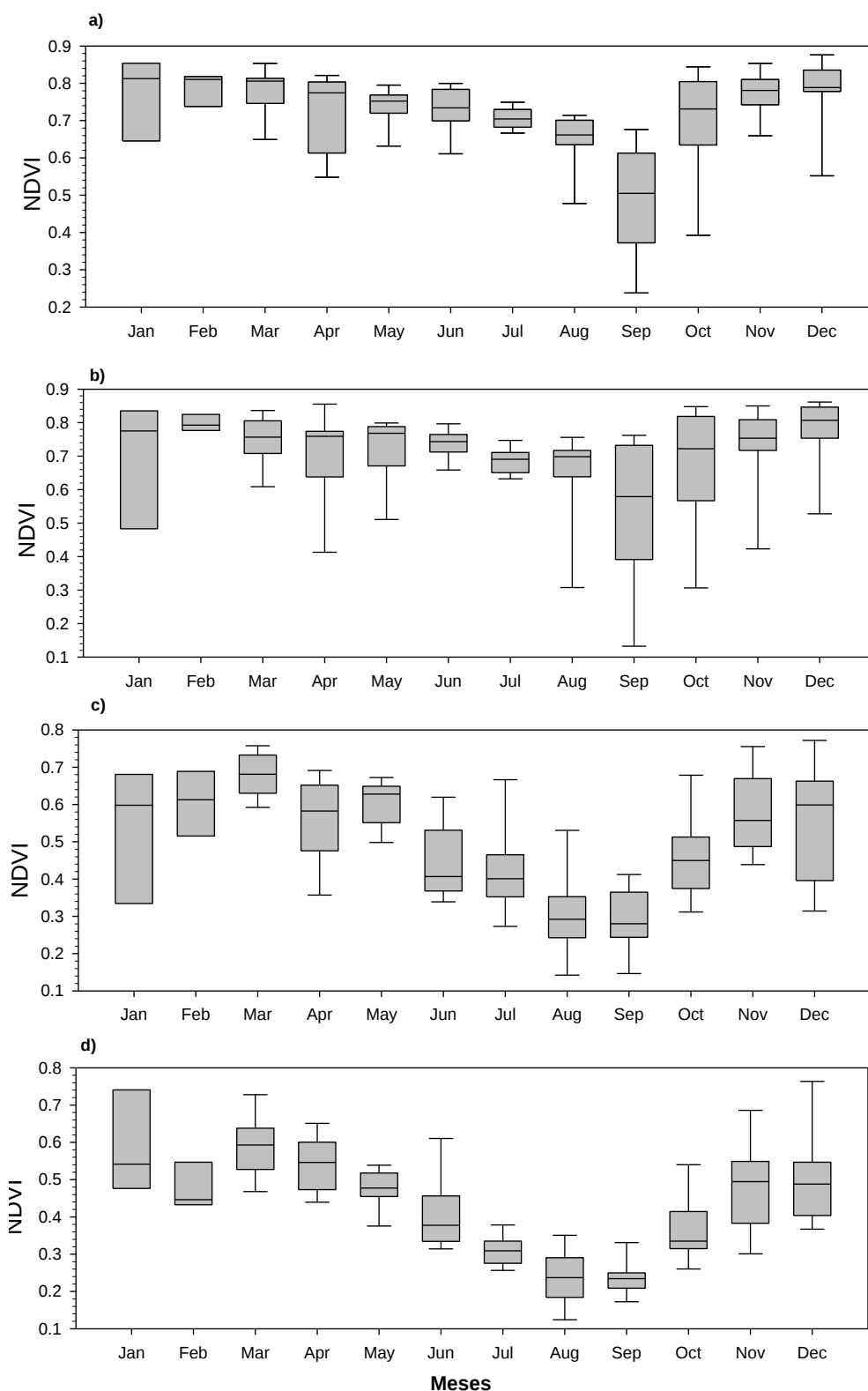


Figura 17: Variabilidade mensal do NDVI analisados nos gráficos de caixa (dados de NDVI de 1994-2017) com a mediana como marca central (em Preto) e quartis inferior de 25% e superior de 75% (caixa cinza). Baía das pedras (BPE), Cambarazal (CAM), Fazenda Experimental (FEX) e Fazenda Miranda (FMI), na região sul Mato-grossense.

Os picos dos perfis fenológicos representados pelas maiores médias mensais de BPE e CAM (respectivamente, $0,783 \pm 0,09$; $0,799 \pm 0,09$) ocorrem em fevereiro, geralmente cerca de um mês antes as de FEX e MIR (março) (respectivamente, $0,678 \pm 0,07$; $0,591 \pm 0,05$). Isto é, fisionomias mais densas (BPE e CAM) atingiram seu pico mais cedo do que as esparsas (FEX e MIR) e não tiveram diferença significativa entre os meses devido a menor variação fenológica associada maiores graus de vegetação sempre verde (DANELICHEN, 2016; SCHWIEDER. M. et al 2016).

As condições ambientais adversas levaram a uma grande diversidade e uma variedade de estratégias de adaptação fenológica (FERREIRA & HUETE, 2004). De acordo com Seixas, (2013) o aumento do NDVI no Cambarazal até junho pode ser explicado pela presença de áreas inundadas, o que mantém a maior umidade. Além disso, Danelichen, (2015) observou que os maiores índices de NDVI em áreas mais vegetadas, como os de floresta, apontam para condições de menos suscetíveis ao período seco.

4.6 FASES DE TRANSIÇÃO DO CICLO FENOLÓGICO DA VEGETAÇÃO

Observa-se (figura 18) em geral, que os pontos de mudanças na curvatura para cada série anual de NDVI, correspondem as datas de transição do ciclo fenológico. Nota-se ainda, que as transições indicadas pelos pontos de mudança nas series (senescência, *Greenup*, dormência e maturidade) variaram em um intervalo de datas, entretanto em média seguiram padrões fenológicos semelhantes (ou pela média anual, linha preta da figura 18).

Estudos ecológicos (DALMOLIN et al., 2014; FONTANA et al., 2015; SCHWIEDER. M. et al., 2016) demonstraram que a fenologia da vegetação tende a seguir padrões temporais relativamente bem definidos. Este padrão reflete a temperatura cumulativa (ou mais simplesmente o número de dias) desde o início do crescimento (ZHANG et al., 2008). Este desenvolvimento vegetativo é determinado pelo incremento continuo da biomassa verde até alcançar uma quantidade máxima (FONTANA et al., 2015). Por exemplo, na vegetação decídua e em muitas culturas, a emergência das folhas tende a ser seguida por um período de crescimento rápido,

seguido por um período relativamente estável de máxima área foliar (DALMOLIN et al., 2014; SCHWIEDER. M. et al., 2016). Dalmolin et al. (2014) observou que expansão total da folha em espécies de Cerrado campo sujo, foi cerca de 2 meses e as taxas de crescimento foram similares.

Pode-se identificar que os perfis fenológicos anuais de BPE e CAM (figura 18a e 18b e tabela 6), tendências de um decréscimo gradual entre os dias 120 a 225 (abril-agosto, aproximadamente) e declínio mais intenso (senescência) entre as datas (Dia do ano) 225 e 258 sendo este a fase dormência, com a vegetação iniciando aumento do verde (*greenup*) na composição do ciclo seguinte (Dia 265), aumentando até o dia 47 (maturidade), finalmente completando o ciclo da vegetação, como indicado pela variação nos índices NDVI. De acordo com de Almeida et al., (2015), em geral as variações no Pantanal são graduais e ocorrem em um único ciclo, assim pode-se justificar que o perfil do NDVI como representativo um do verde acumulado ao longo do ciclo hidrológico. Este padrão temporal pode ser explicado por dois fatores conjuntos, a da variação anual do verde da vegetação e dos períodos de inundação sazonal (DE ALMEIDA et al., 2015). Segundo Padovani (2010) de fevereiro a maio, quando a área inundada é máxima, o verde diminui devido a uma redução na área foliar total causada pelas inundações, não sendo relacionada à diminuição da taxa fotossintética (DE ALMEIDA et al., 2015). A variabilidade interanual do ciclo pode estar relacionada a mudança da área inundada varia acentuadamente de ano para ano e pode chegar a 80% da área total do Pantanal (HAMILTON et al., 1996).

