

## VARIAÇÕES SAZONAIS INTRA E INTERANUAL DA COBERTURA VEGETAL (NDVI E SAVI) NA MATA CILIAR DO BIOMA CAATINGA ASSOCIADA AO RESERVATÓRIO DE SERRINHA II, PE, BRASIL E SUA CORRELAÇÃO COM O SPI E O VOLUME HÍDRICO ACUMULADO

**Ubiratan Joaquim da Silva Junior**

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Recife, PE, Brasil  
[ubiratan.joaquim@ufpe.br](mailto:ubiratan.joaquim@ufpe.br)

**Juarez Antônio da Silva Junior**

Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, PE, Brasil  
[juarez.silvajunior@ufpe.br](mailto:juarez.silvajunior@ufpe.br)

**Débora Natália Oliveira de Almeida**

Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, PE, Brasil,  
[debora.noalmeida@ufpe.br](mailto:debora.noalmeida@ufpe.br)

**Ester Milena dos Santos**

Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, PE, Brasil  
[ester.milena@ufpe.br](mailto:ester.milena@ufpe.br)

**Anderson Luiz Ribeiro de Paiva**

Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, PE, Brasil  
[juarez.silvajunior@ufpe.br](mailto:juarez.silvajunior@ufpe.br)

**Sylvana Melo dos Santos**

Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, PE, Brasil  
[sylvana.santos@ufpe.br](mailto:sylvana.santos@ufpe.br)

**Leidjane Maria Maciel de Oliveira**

Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, PE, Brasil  
[leidjane.oliveira@ufpe.br](mailto:leidjane.oliveira@ufpe.br)

### RESUMO

As matas ciliares são regiões ambientais que contribuem para a purificação da água, e reduzem a vulnerabilidade às inundações. Este estudo objetivou analisar as variações sazonais da cobertura vegetal da Caatinga nas proximidades do Reservatório de Serrinha II - PE, Brasil. O conjunto de dados orbitais foi composto por imagens do satélite MSI - Sentinel 2, de 2016 a 2021, entre os períodos: chuvoso e seco. Assim, avaliaram-se as respostas espectrais dos índices: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) e Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI), correlacionados com o Standardized Precipitation Index (SPI) e a variação volumétrica do reservatório. Os resultados evidenciaram que os índices indicaram crescimento da vegetação no período chuvoso e redução no período seco. De 2016 a 2018 foi identificado, ao correlacionar o SPI com os índices, a redução da vegetação devido a eventos de seca. De 2019 a 2021 tem-se um estágio de regeneração com um aumento positivo dos valores de SPI. Esses eventos também proporcionaram a redução de volume acumulado do reservatório, que apresentou o menor valor em 2017 (11,66 hm<sup>3</sup>). Com isso, a associação do SPI aos índices possibilitou a identificação de mudanças na cobertura vegetal e no volume do reservatório, ocasionadas por déficit pluviométrico.

**Palavras-chave:** MSI – Sentinel 2. Regiões ambientais. Seca.

### INTRA- AND INTER-ANNUAL SEASONAL VARIATIONS OF VEGETABLE COVER (NDVI AND SAVI) IN THE RIPARIAN FOREST OF THE CAATINGA BIOME ASSOCIATED WITH THE SERRINHA II RESERVOIR, PE, BRAZIL AND THEIR CORRELATION WITH SPI AND ACCUMULATED WATER VOLUME

### ABSTRACT

Riparian forests are environmental regions that contribute to water purification and reduce vulnerability to flooding. This study aimed to analyze the seasonal variations in Caatinga vegetation cover near the Serrinha II Reservoir - PE, Brazil. The orbital data set consisted of images from the MSI - Sentinel 2 satellite from 2016 to 2021 between the rainy and dry

periods. The spectral responses of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) were evaluated and correlated with the Standardized Precipitation Index (SPI) and the volumetric variation of the reservoir. The results showed that the indexes indicated vegetation growth in the rainy season and reduction in the dry season. From 2016 to 2018, correlating the SPI with the indexes showed a reduction in vegetation due to drought events. From 2019 to 2021, there was a regeneration stage with a positive increase in SPI values. These events also led to a reduction in the reservoir's accumulated volume, which was lowest in 2017 (11.66 hm<sup>3</sup>). The association of SPI with the indexes made it possible to identify changes in vegetation cover and reservoir volume caused by rainfall deficits.

**Keywords:** MSI – Sentinel 2. Environmental regions. Drought.

## INTRODUÇÃO

As matas ciliares são fundamentais para os ecossistemas das bacias hidrográficas (BURDON et al., 2020) bem como, para o desenvolvimento de biomas semiáridos como a Caatinga (CUNHA et al., 2020). As mudanças hidrológicas e os eventos de secas, em regiões semiáridas proporcionam alterações: na cobertura vegetal (ALBANO et al., 2020), nas propriedades térmicas e na carga de nutrientes dos rios (SURASINGHE et al., 2020). A Caatinga é considerada um dos ecossistemas brasileiros mais negligenciados e ameaçados devido ao uso inadequado e insustentável de seus recursos naturais nas últimas décadas (MORO et al., 2016). Extensas áreas com vegetação nativa foram e vem sendo desmatadas principalmente por causa do uso mal planejado da terra (GALVÍNCIO et al., 2013).

O Nordeste do Brasil, particularmente a região semiárida do Estado de Pernambuco, está sujeito às variabilidades de regimes hidrológicos (SILVA et al., 2012), o que pode proporcionar mudanças no cenário das áreas de mata ciliar. Esse fato ocorre com intensidade nestas áreas, devido, principalmente, as altas temperaturas e a elevada taxa de evapotranspiração (FRANÇA et al., 2019). Sob condições extremas de seca, a falta de água pode afetar o ecossistema de tal forma que proporciona uma mudança de cobertura do solo (desertificação) (HUGHES et al., 2017), e a ausência de cobertura vegetal. Em reservatórios artificiais, construídos para reduzir danos proporcionados por seca (FERREIRA et al., 2019), a investigação das relações entre a vegetação e os processos hidrológicos fornecem informações importantes para entender como os ecossistemas interagem com o clima.

Análises de variações sazonais do vigor vegetativo e índice hídrico (períodos secos e chuvosos) da Caatinga com base em imagens orbitais e precipitação têm sido foco de pesquisas atuais, a exemplo de: (i) Albano et al. (2020) que pesquisaram o comportamento da vegetação de áreas de mata ciliar no Estado de Nevada – EUA, integrando dados de SPI (Índice de precipitação padronizado - *Standardized Precipitation Index*) e o NDVI (Índice de vegetação por diferença padronizado - *Normalized Difference Vegetation Index*) a partir de imagens Landsat entre 1985 à 2018; (ii) Barbosa et al. (2019) que analisaram o comportamento da vegetação da Caatinga mediante eventos de seca para o Nordeste brasileiro, através de dados NDVI Meteosat-SEVIRI associados aos índices SPI e SPEI (Índice de precipitação e evapotranspiração padronizado – *Standardised Precipitation-Evapotranspiration Index*) (entre 2008 a 2016); (iii) Weissteiner et al. (2019) que avaliaram o comportamento das áreas de mata ciliar por meio de índices espectrais e mapeamento do uso do solo em regiões da Itália, a fim de obter o delineamento dessas regiões e; (iv) Paloshi et al. (2020) que investigaram a relação entre o uso da água pela vegetação e a fenologia para espécies lenhosas da Caatinga em nível de espécie e comunidade, usando diferentes escalas de resolução espacial: moderada e alta, e os produtos NDVI e SAVI (Índice de vegetação ajustado ao solo - *Soil Adjusted Vegetation Index*) derivados de imagens Sentinel-2A, no município de Serra Talhada - PE.

O estado da arte atual indica que a maioria dos estudos em biomas brasileiros (90%) são dedicados às florestas tropicais, e poucos a biomas formados por vegetação sazonalmente seca (TÁVORA; KOIDE, 2020) como a Caatinga. Este resultado torna-se ainda mais restrito quando se tem um cenário da vegetação pertencente às áreas de mata ciliar do bioma. A caracterização precisa da resposta da

vegetação às condições de seca em regiões tropicais semiáridas é crítica para compreender a ligação entre as mudanças climáticas e a degradação da terra (IPCC, 2014).

Reservatórios artificiais como Serrinha II, possuem elevado uso consuntivo (SILVA JUNIOR et al., 2021a). Ainda, pesquisas anteriores (ROCHA; BARROS JUNIOR, 2020; CUNHA et al., 2020; PALOSHI et al., 2020) mostraram que existe uma relação linear entre a precipitação e a vegetação da Caatinga em uma escala de tempo interanual. Explorando essa relação, esta contribuição faz uso de séries temporais mensais de precipitação avaliadas através do SPI e a correlação com a resposta espectral dos índices vegetativos (IVs) de forma intra e interanual, identificando os efeitos dos déficits hídricos em áreas de mata ciliar no entorno do Reservatório Serrinha II - PE.

