

CAROLINA DE ABREU CRIVELIN

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

Análise do efeito de diferentes escalas espaciais no estudo da fenologia vegetativa remota

Carolina de Abreu Crivelin

Prof(a).Dr(a). L. Patricia Cerdeira Morellato

Prof. Dr. Thiago Sanna Freire Silva

Rio Claro (SP)

2019

CAROLINA DE ABREU CRIVELIN

ANÁLISE DO EFEITO DE DIFERENTES ESCALAS
ESPACIAIS NO ESTUDO DA FENOLOGIA VEGETATIVA
REMOTA

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Campus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Engenheiro
Ambiental.

Rio Claro- SP

2019

C936a	Crivelin, Carolina de Abreu Análise do efeito de diferentes escalas espaciais no estudo da fenologia vegetativa remota / Carolina de Abreu Crivelin. -- Rio Claro, 2019 35 p. + 1 CD-ROM Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro Orientadora: Leonor Patricia Cerdeira Morellato Coorientador: Thiago Sanna Freire Silva 1. Sensoriamento remoto. 2. Fenologia vegetal. 3. Câmeras digitais. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CAROLINA DE ABREU CRIVELIN

ANÁLISE DO EFEITO DE DIFERENTES ESCALAS
ESPACIAIS NO ESTUDO DA FENOLOGIA VEGETATIVA
REMOTA

Trabalho de Formatura apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Campus de Rio Claro, da Universidade
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho,
para obtenção do grau de Engenheiro
Ambiental.

Comissão Examinadora

Profa. Dra. L. Patricia Cerdeira Morellato
Dr. Daniel Borini Alves
Dra. Desirée Marques Ramos

Rio Claro, 14 de julho de 2019

DEDICATÓRIA E AGRADECIMENTO:

Ao Tapeceiro, grande artista.

Aos meus pais: Amor e persistência.

À Cintia, sem a qual não terminaria a engenharia.

Às tantas colegas de casa, que fizeram minha caminhada mais leve e divertida.

Ao saudoso programa Ciência Sem Fronteiras, e a University of East Anglia, que um dia me permitiram sonhar.

Ao PhenoLab e ao Ecodyn, pelo apoio e inspiração.

Agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (#2013/50155-0- Fapesp Microsoft Research Institute) pelo financiamento do projeto e pela Bolsa de Iniciação Científica (#2017/00597-8) e também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela permissão para o monitoramento nas áreas de estudo Pé de Gigante, Estação Ecológica de Itirapina e Fazenda Botelho, presentes neste estudo.

Finalmente, agradeço à Coordenadora Dra. Magna Soelma Beserra de Moura pela utilização dos dados da área da Embrapa-Semiárido em Petrolina. Sou grata pela orientação do Prof. Dr. Thiago Sanna Freire Silva, Prof. Dra. L. Patricia Cerdeira Morellato e Dra. Bruna de Costa Alberton que possibilitaram a realização deste trabalho.

*“Amar e mudar as coisas,
me interessa mais”*

(Belchior)

RESUMO:

O monitoramento remoto da fenologia vegetativa proporciona a compreensão da dinâmica de processos ecossistêmicos, além de ser um método confiável para acompanhar respostas de comunidades vegetais frente às mudanças climáticas. O investimento em novas tecnologias proporcionou novos métodos de monitoramento de fenologia vegetativa, menos laboriosos que os tradicionais, como a utilização de imagens de câmeras remotas próximas e de sensores orbitais, que geram informações fenológicas em escalas espaciais distintas e exigem uma metodologia comparativa que avalie o grau de concordância entre os métodos. O intuito deste trabalho foi acompanhar a fenologia das comunidades vegetais de quatro áreas, representadas em biomas como a Caatinga e o Cerrado e suas respectivas formações vegetais. Buscou-se comparar os métodos de monitoramento da fenologia vegetativa obtidos por imagens de câmeras remotas próximas e de sensores orbitais, avaliando o grau de concordância entre as informações obtidas. Obtiveram-se três índices de vegetação: através de câmeras de cores Vermelho Verde e Azul (RGB), o Índice de Coordenada Cromática de Verde (GCC), e pelos sensores orbitais, os produtos Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) e Índice de Vegetação Melhorado (EVI). A análise demonstrou que, para as datas de Início da Estação de crescimento (SOS) ocorre uma antecipação na resposta fenológica dos índices extraídos por sensores orbitais. Já para o Pico (MID) e Fim (EOS) da Estação de Crescimento, ocorre o efeito contrário, causando um atraso nas datas extraídas por sensores orbitais em relação às extraídas por câmeras. Os resultados deste estudo auxiliam a compreensão de como a fenologia remota próxima e o sensoriamento remoto por satélites podem ser complementares no estudo da fenologia vegetativa e até em que ponto essas escalas podem ser comparáveis.

ABSTRACT

Remote monitoring of vegetative phenology provides understanding of ecosystem process dynamics and is a reliable method to monitor plant community responses to climate change. The investment in new technologies brought new monitoring methods, less laborious than traditional approaches, such as near-surface and orbital sensor monitoring, which generate different spatial scales of phenological information and require a comparative methodology to evaluate the extent of agreement between them. The aim of this study was the phenological monitoring of four different areas, represented in biomes as Caatinga and Cerrado and their respective vegetation types, assessing the agreement between vegetative phenology information extracted through near-surface cameras and orbital sensors. Three vegetation indexes were used: based on Red, Green and Blue (RGB) cameras, the Gcc Index, and based on orbital sensors, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Enhanced Vegetation Index (EVI) products. The analysis showed an anticipation of the phenological response from the indexes extracted by orbital sensors for the Start of the Growing Season (SOS). On the other hand, for Peak (MID) and End (EOS) of the Growing Season, the opposite effect was observed, causing a delay in the dates extracted by orbital sensors in relation to those extracted by cameras. The results of this study contribute to the understanding of how near-surface and satellite remote sensing are complementary in the study of vegetative phenology and to what extent these scales are comparable.

SUMÁRIO:

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. OBJETIVOS.....	9
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1 . Monitoramento de fenologia vegetativa por tecnologias remotas.....	10
3.1.1 Índices de Vegetação no sensoriamento remoto.....	10
3.1.2 Índices de Vegetação na fenologia remota próxima à superfície.....	12
3.2 . Biomas.....	14
3.2.1. O Cerrado.....	14
3.2.2. A Caatinga.....	15
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
4.1. Escolha dos Índices de Vegetação.....	15
4.2. Áreas de estudo.....	16
4.3. Regime pluviométrico.....	18
4.3.1. Cerrado.....	18
4.3.2. Caatinga.....	19
4.2. Aquisição, delimitação das ROIs e processamento de imagens.....	20
4.2.1. Imagens de câmeras digitais.....	20
4.2.2. Imagens de sensores orbitais.....	21
4.2.3. Processamento de séries temporais.....	22
4.2.4. Comparação de dados.....	22
5.RESULTADOS.....	23
5.1. Início da estação de crescimento (SOS), Pico da estação de Crescimento (MID),Fim da Estação de Crescimento (EOS).....	23
5.2. Curvas fenológicas.....	28
6. DISCUSSÃO	30
7. CONCLUSÃO.....	31
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	32

1. INTRODUÇÃO:

Fenologia é o estudo de fenômenos naturais recorrentes no ciclo de vida dos organismos, tais como floração de plantas, eclosão de insetos, migração de pássaros, e suas conexões com o clima (SCHWARTZ, 2013). A fenologia vegetal, especificamente o brotamento e a senescência foliar, são fundamentais para compreensão da dinâmica de processos ecossistêmicos, uma vez que estão diretamente relacionadas com a produtividade primária, disponibilidade de água, trocas gasosas e a ciclagem de nutrientes (MORISSETTE *et al.*, 2009; NEGI, 2006 e REICH, 1995).

A fenologia também é considerada como um indicador confiável para monitorar respostas de espécies vegetais frente às mudanças climáticas (PARMESAN; YOHE, 2003). Esta confiabilidade promoveu um investimento científico em novas tecnologias para o monitoramento da fenologia vegetal, que atualmente é caracterizada, além dos métodos tradicionais de observação direta em solo, pelo uso de câmeras digitais *in situ* e imagens orbitais adquiridas por satélites, métodos menos laboriosos e mais reproduzíveis que o método usual de monitoramento visual em campo.

Informações obtidas pelo sensor Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), que conta com observações desde 2000, vêm sendo utilizadas para monitorar ciclos fenológicos em diferentes ecossistemas (LIU *et al.*, 2017). Entretanto, para estudos em escalas mais refinadas, a resolução espacial do MODIS não é capaz de fornecer o nível de detalhamento necessário, tornando evidente a busca por alternativas de monitoramento.

Por esses motivos, a fenologia remota próxima à superfície, através do monitoramento da vegetação por fotografias repetidas de câmeras digitais, surgiu como uma abordagem mais detalhada para o monitoramento da fenologia vegetal (GRAHAM *et al.* 2009, 2010, JACOBS *et al.*, 2009, MORISSETTE *et al.*, 2007, RICHARDSON *et al.*, 2007, 2009). O monitoramento da dinâmica fenológica numa maior frequência temporal que as observações visuais do monitoramento da fenologia tradicional, além do baixo custo de implementação e operação, fazem da fenologia remota próxima um método bastante vantajoso para o acompanhamento fenológico (FRIEDL *et al.* 2018).

O fato das câmeras fenológicas conseguirem monitorar escalas que abrangem desde indivíduos isolados até comunidades vegetais, possibilitou a oportunidade de complementar a lacuna existente entre o monitoramento pela fenologia tradicional e o monitoramento por

imagens de satélites (HUFKENS et al., 2011). Entretanto, variadas abordagens de monitoramento produzem diferentes respostas fenológicas, que ainda permanecem um desafio para a avaliação de concordância entre os métodos (ALBERTON et al. 2014, 2017, BROWNING et al., 2017).