Além disso, de acordo com Sanches et al. (2011) vegetação em CAM possui monodominância de *V. divergens*, que, embora seja sempre considerada verde (POTT & POTT, 1994) e retém suas folhas durante o período da cheia (NUNES DA CUNHA & JUNK, 2004), tende a perder folhas mais velhas durante a estação seca (DALMAGRO et al., 2013; BIUDES et al., 2014; MACHADO et al., 2015b). O ciclo fenológico observado na figura 18, estão em concordância com os de Dalmolin et al. (2014) que verificou que abscisão de folhas para *V. divergens* foi maior durante a transição da estação seca-úmida até fevereiro, diminuiu ligeiramente em março e abril, e atingiu um pico em maio de 2011.

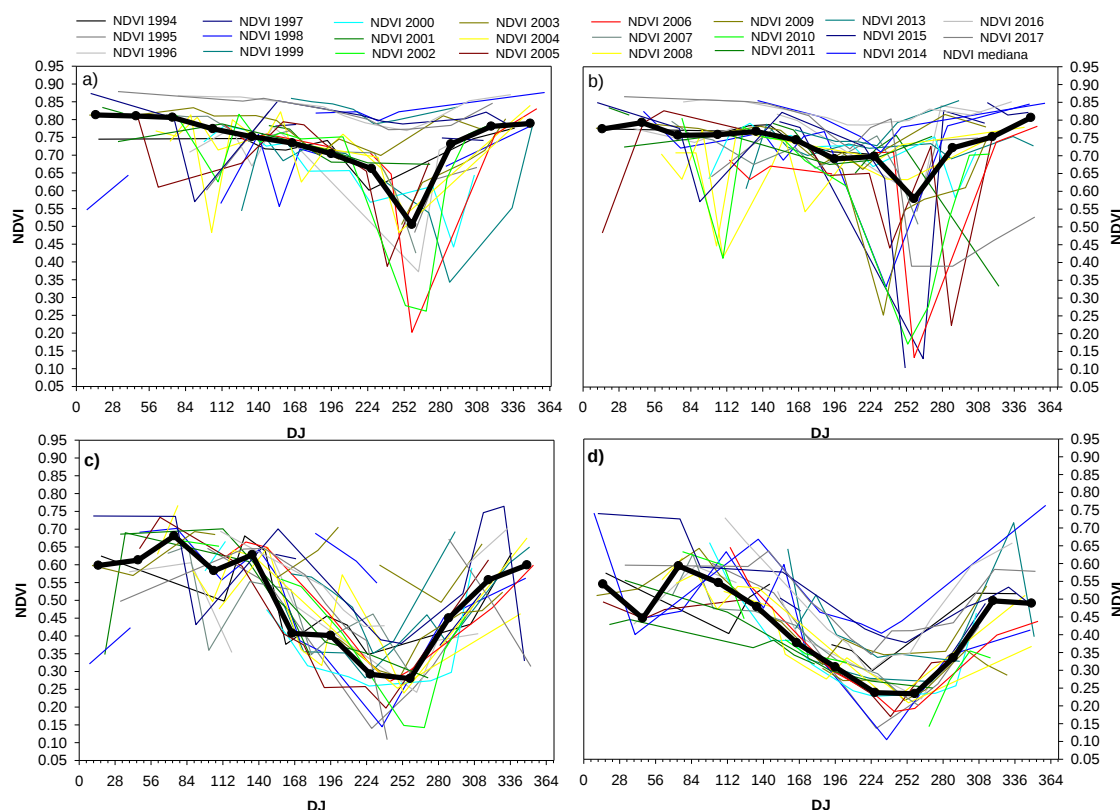


Figura 18: Perfil fenológico da vegetação representada pelas series dos índices de vegetação de diferença normalizada (NDVI), em quatro áreas de estudo: a) Baía das pedras (BPE), b) Cambarazal (CAM), c) Fazenda Experimental (FEX) e d) Fazenda Miranda (FMI). O eixo x representa a data em dia do ano (DJ). O período considerado nas análises se estendeu de 1994 a 2017 (linhas em cores representando cada ano e linha em preto a média).

Os perfis fenológicos de FEX e FMI (figura 18c e 18d e tabela 6) apresentaram uma variação sinusoidal e intenso um declínio (senescência) a partir do dia 106 (abril) aproximadamente, até a fase de menor NDVI (Dormência) entre 226 a 258, com a vegetação iniciando aumento do verde (*greenup*) na formação do ciclo seguinte (Dia 265), aumentando até o dia 80 do ano posterior (maturidade), por fim completando o ciclo da vegetação.

Essa senescência precoce, mais severa e com período de dormência mais longo em FEX e FMI, comparada com a de BPE e CAM (figura 18a e 18b), pode ser um artifício capaz de maximizar o ganho de carbono aumentando as taxas de assimilação de carbono quando as primeiras chuvas iniciarem (FRANCO et al. 2005; ROSSATTO et al. 2009). E também pela substituição da vegetação nativa por gramíneas forrageiras (BIUDES et al., 2015; DANELICHEN et al., 2016), que são menos adaptadas à variação intrínseca da disponibilidade de água no solo.

Essas observações revelaram os padrões esperados, ao mesmo tempo em que se alinham com os achados de outros estudos utilizando dados com resolução espacial mais grosseira (FERREIRA & HUETE, 2004; RATANA et al., 2005). Além disso, o parâmetro de início da temporada ou *greenup* obtido por Schwieder. M. et al. (2016), para as principais fisionomias do cerrado, como campos limpos, campos sujos, campo cerrado, cerrado sensu stricto (savana arborizada com cerrado), apresentou a mediana em torno do dia 271 (28 de setembro de 2009).

Na Tabela 6 observa-se os parâmetros sazonais (*Greenup*, Mat, Sen, Dorm, Comp e Ampl), que possibilita comparar as diferenças dos parâmetros dos ciclos fenológicos entre os locais. Os parâmetros (*Greenup*, Mat, Sen, Dorm e Ampl) também foram utilizados nas taxas de aumento (TG) e diminuição (TS) (JÖNSSON, P., & EKLUNDH, L. 2002). Em BPE e CAM observa-se pela faixa interquartil (mediana) da figura 19 e pela média da tabela 6, que as taxas de *greenup* (TG) foram maiores que as taxas de senescência (TS), o que pode estar relacionado a menor amplitude de NDVI em fisionomias densas como as de BPE e CAM (tabela 6), enfatizando o efeito tampão da vegetação lenhosa à sazonalidade climática (RATANA et al., 2005). Já o efeito contrário foi observado em FEX e FMI, as taxas de *greenup* (TG) foram menores que as taxas de senescência (TS), que indica a rapidez da diminuição do verde é maior que a do aumento do verde, e além disso possui maior amplitude (tabela 6) ao contrário de BPE e CAM, assim como mencionado anteriormente (figura 18) a vegetação de FEX e FMI, que são menos adaptadas à variação intrínseca da disponibilidade de água no solo (BIUDES et al., 2015).