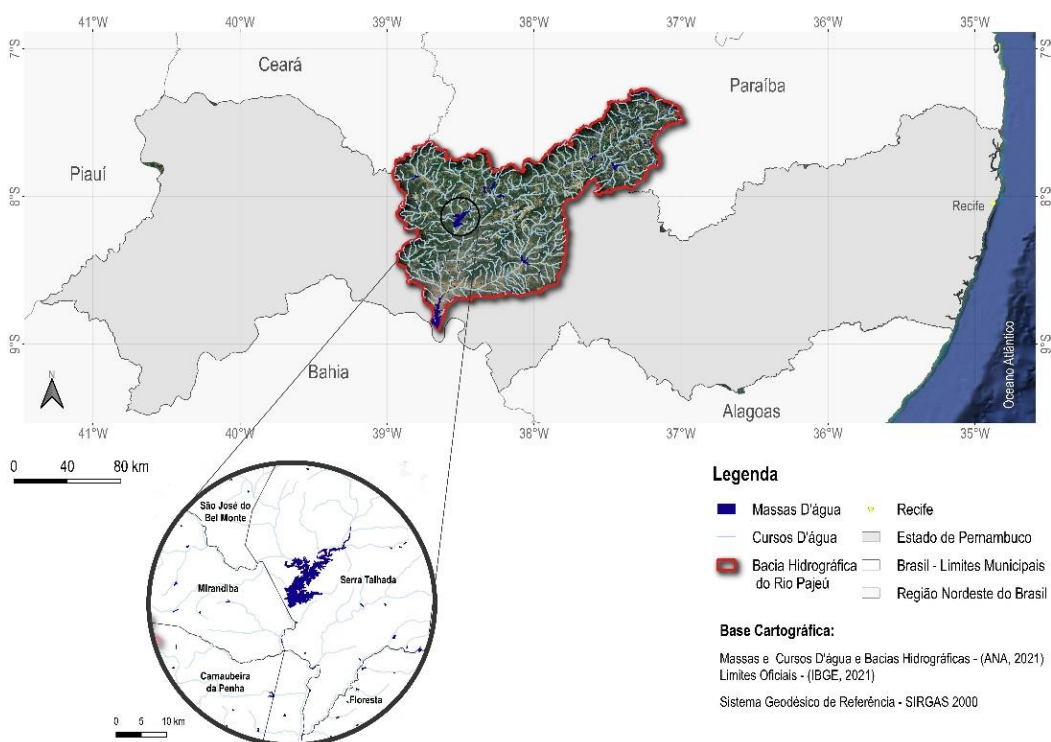
Neste contexto, os objetivos deste estudo são: (i) Investigar as alterações sazonais intra e interanual da cobertura vegetal em áreas de vegetação que envolvem a mata ciliar do bioma Caatinga, no entorno do Reservatório Serrinha II - PE, através dos índices de vegetação: NDVI e SAVI derivados de imagens dos satélites MSI - Sentinel 2A e 2B, (ii) Analisar os efeitos de déficit hídrico na mata ciliar com o volume útil do reservatório através da integração entre os índices espectrais e o SPI, (iii) Identificar possíveis ações de degradação vegetal por efeitos de seca, e (iv) Mapear as mudanças temporais ocorridas em termos espaciais referente a mata ciliar do Reservatório.

## METODOLOGIA

### Área de estudo

A área de estudo compreende a vegetação de mata ciliar no entorno do Reservatório de Serrinha II, inserido na Bacia Hidrográfica do Pajeú (Figura 1), entre as coordenadas aproximadas 09°S, 39°O e 08°S, 38°O, com média de altitude de 455 m acima do nível do mar, no município de Serra Talhada, região semiárida de Pernambuco, Nordeste brasileiro.

Figura 1 - Reservatório de Serrinha II, inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Pajeú, Serra Talhada (PE)



Fonte: Os Autores, 2023.

O clima segundo a classificação Köppen é do tipo BSs'h', o período chuvoso com precipitação média anual é de 431,8 mm (INMET, 2020). Com apenas duas estações distintas: a estação chuvosa muito quente (de fevereiro a maio) e a estação quente e seca (de junho a janeiro) (CUNHA et al., 2015).

## MATERIAL

### *Imagens orbitais*

Foram selecionadas doze imagens temporais do sensor MSI (*Multispectral Instrument*) a bordo dos satélites Sentinel 2 A e 2 B, entre os anos de 2016 e 2021. Na Tabela 1 tem-se a data de aquisição das cenas, e as características referentes aos satélites MSI – Sentinel 2 A e B.

O critério para seleção das imagens foi definido para os períodos de janeiro a julho (alta intensidade pluviométrica) e agosto a dezembro (baixa intensidade de precipitação), seguindo a mesma metodologia proposta por Barbosa et al. (2006) e Cunha et al. (2020). A variabilidade pluviométrica foi levada em consideração com a finalidade de identificar mudanças sazonais no cenário da vegetação, quer sejam por efeitos naturais ou ações antrópicas. Além da sazonalidade hidrológica são considerados fatores inerentes aos sensores como: ampla cobertura, ausência de nuvens, e disponibilidade de dados na nuvem.

Tabela 1 - Data de aquisição das cenas e características do MSI – Sentinel 2 A e B

Data de aquisição da cena	Período de incidência pluviométrica	Características do MSI – Sentinel 2	
14 /05/2016	Chuvoso (janeiro a julho)	Resolução Espectral: 0,443 a 2,190 (µm).	
16/05/2017		Resolução Espacial: 10 e 20 (m).	
20/07/2018		Resolução Temporal: 5 dias.	
05/07/2019		Resolução Radiométrica: 12 (bits).	
02/07/2020		Nível de Processamento: 1 C, valores de refletância do topo da atmosfera (TOA).	
12/07/2021			
10/11/2016	Seco (agosto a dezembro)		Aquisição: Projeto <i>Copernicus</i> da Agência Espacial Europeia (ESA)
12/11/2017			
17/11/2018			
17/11/2019			
16/11/2020			
17/11/2021			

Fonte: Adaptado de ESA (2022).

### *Dados hidrológicos*

Os dados de precipitação foram obtidos no acervo de Monitoramento Pluviométrico do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), gerenciado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). As estações foram escolhidas devido à proximidade com o reservatório e disponibilidade de dados. A série histórica pluviométrica acumulada mensal foi avaliada de 2016 a 2021, possibilitando estimar os padrões de SPI e a correlação com o período de aquisição das imagens. Foram utilizadas como estações base: 838021, 838000 e 838002 disponíveis no acervo.

Os dados do volume útil do reservatório Serrinha II foram obtidos no Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (SAR) integrado ao SNIRH, disponibilizados através do portal eletrônico de dados dos Reservatórios do Norte, Nordeste e Semiárido da ANA (ANA, 2023).

## MÉTODOS

A metodologia abordada dividida em três etapas: aquisição de dados, em que foram selecionadas as imagens e dados hidrológicos. Processamento dos dados, com o cálculo dos índices espectrais e extração das feições: área superficial do reservatório e da vegetação associada. E por fim, análise dos dados e validação tendo como do dado de referência as frações: vegetação e água extraídas por meio do Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME). Os itens a seguir, detalham os processos metodológicos desenvolvidos.

### ***Processamento digital das imagens***

As imagens foram pré-processadas através do *software* livre acesso QGis 3.16, utilizando o método de subtração de objetos escuros (*Dark Object Subtraction – DOS*), desenvolvido por Chavez (1988). Em seguida, processados os índices espectrais com a finalidade de analisar as mudanças sazonais da cobertura vegetal. Os índices de vegetação baseiam-se nas diferenças de refletividade que a vegetação de cor verde apresenta nas regiões do visível e do infravermelho (JENSEN, 2011), com variação de -1 a 1. Os maiores valores dos índices de vegetação são encontrados em áreas com presença de vegetação, enquanto os menores valores ocorrem em áreas de solo descoberto (CUNHA et al., 2015; MARIANO et al., 2018; ZHAO et al., 2020). Dessa forma, para cada imagem MSI – Sentinel 2 foram processados os índices: NDVI (ROUSE JR. et al., 1973; TUCKER, 1979) e SAVI (HUETE, 1988), com o intuito de comparar as respostas espectrais dos índices às mudanças na paisagem a partir da variação da distribuição espacial dos *pixels*, para as classes: mata ciliar (vegetação) e reservatório (água), através de cartas imagens e análises estatísticas por representações gráficas, correlação de Pearson ( $\alpha$ ) e coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

### ***Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME)***

Na análise de mistura espectral linear, um *pixel* misto é decomposto como uma combinação linear de membros finais e suas abundâncias fracionárias de *subpixel* (DEGERICK et al., 2019). Ao representar cada *pixel* como uma combinação de membros finais, as imagens de fração resultantes fornecem representações de campo contínuo das gradações espectralmente heterogêneas na cobertura da Terra (SMALL; MILESI, 2013). Esta metodologia baseia-se em experimentos desenvolvidos por Mayes; Mustard e Melillo (2015) e Penha et al. (2020). O MLME utilizado proposto por Ponzoni (1991) e discutido por Shimabukuro e Ponzoni (2019), onde é extraído de cada cena MSI-Sentinel 2, em *pixels* referentes as frações: água e vegetação utilizadas para o processo de validação do mapeamento como referência.

### ***Classificação binária***

Um sistema de classificação binária é estabelecido por meio da atribuição de valores fixos para relacionar elementos a um conjunto, ou seja, baseado no princípio do terceiro excluído. Assim, são atribuídas as condições de pertinência (valor 1) e não pertinência (valor 0), indicando a presença e não presença do alvo a classe. Para realizar a binarização dos índices, analisa-se a variação dos histogramas das componentes espectrais geradas pelos índices, em seguida definido um limiar, ou seja, um intervalo de níveis de cinza, que corresponda à feição que se deseja extrair. Como descrito em metodologias adotadas por Ponzoni e Shimabukuro (2019), Cunha et al. (2020) e Silva Junior et al. (2021b).

### ***Índice de precipitação padronizado (SPI)***

O SPI realiza análises estatísticas de dados temporais de precipitação e pode ser calculado para uma variedade de escalas de tempo (MCKEE et al., 1993). Essa versatilidade permite o uso do SPI para monitorar o abastecimento de água de curto prazo, como a umidade do solo, importante para a

produção agrícola (BARBOSA et al., 2006). Estas vantagens do uso do SPI refletem a influência da seca em diferentes fontes hídricas, e, conseqüentemente, indicando o impacto em curto, médio e longo prazo (MARTINS et al., 2012).