Devido a essas diferenças nas respostas fenológicas, é fundamental que existam estudos que comparem os resultados obtidos por variados métodos de aquisição de dados, operando em diferentes escalas, e que avaliem o grau de concordância entre os dados, aplicando refinamentos e correções entre as escalas quando necessário. Métodos de monitoramento fenológico mais eficientes e confiáveis apresentam um avanço em relação à conservação de biomas tropicais (ALBERTON et al., 2017). Recentemente, estudos correlacionando as diferentes escalas espaciais de observação surgiram com o intuito de complementar as diferentes abordagens no estudo da fenologia vegetal (ALBERTON et al. 2014, 2017, BROWNING et al., 2017, HUFKENS et al., 2011, MISRA et al., 2016, RICHARDSON et al., 2018). Contudo, grande parte destes estudos de comparação entre escalas encontra-se em climas temperados e pouco se sabe sobre a correlação de escalas nos trópicos (ALBERTON et al. 2014, 2017, 2018). Assim, o presente trabalho busca entender o comportamento da sazonalidade através da extração de métricas fenológicas vegetativas de biomas inseridos em climas tropicais como é o caso da Caatinga e do Cerrado.

2. OBJETIVOS:

Avaliar o grau de concordância entre as informações da fenologia vegetativa obtidas por diferentes abordagens, através do monitoramento por imagens de satélites e por câmeras digitais próximas, acompanhando a fenologia das comunidades vegetais de quatro áreas representadas nos biomas caatinga e cerrado, por três diferentes índices de vegetação: Gcc, EVI e NDVI, sendo os objetivos específicos:

- (1) Extração do índice Gcc das Regiões de Interesse (ROIs) que foram pré-definidas nas séries temporais de câmeras digitais próximas para as quatro áreas;
- (2) Aquisição dos produtos EVI e NDVI das séries temporais obtidas pelo sensor orbital MODIS para os pixels correspondentes às ROIs selecionadas;
- (3) Extração das métricas fenológicas através do algoritmo do software TIMESAT das curvas de séries temporais dos índices de vegetação.

(4) Comparação das respostas por meio de análises estatísticas entre as métricas fenológicas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

3.1. Monitoramento de fenologia vegetativa por tecnologias remotas

O monitoramento de fenologia vegetativa pelo método de observação direta tradicional, além de possuir uma limitação espacial, está sujeito a uma baixa frequência de observações e pode ser influenciado pelo observador (HUFKENS et al., 2011). Por esses fatores, métodos de monitoramento remotos surgiram com o intuito de complementar o estudo da fenologia e tornar este processo mais automatizado através de tecnologias como sensores orbitais e câmeras (ALBERTON et al. 2014, 2017). Para o estudo da vegetação através desses meios, foram desenvolvidos os Índices de Vegetação (IV) que são algoritmos para avaliação qualitativa e quantitativa de cobertura, vigor, e crescimento vegetal, entre outros.

3.1.1. Índices de vegetação no sensoriamento remoto

Os índices de vegetação fazem uso de características exclusivas de refletância espectral da vegetação, que são inferidas de propriedades biofísicas relacionadas às folhas e copas vegetativas (Myeni et al, 1995). Particularmente, a refletância de folhas saudáveis encontra-se na região do Infravermelho Próximo (NIR), com comprimento de onda de 700 a 1.400 nm, devido aos efeitos de estrutura foliar e espalhamento múltiplo nas copas da vegetação (FRIEDL, 2018). Por outro lado, a refletância em comprimentos de onda do visível (com comprimento de onda de 400 a 700 nm), ou chamadas de regiões de Radiação Fotossinteticamente Ativas (PAR), tende a ser muito baixa devido à absorção da folha por pigmentos como a clorofila a e b (DAUGHTRY et al., 2000).

A maioria dos Índices de Vegetação são algoritmos que utilizam taxas ou combinações lineares de refletância de duas ou mais regiões do espectro eletromagnético, principalmente, as regiões envolvendo os comprimentos de onda do NIR e visível por suas características específicas que permitem inferências relacionadas às suas propriedades biofísicas. Atualmente, não existe uma expressão matemática única que represente todos os IVs no sensoriamento remoto, inclusive, há registro de mais de 100 variações destes índices (XUE; SU, 2017). Isso ocorre devido à variedade de combinações de espectros de luz,

instrumentação, plataformas e resoluções, além dos algoritmos terem sido desenvolvidos de forma personalizada, de acordo com suas aplicações específicas, o que contribuiu para que, ao longo do tempo, esses índices fossem modificados e otimizados.

Em 1969 um dos primeiros IVs foi desenvolvido por Jordan, e chamava-se Índice de Razão de Vegetação (RVI), que se baseou no princípio de que as folhas absorvem mais luz vermelha que a infravermelha (JORDAN, 1969). O RVI é muito utilizado para estimar e monitorar biomassa, entretanto, quando a cobertura vegetal é esparsa o índice fica sensível aos efeitos atmosféricos. O RVI pode ser representado pela fórmula:

$$\text{RVI} = \rho_{\text{RED}} / \rho_{\text{NIR}}$$

Em 1974, foi desenvolvido o Índice da Diferença Normalizada (NDVI) por Rouse et. al (1974). Este índice é largamente utilizado para estimativas de cobertura vegetal, biomassa e produção primária. O NDVI representa a capacidade fotossintética, calculado pela diferença da refletância da luz entre os espectros visível e infravermelho próximo (ROUSE et al., 1974). Conforme Huete, Justice e Leeuwen (1999) a energia refletida no espectro visível é muito baixa, uma vez que as folhas absorvem a luz por pigmentos fotossintéticos que apresentam sensibilidade máxima nos comprimentos do azul (470 nm) e vermelho (670 nm). Por outro lado, a morfologia e o ângulo de distribuição das folhas proporcionam uma grande reflexão da luz no comprimento do infravermelho próximo. A partir do contraste entre as medidas do vermelho e infravermelho próximo, pode-se calcular um índice para monitoramento de vegetação que é resumido pela equação:

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{RED}}) / (\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{RED}})$$

Em que ρ_{NIR} e ρ_{RED} são a refletância espectral da superfície para o infravermelho próximo e para o vermelho, respectivamente. Quanto maior o NDVI, maior a capacidade fotossintética da área analisada. A ressalva quanto à utilização do NDVI é que ele sofre efeitos da atmosfera e solo de fundo que podem provocar ruídos (JUSTICE et al. 1998). Muitos outros índices surgiram na tentativa de compensar efeitos atmosféricos e do solo de fundo. Foram desenvolvidos o Índice de Vegetação Resistente a Atmosfera (ARVI) e o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI). Tais efeitos alteram a qualidade dos resultados e a capacidade de transmitir a informação contida nos índices.

Em 1998, Liu e Huete analisaram uma variedade de amostras de substratos sob o dossel e diferentes índices atmosféricos, e suas interações, para um estudo mais

compreensível das condições sob as quais a vegetação estava submetida. Foi descoberto que a interação atmosfera e solo tem um efeito complexo sobre o NDVI, e a redução de um efeito fazia aumentar o outro. Foi introduzido, então, um mecanismo de *feedback* com um parâmetro que conseguisse, simultaneamente, corrigir os efeitos do solo e da atmosfera. Esse novo parâmetro era o Índice de Vegetação Melhorado (EVI) (JUSTICE et al., 1998). O EVI foi um índice desenvolvido como um melhoramento do já existente NDVI. Este índice consegue aperfeiçoar o sinal de vegetação e minimizar as interferências de dossel e de aerossol (JUSTICE et al., 1998).

O cálculo do EVI é mostrado na equação abaixo:

$$\text{EVI} = 2,5(\rho\text{NIR} - \rho\text{RED}) / (L + \rho\text{NIR} + C_1\rho\text{RED} + C_2\rho\text{BLUE})$$

Em que L é a correção de dossel e C₁ e C₂ são coeficientes de correção de aerossóis. Os valores mais comuns para esses coeficientes são, L = 1, C₁ = 6 e C₂ = 7,5.

O ρNIR , ρRED , o ρBLUE correspondem às respectivas bandas do sensor MODIS: banda 2 (841- 871 nm), banda 1 (620- 670 nm), banda 3 (459-479 nm) (JUSTICE et al., 1998).

Uma variedade de outros índices foi desenvolvida de acordo com as especificidades necessárias. Por exemplo, foram desenvolvidos índices sob medida para a agricultura de precisão (MULLA, 2013), auxiliando no monitoramento de áreas cultivadas. Também foram desenvolvidos índices que monitoram a cobertura vegetal de áreas urbanas e consideram especificidades como áreas construídas que podem ser aplicados no mapeamento automático de áreas urbanas (ZHA et al. 2010).

3.1.2. Índices de vegetação na fenologia remota próxima à superfície

O monitoramento fenológico por câmeras digitais (RGB) apresenta uma grande capacidade para melhorar o acompanhamento fenológico, já que seu registro automatizado permite uma alta frequência temporal das observações (RICHARDSON et al. 2009, 2018; ALBERTON et al. 2014, 2017). Além de possuir uma abrangência de escalas que alcança desde indivíduos até comunidades vegetais, representando um potencial para preencher a lacuna entre as escalas de fenologia tradicional com observações de solo e fenologia remota através da utilização de produtos de satélites (HUFKENS et al., 2012).

A proporção de como os canais de cores Vermelho, Verde e Azul estão distribuídos nas ROIs permite que eventos como o brotamento e senescência foliar sejam inferidos também de imagens de câmeras RGB, uma vez que a variação na presença de clorofila, pigmento presente nas folhas, apresenta maior reflexão no canal de cor verde, sendo esta característica a principal utilizada na elaboração do princípio dos índices vegetação RGB. Dentre os mais utilizados, estão os Índices de Coordenada Cromática, que fazem o cálculo relativo as proporções individualizadas de cada canal de cor. Os índices são representados pelas fórmulas,

$$Rcc = R / [R + G + B]$$

$$Gcc = G / [R + G + B]$$

$$Bcc = B / [R + G + B]$$

Sendo Rcc, Gcc e Bcc os índices de Coordenada Cromática relativos aos canais vermelho, verde e azul, respectivamente. Em que R, G e B são as proporções individualizadas das cores vermelho, verde e azul. Os índices Gcc e Rcc apresentam informações fenológicas relacionadas ao brotamento e senescência foliar. Já o Bcc não costuma ser muito utilizado por apresentar uma alta sensibilidade e grande variação diária (RICHARDSON et al., 2007).