Tabela 4: Estimativas para métricas da série temporal média de NDVI (1994-2017), em quatro áreas de estudo: a) Baía das pedras (BPE), b) Cambarazal (CAM), c) Fazenda Experimental (FEX) e d) Fazenda Miranda (FMI). *Greenup*, início é o começo da estação de crescimento, Ampl. É a amplitude, Dorm. São os meses do valor mínimo de NDVI, Mat. São os meses do valor máximo de NDVI, Comp. é a duração da estação (meses), TG. é a taxa de aumento do verde (taxa de *greenup*), TS. é a taxa de decréscimo (taxa de senescência). Entre parênteses a quinzena (primeira ou segunda no mês).

Local	<i>Greenup</i>	Mat.	Sen.	Dorm.	Comp.	Ampl.	TG.	TS.
BPE	set (2)	fev(1) - mar(2)	abr (2)	Set	11	0.308	0.0462	0.0308
CAM	set (2)	fev(1) - mar(2)	abr (2)	Set	11	0.228	0.0342	0.0228
FEX	set (2)	mar	abr (2)	ago (1) - set (2)	10	0.401	0.0437	0.0602
FMI	set (2)	mar	abr (2)	ago (1) - set (2)	10	0.359	0.0392	0.0539

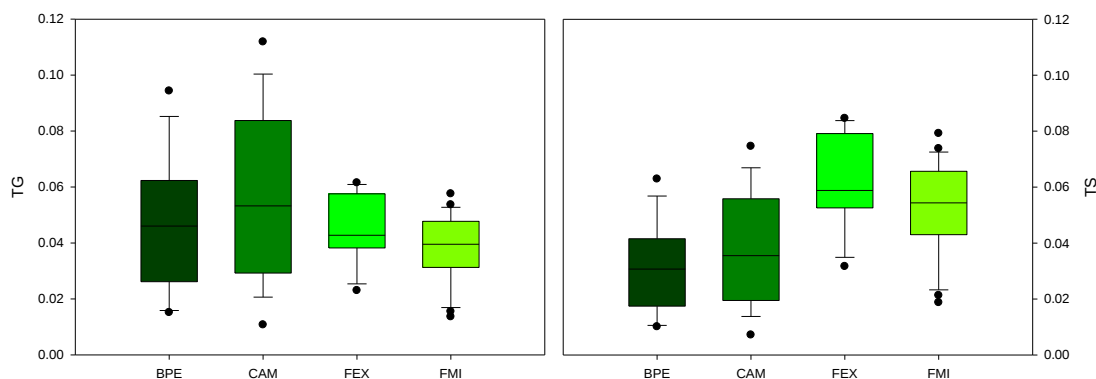


Figura 19: Gráficos de caixa (dados de NDVI de 1994-2017) dos parâmetros a) Taxa de *Greenup* (TG) e b) taxa de senescência (TS), com a mediana como marca central (em Preto) e quartis inferior de 25% e superior de 75% (caixa cinza), dos parâmetros taxa de aumento e decréscimo dos locais Baía das pedras (BPE), Cambarazal (CAM), Fazenda Experimental (EXP) e Fazenda Miranda (MIR).

Segundo Dalmolin et al. (2014) em regiões de Cerrado a abscisão foliar no início da estação seca seja uma adaptação contra a eventual perda de água que se dá quando a umidade do solo se torna restritivo e a demanda evaporativa aumenta (JACKSON et al. 1999; BUCCI et al. 2004). Essa adequação propicia que os galhos sem folhas sejam reidratados por meio da água obtida de reservas internas de água e mais fundo no perfil do solo (ROSSATTO et al., 2012).

Os resultados observados nas estimativas fenológicas (figura 18, 19 e tabela 6) de acordo Jönsson, P., & Eklundh, L. (2002) e Schwieder. M. et al. (2016) pode auxiliar como atributos e base para a distinção das tipologias da vegetação desses locais, permitindo compreender as diferenças nos ciclos sazonais entre os locais, sobretudo nas regiões do Pantanal onde a água é menos limitante (SANCHES et al. 2011) apresentam menores taxas de *greenup* e senescência.

4.7 MAPEAMENTO DO CICLO FENOLÓGICO

Em geral, o padrão sazonal das áreas do mapa observada na figura 20, seguiu o comportamento local ou o padrão fenológico dos locais BPE, CAM, FEX e FMI das figuras 17 e 18. Como discutido anteriormente, o perfil fenológico do NDVI, está relacionado ao verde acumulado ao longo do ano na estação chuvosa (outubro a março), a senescência tardia e mais generalizada de algumas áreas associada ao clímax da estação seca (agosto-setembro) e a senescência precoce (junho a agosto) associada

a regiões de vegetação esparsas e solos arenosos (DE ALMEIDA et al., 2015; PENATTI et al., 2015).

Entretanto, analisando-se a oscilação do NDVI entre os meses e por regiões, observa-se um decréscimo gradual entre os meses de abril a julho, um repentino e mais intenso declínio do NDVI (senescência) em agosto, principalmente nas regiões noroeste e nordeste (figura 20), logo depois ocorrendo em setembro a dormência, cobrindo em quase toda a extensão sul do mapa. Em seguida, ocorreu um rápido aumento, desde o início do verde (*greenup*, setembro-outubro) até o máximo de NDVI (maturidade, dezembro-março), que progrediu notadamente na direção norte-sul (figura 20).

A rápida expansão do verde na fase de transição *greenup* observada de norte a sul na transição do Cerrado-Pantanal, pode estar relacionada a maior expansão da biomassa da vegetação gramínea e arbustiva em resposta às chuvas, em particular nos ecossistemas das savanas (SCALON et al., 2002). Uma vez que, o aumento do verde de curto prazo (*greening*) das árvores é restrito em termos de extensão pela biomassa lenhosa mais acima do solo. Além disso, as vias fotossintéticas associadas a árvores e gramíneas diferem de tal forma que as gramíneas, em geral, são capazes de sintetizar mais carbono por unidade de perda de água via transpiração do que as árvores (SCALON et al., 2002).