O SPI foi avaliado em três escalas de tempo: 3, 12 e 24 meses, entre os anos de 2016 e 2021, através dos dados mensais de precipitação da ANA (2023), obtidos numa série de 34 anos (1990 – 2021). Essa variação de escala de SPI foi escolhida com o intuito de verificar o comportamento da vegetação aos eventos de secas a curto e médio prazos (BONACCORSO et al., 2003; LIMA et al., 2012). Esses valores foram analisados através dos padrões de precipitação para valores de SPI, como descritos por Mckee et al. (1993).

Para modelagem da série temporal através do SPI, utilizou-se *software* de livre acesso *SPI Generator*, desenvolvido pelo Centro Nacional de Mitigação de Secas dos Estados Unidos (NDMC), utilizando em seu processamento o desenvolvimento de Equações para o SPI descritos por Mckee et al. (1993). Os valores de SPI foram correlacionados com a resposta espectral dos índices espectrais e o volume do reservatório entre os anos de 2016 e 2021.

### **Análises, mapeamento e validação das áreas extraídas no mapeamento**

O mapeamento das áreas foi obtido através da binarização dos índices, nas classes: mata ciliar (vegetação) e reservatório (água). A validação do mapeamento foi realizada através da comparação de limiares das amostras de *pixels* derivadas da razão das bandas espectrais dos índices e sua resposta de reflectância aos limiares das binarizações com os *pixels* “puros” gerados pelas frações água e vegetação do MLME. Esses limiares foram gerados através de amostras de treinamento obtidas a partir das assinaturas espectrais dos alvos disponibilizadas através da *United States Geological Survey* (USGS, 2023), considerando uma porcentagem de 95% de pureza.

O mapa de referência é um produto da binarização das frações pelo algoritmo de classificação automática *K-means*, seguido por uma edição manual de imagem pós-classificação. O qual possibilita identificar o grau de acurácia dos índices em caracterizar as feições: mata ciliar (vegetação) e reservatório (água), através dos elementos gerados pela matriz de confusão ou de erros: Índice *Kappa*, Acurácia Global e Erros de Omissão (Eo) e Comissão (Ec).

Os Eo relacionam-se a acurácia do produtor, ou seja, referem-se a erros de classificação de outras classes não são atribuídos a uma determinada classe. Por outro lado, os Ec, estão associados a acurácia do usuário, referem-se a *pixels* atribuídos a uma determinada classe, oriundos de erros de classificação das outras classes (STEHMAN, 1997). O Índice *Kappa* é uma ferramenta utilizada para controlar este fator de concordância aleatória, sendo analisado em associação a análises de Eo, Ec e Acurácia Global. Segundo Landis e Koch (1977), para o Índice *Kappa* são consideradas as seguintes amplitudes de desempenhos: ( $\leq 0$ ) péssimo; (0 – 0,2) ruim; (0,21 - 0,4) razoável; (0,41 - 0,6) bom; (0,61 - 0,8) muito bom; e (0,81 - 1,0) excelente.

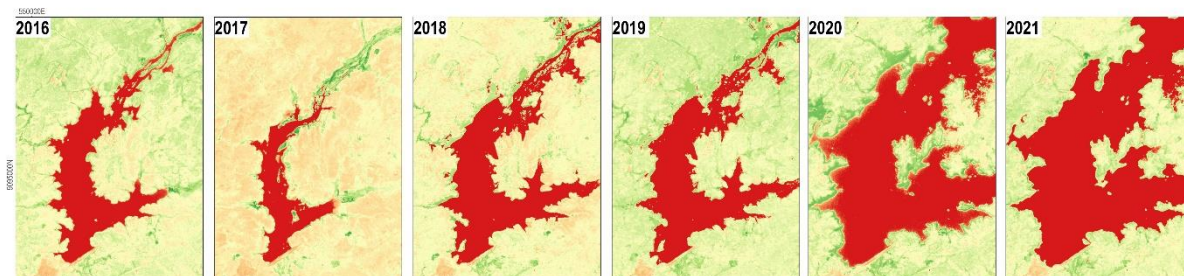
## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **Mapeamento das áreas de mata ciliar utilizando NDVI e SAVI**

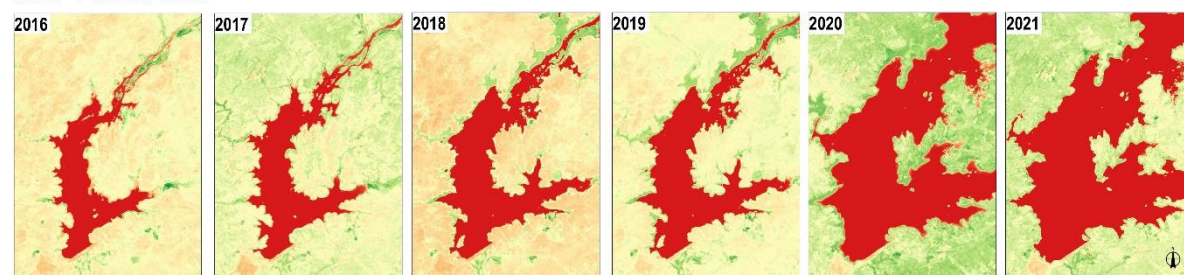
Nas Figuras 2 e 3, pode-se observar os resultados da distribuição espacial dos *pixels*, para os índices NDVI e SAVI ao longo da área de estudo nos períodos chuvoso e seco, com datas descritas conforme a Tabela 1.

Figura 2 - Distribuição espacial dos *pixels* de NDVI durante o período chuvoso e seco

NDVI - Período Chuvoso



NDVI - Período Seco



NDVI  
■ -1,0 - 0,0 ■ 0,0 - 0,2 ■ 0,2 - 0,4 ■ 0,4 - 0,6 ■ 0,6 - 1,0

0 2.000 4.000 m  
SIRGAS 2000 - 24S

Fonte: Os Autores, 2023.

O NDVI apresentou uma distribuição do índice variando de -0,40 a 0,85. Em que, os valores obtidos com *pixels* superiores a 0,54 concentraram-se no período chuvoso formando grandes áreas de cobertura vegetal e; para o período seco o índice apresentou uma queda de valores com amplitude entre -0,08 a 0,23, resultando numa baixa densidade de cobertura vegetal. Entretanto, entre 2020 e 2021 em ambos os regimes hidrológicos tem-se a presença de valores elevados entre 0,54 e 0,85, devido a um aumento da precipitação durante o período de imageamento.

Durante o período chuvoso em 2017 apesar de ser encontrada uma redução considerável da área ocupada pelo reservatório com relação aos demais anos, o índice apresentou um aumento de altos valores de NDVI, com média de 0,71 que se reduz em 2018 (média = 0,58) e volta a apresentar um aumento considerável em 2020 (média = 0,86), período em que a espelho hídrico sofre um acúmulo de água, relativamente superior aos demais anos, com uma precipitação média de 1.109,50 mm, entre janeiro e julho. No período seco, a vegetação sofre uma considerável redução em área característica das mudanças sazonais da Caatinga, até mesmo em 2020 e 2021 em que houve uma concentração elevada de volume de água no reservatório.

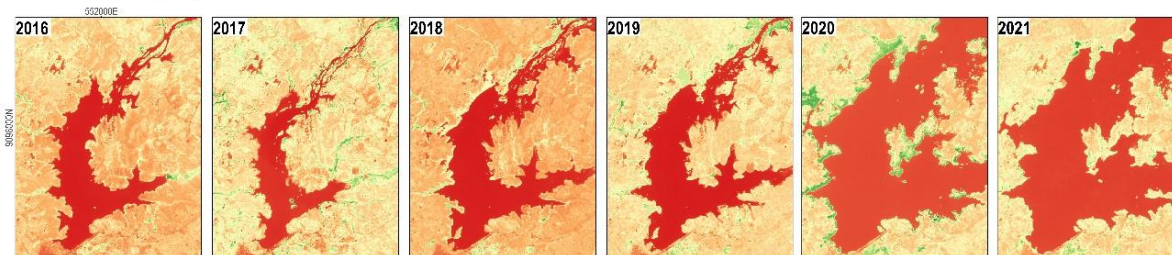
Esses resultados corroboram com Barbosa et al. (2019) quando estudaram as mudanças na cobertura vegetal do bioma Caatinga no Nordeste brasileiro, onde encontraram uma variação de NDVI em média entre 0 e 0,4 para o período seco, assim como entre 0 e 0,8 para o período chuvoso, este com maiores variações entre 0,6 e 0,8. Esses dados estão associados com capacidade do NDVI em apresentar respostas espectrais mais coerentes para biomassa em períodos de alta umidade, em relação aos demais índices (WESTINGA et al., 2020). O mesmo resultado foi visto em 2020, com uma variação entre -0,6 e 0,4 para o período seco e entre 0,4 e 0,7 para o período chuvoso e; em 2021 com máximo de 0,32 em novembro e mínimo de -0,4; e em julho entre 0,3 e 0,8. Isso pode ter ocorrido considerando que o NDVI utiliza as regiões do espectro eletromagnético mais associadas à alta absorção de clorofila na banda vermelha e alta refletância da banda NIR, por camadas de mesófilo na biomassa de folhas verdes (JENSEN, 2011). No entanto, em florestas sazonalmente secas, o NDVI apresenta limitações em identificar a vegetação caducifólia do solo subjacente durante o período seco (JACQUES et al., 2014; MAYES et al., 2015), além de sofrer forte influência das mudanças climáticas (CUNHA et al.,

2020). O que pode ter proporcionado um aumento de biomassa através do NDVI em ambos os períodos analisados em 2020 e 2021, além da influência do aumento da incidência pluviométrica.