Outro índice amplamente utilizado para monitoramento de vegetação é o Índice de Excesso de Verde (ExGw) (WOEBBECKE et al. 1995). Este índice é usado principalmente na agricultura para diferenciar cobertura vegetal de solo. Entretanto Richardson et al. (2009) demonstraram que o índice pode ser útil para monitorar fenologia vegetal. O índice é descrito pela fórmula:

$$ExGw = 2 * G - (R + B)$$

Em que o excesso do canal da cor verde (G) é subtraído da soma dos canais Vermelho (R) e Azul (B).

3.2. Biomas

Os biomas tropicais Cerrado e Caatinga ocupam juntos mais de 30% da superfície do território brasileiro (IBGE, 2004) e apresentam forte influência da sazonalidade, influenciada pela distribuição do regime pluviométrico.

3.2.1. Cerrado

O bioma do cerrado é um dos principais centros de biodiversidade do mundo e foi ranqueado por Myers et al. (2000) como um dos 25 *hotspots* de biodiversidade do mundo, área prioritária para a conservação. Dias (1992), Myers et al. (2000) e Simon e Proença (2000) estimam que o cerrado possui mais de 10 mil espécies nativas de plantas vasculares, sendo que o número registrado passa dos 6 mil.

Originalmente, o cerrado possuía uma área de 2 milhões de km², representando 23% da superfície do país, excedida apenas pela Floresta Amazônica, entretanto, devido à expansão da agricultura mecanizada mais de 60% do bioma foi perdido (CAVALCANTI; JOLY, 2002; MACHADO et al., 2004). O bioma se estende desde as bordas da Floresta Amazônica, ao norte, até estados mais ao sul como São Paulo e Paraná, proporcionando uma grande variação latitudinal e altimétrica. Segundo um estudo de extinção de espécies por riscos de mudanças climáticas de Thomas et al. (2004), o cerrado presente mais ao sul do Brasil deve ser uma área prioritária nas estratégias de conservação, já que áreas mais frias e úmidas apresentam-se como os últimos refúgios climáticos para espécies do cerrado no futuro.

A vegetação do cerrado é variada, indo de campos, passando por arbustos, formações arbóreas, até formações mais fechadas com altura de copa de 8 a 13 metros (RATTER et al., 2006). De acordo com Pennington, Lewis e Ratter (2006), nessa continuidade de formações, alguns estágios do cerrado são reconhecidos como:

- (i) Campo limpo: consistindo de campos, sem vegetação maior que formações arbustivas;
- (ii) Campo sujo: campos com dispersão de arbustos e pequenas formações arbóreas;
- (iii) Campo cerrado: também conhecido como cerrado ralo, com contínua vegetação rasteira, com poucos arbustos e árvores que não somam mais que 10% da cobertura;

- (iv) Cerrado sensu stricto: floresta baixa e espaçada, com dominância de árvores de 3 a 8 m de altura.
- (v) Cerradão: Densa floresta, de 8 a 13 m ou mais altas, fazendo uma sombra considerável ao ponto de tornar a vegetação rasteira esparsa.

3.2.2. A Caatinga

A caatinga apresenta a maior e mais isolada floresta seca da América do Sul, ocupando mais de 850.000 km². A família *Leguminosae* é a melhor representante do bioma, com 293 espécies e 77 gêneros, que compreende cerca de um terço do total de biodiversidade de plantas no local. A caatinga é caracterizada por árvores baixas e arbustos, com frequentes galhos e troncos retorcidos, com pequenas folhas decíduas na estação seca, assim como uma camada herbácea efêmera presente apenas durante a estação chuvosa (PENNINGTON, LEWIS e RATTER, 2006).

Autores como Rizzini (1963; 1979) e Andrade-Lima (1982) consideravam a caatinga pobre em endemismo e com um número baixo de espécies. Contudo, entre os anos 1990 e 2000, alguns autores surgiram contra essa teoria, demonstrando uma alta taxa de endemismo para o bioma (HARLEY, 1996; GIULIETTI et al., 2002; PRADO, 2003). Dados recentes demonstram que o bioma possui 3.150 espécies, 152 famílias e 31 gêneros endêmicos (QUEIROZ et al. 2017).

Ocupando a região nordeste e o norte de Minas Gerais, possuindo cerca de 850.000 Km² (PENNINGTON, LEWIS e RATTER, 2006). O bioma é hoje o terceiro mais degradado do país, perdendo apenas para a Mata Atlântica e o Cerrado (MYERS et al, 2000). Os principais causadores da degradação são a agropecuária e o extrativismo, aumentando o processo de desertificação do bioma (ARAÚJO FILHO, 1996).

4. MATERIAL E MÉTODOS:

4.1. Escolha dos Índices de Vegetação:

Dentre os índices apresentados, para este estudo, foram selecionados os índices NDVI, EVI e Gcc para a comparação entre as respostas fenológicas. Essa escolha baseia-se na disponibilidade de obtenção desses produtos e na existência de estudos anteriores que comparem tais índices.

4.2. Áreas de Estudo:

As áreas de estudo (**Tabela 1**) foram escolhidas pela presença de câmeras fenológicas já instaladas nos locais que são representativos de vegetação nativa dos biomas Cerrado e Caatinga.

Tabela 1. Áreas de estudo e tipo de vegetação correspondente.

Nome (ID)	Coordenadas	Localização	Tipo de vegetação
Embrapa Semiárido (CAAT)	09°05'00''S 40°19'00''W	Petrolina, PE	Caatinga
Estação Ecológica de Itirapina (IES)	22°13'23''S 47°53'03''W	Itirapina, SP	Cerrado campo sujo
Fazenda Botelho (CORE)	22°10'49''S 47°52'16''W	Itirapina, SP	Cerrado <i>sensu stricto</i>
Pé de Gigante (PEG)	21°40'00''S 47°38'30''W	Santa Rita do Passa Quatro, SP	Cerrado <i>sensu stricto</i>

As áreas de estudo já possuíam a infraestrutura necessária para o monitoramento fenológico instalada como parte do projeto multidisciplinar *e-Phenology* que teve o apoio da FAPESP e do *Microsoft Research Institute* com o objetivo de promover a utilização de novas tecnologias para o monitoramento ambiental remoto nos trópicos. Os locais de estudo contam com a instalação de câmeras do tipo Mobotix AG- Germany de 3.1 Mp de resolução, sendo que três delas possuem torres fenológicas, contando com imagens de vista superior e uma delas com imagem de vista de paisagem, conforme a Figura 1. A localização das câmeras é mostrada no mapa da figura 2, com seus respectivos biomas e formações vegetais relacionados.

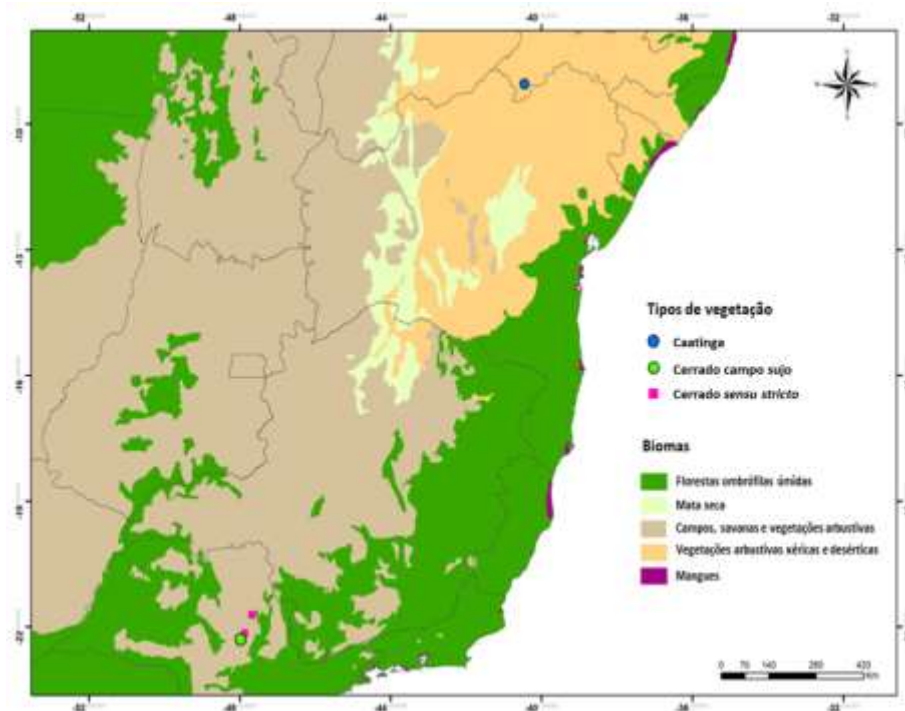


Figura 1: Mapa dos tipos de vegetação e biomas das câmeras de monitoramento fenológico. Os ponto azul indica a área de caatinga em Petrolina (PE), o ponto verde indica o cerrado campo sujo em Itirapina (SP) e os quadrados rosa indicam as áreas de cerrado campo sensu stricto uma em Itirapina (SP) e outra em Santa Rita do Passa Quatro (SP). Fonte: ALBERTON, 2018.