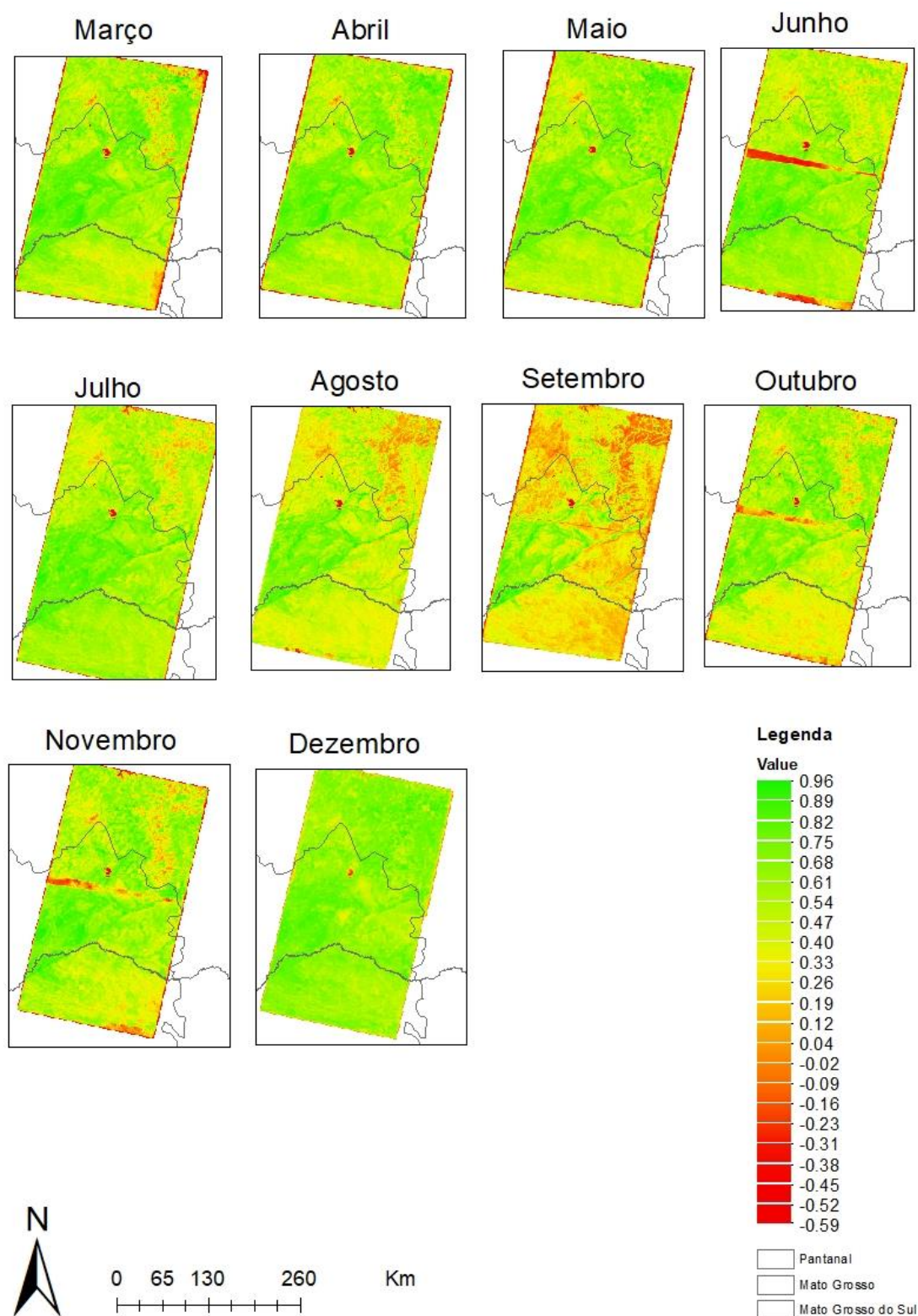


Figura 20: Distribuição espacial da variabilidade anual para a média mensal do NDVI na região sul Mato-grossense (2007-2017).

Contudo, as áreas agrícolas como a nordeste do mapa (cidades: Primavera do leste, Campo verde) exibem a primeira senescência e maturidade de março a maio e

em seguida segue a tendência de senescência junho e dormência em setembro e assim como as demais áreas, e o *greenup* e maturidade ocorreu de outubro a dezembro. Portanto, o distinto perfil fenológico em áreas agrícolas, pode estar relacionado a práticas de semeadura e colheita, e como resultado, o tempo exato da fenologia das culturas nessas áreas pode ser bastante variável e fortemente depende do tipo de cultura e do manejo (ZHANG et al., 2008). Especificamente, a estreito período de semeadura recomendada para cada região, que faz com que o ciclo da cultura seja semelhante nas regiões produtoras entre os anos (FONTANA et al., 2015)

Observa-se próximo a área central do mapa (figura 20), regiões continuamente verdes, de maior índice de vegetação e com tempo e intensidade da senescência diferente das demais áreas. Nesta região, conforme caracterizado por Corradini e Assine (2012), é compreendida por um megaleque fluvial o São Lourenço, descrito na bacia sedimentar do Pantanal (DE ALMEIDA et al., 2015), caracterizado por uma rede de drenagem complexa e sujeita a periódicas inundações (CORRADINI & ASSINE, 2012) e que influenciam a fenologia da vegetação (PENATTI & ALMEIDA, 2012).

Nestas regiões de planícies fluviais, as áreas arborizadas possuem maior índice de área foliar, vegetação mais densa e tem água disponível durante todo o ano (SILVA, J. F. et al., 2006), de acordo com de Almeida et al., (2015) a senescência tende a ser atrasada ou praticamente ausente. Outras evidências como as observadas por Sanches et al. (2011), Vourlitis, G. L. et al. (2011) e Dalmolin et al. (2014) corroboram com o distinto perfil fenológico dessas regiões, dado a menor variação sazonal na condutividade e evapotranspiração do dossel e as espécies arbóreas (*V. divergens*) do local possuem um sistema radicular que pode acessar reservas de águas profundas do solo, durante a estação seca.

A variabilidade espacial do NDVI em cada mês é indicativo que os padrões observados dependem fortemente da latitude, devido à forte dependência do gradiente de precipitação do estado de Mato Grosso (BIUDES et al., 2015). Em regiões áridas e semiáridas, a fenologia da vegetação depende fortemente das chuvas (ZHANG et al., 2006).

5. CONCLUSÃO

Foi possível monitorar a dinâmica da vegetação na transição dos biomas de Cerrado e Pantanal usando sensoriamento remoto. Os dados do satélite Landsat 5 e 8 para uma região sul de Mato Grosso apresentou características espaço temporais, geograficamente e ecologicamente consistentes com o comportamento da vegetação conhecido para esta região. Avaliou-se o perfil da variabilidade espaço temporal do índice de vegetação (NDVI médio) ao longo das latitudes, que possibilitou observar a heterogeneidade das vegetações que compreendem a transição da vegetação Cerrado-Pantanal. E também o perfil a variabilidade do NDVI em conjunto da precipitação relacionada ao longo de um gradiente climático regional. Além disso, a resposta NDVI de um determinado ano é influenciada pela precipitação no ano anterior.

Identificou-se o período de transição das fases do ciclo anual de fenologia da vegetação fenológica a partir da série temporal de índice de vegetação (NDVI), que possibilitou distinguir o perfil de cada região. Em particular, as estimativas do início do *greenup*, do início da maturidade e do início da dormência mostram fortes padrões espaço-temporais que também dependem do tipo de cobertura da superfície.

Análises de correlação forneceram uma melhor compreensão dos possíveis impactos das mudanças climáticas nos ecossistemas

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLER, Robert F.; HAKKARINEN, Ida M. Aircraft multifrequency passive microwave observations of light precipitation over the ocean. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 8, n. 2, p. 201-220, 1991.

ADEYEWA, Z. D.; NAKAMURA, K. Validation of TRMM Radar Rainfall Data over Major Climatic Regions in Africa. **Journal of Applied Meteorology**, 42 (2), p. 331 – 347, 2003.

Allen, R. G., Bastiaanssen, W., Waters, R.; Tasumi, M.; & Trezza, R. Surface energy balance algorithms for land (SEBAL). **Idaho implementation-Advanced training and users manual, version**, v. 1, p. 97, 2002.

ALHO, Cleber José Rodrigues. Biodiversity of the Pantanal: response to seasonal flooding regime and to environmental degradation. **Brazilian Journal of Biology**, v. 68, n. 4, p. 957-966, 2008.

ALVES, LINCOLN MUNIZ. Clima da região centro-oeste do Brasil. Tempo e Clima no Brasil. São Paulo: **Oficina de Textos**, p. 235, 2009.

Asner, G. P.; & Martin, R. E. Spectral and chemical analysis of tropical forests: Scaling from leaf to canopy levels. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 10, p. 3958-3970, 2008.

ARIEIRA, Julia; CUNHA, CN da. Fitossociologia de uma floresta inundável monodominante de *Vochysia divergens* Pohl (Vochysiaceae), no Pantanal Norte, MT, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 20, n. 3, p. 569-580, 2006.

BADHWAR, G. D. Automatic corn-soybean classification using landsat MSS data. I. Near-harvest crop proportion estimation. **Remote Sensing of Environment**, v. 14, n. 1-3, p. 15-29, 1984.

BASLER, David; KÖRNER, Christian. Photoperiod sensitivity of bud burst in 14 temperate forest tree species. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 165, p. 73-81, 2012.

BIUDES, M.S.; CAMPELO JÚNIOR, J.H.; NOGUEIRA, J.S.; SANCHES, L. Estimativa do balanço de energia em cambarazal e pastagem no norte do pantanal pelo método da razão de bowen. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.24, n.2, 135-143, 2009.