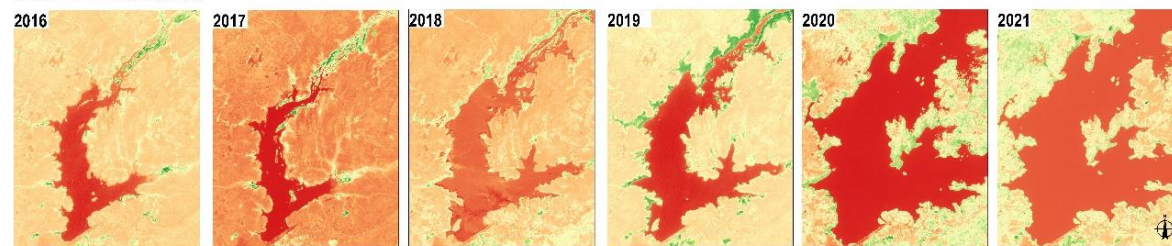
Procurou-se mostrar na Figura 3 a geoespacialização do SAVI, registrando de forma geral um decréscimo na concentração da vegetação na região em relação ao NDVI (Figura 2). Apresentando uma média de 0,48 com pixels distribuídos entre -0,11 a 0,72 para o período chuvoso e -0,05 a 0,64 para o período seco, com média de 0,25.

Figura 3 - Distribuição espacial dos *pixels* de SAVI durante o período chuvoso e seco

#### SAVI - Período Chuvoso



#### SAVI - Período Seco



#### SAVI

■ -1,0 - 0,0 ■ 0,0 - 0,2 ■ 0,2 - 0,4 ■ 0,4 - 0,6 ■ 0,6 - 1,0

0 1000 2000  
SIRGAS 2000 - 24S

Fonte: Os Autores, 2023.

Os dias estudados dos anos de 2017, 2019, 2020 e 2021 apresentaram maior quantidade de *pixels* classificados entre 0,54 e 0,85 com valor médio geral de 0,51 no período chuvoso, resultando numa maior cobertura vegetal na mata ciliar da série. Em 2016 e 2018 tem-se uma redução deste intervalo de distribuição com média de 0,43.

Para o período seco, tem-se uma variação média com valor de SAVI igual a 0,26. Em que, 2017 apresentou o menor valor médio da série (0,06), o que resultou em redução considerável de *pixels* com valores superiores a 0,54 (presença de área vegetada). Em termos de classificação espacial, houve um crescimento de áreas de *pixels* de solo exposto e uma redução de áreas vegetadas. Ou seja, o SAVI apresentou uma mistura espectral de *pixels* entre os valores variando de 0,23 a 0,54, o que proporcionou uma redução de biomassa nas áreas de mata ciliar e aumento de solo exposto. Deve-se assinalar que a redução de folhagem característica fenológica da vegetação do bioma é um atenuante, uma vez que houve uma redução de volume do dossel aliada a resolução espacial do sensor, considerando os *pixels* que deveriam ter altos valores de SAVI referentes à mata ciliar, podem ser enquadrados como solo exposto, presente nas áreas de margem do reservatório.

Uma outra feição notável quando se pesquisa o SAVI é a melhor reflectância da rugosidade da superfície em relação ao NDVI, influenciando também, o calor e o vapor de água (BASTIAANSEN, 2000); e varia de acordo com os fluxos fenológicos dos estágios da Caatinga, o que pode ter proporcionado uma maior distinção entre as classes de solo exposto e vegetação, reduzindo o número de falsos negativos. Além disso, o fator de ajuste ao solo presente no SAVI, faz com que os *pixels* relacionados à superfície aberta do solo, formem uma linha no espaço espectral das regiões vermelha e infravermelha próxima do espectro eletromagnético. Podendo ainda evitar o efeito do fundo do solo

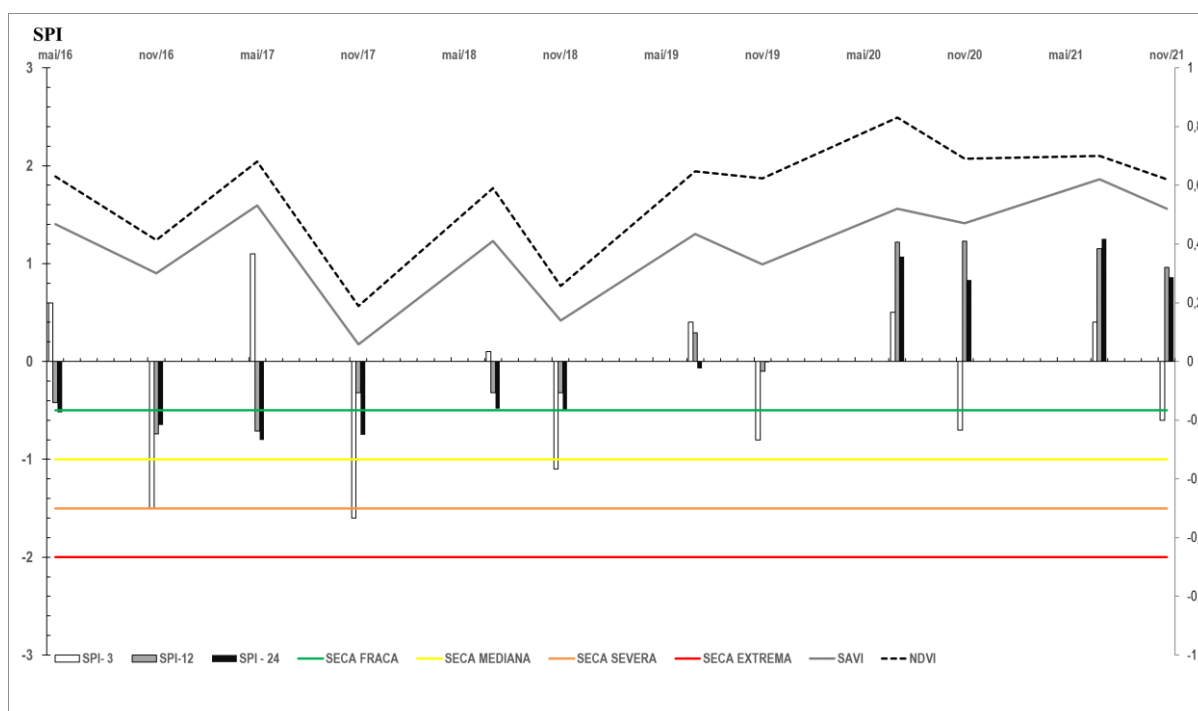


na refletância espectral do dossel da vegetação com base nas distâncias ou ângulos das isolinhas da vegetação (PRUDNIKOVA et al., 2019).

### **Análise da influência da precipitação na mata ciliar através da relação temporal entre o SPI**

Na visualização gráfica da Figura 4 destacou-se a variação temporal entre o SPI e os índices espectrais NDVI e SAVI, para os períodos seco e chuvoso, entre 2016 e 2021 no Reservatório de Serrinha II - PE. Deve-se assinalar que os valores de NDVI e SAVI apresentaram-se diretamente proporcionais ao SPI.

Figura 4 - Relação temporal entre o SPI nas escalas 12 e 24 e os índices espectrais



Fonte: Os Autores, 2023.

Verificou-se pela Figura 4, que com a redução dos valores de NDVI para o período seco, o SPI apresentou intervalos de seca variando entre fraca a severa. E um aumento dos valores para o período chuvoso, com um SPI classificando-se em presença de chuvas normais a moderadas.

A relação entre o SAVI e o SPI foi semelhante ao NDVI – SPI, em que, no período chuvoso houve um aumento dos valores de SAVI e do SPI, com ausência de secas medianas, severas ou extremas, e no período seco, em que foi identificada a presença de seca entre mediana a severa, houve a redução dos valores médios de SAVI e SPI. Entretanto, o SAVI em ambos os períodos hidrológicos apresentou valores médios inferiores ao NDVI. Essa disparidade entre os valores está associada à redução dos efeitos de saturação presentes no NDVI, reduzidos com o cálculo do SAVI. Além disso, correlacionando as análises dos índices e a resposta do SPI, durante o período de regeneração da vegetação após ser exposta a eventos de estresse hídrico, secas, incêndio ou queimadas, a vegetação secundária inicial pode se recuperar rapidamente, o que leva a uma rápida saturação dos valores NIR / Red que respondem à presença de clorofila e área foliar. E este efeito pode reduzir a sensibilidade dos índices (CUNLIFFE et al., 2020), resultando num aumento da mistura de *pixels* e uma heterogeneidade entre a resposta espectral dos índices.