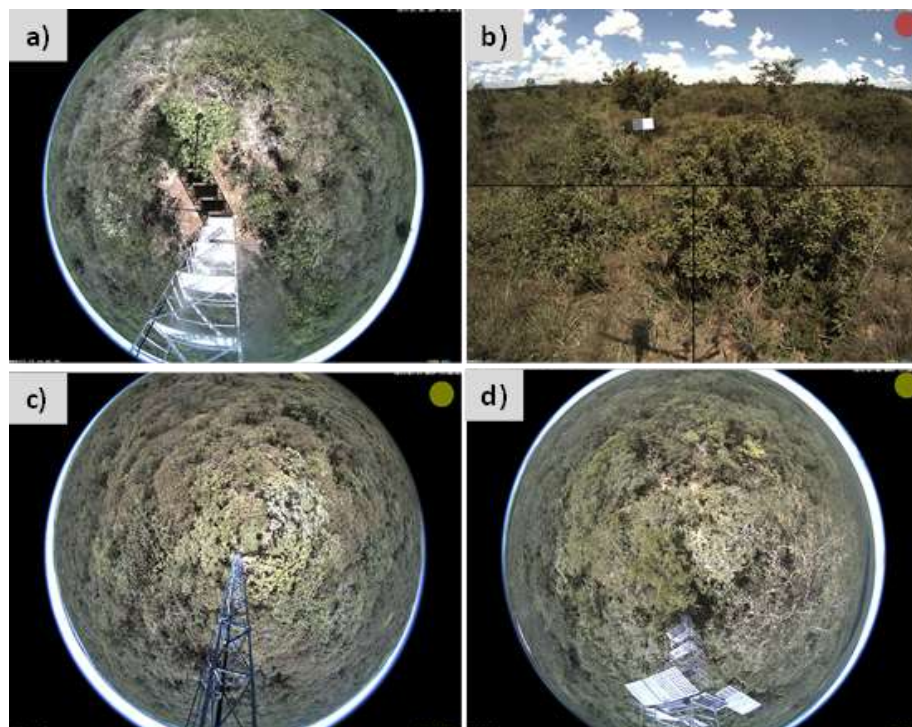


Figura 2: Imagem típica de câmera fenológica nas áreas a) Embrapa Semiárido (CAAT) com vegetação de caatinga em Petrolina (PE), b) Estação Ecológica de Itirapina (IES) com vegetação de cerrado campo sujo em Itirapina (SP), c) Fazenda Botelho (CORE) com vegetação de cerrado *sensu stricto* em Itirapina (SP) e d) Pé de Gigante com vegetação de cerrado *sensu stricto* em Santa Rita do Passa Quatro (SP).

4.3. Regime pluviométrico

4.3.1. Cerrado

O regime climático do cerrado, no estado de São Paulo, caracteriza-se como Subúmido (C2) de acordo com a classificação de Thornwaite (1948), com Índice de umidade entre 0 e 20. O clima típico do cerrado é mais úmido que a maioria de regiões savânicas do mundo, sendo que para 90% da área, as precipitações são de 800 a 2.000 mm (DIAS, 1992). Concentradas na estação chuvosa (outubro a março), possuindo uma forte estação seca (abril a setembro), com temperaturas variando de 18 °C a 28 °C e precipitação média anual de 1524 mm (REYS et al. 2013, CAMARGO et al. 2011, 2018).

Os gráficos da figura 3 demonstram o regime de chuvas para os anos das séries temporais analisadas para os municípios contendo as áreas de estudo, sendo que a Estação Ecológica de Itirapina (IES) e a Fazenda Botelho (CORE) encontram-se no município de Itirapina e o Cerrado Pé de Gigante (PEG) está localizado no município de Santa Rita do Passa Quatro.

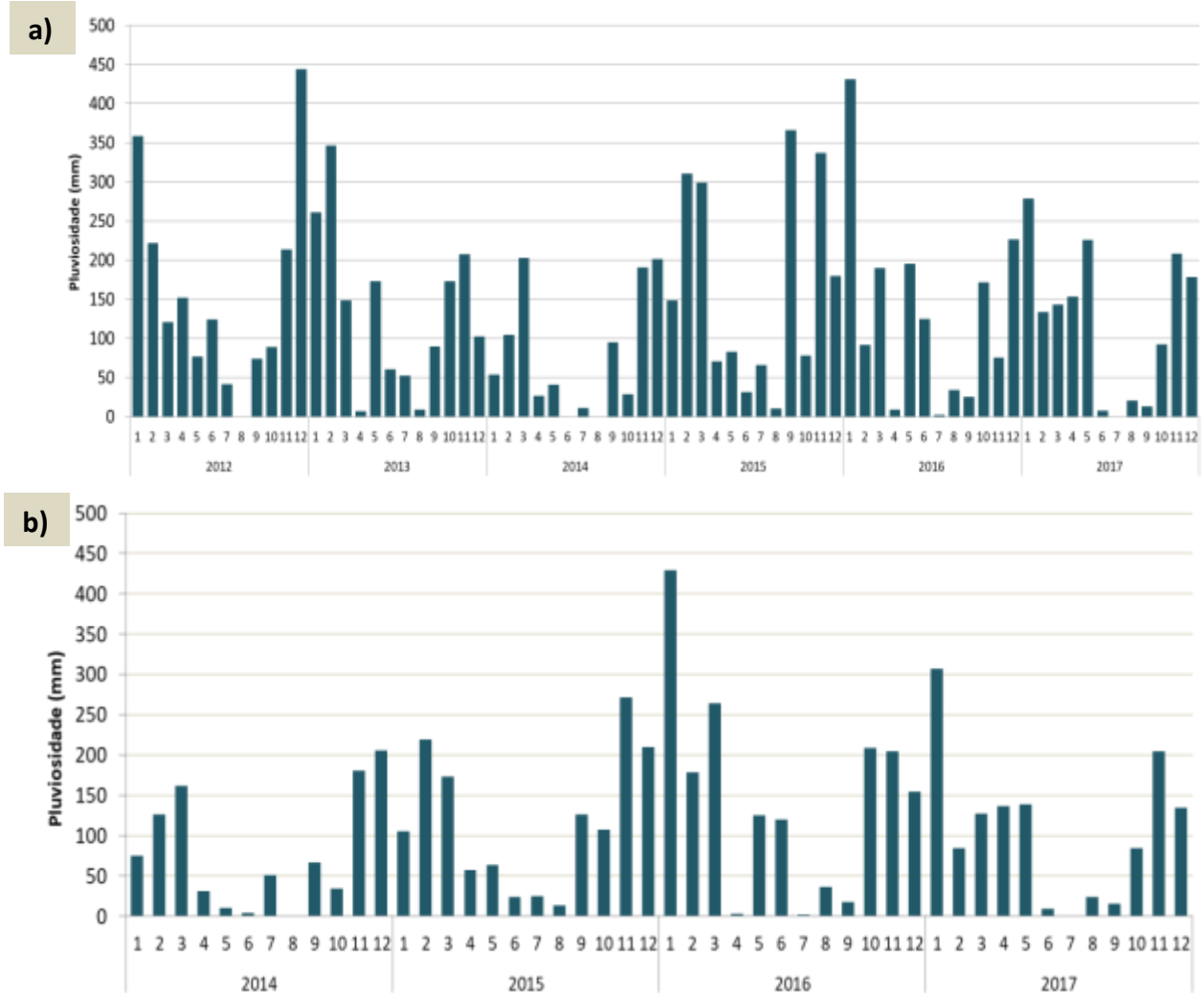


Figura 3: Gráficos de Pluviosidade. Letra a) corresponde ao município de Itirapina para os anos de 2012 a 2017 e letra b) ao município de Santa Rita do Passa Quatro- SP, para os anos de 2014 a 2017. Fonte: Figura a): Agência Nacional das Águas (ANA), 2019. Figura b): Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAAE), 2019.

4.3.2. Caatinga

Conforme Sampaio (1995), a caatinga ocorre sob um clima semiárido, com alta evapotranspiração potencial (1.500- 2.000 mm/ano) e baixa precipitação (300-1.000 mm/ano) concentrada entre 3 e 5 meses do ano. A região caracteriza-se como Semiárido (D), de acordo com a classificação de Thornwaite (1948), com Índice de umidade entre -40 e -20. A área Embrapa Semiárido (CAAT), localizada em Petrolina (PE) tem o pluviograma representado na figura 4.

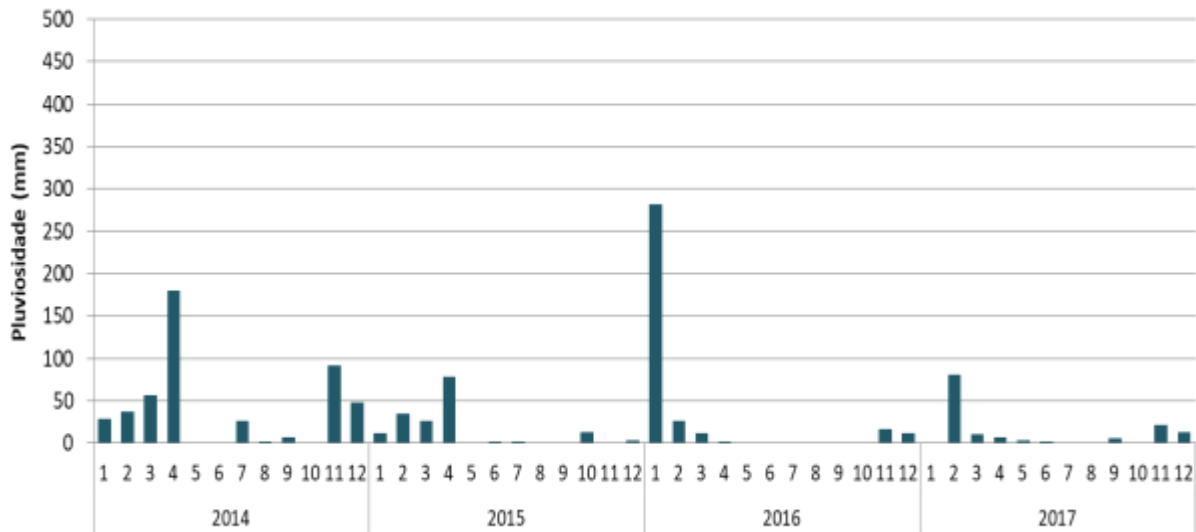


Figura 4: Gráfico de Pluviosidade para o município de Petrolina-PE, para os anos de 2014 a 2017. Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), 2019.

5. Aquisição, delimitação das ROIS e processamento de imagens

5.1. Imagens de Câmeras digitais:

As imagens de câmeras digitais foram adquiridas das câmeras Mobotix AG- Germany presentes nas áreas de estudo (ALBERTON et al. 2017), para os períodos de 2014 a 2017 para as áreas da Embrapa Semiárido (CAAT), Estação Ecológica de Itirapina (IES) e Pé de Gigante (PEG). As imagens da Fazenda Botelho (CORE) contavam com um banco de informações de 2012 a 2015. Portanto, para as comparações fenológicas foram utilizadas as estações de crescimento em comum, dos anos de 2014 e 2015.