BIUDES, M.S.; NOGUEIRA, J.S.; DALMAGRO, H.J.; MACHADO, N.G.; DANELICHEN, V.H.M.; SOUZA, M.C. Mudança no microclima provocada pela conservação de uma floresta de cambará em pastagem no norte de Pantanal. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, v.10, n.1, p.61-68, 2012.

Biudes, M. S.; Machado, N. G.; de Moraes Danelichen, V. H.; Souza, M. C.; Vourlitis, G. L.; & de Souza Nogueira, J. Ground and remote sensing-based measurements of leaf area index in a transitional forest and seasonal flooded forest in Brazil. **International journal of biometeorology**, 58(6), 1181-1193. 2014.

Biudes, M. S.; Vourlitis, G. L.; Machado, N. G.; de Arruda, P. H. Z.; Neves, G. A. R.; de Almeida Lobo, F.; ... & de Souza Nogueira, J. Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 202, p. 112-124, 2015.

Bucci, S. J.; Goldstein, G.; Meinzer, F. C.; Franco, A. C.; Campanello, P.; Scholz, F. G. Mechanisms contributing to seasonal homeostasis of minimum leaf water potential and predawn disequilibrium between soil and plant water potential in Neotropical savanna trees. **Trees**, v. 19, n. 3, p. 296-304, 2005.

BURGESS, Tony L. Desert grassland, mixed shrub savanna, shrub steppe, or semidesert scrub. **The desert grassland**, p. 31-67, 1995.

CASTRO, E. A.; AND J. B. K AUFFMAN. Ecosystem structure in the Brazilian Cerrado: A vegetation gradient of aboveground biomass, root mass and consumption by fire. **J. Trop. Ecol.** 14: 263 – 283. 1998.

Conservation International (2009) Monitoring alterations in vegetation cover and land use in the upper Paraguay river basin, Brazilian portion. Conservation International, Brasília.

CORRADINI, Fabrício Anibal; ASSINE, Mario Luis. Compartimentação geomorfológica e processos deposicionais no megaleque fluvial do rio São Lourenço, Pantanal mato-grossense. **Revista Brasileira de Geociências**, p. 20-33, 2012.

CUNHA, C.N.; JUNK, W.J. Year-to-year changes in water level drive the invasion of *Vochysia divergens* in Pantanal grasslands. **Applied Vegetation Science** 7: 103-110, 2004.

Chen, J.; Rao, Y.; Shen, M.; Wang, C.; Zhou, Y.; Ma, L.; Yang, X. A simple method for detecting phenological change from time series of vegetation index. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 54, n. 6, p. 3436-3449, 2016.

Chiaranda, R., Rizzi, N. E.; Colpini, C.; Soares, T. S.; & Silva, V. S. Análise da precipitação e da vazão da bacia do Rio Cuiabá. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, 7(1). 2012.

CHUINE, Isabelle. A unified model for budburst of trees. **Journal of theoretical biology**, v. 207, n. 3, p. 337-347, 2000.

DA CUNHA, Catia Nunes; PIEDADE, Maria Teresa Fernandez; JUNK, Wolfgang J. (Ed.). **Classificação e delineamento das áreas úmidas brasileiras e de seus macrohabitats**. EdUFMT, 2014.

Dalmagro, H. J.; Lobo, F. D. A.; Vourlitis, G. L.; Dalmolin, Â. C.; Antunes, M. Z.; Ortiz, C. E. R.; Nogueira, J. D. S. The physiological light response of two tree species across a hydrologic gradient in Brazilian savanna (Cerrado). **Photosynthetica**, v. 52, n. 1, p. 22-35, 2014.

Dalmolin, Â. C.; de Almeida Lobo, F.; Vourlitis, G.; Silva, P. R.; Dalmagro, H. J.; Antunes, M. Z.; & Ortiz, C. E. R. Is the dry season an important driver of phenology

and growth for two Brazilian savanna tree species with contrasting leaf habits?. **Plant ecology**, v. 216, n. 3, p. 407-417, 2015.

Danelichen, V. H. D. M.; Biudes, M. S.; Souza, M. C.; Machado, N. G.; & Nogueira, J. D. S. Relations of vegetation and water indices to volumetric soil water content in the Pantanal of Mato Grosso, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 37, n. 18, p. 4261-4275, 2016.

DE BEURS, Kirsten M.; HENEERY, Geoffrey M. Spatio-temporal statistical methods for modelling land surface phenology. In: **Phenological research**. Springer, Dordrecht, 2010. p. 177-208.

de Miranda, S. D. C.; Bustamante, M.; Palace, M.; Hagen, S.; Keller, M.; & Ferreira, L. G. Regional variations in biomass distribution in Brazilian savanna woodland. **Biotropica**, 46(2), 125-138. 2014.

Domingues, A. N.; Abreu, J. G. D.; Caneppele, C.; Reis, R. H. P. D.; Behling Neto, A.; & Almeida, C. M. D. Agronomic characteristics of corn hybrids for silage production in the State of Mato Grosso, Brazil. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, 35(1), 7-12. 2013.

EITEN, G. 1972. The Cerrado vegetation of Brazil. **Bot. Rev.** 38: 201 – 341.

Evans, T.; Costa, M.; Tomas, W.; & Restel, A. Large-scale habitat mapping of the Brazilian Pantanal wetland: a SAR remote sensing approach. **Accessed December**, v. 14, 2015.

FELFILI, J. M.; SILVA-JÚNIOR, M. C. Diversidade alfa e beta no cerrado sensu stricto, Distrito Federal, Goiás, Minas Gerais e Bahia. **Cerrado: ecologia, biodiversidade e conservação. Brasília: Ministério do Meio Ambiente**, p. 141-154, 2005.

FERREIRA, L. G.; HUETE, A. R. Assessing the seasonal dynamics of the Brazilian Cerrado vegetation through the use of spectral vegetation indices. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 10, p. 1837-1860, 2004.

Ferreira-Junior, W. G.; Schaefer, C. E.; Cunha, C. N.; Duarte, T. G.; Chieregatto, L. C.; & Carmo, F. Flood regime and water table determines tree distribution in a forest-savanna gradient in the Brazilian Pantanal. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 88, p. 719-731, 2016.

FISHER, Jeremy I.; MUSTARD, John F. Cross-scalar satellite phenology from ground, Landsat, and MODIS data. **Remote Sensing of Environment**, v. 109, n. 3, p. 261-273, 2007.

FREDENT, Stanley C.; MERCANTI, Enrico P.; BECKER, Margaret A. Symposium on Significant Results Obtained from the Earth Resources Technology Satellite-1 Volume I: Technical Presentations Section A. NASA SP-327. **NASA Special Publication**, v. 327, 1973.

FIETZ CR; COMUNELLOE, CREMONC & DALLACORT. 2008. Estimativa da precipitação provável para o Estado de Mato Grosso. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 237 pp.

FURLEY, Peter A. The nature and diversity of neotropical savanna vegetation with particular reference to the Brazilian cerrados. **Global Ecology and Biogeography**, v. 8, n. 3-4, p. 223-241, 1999.

GARNER, Rob. **Landsat 8 Instruments**. [S. l.], 3 ago. 2017. Disponível em: <https://www.nasa.gov/content/landsat-8-instruments#.UieDrzY3s0M>. Acesso em: 8 jul. 2019.

GE, Quansheng; WANG, Huanjiong; DAI, Junhu. Phenological response to climate change in China: a meta-analysis. **Global Change Biology**, v. 21, n. 1, p. 265-274, 2015.

Goward, S. N.; Tucker, C. J.; & Dye, D. G. Compton J.; DYE, Dennis G. North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer. **Vegetatio**, v. 64, n. 1, p. 3-14, 1985.

GOWARD, Samuel N.; PRINCE, Stephen D. Transient effects of climate on vegetation dynamics: satellite observations. **Journal of Biogeography**, p. 549-564, 1995.