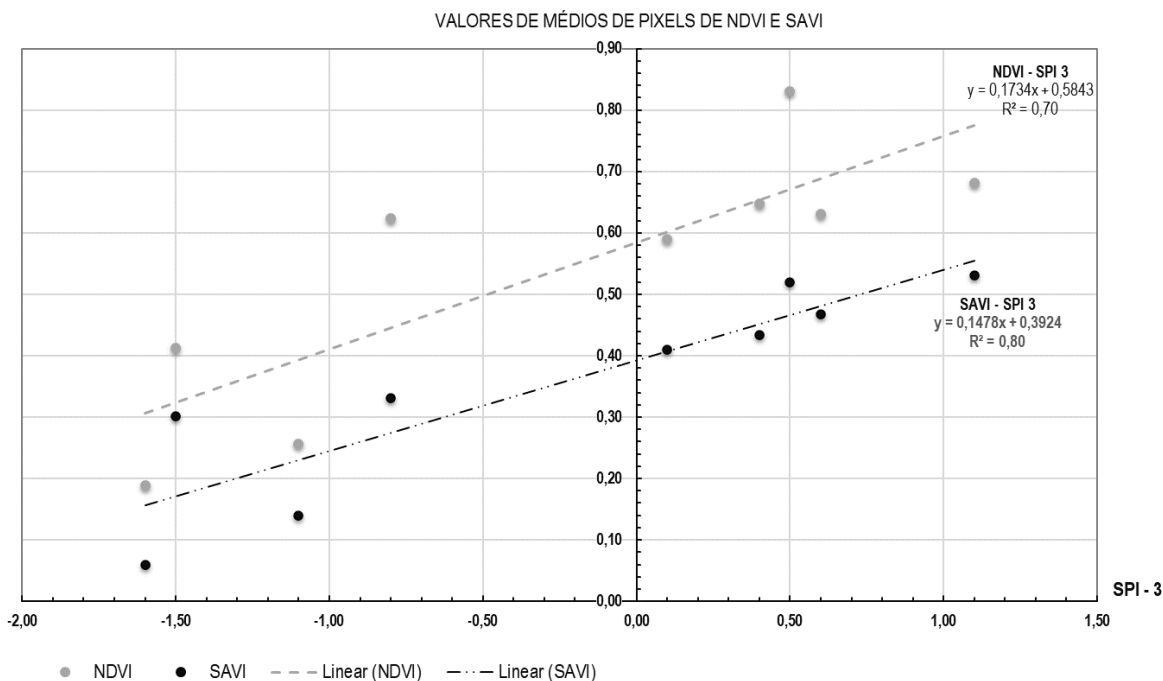
O SPI até 3 meses reflete as condições de água no solo em curto e médio prazos e, fornece a estimativa da precipitação sazonal, sendo sensível às grandes variações na magnitude da chuva (DOMINGOS, 2006). Especificamente os valores médios de SPI-3 ao longo da série (Figura 4), foram capazes de

identificar eventos mais significativos ocorridos de forma genérica, ou seja, entre novembro de 2016 e novembro de 2018 tem-se a presença de uma seca variando entre severa a extrema, porém, de curto prazo, com maior valor encontrado para novembro de 2017 (-1,6) corroborando com uma queda dos valores médios de NDVI (0,19) e SAVI (0,06). A partir de 2019, o índice tem um aumento positivo de valores SPI-3 (-0,8), indicando a presença de um déficit hídrico presente na região neste período, corroborando com o aumento dos valores de NDVI (0,62) e SAVI (0,33), que possuem significativa correlação com a incidência de precipitação.

No contexto da escala anual, o SPI-12 tornou-se mais completo por agregar todo o regime pluviométrico analisado. Segundo Guedes et al. (2012), o SPI-12 meses está diretamente associado à escassez de água em forma de vazão, e aos níveis de água dos lençóis subterrâneos. Ao longo da série em julho (SPI-12 = 1,22) e novembro de 2020 (SPI-12 = 1,23) o índice indicou a presença de chuvas medianas na região. E neste período o reservatório apresentou uma média de volume anual de 245,62 hm<sup>3</sup>. Além disso, ao longo da série o índice indicou presença de seca de fraca a mediana apenas em maio de 2017 (-0,71) e em novembro de 2016 (-0,74), nos demais apenas uma tendência a seca fraca ou ausência de seca. A escala bienal representada pelo SPI de 24, seguiu padrões próximos à escala anual, porém com maiores valores indicativos de seca variando entre a mediana. Guedes et al. (2012), sob este aspecto, afirmaram que as escalas maiores do SPI tendem a esconder algumas ocorrências de precipitação, pois valores positivos ficam inseridos na precipitação acumulada de cada período.

Ao observar o comportamento hídrico da região ao longo dos anos na Figura 4, ficou notória a escassez hídrica na região, proporcionada pela baixa precipitação sendo um forte agente atenuante na redução da cobertura vegetal da mata ciliar, uma vez que em períodos com ambas as estações chuvosas e secas, o cenário de SPI mantinha-se entre um intervalo de seca fraca a mediana, caracterizando uma seca meteorológica, formada pela variação pluviométrica característica da região. A Figura 5 apresenta a correlação entre os índices de vegetação e o SPI-3.

Figura 5 - Gráfico de correlação linear entre os índices espectrais e o SPI-3



Fonte: Os Autores, 2023.

Para o período seco, momento em que os valores de *pixels*, que representam a presença de cobertura vegetal sadia no período chuvoso, decresceram consideravelmente, o SPI teve uma variação de seca

entre fraca a severa, o que resulta num quadro de estresse hídrico na área. Os IVs apresentaram correlação direta com o SPI e muito próxima entre si. O NDVI e o SPI apresentaram uma correlação de *Pearson* ( $\alpha$ ) igual a 0,76 ( $R^2 = 0,70$ ) e o SAVI com o SPI, apresentou  $\alpha = 0,77$  ( $R^2 = 0,80$ ), considerando toda a série entre os intervalos chuvoso e seco.

**Análise da influência da precipitação no volume acumulado do reservatório através da relação temporal entre o SPI e IVs: NDVI e SAVI**

As relações entre os IVs, o SPI e o volume acumulado do Reservatório apresentaram-se diretamente proporcionais, ou seja, a medida em que os reservatórios apresentaram um aumento do volume, os valores de SPI aumentavam e, também uma elevação nos valores do NDVI e SAVI, indicando uma regeneração da cobertura vegetal. Opostamente, em períodos de déficit hídrico, como em novembro de 2016 e 2017, houve uma queda considerável dos valores dos IVs, resultando numa supressão da camada vegetal. Na Tabela 2, destaca-se a relação temporal entre a variação do volume do Reservatório, os índices e o SPI.

Tabela 2 - Relação temporal entre os índices vegetativos, SPI e o volume do Reservatório

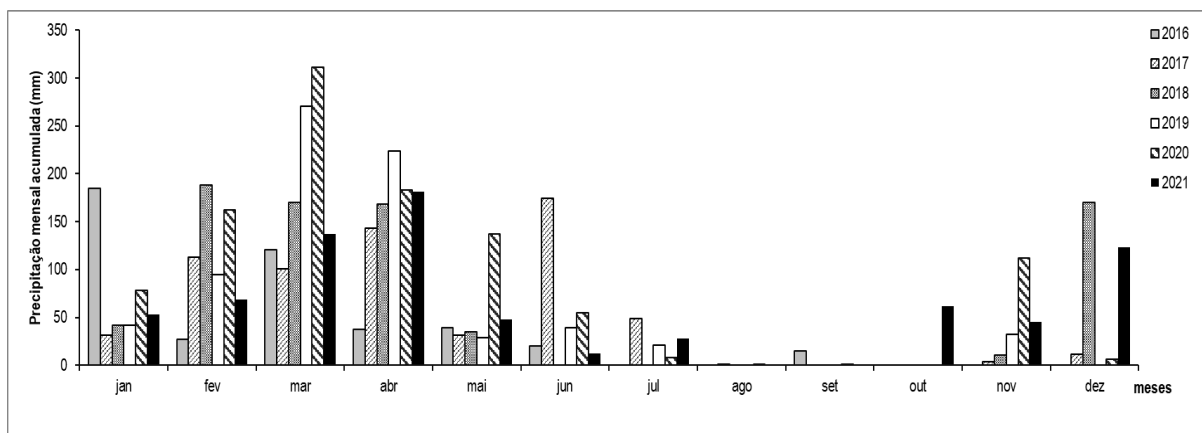
Mês	mai/16	nov/16	mai/17	nov/17	jul/18	nov/18	jul/19	nov/19	jul/20	nov/20	jul/21	nov/21
NDVI	0,63	0,41	0,68	0,19	0,59	0,26	0,65	0,62	0,83	0,69	0,70	0,62
SAVI	0,47	0,30	0,53	0,06	0,41	0,14	0,43	0,33	0,52	0,47	0,62	0,52
SPI-3	0,60	-1,50	1,10	-1,60	0,10	-1,1	0,40	-0,80	0,5	-0,7	0,40	-0,60
SPI-12	-0,42	-0,74	-0,71	-0,32	-0,32	0,20	0,29	-0,10	1,22	1,23	1,15	1,25
SPI-24	-0,52	0,01	-0,80	-0,74	-0,48	-0,13	-0,07	0,01	1,07	0,83	0,96	0,86
<b>Volume (hm<sup>3</sup>)</b>	27	14,92	25,48	11,66	65,89	50,7	78,23	55,69	318,09	290,58	273,01	235,13
<b>Cota (m)</b>	382,12	380,88	381,82	379,38	385,53	384,39	386,19	384,68	395,14	394,51	394,09	393,01

Fonte: Os Autores, 2023.

Os valores de SPI-12 e 24 foram diretamente proporcionais ao volume do reservatório. Em 2016 e 2017, anos em que o reservatório apresentou volume a 30 hm<sup>3</sup>, foi encontrada a presença de secas variando de leve a mediana e em 2020, cujo volume é superior a 200 hm<sup>3</sup>, tem-se a caracterização a partir dos valores de SPI, de chuvas medianas. Entretanto, o SPI-3 não apresentou resultados homogêneos para o período chuvoso, quando correlacionado com o volume do reservatório. Para o período seco, apresentou os menores valores, em especial nos anos de 2016 (-1,5) e 2017 (-1,6), caracterizando esse período como um período de seca severa.