O processo constou num total de 7 etapas: (1) Aquisição das imagens do banco de dados do Laboratório de Fenologia pertencente ao Departamento de Botânica- IB da UNESP Rio Claro; (2) As imagens foram renomeadas para padronização de nomenclatura; (3) Foi feita a inspeção visual para detecção de imagens com baixa iluminação e erros de registro, além da localização de períodos em que as câmeras se movimentaram devido à ação natural (tempestades, fortes ventos, animais) ou ação humana durante algum período de manutenção da aparelhagem; (4) Houve a seleção de Regiões de Interesse (ROIs) representando as comunidades vegetais em questão; (5) Foram criadas máscaras binárias com a delimitação das ROIs; (6) Foram extraídos os canais de cor RGB baseados no padrão de reflexão da luz (PONZONI; SHIMABUKURO, 2007) e foi calculado o índice Coordena Cromática de Verde (Gcc) pela transformação não linear do Número Digital (DN) de cada pixel que separa as proporções dos três canais de cores, conforme proposto por Sonnentag et al. (2012); (7) Foram utilizados filtros como o cálculo do valor do percentil 90 numa janela de agregação de 7 dias, para garantia da qualidade de iluminação das imagens selecionadas (SONNENTAG et

al., 2012, ALBERTON et al., 2017). Também foram utilizados filtros de interpolação para minimizar intervalos em que faltavam registros de dados. As etapas 2, 5 e 6 foram feitas por meio do software Phenoviewer que foi desenvolvido em parceria com o Instituto de Computação da Unicamp- Universidade Estadual de Campinas.

5.2. Imagens de Sensores Orbitais

O sensor MODIS, presente nas plataformas Terra, lançada em dezembro de 1999 e Aqua, lançada em maio de 2002, foi projetado para produzir dados para o estudo nos campos da atmosfera, oceano e terra, com bandas espectrais selecionadas para esses objetivos e com uma cobertura praticamente global e resolução temporal quase diária, que vai de 1 a 2 dias (JUSTICE et al., 2002). Possuindo 36 bandas espectrais, o MODIS é capaz de operar nas resoluções espaciais de 1 Km, 500 m e 250m (LATORRE et al., 2003). Dentre os muitos produtos do MODIS, os índices de vegetação EVI e NDVI são produtos de composição em que o critério de escolha é o valor máximo do pixel para os índices. Os produtos de composição possuem a resolução temporal de 16 dias e espacial de 250 m. As séries temporais do produto MODIS foram adquiridas da combinação das plataformas orbitais Aqua e Terra, já filtradas para a redução de efeitos atmosféricos. Os dados podem ser obtidos gratuitamente pelo site ivfl-info.boku.ac.at disponibilizado pela Universidade de Recursos Naturais e Ciências da Vida de Viena.

Para as áreas de estudo, foram selecionadas amostras de pixels correspondentes às áreas homogêneas dos respectivos biomas. Optou-se pela utilização de mais pixels para o cálculo do índice para evitar ruídos, já que a extração de dados de um único pixel está mais sujeita a interpretações errôneas. As imagens de satélite foram adquiridas, inicialmente, para a série temporal de 2002 a 2017, e neste trabalho foram utilizadas as estações de crescimento respectivas às das câmeras digitais para fins de comparação. A criação das ROIS das imagens do produto MODIS foram feitas na própria plataforma disponibilizada pelo site da Universidade de Recursos Naturais e Ciências da Vida de Viena, conforme a figura 5.

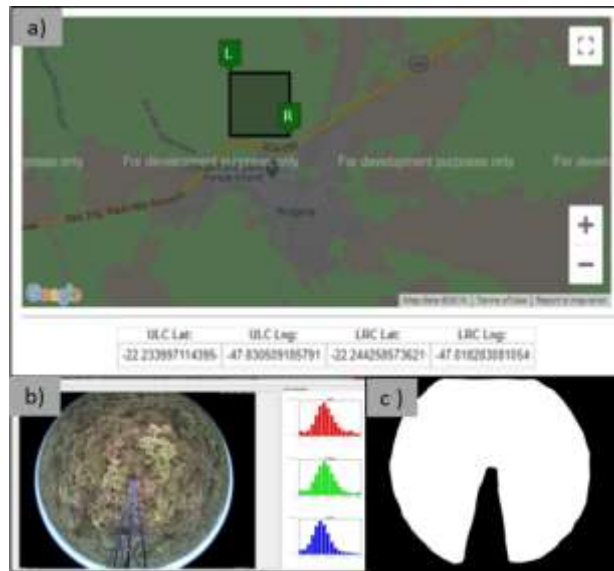


Figura 5: Seleção das ROIS. a) Representa a seleção de imagens do produto MODIS e b) Representa a interface do software Phenoviewer e c) Mostra uma máscara elaborada manualmente.

5.3. Processamento das séries temporais:

O processamento das séries temporais foi feito pelo software TIMESAT (JONSSON; EKLUNDH, 2004) por apresentar a vantagem de possuir diferentes métodos de suavização da série de índice de vegetação, além de não requerer conhecimentos sólidos em linguagem de programação.

O método de suavização escolhido foi o Savitsky-Golay, por demonstrar-se o mais adequado para a suavização das curvas fenológicas dos três diferentes índices de vegetação. Os outros dois métodos causaram um excesso de suavização e consequente perda de dados. O método é descrito pela seguinte equação:

$$Y_j = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} C_i Y_{j+i}}{N}$$

Em que Y é o resultado do valor do índice de vegetação, Ci é o coeficiente para o i da janela de suavização do índice, N é o número inteiro da convolução e é igual à janela de suavização (2m +1). O j representa o índice de processamento ordenado da tabela original e m representa a metade da janela de suavização (SAVITZKY; GOLAY, 1964). Este método é de filtragem adaptativa baseado em média móvel, cujo valor da janela de suavização deve ser pré-estabelecido pelo usuário. O processo prevê um mecanismo de controle adaptativo através

do algoritmo de ajuste de parâmetros, o que faz dele um método bastante flexível no processo de filtragem das curvas fenológicas.

O software também permite que o usuário defina os critérios para a extração das métricas. O Início da Estação de Crescimento (SOS) foi definido, manualmente, como um aumento em 20% da amplitude sazonal, medido em relação ao lado esquerdo da curva. De modo análogo, o Fim da Estação de Crescimento (EOS) foi definido como um decrescimento a 20% da amplitude sazonal, medido em relação ao lado direito da curva. Tal critério foi definido através da inspeção visual de várias amostras e tem o intuito de abranger o comprimento máximo da estação de crescimento até o ponto em que não é influenciado por possíveis ruídos presentes em períodos que o sinal está mais fraco.

O Pico da Estação de Crescimento (MID) foi então estabelecido como o valor médio das datas em que os valores da curva aumentaram 80% em relação ao limite esquerdo e diminuíram em 80% em relação ao limite direito, como já é pré-definido pelo cálculo do software.

5.4. Comparação de dados

Para quantificar as diferenças entre os três Índices de Vegetação (IVs), foram feitos os cálculos de datas médias entre as datas extraídas, além das diferenças entre o NDVI e EVI em relação ao GCC, com posterior análise de dispersão das datas por regressão linear simples.

6. RESULTADOS:

6.1. Início da Estação de Crescimento (SOS), Pico da Estação de Crescimento (MID) e Final da Estação de Crescimento (EOS)

Os resultados da extração fenológica são mostrados na tabela 2. Foi possível verificar que para a maioria das datas de Início de Estação de Crescimento SOS ocorre um atraso do sinal do GCC em relação aos produtos do MODIS. Para a Embrapa Semiárido, a média da diferença foi de 16 dias de atraso em relação ao NDVI e 25 dias de atraso em relação ao EVI. Para o Pé de Gigante (PEG), as médias da diferença foram de 10 e 38 dias em relação ao NDVI e EVI, respectivamente. A área Estação Ecológica de Itirapina (IES) demonstrou um comportamento contrário, apresentando na verdade um adiantamento do Gcc em relação aos dados do produto MODIS, sendo de 31 e 19 dias adiantados em relação ao NDVI e EVI, respectivamente. A área Fazenda Botelho (CORE) teve apenas uma estação de crescimento

registrada, por esse motivo a média dessa área de estudo não foi contabilizada, entretanto, a localidade também demonstrou um grande adiantamento em relação aos índices do produto MODIS (NDVI com 143 dias e EVI com 108 dias). As datas de início de estação de crescimento são eventos fenológicos mais difíceis de serem monitorados (BROWNING et al., 2017) e essa verificação pode ser observada pela presença de variados padrões para o SOS.

Já os resultados de Pico (MID) e Fim da Estação de Crescimento (EOS) demonstram um padrão oposto do SOS, sendo que os eventos fenológicos levam mais tempo serem detectado pelos produtos do MODIS e aparecem mais rapidamente nas curvas do GCC. Por exemplo, para o MID as datas do Gcc apresentaram um adiantamento das médias da diferença em relação ao NDVI de 43 dias para a Embrapa Semiárido (CAAT), 45 dias para a Estação Ecológica de Itirapina (IES) e 156 dias para o Pé de Gigante (PEG), sendo que a única estação de crescimento monitorada para a Fazenda Botelho (CORE) também demonstrou um adiantamento do Gcc de 91 dias em relação ao NDVI. Em relação ao EVI, os adiantamentos das médias foram de 38, 15 e 109 dias, para as áreas Embrapa Semiárido (CAAT), Estação Ecológica de Itirapina (IES) e Pé de Gigante (PEG), respectivamente e a única estação monitorada da Fazenda Botelho (CORE) também apresentou um adiantamento de 68 dias.