HAASE, Rainer. Litterfall and nutrient return in seasonally flooded and non-flooded forest of the Pantanal, Mato Grosso, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 117, n. 1-3, p. 129-147, 1999.

Hamilton, S. K.; Sippel, S. J.; & Melack, J. M. Inundation patterns in the Pantanal wetland of South America determined from passive microwave remote sensing. **Archiv für Hydrobiologie**, v. 137, n. 1, p. 1-23, 1996.

HAMILTON, Stephen K.; SIPPEL, Suzanne J.; MELACK, John M. Comparison of inundation patterns among major South American floodplains. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 107, n. D20, p. LBA 5-1-LBA 5-14, 2002.

Henebry, G. M., & de Beurs, K. M. Remote sensing of land surface phenology: A prospectus. In: **Phenology: An Integrative Environmental Science**. Springer, Dordrecht, 2013. p. 385-411.

Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E. P.; Gao, X.; & Ferreira, L. G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote sensing of environment**, v. 83, n. 1-2, p. 195-213, 2002.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA); IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapa de biomas do Brasil. Primeira aproximação. 2004. Acesso em: 05 fevereiro. 2019.

INSTRUMENTS. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://pmm.nasa.gov/TRMM/trmm-instruments>. Acesso em: 28 jun. 2019.

Jackson, P. C.; Meinzer, F. C.; Bustamante, M.; Goldstein, G.; Franco, A.; Rundel, P. W.; ... & Causin, F. Partitioning of soil water among tree species in a Brazilian Cerrado ecosystem. **Tree physiology**, v. 19, n. 11, p. 717-724, 1999.

JENNER, Lynn. Landsat Mission Update. [S. l.], 7 ago. 2017. Disponível em: <https://www.nasa.gov/feature/landsat-mission-update/>. Acesso em: 6 jul. 2019.

Johnson, M. O.; Galbraith, D.; Gloor, M.; De Deurwaerder, H.; Guimberteau, M.; Rammig, A.; ... & Phillips, O. L. Variation in stem mortality rates determines patterns of above-ground biomass in Amazonian forests: implications for dynamic global vegetation models. **Global change biology**, v. 22, n. 12, p. 3996-4013, 2016.

JONSSON, Per; EKLUNDH, Lars. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. **IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 8, p. 1824-1832, 2002.

JÖNSSON, Per; EKLUNDH, Lars. Seasonality extraction from time-series of satellite sensor data. In: **Frontiers of Remote Sensing Information Processing**. 2003. p. 487-500.

JUNIOR, Mario Zortéa Antunes et al. Métodos não destrutivos para estimativa de densidade de área foliar em mangueira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, n. 12, p. 1624-1630, 2010.

Junk, W. J.; Nunes da Cunha, C.; da Silva, C. J.; & Wantzen, K. M. The Pantanal: A large South American wetland and its position in limnological theory. In: **The Pantanal: Ecology, biodiversity and sustainable management of a large neotropical seasonal wetland**. Pensoft, 2011. p. 23-44.

JUNK, W. J.; P. B. BAYLEY and R. E. SPARKS, 1989. The Flood Pulse Concept in River-Floodplain-Systems. **Canadian Special Publications for Fisheries and Aquatic Sciences** 106: 110–127.

Junk, W. J.; Piedade, M. T. F.; Lourival, R.; Wittmann, F.; Kandus, P.; Lacerda, L. D.; ... & Schöngart, J. Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 24, n. 1, p. 5-22, 2014.

Justice, C. O.; Townshend, J. R. G.; Holben, B. N.; & Tucker, E. C. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, 6(8), 1271-1318. 1985.

Justice, C. O.; Townshend, J. R. G.; & Choudhury, B. J. Comparison of AVHRR and SMMR data for monitoring vegetation phenology on a continental scale. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, n. 10, p. 1607-1632, 1989.

KRAMER, Herbert J. **Observation of the Earth and its Environment: Survey of Missions and Sensors**. Springer Science & Business Media, 2002.

KNAPP, W. W.; DETHIER, B. E. Satellite monitoring of phenological events. **International Journal of Biometeorology**, v. 20, n. 3, p. 230-239, 1976.

KUPLICH, Tatiana Mora; MOREIRA, Andreise; FONTANA, Denise Cybis. Série temporal de índice de vegetação sobre diferentes tipologias vegetais no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande**. Vol. 17, n. 10 (oct. 2013), p. 1116-1123, 2013.

LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite. [S. l.], 25 set. 2013. Disponível em: https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/sat/conteudo/missao_landsat.html. Acesso em: 6 jul. 2019.

LANDSAT Benefiting Society for Fifty Years. [S. l.], 2018. Disponível em: https://landsat.gsfc.nasa.gov/how_landsat_helps/case-studies-2/. Acesso em: 6 jul. 2019.

Lehmann CER; Archibald SA; Hoffmann WA; Bond WJ. Deciphering the distribution of the Savanna biome. **New Phytol**;191(1):197–209. 2011.

LIANG, Liang; SCHWARTZ, Mark D. Landscape phenology: an integrative approach to seasonal vegetation dynamics. **Landscape Ecology**, v. 24, n. 4, p. 465-472, 2009.

LIANG, Liang; SCHWARTZ, Mark D.; FEI, Songlin. Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 1, p. 143-157, 2011.

LIEBSCH, Dieter; MIKICH, Sandra Bos. Fenologia reprodutiva de espécies vegetais da Floresta Ombrófila Mista do Paraná, Brasil. **Brazilian Journal of Botany**, v. 32, n. 2, p. 375-391, 2009.

LIETH, H. Introduction to phenology and the modeling of seasonality. **Phenology and seasonality modeling**, v. 8, p. 3-19, 1974.

LLOYD, Daniel. A phenological classification of terrestrial vegetation cover using shortwave vegetation index imagery. Title **REMOTE SENSING**, v. 11, n. 12, p. 2269-2279, 1990.

LIU, William Tse Horng. Aplicações de sensoriamento remoto. Oficina de Textos, 2015.

Lo, MH & Famiglietti, JS. Efeito da dinâmica do lençol freático na memória hidrológica da superfície terrestre . **J. Geophys Res.** , 115 , D22118 . 2010. doi: 10.1029 / 2010jd014191 .

M. Shen; Y. Tang; A. R. Desai; C. Gough; and J. Chen, “Can EVI-derived land surface phenology be used as a surrogate for phenology of canopy photosynthesis?” **Int. J. Remote Sens.**, vol. 35, no. 3, pp. 1162–1174, 2014.

MAGGIONI, Viviana; MEYERS, Patrick C.; ROBINSON, Monique D. A review of merged high-resolution satellite precipitation product accuracy during the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) era. **Journal of Hydrometeorology**, v. 17, n. 4, p. 1101-1117, 2016.

Mariano, G. C.; Morellato, L. P. C.; Almeida, J.; Alberton, B.; de Camargo, M. G. G.; & Torres, R. D. S. Modeling plant phenology database: Blending near-surface remote

phenology with on-the-ground observations. *Ecological engineering*, 91, 396-408. 2016.

MACHADO, Ricardo B. Estimativa de perda da área do Cerrado brasileiro. 2016 apud MANTOVANI, J. E.; PEREIRA, A. Estimativas da integridade da cobertura vegetal do Cerrado. **Pantanal através de dados TM/Landsat**, 1998.

Machado, N. G.; Sanches, L.; Silva, L. B.; Novais, J. W. Z.; Aquino, A. M.; Biudes, M. S.; ... & Nogueira, J. S. Soil nutrients and vegetation structure in a neotropical seasonal wetland. **Applied ecology and environmental research**, v. 13, n. 1, p. 289-305, 2015.