A vegetação da Caatinga responde intimamente às flutuações de chuva, então a mudanças de biomassa proporcionadas por influências da ausência de chuvas precisam ser consideradas e analisadas antes de atribuir eventos de degradação da vegetação às atividades humanas (BARBOSA et al., 2019). O ano de 2020 apresentou a maior média de precipitação no período chuvoso da série com 311,1 (mm) para o mês de maio e um total de 936,3 mm até o mês de agosto período de início das baixas incidências pluviométricas (Figura 6). Por outro lado, o ano de 2018 obteve o maior valor para o período seco com 170 mm para o mês de dezembro e, 2016 o menor valor da série em ambos os períodos, com um total de 443,6 mm no ano.

Figura 6 - Distribuição da precipitação mensal acumulada (mm) no Reservatório



Fonte: Adaptado de ANA (2023).

### Extração das áreas de mata ciliar e do reservatório através dos IVS

Na Tabela 3 pode-se observar os valores das áreas extraídas para as classes mata ciliar (vegetação) e reservatório (água), através da binarização dos índices espectrais:

Tabela 3 - Áreas da mata ciliar e Reservatório, extraídas da matriz de confusão a partir da classificação binária

Ano	Índice	Área vegetação – Mata ciliar (km <sup>2</sup> )	Área água - Reservatório (km <sup>2</sup> )
2016	NDVI	0,34	4,97
	SAVI	0,28	4,38
2017	NDVI	0,68	3,15
	SAVI	0,47	3,14
2018	NDVI	1,28	7,67
	SAVI	0,71	8,10
2019	NDVI	1,92	8,09
	SAVI	1,44	9,64
2020	NDVI	3,28	17,36
	SAVI	6,27	17,36
2021	NDVI	4,80	25,08
	SAVI	6,40	25,15

Fonte: Os Autores, 2023.

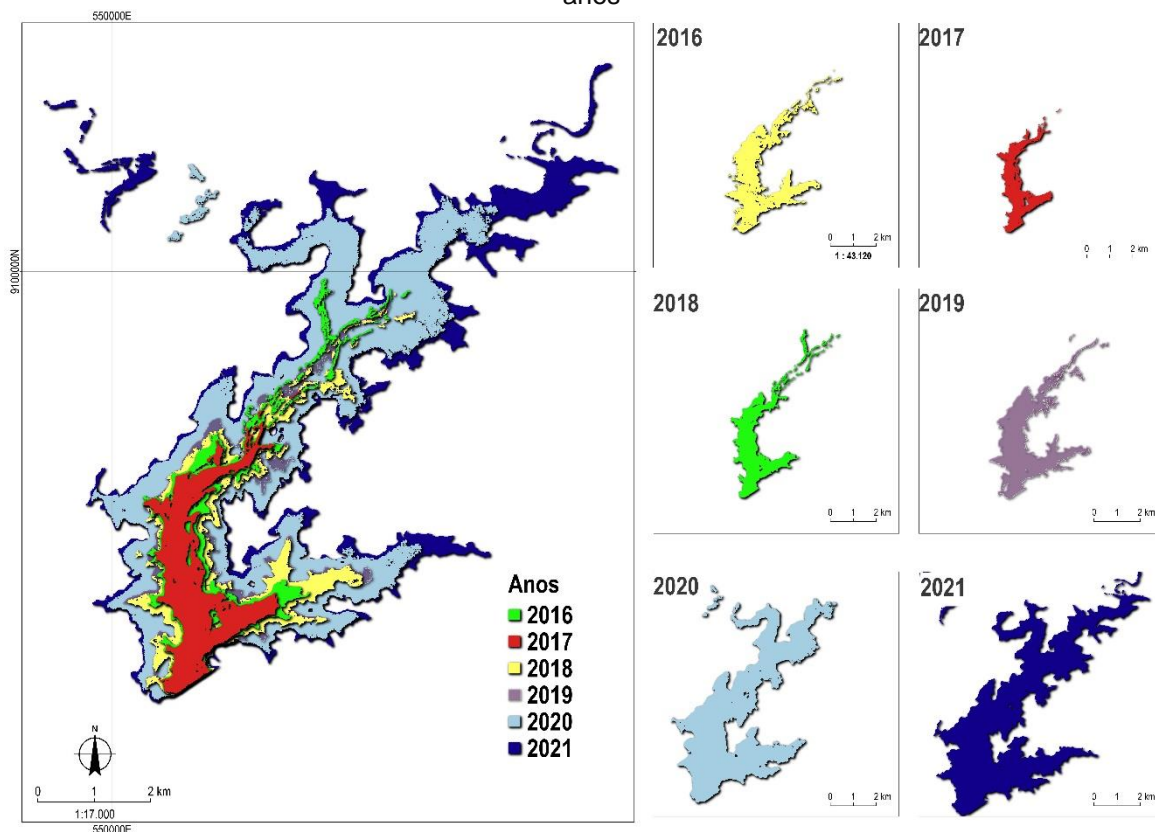
Entre 2016 e 2017 têm-se as menores áreas de mata ciliar entre 0,28 e 0,47 (SAVI) e 0,34 a 0,68 (NDVI), provavelmente estes valores estão associados a presença de seca na região. Através dos valores obtidos com o SPI (Tabela 2), neste momento a região passou por um período de seca de fraca a mediana (SPI-12 e SPI-24) e mediana a severa (SPI-3). Os anos de 2018 e 2019 tiveram uma proximidade entre seus resultados, com tendência de crescimento, o que indica um período de estabilidade da cobertura vegetal. Neste período tem-se um aumento dos valores de SPI, classificando-se em seca fraca, evento característico do déficit hídrico presente na região no período de baixa incidência pluviométrica. Corroborando com o aumento do volume do reservatório no mês de novembro ao longo dos anos (Tabela 3).

O ano de 2020 teve o maior valor em área da cobertura vegetal na mata ciliar, representando um aumento de 3,51% da área vegetal presente em 2016 e 8,6% da área total para o NDVI. Quando este quantitativo foi analisado as áreas de mata ciliar, através das respostas dos índices de vegetação, o

NDVI apresentou maior quantidade de pixels classificados para áreas de mata ciliar, e consequentemente maiores áreas que o SAVI.

Como bem evidenciado na Tabela 3, foi possível afirmar que houve um aumento na área ocupada pelo Reservatório Serrinha II, identificado com valores em proximidade para ambos os índices. 2021 apresentou maior área da série equivalente a 25, 15 (km<sup>2</sup>) o que equivale a aumento de 14,21% da área do reservatório presente em 2017 e 23,55% da área total, ano com menor área (3,14 km<sup>2</sup>). Essa proximidade entre os valores obtidos com os índices decorre da homogeneidade do alvo água, com isso, a condição de classificação de pixels ausentes de mistura é muito maior que a vegetação, que possui uma maior heterogeneidade de distribuição espacial, principalmente em floresta sazonalmente secas como a Caatinga. Além disso, havendo componentes da mistura na água, como sólidos em suspensão, sua forma espectral muda e se torna mais facilmente confundida com outros elementos de cobertura da terra (CHEN et al., 2020). Na Figura 7 tem-se a espacialização das mudanças ocorridas no corpo hídrico, a partir da extração da área superficial:

Figura 7 - Mudanças na área superficial através do SAVI do Reservatório Serrinha II ao longo dos anos



Fonte: Os Autores, 2023.

### Validação e acurácia do mapeamento

Devido à limitação de proximidade de datas dos dados MSI – Sentinel 2 e fatores climáticos como presença de nuvens nas cenas no período chuvoso, que podem influenciar na modelagem dos resultados e para avaliar possível presença de continuidade de seca e/ou degradação da cobertura vegetal (Barbosa et al., 2019), o processo de extração das áreas da mata ciliar e reservatório, bem como a validação dos dados a partir do MLME foi realizado apenas com dados referentes ao período de baixa incidência pluviométrica. Sendo assim, foi analisando a acurácia do mapeamento através dos parâmetros: Índice Kappa, Acurácia Global, Eo e Ec, extraídos da matriz de confusão, como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados de acurácia do mapeamento extraídos da matriz de confusão a partir da classificação binária dos índices

Ano	Índice	Classe	E <sub>o</sub>	E <sub>c</sub>	Índice Kappa	Acurácia Global (%)
2016	NDVI	MATA CILIAR	39,50	15,9	0,70	99,60
	SAVI		36,74	8,90	0,67	99,66
	NDVI	ÁGUA	0,81	19,51	0,88	98,63
	SAVI		2,02	9,73	0,93	99,30
2017	NDVI	MATA CILIAR	9,30	31,90	0,77	99,60
	SAVI		10,71	12,16	0,83	99,70
	NDVI	ÁGUA	2,20	6,47	0,95	99,63
	SAVI		2,20	6,47	0,95	99,63
2018	NDVI	MATA CILIAR	12,85	28,97	0,77	99,30
	SAVI		33,37	2,37	0,78	99,50
	NDVI	ÁGUA	6,06	8,14	0,92	98,50
	SAVI		2,36	20,74	0,86	97,15
2019	NDVI	MATA CILIAR	18,89	9,93	0,85	99,19
	SAVI		39,61	6,92	0,72	98,66
	NDVI	ÁGUA	0,71	10,74	0,93	98,75
	SAVI		0,75	10,82	0,93	98,74
2020	NDVI	MATA CILIAR	9,4	15,8	0,72	96,70
	SAVI		36,38	8,25	0,65	97,03
	NDVI	ÁGUA	11,85	22,97	0,87	99,50
	SAVI		25,37	2,37	0,88	99,40
2021	NDVI	MATA CILIAR	8,40	12,50	0,86	97,50
	SAVI		30,25	9,70	0,78	98,35
	NDVI	ÁGUA	9,15	14,72	0,80	97,05
	SAVI		8,70	5,40	0,92	99,20

Fonte: Os Autores, 2023.