Para o EOS, as médias das diferenças também demonstraram um adiantamento na detecção do sinal do Gcc e apenas uma das áreas apresentou um comportamento contrário de atraso em relação ao sinal do NDVI. Os resultados das médias das diferenças encontradas em relação ao NDVI foram um adiantamento médio de 13 dias para a Embrapa Semiárido (CAAT), 45 dias para a Estação Ecológica de Itirapina (IES), 37 dias para o Pé de Gigante (PEG), sendo que a única estação de crescimento registrada para a Fazenda Botelho (CORE) também demonstrou um adiantamento de 104 dias. Para o EVI, o adiantamento foi de 4 dias para a Embrapa Semiárido (CAAT), 24 dias para a Estação Ecológica de Itirapina (IES) e 90 dias para a única estação monitorada na Fazenda Botelho (CORE). O Pé de Gigante (PEG) demonstrou comportamento oposto, apresentando uma média de variação com um atraso de 9 dias em relação ao EVI.

Também foram verificados que ambos os produtos do MODIS (EVI e NDVI) apresentaram variações entre si para a resposta para o monitoramento. De modo geral, nota-se que o EVI foi um índice mais sensível para o monitoramento da fenologia vegetal, aproximando-se das datas dos eventos fenológicos obtidos por extração de câmeras digitais, enquanto que o NDVI contribuiu para um maior distanciamento entre as datas. Essa

observação fica mais evidente analisando as médias de Pico (MID) e Fim (EOS) da Estação de Crescimento conforme a tabela 2. Exemplificando, para as datas de MID da Embrapa Semiárido (CAAT), a média da diferença do EVI encontra-se 5 dias mais próxima da data média do Gcc em relação à data média do NDVI (43 e 38 dias de diferença, nessa ordem). Este padrão é observado para todas as áreas, em que, a data do EVI apresenta-se 30 dias mais próxima do Gcc na Estação Ecológica de Itirapina (IES), 23 dias mais próxima na Fazenda Botelho (CORE) e 47 dias mais próxima no Pé de Gigante (PEG) quando comparadas com as datas do NDVI. Para o EOS, o mesmo efeito é encontrado, sendo que as datas do EVI estão mais próximas em 9, 21, 14 e 28 dias em relação às médias das datas do NDVI, para as áreas Embrapa Semiárido (CAAT), Estação Ecológica de Itirapina (IES), Fazenda Botelho (CORE) e Pé de Gigante (PEG), respectivamente.

Uma análise de dispersão das datas permite afirmar que os dados com uma melhor relação foram o de Final da Estação de Crescimento (EOS), com R^2 de 0,5139 para o NDVI e 0,3747 para o EVI. Apesar de o EVI possuir uma melhor aproximação em relação às datas Gcc, os dados melhor relacionados para o EOS foram os de NDVI vide figura 7.

As datas de Início de Estação de Crescimento (SOS) também apresentaram bons valores de relação com R^2 de 0,4661 para o NDVI e 0,3543 para o EVI, enquanto que os valores de Pico de Estação de Crescimento (MID) apresentaram uma relação muito baixa, tanto para o NDVI quanto para o EVI, com R^2 de 0,0007 e 0,0568.

Tabela 2: Datas em Day of Year (DOY) dos eventos fenológicos SOS, MID, EOS dos anos de 2014 a 2017 para as quatro áreas de estudo.

Início da Estação de Crescimento (SOS)						
		NDVI	EVI	GCC	NDVI-GCC	EVI-GCC
Embrapa Semiárido (CAAT)	Estação 1	284 (2014)	276 (2014)	318 (2014)	-34	-42
	Estação 2	313 (2015)	307 (2015)	340 (2015)	-27	-33
	Estação 3	295 (2016)	281 (2016)	281 (2016)	14	0
	Média	297	288	313	-16	-25
Estação Ecológica de Itirapina (IES)	Estação 1	268 (2014)	263 (2014)	256 (2014)	12	7
	Estação 2	281 (2015)	258 (2015)	219 (2015)	62	39
	Estação 3	265 (2016)	257 (2016)	245 (2016)	20	12
	Média	271	259	240	31	19
Fazenda Botelho (CORE)	Estação 1	295 (2014)	260 (2014)	152 (2014)	143	108
	Estação 2	-	-	-	-	-
	Estação 3	-	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	-
Pé de Gigante (PEG)	Estação 1	293 (2014)	261 (2014)	238 (2014)	55	23
	Estação 2	268 (2015)	243 (2015)	252 (2015)	16	-9
	Estação 3	264 (2016)	237 (2016)	365 (2016)	-101	-128
	Média	275	247	285	-10	-38
Pico da Estação de Crescimento (MID)						
Embrapa Semiárido (CAAT)	Estação 1	62 (2015)	52 (2015)	354 (2014)	73	63
	Estação 2	57 (2016)	52 (2016)	54 (2016)	3	-2
	Estação 3	84 (2017)	85 (2017)	33 (2017)	51	52
	Média	68	63	25	43	38
Estação Ecológica de Itirapina (IES)	Estação 1	46 (2015)	20 (2015)	322 (2014)	89	63
	Estação 2	51 (2016)	19 (2016)	64 (2015)	-13	-45
	Estação 3	55 (2017)	23 (2017)	362 (2016)	58	26
	Média	51	21	6	45	15
Fazenda Botelho (CORE)	Estação 1	11 (2015)	353 (2014)	285 (2014)	91	68
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	-
Pé de Gigante (PEG)	Estação 1	62 (2015)	009 (2015)	320 (2014)	107	54
	Estação 2	35 (2016)	361 (2015)	305 (2015)	95	56
	Estação 3	37 (2017)	355 (2016)	136 (2016)	266	219
	Média	45	363	254	156	109
Fim da Estação de Crescimento (EOS)						
Embrapa Semiárido (CAAT)	Estação 1	209 (2015)	195 (2015)	200 (2015)	9	-5
	Estação 2	180 (2016)	168 (2016)	173 (2016)	7	-5
	Estação 3	211 (2017)	210 (2017)	188 (2017)	23	22
	Média	200	191	187	13	4
Estação Ecológica de Itirapina (IES)	Estação 1	190 (2015)	163 (2015)	120 (2015)	70	43
	Estação 2	176 (2016)	164 (2016)	159 (2016)	17	5
	Estação 3	188 (2017)	166 (2017)	141 (2017)	47	25
	Média	185	164	140	45	24
Fazenda Botelho (CORE)	Estação 1	116 (2015)	102 (2015)	12 (2015)	104	90
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	-
Pé de Gigante (PEG)	Estação 1	195 (2015)	145 (2015)	214 (2015)	-19	-69
	Estação 2	178 (2016)	135 (2016)	14 (2016)	164	121
	Estação 3	187 (2017)	142 (2017)	223 (2017)	-36	-81
	Média	187	141	150	37	-9

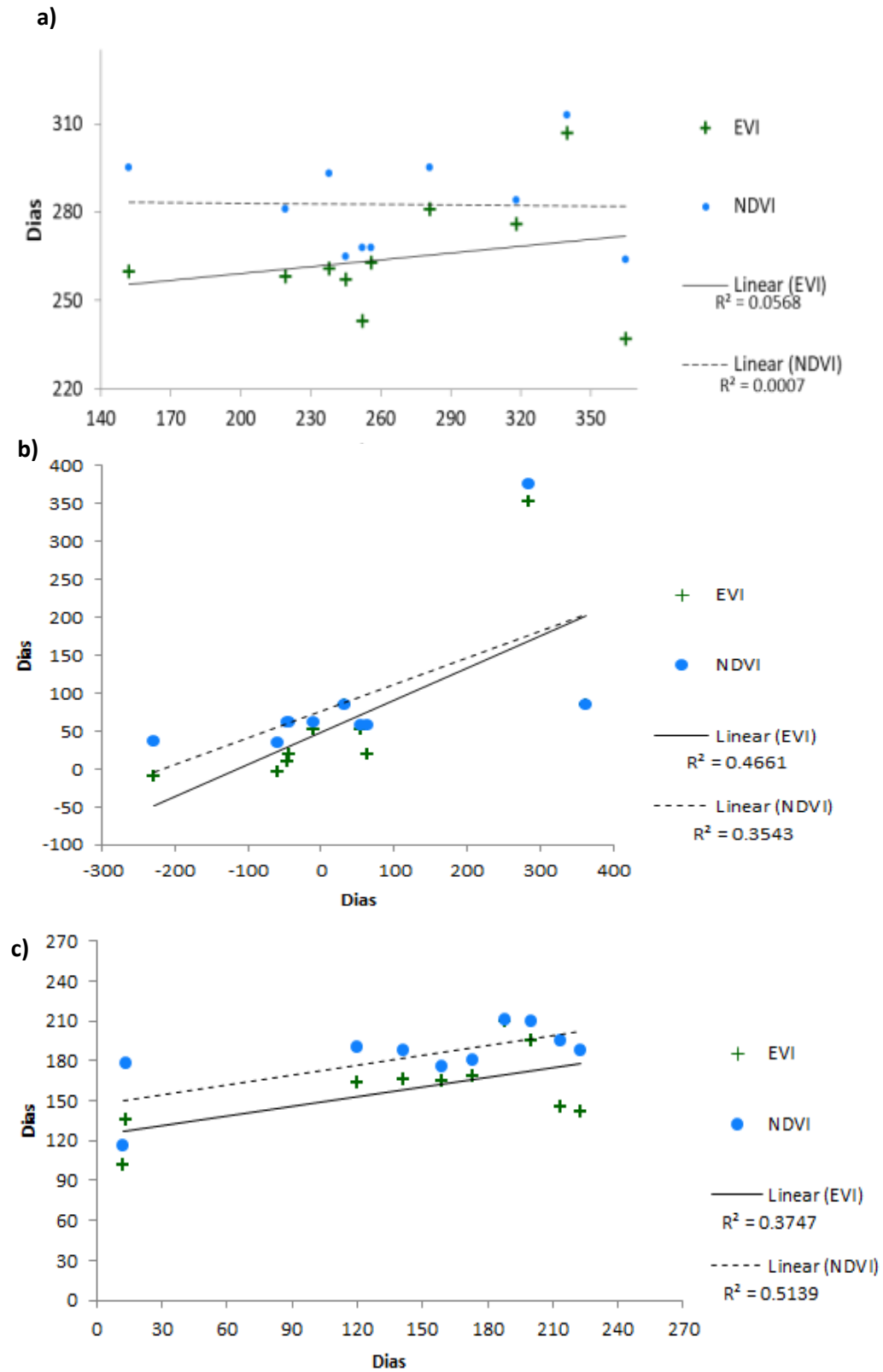


Figura 7: Relação entre as datas dos eventos fenológicos. O eixo x contém as datas extraídas do índice Gcc e o eixo y as datas extraídas do EVI e NDVI. Os gráficos a) representam as datas de SOS, b) representam as datas de MID e c) representam as datas EOS. O eixo do gráfico b) apresenta valores negativos devido à relação relativa às datas atrasadas na mudança entre as estações de crescimento.