Marchant, R., 2010. Understanding complexity in savannas: climate, **biodiversity and people**. Curr. Opin. Environ. Sustain. 2, 101–108.

MESQUITA JR, H. N. NDVI measurements of Neotropical savanna physiognomies a gradient of: biomass, structure and phenology changes. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 33, p. 93-100, 2000.

Mioto, C. L.; Paranhos Filho, A. C.; & do Amaral Albrez, E. Contribuição à caracterização das sub-regiões do Pantanal. **Entre-Lugar**, v. 3, n. 6, p. 165-180, 2012.

Miranda, C. S.; Gamarra, R. M.; Mioto, C. L.; Silva, N. M.; Conceição Filho, A. P.; & Pott, A. Analysis of the landscape complexity and heterogeneity of the Pantanal wetland. **Brazilian Journal of Biology**, v. 78, n. 2, p. 318-327, 2018.

Myneni, R. B.; Hoffman, S.; Knyazikhin, Y.; Privette, J. L.; Glassy, J.; Tian, Y.; ... & Lotsch, A. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. **Remote sensing of environment**, v. 83, n. 1-2, p. 214-231, 2002.

MISSION Overview. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://pmm.nasa.gov/TRMM/mission-overview>. Acesso em: 28 jun. 2019.

MMA – Mistério do Meio Ambiente. Vegetação da Bacia do Alto Paraguai. Disponível em: < <http://mapas.mma.gov.br/geonetwork/srv/br/main.home> >. Acessado em: 09 de junho de 2019.

MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Monitoramento do Desmatamento nos Biomas Brasileiros por Satélite. Acordo de Cooperação Técnica MMA/IBAMA: Monitoramento do Bioma Caatinga 2008 a 2009. 2011.

Morisette, J. T.; Richardson, A. D.; Knapp, A. K.; Fisher, J. I.; Graham, E. A.; Abatzoglou, J.; ... & Liang, L. Tracking the rhythm of the seasons in the face of global change: phenological research in the 21st century. **Frontiers in Ecology and the Environment**, 7(5), 253-260. 2009.

MORELLATO, L. Patnícia C. et al. Phenology of Atlantic rain forest trees: a comparative study 1. **Biotropica**, v. 32, n. 4b, p. 811-823, 2000.

MORELLATO, L. Patricia C.; CAMARGO, Maria Gabriela G.; GRESSLER, Eliana. A Review of Plant Phenology in South and Central America. **Phenology: An Integrative Environmental Science**, p. 91, 2013.

Mountford, G. L.; Atkinson, P. M.; Dash, J.; Lankester, T.; & Hubbard, S. Sensitivity of Vegetation Phenological Parameters: From Satellite Sensors to Spatial Resolution and Temporal Compositing Period. **In Sensitivity Analysis in Earth Observation Modelling** (pp. 75-90). 2017.

Moulin, S.; Kergoat, L.; Viovy, N.; & Dedieu, G. Global-scale assessment of vegetation phenology using NOAA/AVHRR satellite measurements. **Journal of Climate**, v. 10, n. 6, p. 1154-1170, 1997.

Muraoka, H.; Noda, H. M.; Nagai, S.; Motohka, T.; Saitoh, T. M.; Nasahara, K. N.; & Saigusa, N. Spectral vegetation indices as the indicator of canopy photosynthetic productivity in a deciduous broadleaf forest. **Journal of Plant Ecology**, v. 6, n. 5, p. 393-407, 2012.

NASA – National Aeronautics and Espace Administration. Precipitation measurement missions. Disponível em: <https://pmm.nasa.gov/TRMM/trmm-instruments>. Acesso em: junho de 2019.

NUNES DA CUNHA C E JUNK W.J. Year-to-year changes in water level drive the invasion of *Vochysia divergens* in Pantanal grasslands. Cuiabá, MT: **Applied Vegetation Science**, 2004.

Ogle, K., Barber, J. J., Barron-Gafford, G. A., Bentley, L. P., Young, J. M., Huxman, T. E., ... & Tissue, D. T. Kiona et al. Quantifying ecological memory in plant and ecosystem processes. **Ecology letters**, v. 18, n. 3, p. 221-235, 2015.

Poorter, L.; Bongers, F.; Sterck, F. J.; & Wöll, H. Architecture of 53 rain forest tree species differing in adult stature and shade tolerance. **Ecology**, v. 84, n. 3, p. 602-608, 2003.

Pessi, D. D.; Santos, C. S. A. D.; Nonato, J. J.; Dourado, L. G. A.; Silva, O. P.; Bassini, R. T.; & José, J. V. (2019). Validação das estimativas de precipitação do satélite TRMM no Estado de Mato Grosso, Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, 42(1), 81-90.

PEEL, Murray C.; FINLAYSON, Brian L.; MCMAHON, Thomas A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and earth system sciences discussions**, v. 4, n. 2, p. 439-473, 2007.

PENATTI, N. C; DE ALMEIDA, T. I. R; FERREIRA, L. G; ARANTES, A. E; COE, M. T. Satellite-based hydrological dynamics of the world's largest continuous wetland. **Remote Sensing of Environment**, v. 170, p. 1-13, 2015.

Pott, A.; Oliveira, A. K. M.; Damasceno-Junior, G. A.; & Silva, J. S. V. Plant diversity of the Pantanal wetland. **Brazilian Journal of Biology**, v. 71, n. 1, p. 265-273, 2011.

POTT, Arnildo; POTT, Vali Joana. Plantas do pantanal. 1994.

POTT, A.; POTT, V. J. Alterações florísticas na planície do baixo Taquari. **Impactos ambientais e sócio-econômicos na Bacia do Rio Taquari-Pantanal**. Corumbá: Embrapa Pantanal, p. 261-293, 2005.

Rao, V. B.; Cavalcanti, I. F.; & Hada, K. Annual variation of rainfall over Brazil and water vapor characteristics over South America. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 101(D21), 26539-26551. 1996.

Ratter, J.A.; Ribeiro, J.F.; Bridgewater, S.; The Brazilian Cerrado vegetation and threats to its biodiversity. **Ann. Bot.** 80, 223–230. 1997.

RATANA, Piyachat; HUETE, Alfredo R.; FERREIRA, Laerte. Analysis of Cerrado physiognomies and conversion in the MODIS seasonal–temporal domain. **Earth Interactions**, v. 9, n. 3, p. 1-22, 2005.

REBELLATO, L.; CUNHA C. N. Efeito do “fluxo sazonal mínimo da inundação” sobre a composição e estrutura de um campo inundável no Pantanal de Poconé, MT, Brasil. Cuiabá, MT: **Acta bot. bras**, 2005.

Reed, B. C., Brown, J. F., VanderZee, D., Loveland, T. R., Merchant, J. W., & Ohlen, D. O. Measuring phenological variability from satellite imagery. **Journal of vegetation science**, v. 5, n. 5, p. 703-714, 1994.

RADAMBRASIL P. Levantamentos de Recursos Naturais. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. Volumes. 1982.

RIBEIRO, José Felipe; WALTER, Bruno Machado Teles. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. **Cerrado: ecologia e flora**, v. 1, p. 151-212, 2008.

RICHARDS, Peter D.; VANWEY, Leah. Farm-scale distribution of deforestation and remaining forest cover in Mato Grosso. **Nature Climate Change**, v. 6, n. 4, p. 418, 2016.

ROSSATTO, Davi Rodrigo; HOFFMANN, William Arthur; FRANCO, Augusto César. Differences in growth patterns between co-occurring forest and savanna trees affect the forest–savanna boundary. **Functional Ecology**, v. 23, n. 4, p. 689-698, 2009.

Sanches, L.; Vourlitis, G. L.; de Carvalho Alves, M.; Pinto-Júnior, O. B.; & de Souza Nogueira, J. Seasonal patterns of evapotranspiration for a *Vochysia divergens* forest in the Brazilian Pantanal. **Wetlands**, v. 31, n. 6, p. 1215-1225, 2011.