Ao longo da série para a mata ciliar, o SAVI apresentou maior quantidade de E<sub>o</sub> por ano, sendo o ano de 2019 o maior valor (39,61), ou seja, houve certa confusão de classificação dos pixels dessa classe para outras classes, e 2017 o menor (10,71). Essa variação foi evidente também para classe água, com maior valor para 2016 (39,5) e menor para 2018 (0,50). Com relação ao E<sub>c</sub>, para a classe mata ciliar o NDVI apresentou maiores valores em 2017 (31,90) e menor em 2018 (2,80) para o SAVI e para a classe água os erros de comissão foram inferiores a 15, sendo 2019, maior valor (14,4) e menor para 2016 (0,3). Em seus resultados Castro Teixeira et al. (2017) encontraram uma maior variação dos E<sub>o</sub> e E<sub>c</sub> com relação ao NDVI e SAVI para vegetação em fase de crescimento em floresta tropicais secas.

Em 2017 com a redução da cobertura vegetal, as classes estiveram mais distintas. Segundo Silveira et al. (2018), as heterogeneidades na estrutura do dossel vertical e horizontal, decorrentes de mudanças na altura da vegetação e densidade de cobertura, proporcionam dificuldades para o mapeamento por sensoriamento remoto da Caatinga. Para a classe mata ciliar, os IVs tiveram valores próximos de índice Kappa, variando entre 0,65 e 0,85, classificando como um desempenho muito bom. O NDVI teve valores superiores a 0,70 e o SAVI a 0,61 na maioria dos anos, incluindo 2016 e 2017, em que a redução das áreas de mata ciliar foi mais severa.

Em termos de acurácia global, em ambas as classes a variação foi superior a 92%, refletindo assim as respostas obtidas com o índice Kappa. Esses dados corroboram com os valores encontrados por Foody (2020), e Stehman (1997), que obtiveram valores de acurácia global para os IVs superiores a 90% e índice Kappa superiores a 0,61.

## CONCLUSÃO

Neste estudo, investigou-se o comportamento sazonal da biomassa em áreas de mata ciliar do bioma Caatinga, no entorno do Reservatório de Serrinha II, a partir da análise da sensibilidade dos índices espectrais: NDVI e SAVI, correlacionados ao SPI. O conjunto de dados derivado de imagens dos

satélites MSI - Sentinel 2A e B compreendeu um intervalo de 2016 a 2021. Determinou-se a área ocupada pelas classes: mata ciliar e reservatório (água) bem como uma validação dos dados através do MLME para verificar a qualidade espacial do mapeamento. Em que foram extraídas as seguintes conclusões:

Os IVs possibilitaram identificar mudanças no cenário da cobertura vegetal da mata ciliar e do reservatório ao longo dos anos, em diferentes intervalos interanuais e condições hídricas, com um aumento positivo de valores para o período chuvoso indicando a presença vegetativa e um decréscimo para o período seco. Entretanto, o SAVI quando comparado ao NDVI apresentou uma tendência de mistura espectral dos pixels, corroborando num decréscimo da presença de cobertura vegetal em ambos os regimes hídricos.

Em termos espaciais, as áreas de mata ciliar apresentaram um aumento apesar da condição de perda de folhagem da Caatinga em intervalos de redução pluviométrica, com média de crescimento de 92,58% em novembro de 2020 em relação a novembro de 2016. Com relação ao reservatório, também houve um aumento de área e volume. Em que, em 2020 houve um aumento considerável da série, resultante da alta incidência pluviométrica ocorrida na região. A análise associada do SPI com os IVs possibilitou identificar que entre 2016 e 2017 ocorreram perdas de áreas vegetadas ocasionada pela presença de secas medianas a severas, e que a partir de 2019 a região passa a ter uma redução desses efeitos, sendo apenas detectada secas fracas, o que proporciona um estado de regeneração vegetativa.

Contudo, identificou-se que os índices espectrais associados aos hidrológicos pode proporcionar uma análise mais precisa das mudanças temporais nas áreas de mata ciliar associadas a reservatórios artificiais.

## REFERÊNCIAS

- ALBANO, C.M.; MCGWIRE, K.C.; HAUSNER, M.B.; MCEVOY, D.J.; MORTON, C.G.; HUNTINGTON, J.L. Drought Sensitivity and Trends of Riparian Vegetation Vigor in Nevada, USA (1985–2018). *Remote Sensing*, v. 12, n. 9, p. 1362-1416, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12091362>
- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios - SAR**. Disponível em: <https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/7d53f4b435ed4fdfaf11d493c644ce70>. Acesso: novembro de 2023.
- BASTIAANSEN, W.G.M. SEBAL - based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, v. 229, p. 87-100. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00202-4)
- BARBOSA, H.A.; KUMAR, T.V.L.; PAREDES, F.; ELLIOTT, S.; AYUGA, J.G. Assessment of Caatinga response to drought using Meteosat-SEVIRI Normalized Difference Vegetation Index (2008–2016). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 148, p. 235-252, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.12.014>
- BARBOSA, H.A.; BARBOSA, A.R. HUETE, W.E. Baethgen A 20-year study of NDVI variability over the Northeast region of Brazil. *J. Arid Environ.*, v. 67, p. 288-307, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.02.022>
- BONACCORSO, B.; BORDI, I.; CANCELLIERE, A. Spatial variability of drought: an analysis of the SPI in Sicily. *Water Resources Management.*, v. 17, p.273–296. 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1024716530289>
- BURDON, F.J.; RAMBERG, E.; SARGAC, J.; FORIO, M.A.E.; SAEYER, N.; MUTINOVA, P.; MOE, T.F.; PAVELESCU, M.O.; DINU, V.; CAZACU, C. Assessing the benefits of forested riparian zones: a qualitative index of riparian integrity is positively associated with ecological status in european streams. *Water*, v. 12, n. 4, p. 1178-1186, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12041178>
- CASTRO TEIXEIRA, A.H.; LEIVAS, J.F.; HERNANDEZ, T.B.F.; FRANCO, M.A.R. Balanços de radiação e energia em larga escala com imagens Landsat 8 e dados agrometeorológicos no

semiárido brasileiro **J. Appl. Remote Sens.**, v. 11, n.1. 2017.  
<https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.016030>

CHAVEZ JR., P.S. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. **Remote Sensing of Environment**, v.24, n.3, p. 459-479, 1988.  
[https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90019-3](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90019-3)

CHEN, F.; CHEN, X.; VOORDE, T.; ROBERTS, D.; JIANG, H.; XU, W. Open water detection in urban environments using high spatial resolution remote sensing imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 242, p. 111706-111730, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111706>

CUNHA, J.; NÓBREGA, R.L.B.; RUFINO, I.; ERASMI, S.; GALVÃO, C.; VALENTE, F. Surface albedo as a proxy for land-cover clearing in seasonally dry forests: Evidence from the Brazilian Caatinga. **Remote Sensing of Environment**, v. 238, p. 111250-111263, 2020.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111250>

CUNHA, A.; ALVALÁ, R.; NOBRE, C.; CARVALHO, M. Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. **Agric. For. Meteorol.**, v.214-215, p.494-505, 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.09.010>

CUNLIFFE, A.M.; ASSMANN, J.J.; DASKALOVA, G.N.; KERBY, J.T.; MYERS-SMITH, I.H. Aboveground biomass corresponds strongly with drone-derived canopy height but weakly with greenness (NDVI) in a shrub tundra landscape. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 12, p. 125004-125015, 2020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba470>

DEGERICKX, J.; ROBERTS, D.A.; SOMERS, B. Enhancing the performance of Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) for urban land cover mapping using airborne lidar data and band selection. **Remote Sensing of Environment**, v.221, p.260-273, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.026>

DOMINGOS, S.I.S. Análise do índice de seca Standardized Precipitation Index (SPI) em Portugal Continental e sua comparação com o Palmer Drought Severity Index (PDSI). **Tese de licenciatura em Meteorologia, Oceanografia e Geofísica Interna – variante Meteorologia**. Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa, julho de 2006.

ESA - European Spatial Agency. **Copernicus: Sentinel-2 - The Optical Imaging Mission for Land Services**. 2020. Disponível em: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-2#sensors>. Acesso em: 22 mai. 2020.

FERREIRA, N.C.F.; MELLO DUARTE, J.R.; OLIVEIRA, L.A.B.; SILVA, E.C.; CARVALHO, I.A. O papel das matas ciliares na conservação do solo e água. **Biodiversidade**, v. 18, n. 3, p. 171-179, 2019.

FOODY, G.M. Explaining the unsuitability of the kappa coefficient in the assessment and comparison of the accuracy of thematic maps obtained by image classification. **Remote Sensing of Environment**, v. 239, n. 1, p. 11- 11, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111630>

FRANÇA, A.M.L.; DIAZ, F.C.C; DOS REIS, V.J.; COSTA, O.S.V.; GALVINCIO, D.J.; Efeitos da precipitação na vazão da bacia hidrográfica do rio Pajeú-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 6, p. 2377-2391, 2019. <https://doi.org/10.26848/rbqf.v12.6.p2377-2391>

GALVÍNCIO, J.D.; MOURA, M.S.B.; SILVA, T.G.; SILVA, B.B.; NAUE, C.R. LAI improved to dry forest in Semiarid of Brazil. **Int. J. Remote Sens.**, v. 3, p. 193-215, 2013.  
<https://doi.org/10.14355/ijrsa.2013.0304.04>

GUEDES, R.V.S.; MACEDO, M.J.H.; SOUSA, F.A.S. Análise espacial de eventos de secas com base no índice padronizado de precipitação e análise de agrupamento. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 23, p. 55-65, 2012.