6.2. Curvas fenológicas:

A Embrapa Semiárido (CAAT), inserida no bioma da caatinga, apresentou as maiores amplitudes de variação sazonal, como é esperado em áreas sob climas semiáridos conforme a figura 8 a), com valores de NDVI variando de 0,8 a 0,4, de EVI de 0,4 a 0,1 e Gcc 0,355 a 0,340.

A Estação Ecológica de Itirapina (IES), que possui a fitofisionomia cerrado campo sujo, apresentou, no geral, a segunda maior amplitude sazonal, com índices de NDVI variando de 0,45 a 0,7, EVI de 0,2 a 0,4 e Gcc de 0,375 a 0,335.

As áreas de *Cerrado sensu stricto* Fazenda Botelho (CORE), figura 8 c), e Pé de Gigante (PEG), figura 8 d), foram as que apresentaram menores variações de amplitude sazonal. Os valores de NDVI variaram de 0,75 a 0,85, para o EVI de 0,4 a 0,6 e para o Gcc de 0,345 a 0,355 para a área Fazenda Botelho (CORE). No Pé de Gigante (PEG) o NDVI variou de 0,7 a 0,9, o EVI de 0,3 a 0,55 e o Gcc de 0,340 a 0,355. Os valores dos Índices de Vegetação das áreas de Cerrado *sensu stricto* foram os mais altos registrados.

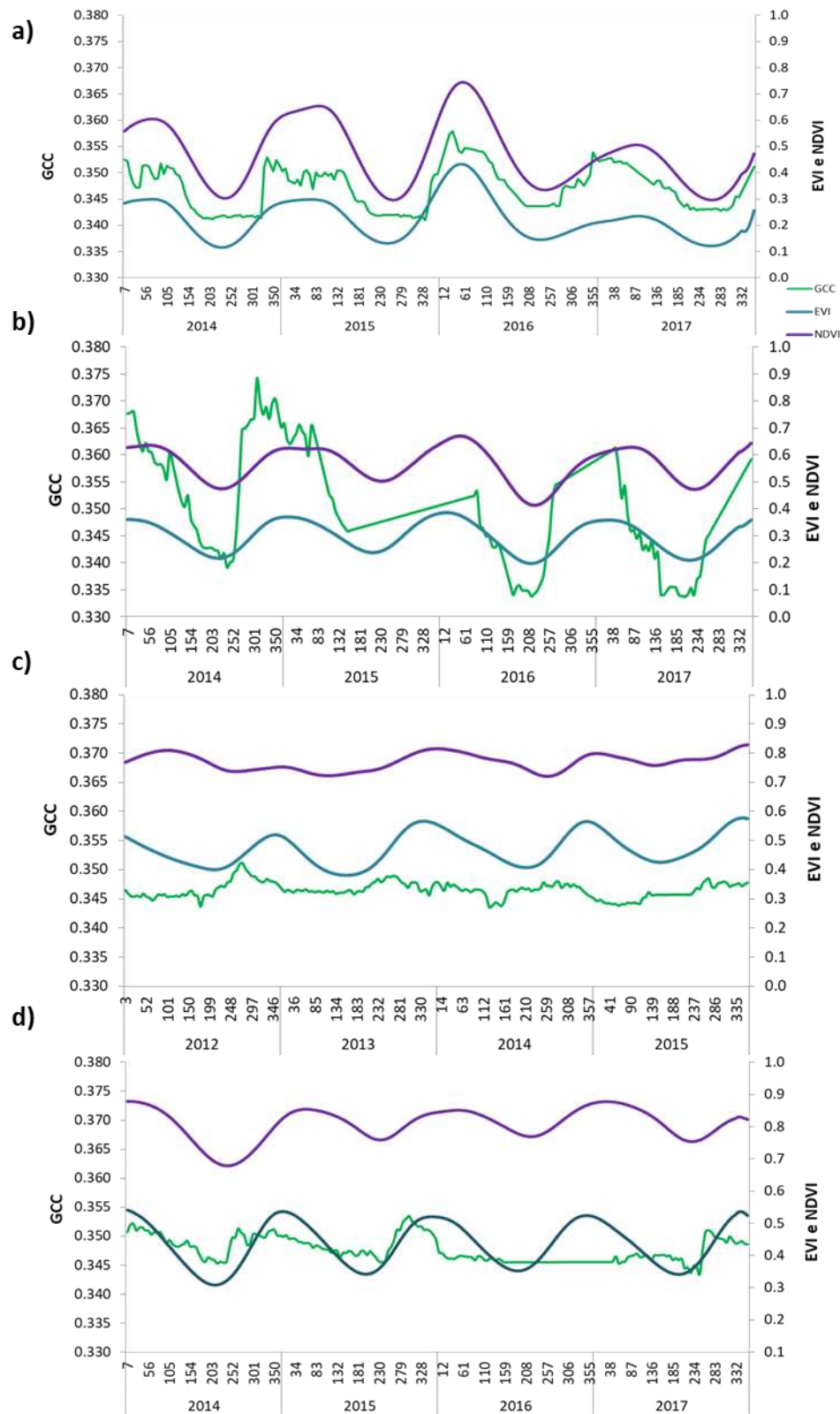


Figura 8: Séries temporais da variação dos índices GCC, EVI e NDVI. Os gráficos representam as áreas: a) Embrapa Semiárido (CAAT), b) Estação Ecológica de Itirapina (IES), c) Fazenda Botelho (CORE) e d) Pé de Gigante (PEG). Os segmentos lineares que conectam alguns pontos das curvas de Gcc são devido às interpolações simples que foram necessárias para a execução do Software TIMESAT.

7. DISCUSSÃO:

A variabilidade de áreas áridas e semiáridas pode ser mais facilmente detectada nos sinais dos produtos MODIS e das câmeras digitais (Browning et al. 2017), sendo que esta variabilidade está principalmente condicionada ao regime de distribuição de chuvas, como foi detectado para a área Embrapa Semiárido (CAAT).

Os valores dos Índices de Vegetação das áreas de *Cerrado sensu stricto* foram os mais altos registrados, indicando uma maior presença de vegetação, como já era esperado, devido à maior concentração de vegetação por área na fitofisionomia em questão em relação às outras.

De modo geral, houve concordância entre as respostas fenológicas dos diferentes métodos. A principal característica do Gcc é ser extremamente sensível às pequenas variações, já que se trata de uma escala mais refinada, enquanto que o EVI e o NDVI detectam apenas um padrão geral da resposta fenológica. Além disso, os produtos do MODIS sofrem interferência do dossel, de aerossóis, passam por uma série de filtros de suavização e ajustes, somado ao fato de que a resolução de um pixel é 250 m, o que acaba abarcando áreas que não são totalmente fiéis às ROIs que foram cuidadosamente selecionadas para o caso das câmeras digitais.

Assim como Browning et al. 2017; Hufkens et al. 2011 e Richardson et al. 2018, os resultados fenológicos, obtidos por produtos do MODIS, para o monitoramento de Início da Estação de Crescimento (SOS) ocorreram adiantados em relação aos dados obtidos por câmeras digitais.

O efeito inverso foi notado por esses mesmos autores para o monitoramento de Fim da Estação de Crescimento (EOS), em que os resultados obtidos por produtos do MODIS ocorrem com um atraso relativo ao obtido por câmeras digitais. Este mesmo efeito foi observado para as datas de Pico da Estação de Crescimento (MID).

O principal fator para a diferença na detecção da resposta fenológica entre os métodos consiste em equipamentos diferentes medirem efeitos distintos, apresentando diferentes agentes condicionantes de resposta.

Por exemplo, os índices de cor extraídos das câmeras RGB estão condicionados à quantidade de cor extraída dos canais de uma ROI, enquanto que os índices EVI e NDVI são dependentes do infravermelho próximo, que está muito mais associado à quantidade de

vegetação presente na área. Richardson et al. 2018 destaca que a provável causa associada ao atraso da resposta dos produtos do MODIS para as datas de EOS seria a mudança de coloração das folhas durante o outono. O GCC seria capaz de detectar uma mudança na coloração da folhagem mais rapidamente, já a diminuição do índice obtido por satélite só ocorreria com a queda de fato das folhas, que só acontece dias mais tarde.

Porém, cabe destacar que o estudo conduzido por Richardson et al. 2018 ocorreu em áreas de clima temperado, com forte sazonalidade e estações bem definidas. Foi encontrado o mesmo padrão neste estudo, conduzido em áreas tropicais, entretanto, mais pesquisas quanto a esse tema são exigidas para afirmar que a mudança de coloração na folhagem representa um fator de desacoplamento temporal entre os métodos. Dificuldades em detectar a mudança de cor na folhagem de vegetação tropical já foram anteriormente salientadas por (MORELLATO et al., 2013; 2010; MORISETTE et al., 2009; RICHARDSON et al., 2007, ALBERTON et al. 2014, 2017).

Outro fator importante a ser destacado é a heterogeneidade das áreas analisadas, uma vez que são formações vegetais tropicais. Este fator dificulta na obtenção de resposta dos produtos de satélites, já que muitas informações acabam sendo agregadas num único pixel (RICHARDSON et al. 2018; BROWNING et al. 2017). Estudos revelam que as menores correlações entre os índices são em áreas heterogêneas, enfatizando que o MODIS possui uma limitação para esse tipo de análise.

8. CONCLUSÃO:

Nota-se que a diferença entre os métodos de extração altera o resultado das datas dos eventos fenológicos. Além disso, a variação de refinamento temporal e espacial influencia na resposta fenológica final.

Para este estudo, ocorreram diferenças entre as datas dos produtos do MODIS e dos extraídos de câmeras digitais, sendo que o EVI demonstrou-se mais efetivo que o NDVI em reduzir as variações temporais de Pico e Fim das Estações de Crescimento.