SEIXAS, GUILHERME BARROS. **AVALIAÇÃO DE VEGETAÇÃO MONODOMINANTE DO PANTANAL E VEGETAÇÃO DE CERRADO, UTILIZANDO PARÂMETROS BIOFÍSICOS ESTIMADOS POR IMAGENS DE SATÉLITES**. 12/2013. Tese (Doutorado) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO, Cuiabá, MT, 2013.

Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Kong, D., Ye, A., Di, Z., & Gong, W. Would the ‘real’ observed dataset stand up? A critical examination of eight observed gridded climate datasets for China. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 1, p. 015001, 2014.

Piao, S., Friedlingstein, P., Ciais, P., Viovy, N., & Demarty, J. Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the Northern Hemisphere over the past 2 decades. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 21, n. 3, 2007.

Saleska, S. R.; Didan, K.; Huete, A. R.; & Da Rocha, H. R. Amazon forests green-up during 2005 drought. **Science**, 318(5850), 612-612. 2007.

Santos, S.A.; da Cunha, C.N.; Tomás, W.; de Abreu, U.G.P.; Arieira, J. Plantas Invasoras no Pantanal: Como Entender o Problema e Soluções de Manejo por Meio de Diagnóstico Participativo. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 66, Embrapa Pantanal, Corumbá, MS, Brasil., pp. 45, 2006.

Silva, J. F.; Farinas, M. R.; Felfili, J. M.; & Klink, C. A. Spatial heterogeneity, land use and conservation in the cerrado region of Brazil. **Journal of Biogeography**, 33(3), 536-548. 2006.

Sanches, L.; Vourlitis, G. L.; de Carvalho Alves, M.; Pinto-Júnior, O. B.; & de Souza Nogueira, J. Seasonal patterns of evapotranspiration for a *Vochysia divergens* forest in the Brazilian Pantanal. **Wetlands**, v. 31, n. 6, p. 1215-1225, 2011.

SOARES, A. S. D.; PAZ, A. R. & PICCILLI, D. G. A. Avaliação das estimativas de chuva do satélite TRMM no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p288-299, 2016.

Shen, M.; Piao, S.; Cong, N.; Zhang, G.; & Jassens, I. A. Precipitation impacts on vegetation spring phenology on the Tibetan Plateau. **Global change biology**, 21(10), 3647-3656. 2015.

Schwartz, M. D.; & Reed, B. C. Surface phenology and satellite sensor-derived onset of greenness: an initial comparison. **International Journal of Remote Sensing**, 20, 3451–3457. 1999.

Schwartz, M. D.; and J. M. Hanes. 2010. Continentalscale phenology: warming and chilling. **International Journal of Climatology** 30:1595–1598.

Schwieder, M.; Leitão, P. J.; da Cunha Bustamante, M. M.; Ferreira, L. G.; Rabe, A.; & Hostert, P. Mapping Brazilian savanna vegetation gradients with Landsat time series. **International journal of applied earth observation and geoinformation**, v. 52, p. 361-370, 2016.

SILVA, J. S. V.; ABDON, M. M. Delimitação do Pantanal Brasileiro e suas Sub-regiões. **Pesq. Agropec. Bras., Brasília**, v. 33, Número Especial, p. 1703-1711, out. 1998.

Soares-Filho, B.S.; Nepstad, D.C.; Curran, L.M.; Cerqueira, G.C.; Garcia, R.A.; Ramos, C.A.; Voll, E.; McDonald, A.; Lefebvre, P.; Schlesinger, P.; Modelling conservation in the Amazon Basin. **Nature** 440, 520–523, 2006. <http://dx.doi.org/10.1038/nature04389>.

Scanlon, T. M.; Albertson, J. D.; Caylor, K. K.; & Williams, C. A. Determining land surface fractional cover from NDVI and rainfall time series for a savanna ecosystem. **Remote Sensing of Environment**, v. 82, n. 2-3, p. 376-388, 2002.

Tang, J.; Körner, C.; Muraoka, H.; Piao, S.; Shen, M.; Thackeray, S. J.; & Yang, X. Emerging opportunities and challenges in phenology: a review. **Ecosphere**, 7(8). 2016.

TATEISHI, R.; EBATA, M. Analysis of phenological change patterns using 1982–2000 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 12, p. 2287-2300, 2004.

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

Tostes, J. O., Lyra, G. B., Oliveira-Júnior, J. F., & Francelino, M. R. Assessment of gridded precipitation and air temperature products for the State of Acre, southwestern Amazonia, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 4, p. 153, 2017.

VAN SCHAIK, Carel P.; TERBORGH, John W.; WRIGHT, S. Joseph. The phenology of tropical forests: adaptive significance and consequences for primary consumers. **Annual Review of ecology and Systematics**, v. 24, n. 1, p. 353-377, 1993.

Vermote, E.; Justice, C.; Claverie, M.; & Franch, B. Preliminary analysis of the performance of the Landsat 8/OLI land surface reflectance product. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 46-56, 2016.

VITASSE, Yann. Ontogenic changes rather than difference in temperature cause understory trees to leaf out earlier. **New Phytologist**, v. 198, n. 1, p. 149-155, 2013.

Vourlitis, G. L., & da Rocha, H. R. Flux dynamics in the cerrado and cerrado-forest transition of Brazil. Ecosystem function in global savannas: **measurement and modeling at landscape to global scales**, 97-116, 2011.

Vourlitis, G. L.; de Almeida Lobo, F.; Lawrence, S.; Codolo de Lucena, I.; Pinto, O. B.; Dalmagro, H. J.; ... & de Souza Nogueira, J. Variations in stand structure and diversity along a soil fertility gradient in a Brazilian savanna (Cerrado) in southern Mato Grosso. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 4, p. 1370-1379, 2013.

Yang, B.; He, M.; Shishov, V.; Tychkov, I.; Vaganov, E.; Rossi, S.; ... & Griesinger, J. New perspective on spring vegetation phenology and global climate change based on Tibetan Plateau tree-ring data. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 114, n. 27, p. 6966-6971, 2017.

Yates, H.; Strong, A.; McGinnis, D.; & Tarpley, D. Terrestrial observations from NOAA operational satellites. **Science**, v. 231, n. 4737, p. 463-470, 1986.

Wolkovich, E. M.; B. I. Cook, and T. J. Davies. 2014. Progress towards an interdisciplinary science of plant phenology: building predictions across space, time and species diversity. **New Phytologist** 201: 1156–1162.

WHITE, Michael A.; THORNTON, Peter E.; RUNNING, Steven W. A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global biogeochemical cycles*, v. 11, n. 2, p. 217-234, 1997.

ZHANG, Fucang; ZHANG, Renduo; KANG, Shaozhong. Estimating temperature effects on water flow in variably saturated soils using activation energy. ***Soil Science Society of America Journal***, v. 67, n. 5, p. 1327-1333, 2003.

Zhang, X.; Friedl, M. A.; Schaaf, C. B.; Strahler, A. H.; Hodges, J. C.; Gao, F.; ... & Huete, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. ***Remote sensing of environment***, v. 84, n. 3, p. 471-475, 2003.

ZHANG, Xiaoyang; FRIEDL, Mark A.; SCHAAF, Crystal B. Global vegetation phenology from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Evaluation of global patterns and comparison with in situ measurements. ***Journal of Geophysical Research: Biogeosciences***, v. 111, n. G4, 2006.

Zhang, X.; Friedl, M. A.; Schaaf, C. B.; Strahler, A. H.; Hodges, J. C.; Gao, F.; ... & Huete, A. Monitoring vegetation phenology using MODIS. ***Remote sensing of environment***, v. 84, n. 3, p. 471-475, 2003.