HUETE, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). **Remote sensing of environment**, v. 25, p. 295-309, 1988. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)



HUGHES, T.P.; KERRY, J.T.; ÁLVAREZ-NORIEGA, M.; ÁLVAREZ-ROMERO, J.G.; ANDERSON, K.D.; BAIRD, A.H.; BRIDGE, T.C. Global warming and recurrent mass bleaching of corals. **Nature**, v. 543, p. 373–377, 2017. <https://doi.org/10.1038/nature21707>

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos do INMET**. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 21 de novembro de 2023.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **AR5 Mudanças Climáticas 2014: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade**. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/full-report-global-aspects/>. 2014. Acesso em: 21 de março de 2021.

JACQUES, D.C.; KERGOAT, L.; HIERNAUX, P.; MOUGIN, E.; DEFOURNY, P. Monitoring dry vegetation masses in semi-arid areas with MODIS SWIR bands. **Remote Sensing of Environment**, v. 153, p. 40-49, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.027>

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2. ed. São José dos Campos: Parêntese, 2011.

LANDIS, J.R.; KOCH, G.G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977. <https://doi.org/10.1080/096382800296575>

LIMA, A.; SILVA, T.S.F.; ARAGÃO, L.E.O.C.; FREITAS, R.M.; ADAMI, M.; FORMAGGIO, A.R.; SHIMABUKURO, Y. E. Land use and land cover changes determine the spatial relationship between fire and deforestation in the Brazilian Amazon. **Applied Geography**, v. 34, p. 239–246, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.10.013>

MARIANO, D.A.; SANTOS, C.A.C. dos; WARDLOW, B. D.; ANDERSON, M. C.; SCHILTMAYER, A. V.; TADESSE, T.; SVOBODA, M. D. Use of remote sensing indicators to assess effects of drought and human-induced land degradation on ecosystem health in Northeastern Brazil. **Remote Sensing of Environment**, v. 213, p. 129-143, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.048>

MARTINS, D.S.; RAZIEI, T.; PAULO, A.A.; PEREIRA, L.S. Spatial and temporal variability of precipitation and drought in Portugal. **Nat Hazards Earth Syst Sci**. v.12, p.1493–1150, 2012. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-1493-2012>

MAYES, M.T.; MUSTARD, J.F.; MELILLO, J.M. Forest cover change in Miombo Woodlands: modeling land cover of african dry tropical forests with linear spectral mixture analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 165, p. 203-215, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.006>

MCKEE, T.B.; DOESKEN, N.J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to times scale. In: Conference on Applied Climatology, 8., 1993, Boston. **Anais...** American Meteorological Society. Boston: Preprints, 1993. p.179-184

MORO, M.F.; LUGHADHA, E.N.; ARAUJO, F.S.; MARTINS, F.R. A phytogeographical metaanalysis of the semi-arid caatinga domain in Brazil. **The botanical review**, v. 82, n. 2, p. 91-148, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12229-016-9164-z>

PALOSCHI, R.A.; RAMOS, D.M.; VENTURA, D.J.; SOUZA, R.; SOUZA, E.; MORELLATO, L.P.C.; NÓBREGA, R.L.B.; COUTINHO, Í.A.C.; VERHOEF, A.; KÖRTING, T.S. Environmental drivers of water use for caatinga woody plant species: combining remote sensing phenology and sap flow measurements. **Remote Sensing**, v. 13, n. 1, p. 75-85, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs13010075>

PENHA, T.V.; KÖRTING, T.S.; FONSECA, L.M.G.; SILVA JÚNIOR, C.H.L.; PLETSCHE, M.A.J.S.; ANDERSON, L.O.; MORELLI, F. Detecção de áreas queimadas na Amazônia brasileira usando índices espectrais e GEOBIA. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, n. 2, p. 253-269, 2020. <https://doi.org/10.14393/rbcv72n2-48726>

PONZONI, F.J. **Aplicação do modelo SAIL no estudo da reflectância espectral de dosséis de mudas de Eucalyptus sp. e de Aspidosperma sp.** 1993. 253 f. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.

PRUDNIKOVA, E.; SAVIN, I.; VINDEKER, G.; GRUBINA, P.; SHISHKONAKOVA, E.; SHARYCHEV, D. Influence of soil background on spectral reflectance of winter wheat crop canopy. **Remote Sensing**, v. 11, n. 16, p. 1932-1945, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11161932>

ROCHA, A.K.P.; BARROS JUNIOR, G. Condições operacionais de barragens destinadas ao armazenamento de água no Vale do Rio Pajeú, Brasil. *Research, Society And Development*, v. 9, n. 10, p. 156-170, 2020. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8829>

ROUSE JR., J.W.; HAAS, R.H.; SCHELL, J.A.; DEERING, D.W. Monitoramento de sistemas de vegetação nas Grandes Planícies com ERTS SC Freden, EP Mercanti, M. Becker (Eds.), *Anais... In: Simpósio do Third Earth Resources Technology Satellite-1, apresentações técnicas, seção A*, vol. I, National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC (1973), pp. 309 – 317 NASA SP-351.

SHIMABUKURO, Y.E.; MIETTINEN, J.; BEUCHLE, R.; GRECCHI, R.C.; SIMONETTI, D.; ACHARD, F. Estimating burned area in Mato Grosso, Brazil, using an object-based classification method on a systematic sample of medium resolution satellite images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 8, n. 9, p. 4502–4508, 2015. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2464097>

SHIMABUKURO, Y.E.; PONZONI, F.J. 2019. **Spectral Mixture for Remote Sensing: Linear Model and Applications**. Springer Remote Sensing/Photogrammetry. São Paulo: Oficina de Textos. 77 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-02017-0>

SILVA, B.; MONTENEGRO S.M.G.L.; SILVA, F.B.D.; ARAÚJO FILHO, P.F.D.A. Chuvas intensas em localidades do Estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 3, p. 135-147, 2012. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v17n3.p135-147>

SILVA JUNIOR, J. A.; PACHECO, A. P. Análise do Modelo Linear de Mistura Espectral na Avaliação de Incêndios Florestais no Parque Nacional do Araguaia, Tocantins, Brasil: imagens eo-1/hyperion e landsat-7/etm+. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, v. 43, n. 4, p. 320-335, 2021b. Instituto de Geociências - UFRJ. [https://doi.org/10.11137/2020\\_4\\_440\\_450](https://doi.org/10.11137/2020_4_440_450)

SILVA JUNIOR, U.J.; GONÇALVES, R.M.; OLIVEIRA, L.M.M.; SILVA JÚNIOR, J.A. Sensibilidade Espectral dos Índices de Vegetação: GNDVI, NDVI e EVI na Mata Ciliar do Reservatório de Serrinha II – PE, Brasil. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 73, n. 1, p. 17-35, 2021a. <https://doi.org/10.14393/rbcv73n1-55252>

SILVEIRA H.L.F.; GALVÃO L.S.; SANCHES I.D.; SÁ, I.B.; TAURA T.A. Use of MSI/Sentinel-2 and airborne LIDAR data for mapping vegetation and studying there lation ships with soil attributes in the Brazilian semi-arid region. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 73, p.179–190, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.016>

SMALL, C.; MILESI, C. Multi-scale standardized spectral mixture models. *Remote Sensing of Environment*, v. 136, p. 442-454, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.05.024>

STEHMAN, S.V. Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment*, v. 62, n. 1, p. 77–89, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00083-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00083-7)

SURASINGHE, T.; KARIYAWASAM, R.; SUDASINGHE, H.; KARUNARATHNA, S. Challenges in Biodiversity Conservation in a Highly Modified Tropical River Basin in Sri Lanka. *Water*, v. 12, n. 1, p. 26-44, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12010026>

TÁVORA, B.E.; KOIDE, S. Event-Based Rainfall Interception Modeling in a Cerrado Riparian Forest—Central Brazil: an alternative approach to the is method for parameterization of the gash model. *Water*, v. 12, n. 8, p. 2128-2145, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12082128>

TUCKER, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, v.8, p. 127-150, 1979. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)

USDA. Soil-Survey-Staff. *Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification of Making and Interpreting Soil Surveys; USDA*. Agriculture Handbook, 436; Natural Resources Conservation Service: Washington, DC, USA, 1999; p. 869.

USGS - United States Geological Survey. **The Earth Explorer**. Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 5 mai. 2020.

Variações sazonais intra e interanual da cobertura vegetal (NDVI e SAVI) na mata ciliar do bioma Caatinga associada ao reservatório de Serrinha II, PE, Brasil e sua correlação com o SPI e o volume hídrico acumulado

Ubiratan Joaquim da Silva Junior  
Juarez Antônio da Silva Junior  
Débora Natália Oliveira de Almeida  
Ester Milena dos Santos  
Anderson Luiz Ribeiro de Paiva  
Sylvana Melo dos Santos  
Leidjane Maria Maciel de Oliveira

---

WEISSTEINER, C. J.; LÓPEZ-LOZANO, R.; MANFRON, G.; DUVEILLER, G.; HOOKER, J.; VELDE, M.; BARUTH, B. A Crop Group-Specific Pure Pixel Time Series for Europe. **Remote Sensing**, v. 11, n. 22, p. 2668-2672, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11222668>

WESTINGA, E.; BELTRAN, A.P.R.; BIE, C.A.J.M.; VAN GILS, H.A.M.J. A novel approach to optimize hierarchical vegetation mapping from hyper-temporal NDVI imagery, demonstrated at national level for Namibia. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 91, p. 102152-102164, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102152>

ZHAO, H.; HUANG, F.; QI, H. Generating high resolution LAI based on a modified FSDAF Model. **Remote Sensing**, v. 12, n. 1, p. 150-165, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12010150>

---

Recebido em: 30/08/2023

Aceito para publicação em: 07/12/2023