



Monitoramento da superfície do solo usando indicadores ambientais provenientes de dados de satélite em órbita geostacionária¹

Carlos Roberto da Silveira Junior¹, Laerte Guimarães Ferreira Junior², Bernardo Barbosa da Silva³

1. Doutor em Ciências Ambientais. Instituto Federal de Goiás. Rua 75, nº 46. Centro, 74055-110. Goiânia - GO, Brasil. E-mail: carlos.junior@ifg.edu.br (autor correspondente). 2. Doutor em Sensoriamento Remoto. Instituto de Estudos Socioambientais. Campus Samambaia, Alameda Palmeiras s/n, 74001-970, Goiânia - GO, Brasil. Universidade Federal de Goiás. E-mail: lapig.ufg@gmail.com. 3. Doutor em Engenharia Civil. Centro de Tecnologias e Recursos Naturais. Av. Aprígio Veloso, nº 882. Bairro Universitário, 58.109-970, Campina Grande, Paraíba, Brasil. Universidade Federal de Campina Grande. E-mail: bernardo.silva@ufcg.edu.br.

Artigo recebido em 06/04/2020 e aceito em 25/11/2020

RESUMO

O satélite em órbita geostacionária Meteosat-10 possui bandas espectrais que permitem criar indicadores ambientais com alta resolução temporal (15 minutos) e baixa resolução espacial (3 km), permitindo o monitoramento da fenologia da paisagem. Porém, para o Brasil, pouco tem sido utilizado devido ao alto ângulo de visada (45 a 80°). Indicadores como NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), eficiente para o monitoramento da vegetação devido à simplicidade e estreita relação com a produtividade da vegetação, e o NDWI (*Normalized Difference Water Index*), que indica a umidade da superfície do solo combinando o solo e a vegetação expostos, ajudam a compreender a sazonalidade ambiental e ocupação das bacias hidrográficas. Esse artigo tem como objetivo avaliar a capacidade de indicadores biofísicos, provindos do satélite em órbita geostacionária Meteosat-10, para o monitoramento ambiental da superfície do solo, tendo como área de estudo bacias hidrográficas, Ottobacias nível 5, do estado de Goiás, incluindo o Distrito Federal, no período 2013 a 2015. Para tanto, foram avaliados o NDVI, NDWI e a precipitação com resolução temporal de 12 dias e mensal. Fez-se o cálculo dos indicadores normalizados SPI (*Standard Precipitation Index*), SVI (*Standard Vegetation Index*) e SWI (*Standard Water Index*) para comparações entre os anos e obtenção da tendência de cada indicador. Como resultado pode-se identificar e compreender padrões sazonais das bacias hidrográficas em diferentes regiões e classes de uso, demonstrando o potencial de indicadores de vegetação provenientes de satélites geostacionários, para o monitoramento da cobertura do solo em bacias hidrográficas, bem como identificar a maior sensibilidade do NDWI para o monitoramento de mudanças ocorridas na superfície.

Palavras-chave: NDVI, NDWI, Meteosat-10, monitoramento ambiental.

Monitoring of soil surface using environmental indicators satellite data monitor from geostationary orbit

ABSTRACT

The geostationary orbit satellite Meteosat-10, has spectral bands that allow create that provides environmental indicators with high temporal resolution and low spatial resolution, allowing the monitoring of landscape phenology. However, for Brazil little has been used due to the high viewing angle of Meteosat-10 (45 a 80°). Indicators like NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), efficient for monitoring vegetation due to the simplicity and close relationship with the productivity of the vegetation, and the NDWI (*Normalized Difference Water Index*), which indicates the moisture of the soil surface combining the soil and the exposed vegetation, help to understand the environmental seasonality and occupation of watersheds. This article aims to evaluate the capacity of biophysical indicators, coming from the geostationary orbit satellite Meteosat-10, for the environmental monitoring of the soil surface, with hydrographic basins, Ottobasin level 5, from the state of Goiás, as the study area. Distrito Federal, from 2013 to 2015. For this purpose, NDVI, NDWI and precipitation with 12-day and monthly resolution were evaluated. Standardized indicators SPI (*Standard Precipitation Index*), SVI (*Standard Vegetation Index*) and SWI (*Standard Water Index*) were calculated for comparisons

¹ Artigo extraído de Tese.

between years and obtaining the trend of each indicator. As a result, it is possible to identify and understand seasonal patterns of hydrographic basins in different regions and classes of use, demonstrating the potential of vegetation indicators from geostationary satellites, for monitoring soil cover in hydrographic basins, as well identify the highest sensitivity NDWI for monitoring surface changes.