A utilização de métodos remotos para o monitoramento da fenologia vegetal pode ser uma importante estratégia aliada às políticas de manejo e conservação de recursos naturais dos biomas em que estão inseridas.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ALBERTON, B.C. **Fenologia remota e os padrões de trocas foliares ao longo de um gradiente de sazonalidade**. Tese (Doutorado em Ecologia e Biodiversidade) – Instituto de Biociências (IBRC) Rio Claro. Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho UNESP. 2018.
- ALBERTON, B.C. Introducing digital câmeras to monitor plant phenology in the tropics: applications for conservation. **Perspectives in ecology and conservation**, v.15, n.2, 82-90, 2017.
- ALBERTON, B.C. Using phenological câmeras to track the green up in a cerrado savanna and its on-the-ground validation. **Ecological Informatics**, v. 19, 62- 70, 2014.
- ANDRADE-LIMA, D. Present-day forest refuges in Northeastern Brazil. **Biological diversification in the tropics**, 245-251, 1982.
- ARAÚJO FILHO, J. A. **Desenvolvimento sustentável da caatinga. Sobral (CE): Ministério da Agricultura/ EMBRAPA/CNPC**, 1996. 45p.
- BROWNING, D. M. et al. Phenocams bridge the gap between field and satellite observations in na arid grassland ecosystem. **Remote Sensing**, v. 9, n. 10, 1071, 2017.
- CAMARGO, M. G, et al. Leafing patterns and leaf exchange strategies of a cerrado woody community. **Biotropica**, v. 50, n. 3, p. 442- 454, 2018.
- CAVALCANTI, R. B.; JOLY, C.A., **Biodiversity and conservation priorities in the cerrado region, in the Cerrados of Brazil**, 351, 2002.
- DAUGHTRY, C. S. et al. Estimating corn leaf clorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v. 74, 229-239, 2000.
- DIAS, B. F. de S., Cerrados: uma caracterização, em Alternativas de desenvolvimento dos cerrados: manejo e conservação dos recursos naturais renováveis, FUNATURA- IBAMA, Brasília, DF, Brasil, v. 11, 1992.
- FRIEDL, M. A. Remote sensing of croplands. **Comprehensive Remote Sensing**, v. 6, 78-95, 2018.
- GIULIETTI AM, Harley RM, Queiroz LP, Barbosa MR, Bocage AL, Figueiredo MA. **Espécies endêmicas da caatinga**. In: Sampaio EVSB, Giullietti AM, Virgínio J, Gamarra-Rojas CFL, editores. Vegetação e flora da caatinga. Recife: Associação de Plantas do Nordeste; 2002.
- GRAHAM, E.A., Yuen, E.M., Robertson, G.F., Kaiser,W.J., Hamilton, M.P., Rundel, P.W., 2009.Budburst and leaf area expansion measured with a novel mobile camera system and simple color thresholding. **Environ. Exp. Bot.** 65, 238–244.
- GRAHAM, E.A., et al., 2010. Public internetconnected cameras used as a cross-continental ground-based plant phenology monitoring system. **Glob. Chang. Biol.** 16, 3014–3023.
- HARLEY, R.M. Exemples of endemism and phytogeographical elements in the caatinga. **Anais da Reunião Especial da Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência**, 219-227, 1996.

HUETE, A., JUSTICE, C., VAN LEEUWEN W.J.D. **Modis Vegetation Index, Algorithm Theoretical Basis Document**. 1999.

HUFKENS, K. et al. Linking near-surface and satellite remote sensing measurements of deciduous broadleaf forest phenology. **Remote Sensing Environment**, v. 117, 307-321, 2011.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE lança o Mapa de Biomas do Brasil e o Mapa de Vegetação do Brasil, em comemoração ao Dia Mundial da Biodiversidade**. 2004.

JACOBS, N. et al. The global network of outdoor webcams: Properties and applications. **International Conference on Advances in Geographic Information Systems**. v. 111, 120, 2009.

JONSSON P., EKLUNDH L. TIMESAT—A program for analyzing time-series of satellite sensor data. **Comput Geosci**, v. 30, 833–45, 2004.

JORDAN, C.F. Derivation of leaf-area index from quality of light on the forest floor. **Ecology**, v.50, 663-666, 1969.

JUSTICE, C.O., et al. An overview of MODIS Land data processing and product status. **Remote Sensing of Environment**. v. 83, 3-15, 2002.

JUSTICE, C.O., et al. The moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS): land remote sensing for global change research. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, 1228-1249, 1998.

LATORRE, M. L. et al. Sensor modis: características gerais e aplicações. **Espaço & Geografia**, v. 6, n. 1, 91-121, 2003.

LIU, Y. et al. Using data from Landsat, MODIS, VIIRS and PhenoCams to monitor the phenology of California oak/grass savanna and open grassland across spatial scales. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 237-238, p. 311- 325, 2017.

MACHADO, R. B., et al. Estimativas de perda de área do Cerrado brasileiro. **Conservação Internacional**. Brasília, DF, Brasil, 2004.

MISRA, G., et al. Effects of Different Methods on the Comparison between Land Surface and Ground Phenology—A Methodological Case Study from South-Western Germany. **Remote Sens.**, v. 8, n. 753. 2016.

MORELLATO, L.P.C. et al. **The Influence of Sampling Method, Sample Size, and Frequency of Observations on Plant Phenological Patterns and Interpretation in Tropical Forest Trees. Phenological research**. Springer, 9–121. 2010.

MORELLATO, L.P.C. et al. **A review of plant phenology in South and Central America. Phenology: An Integrative Environmental Science**. Springer, 91–113. 2013.

MORELLATO, L.P.C. et al. Linking plant phenology to conservation biology. **Biological Conservation**, v. 195, 60- 72. 2016.

- MORISSETTE, J. T. et al. Tracking the rhythm of the seasons in the face of global change: Phenological research in the 21st century. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 7, n. 5, 253–260, 2009.
- MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**. v. 114, n.4, 358-371, 2013.
- MYERS, N. et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n.853, 2000.
- MYNENI, R. B., et al. The Interpretation of spectral vegetation indexes. **IEE Trans. Geosci. Remote Sens.**, v. 33, 481- 486. 1995.
- NEGI, G. C. S. Leaf and bud demography and shoot growth in evergreen and deciduous trees of central Himalaya, India. **Trees - Structure and Function**, v. 20, n. 4, 416–429, 2006.
- PARMESAN, C.; YOHE, G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. **Nature**, v. 421, n. 6918, 37–42, 2003.
- PENNINGTON R. T.; LEWIS G. P.; RATTER J.A. **Neotropical savannas and seasonally dry forests: plant diversity, biogeography and conservation**, v.69, 122-123. 2006.
- PONZONI,F.J., SHIMABUKURO,Y.E. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação**. São Paulo: Parênteses Editora, 2009.
- PRADO, D. E. As caatingas da América do Sul. **Ecologia e conservação da caatinga**, 3-73, 2003.
- RATTER, J. A. et al. Biodiversity patterns of the woody vegetation of the Brazilian Cerrado. In: PENNINGTON; R. T.; LEWIS, G. P.; RATTER J. A. **Neotropical savannas and seasonally dry forests: plant diversity, biogeography and conservation**, 31- 66, 2006.
- REICH, P. B. Phenology of tropical forests: patterns, causes, and consequences. **Canada Journal of Botany**, v. 73, n. August 1993, 164–174, 1995.
- REYS, P. et al. Estrutura e composição florística de um Cerrado sensu stricto e a sua importância para propostas de restauração ecológica. **Hoehnea**, v. 40, n. 3, 449- 464, 2013.
- RICHARDSON, A. D. et al. Use of digital webcam images to track spring green-up in a deciduous broadleaf forest. **Oecologia**, v. 152, n. 2, 323–334, 2007.
- RICHARDSON, A. D. et al. Intercomparision of phenological transition dates derived from the PhenoCam Dataset V1.0 and MODIS satellite remote sensing, n. 8, p. 5679, 2018.
- RICHARDSON, A. D. et al. Near surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology. **Ecol. Appl.** n. 19, 1417–1428. 2009.
- RIZZINI, C. T. et al. Nota prévia sobre a divisão fitogeográfica do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia*, v. 25, n. 1, p. 3-64, 1963.

- RIZZINI, C. T. et al. Tratado de fitogeografia do Brasil: aspectos sociológicos e florísticos, v. 2, 1979.
- ROUSE, J.W. et al. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS-1 Symposium NASA, 309-317, 1974.
- SAMPAIO, E.V.S.B. Overview of the Brazilian Caatinga. Seasonally Dry Tropical Forests, 35-63, 1995.
- SAVITSKY, A.; GOLAY, M.J.E. Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least-Squares Procedures. **Analytical Chemistry**, n. 36, 1627-1639. 1964.
- SCHWARTZ, M. D. **Phenology: An Integrative Environmental Science**. 1. ed. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013.
- SILVA, J. M. C. et al. **Biodiversidade da Caatinga: áreas e ações prioritárias para a conservação**. MMA/UFPE/Conservation International – Biodiversitas – Embrapa Semi-árido, 2004. 382
- SIMON, M. F.; PROENÇA, C. Phytogeographical patterns of Mimosa (Mimosoidae, Leguminosae) in the Cerrafo Biome of Brazil: an indicator of genus of high-altitude centers of endemism? **Biol. Conservation**, v. 96, 279, 2000.
- SONNENTAG, O. et al. Digital repeat photography for phenological research in forest ecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 152, n. 1, 159–177, 2012.
- THOMAS, W.W. et al. Plant endemism in two forests in southern Bahia, Brazil. **Biodiversity Conservation**, n.7, 311, 1998.
- THORNTON, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v.38, n.1, 55-94, 1948.
- WOEBBECKE D. M., et al. Color indices for weed identification under various soil residue and lighting conditions. **Transactions of the ASAE** 38, 259- 269, 1995.
- XUE, J.; SU. B. Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. **Journal of Sensors**. 2017.
- ZHA, Y. et al. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 3, 583-594, 2003.