Keywords: NDVI, NDWI, Meteosat-10, environmental monitoring.

Introdução

A maioria de estudos relacionados ao monitoramento da superfície da Terra faz uso de dados provenientes de satélites em órbita polar para obtenção de indicadores ambientais. Esses satélites apresentam alta ou média resolução espacial (1 km a 30 m) e baixa resolução temporal (1 a 16 dias), como os satélites Terra MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) (Pereira et al., 2018; Xu et al., 2020), Landsat 5 (Szabó et al., 2016), Landsat 8 (Silva et al., 2017) e SPOT-VEG (*Satellite Pour l'Observation de la Terre Végétation*) (Barbosa et al., 2015). Porém, pouco se tem investigado o potencial de satélites em órbita geoestacionária para o monitoramento da superfície da Terra.

Tal alternativa tornou-se relevante a partir da série MSG (*Meteosat Second Generation*) uma vez que o sensor SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager*) obtém a refletância das bandas RED (vermelho), NIR (infravermelho próximo) e SWIR (infravermelho de ondas curtas) úteis para a estimativa de índices para o monitoramento da vegetação. Particularmente, dentre os satélites da série MSG, o Meteosat-10 está localizado a 0° de latitude e longitude cobrindo a Europa, África, oeste do Oriente Médio e nordeste da América e apresenta alta resolução temporal (15 minutos) e baixa resolução espacial (3 km) (Schmetz et al., 2002). Este satélite mostra-se eficiente para o monitoramento da superfície em regiões da África, quando comparado com dados de satélites polares (Yan et al., 2016), sendo utilizado na análise e comportamento do estresse da vegetação (Demisse et al., 2018) e estimativas de fenologia (Julien et al., 2018).

Os satélites em órbita geoestacionária quando comparado a satélites em órbita polar, possibilitam a compreensão de fatores sazonais e antrópicos com maior detalhamento temporal, devido à alta resolução temporal. Assim, em períodos de alta precipitação, que ocasionam cobertura de nuvens, os satélites em órbita polar obterão uma pequena quantidade de observações, mesmo em composição de dias, diferente dos satélites orbitais geoestacionários que podem obter mais do que uma imagem durante o dia, tendo mais oportunidades para observação da superfície (Barbosa et al., 2019). Da mesma forma, permitem estudar a refletância da superfície em diferentes

intervalos do dia, com diferentes condições de iluminação, possibilitando maior compreensão de características da vegetação. Por outro lado, o Meteosat-10 apresenta desvantagens que limitam a utilização do dado, como a baixa resolução espacial e o alto ângulo de visada para o Brasil, entre 45° e 80°.

Entretanto, quando se deseja observar a superfície em escala espacial menor pode-se utilizar uma resolução espacial mais baixa do que o convencional, de tal forma que a baixa resolução espacial dos satélites em órbita geoestacionária deixa de representar uma limitação, tornando assim o dado interessante devido a sua maior resolução temporal. Essas escalas, comparadas à escala local, permitem melhor estudo e compreensão de fenômenos que abrangem áreas maiores, fornecendo uma visão mais ampla no estudo de mudanças de uso e cobertura do solo e tendências socioeconômicas.

Uma categoria geográfica regional bastante utilizada é o recorte territorial de bacias hidrográficas para gestão de recursos que, para ser efetiva, deve ser integrada e considerar todos os aspectos, físicos, sociais e econômicos (Cerezini e Hanai, 2017). Historicamente, a paisagem de bacias hidrográficas tomou relevância quando apresentada pela ONU (Organização das Nações Unidas) no início dos anos 90 durante a Conferência de Dublin (que antecedeu a Eco-92), sendo sugerida a gestão de recursos hídricos baseada no recorte territorial de bacias hidrográficas (Peixoto e Silveira, 2017). Posteriormente, no Brasil, a Lei 9.433 de 8 de janeiro de 1997 instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e definiu que “a bacia hidrográfica é a unidade territorial para a operacionalização dessa política e para a atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos” (Brasil, 1997). Assim, a bacia hidrográfica é reconhecida como o “palco unitário de interação das águas com o meio físico, o meio biótico e o meio social, econômico e cultural” (Barbosa, 2016). No entanto, para uma gestão efetiva torna-se importante o monitoramento de indicadores biofísicos da bacia hidrográfica, que podem ajudar a estabelecer condições de uso e ocupação sustentáveis. Com esse monitoramento, é possível, por exemplo, diagnosticar alterações antrópicas e naturais na paisagem, e orientar ou

estabelecer políticas de reversão de um quadro de degradação ambiental (Santos e Martins, 2018).

O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) representa um indicador eficiente para o monitoramento da vegetação devido à simplicidade conceitual e estreita relação com a produtividade da vegetação (Tian et al., 2015). Proposto por Tucker (1979) é definido pela diferença normalizada das bandas espectrais do NIR e RED é representado por valores entre -1 e 1, apresentando valores baixos para solo exposto e valores altos para áreas com grande cobertura vegetal enquanto valores negativos ou próximos de zero indicam áreas de água, edificações. Isso ocorre devido à maior sensibilidade da banda espectral NIR para áreas de cobertura vegetal, quando comparado à banda espectral RED. O NDWI (*Normalized Difference Water Index*), proposto por Gao (1996), é um indicador de água ou umidade na superfície, relacionando a quantidade de água por unidade de área na vegetação, representa uma medida da umidade da superfície do solo, combinando o solo e a vegetação expostos, mostra-se útil em análises comparativas da redução da área do espelho d'água em reservatórios (Anjos et al., 2017; Cunha et al., 2020) porém, não pode ser considerado uma medida de teor de água do solo (Jovanovic et al., 2014). Definido pela diferença normalizada das bandas espectrais do NIR e SWIR é representado por valores entre -1 e 1, apresentando valores negativos para vegetação com grande quantidade de folhas ou galhos secos e valores positivos para vegetação com grande quantidade de folhas ou galhos verdes. Isso ocorre devido à maior sensibilidade da banda espectral SWIR para a umidade da superfície ou dossel, quando comparado à banda espectral NIR. O NDVI é considerado o mais popular índice para estudo da saúde vegetal e produção de culturas, sendo utilizado em pesquisas e ações de tomada de decisão (Fonseca et al., 2018), entretanto, é preciso cautela pois são necessários valores confiáveis e de qualidade de refletância das bandas espectrais para se obter um indicador confiável (Machado et al., 2018). Por outro lado, o NDWI ainda está em fase de desenvolvimento, por ser um índice mais novo e pouco explorado, e necessita de maiores investigações em relação ao seu potencial e sensibilidade ao teor de água na vegetação Ezzine et al., 2014).

De maneira geral, esses índices juntos são eficientes para analisar a resposta espectral da cobertura vegetal, possibilitando a espacialização dos valores e conseqüentemente a identificação de

uso e cobertura do solo (Albuquerque et al. 2014). Como o NDVI é um índice sensível ao verdor da vegetação e o NDWI ao teor de água, os índices apresentaram uma forte correlação (Szabó et al., 2016). Porém, como o NDWI é influenciado tanto pelo ressecamento quanto pelo murchamento da vegetação, pode ser um indicador mais sensível do que NDVI para monitoramento da seca (Sun et al., 2017), fornecendo informações relacionadas ao estado em que se encontra a vegetação natural (Zhang et al., 2018) e de culturas como soja e milho (Xu et al., 2020) e, assim, fornecer subsídios aos planejadores públicos quanto ao gerenciamento do uso e cobertura do solo em regiões de bacias hidrográficas. Com efeito, o estudo de indicadores biofísicos de bacias hidrográficas pode ser feito com dados de satélites em órbita geostacionária, como o Meteosat-10, podendo apresentar, devido sua alta resolução temporal, resultados pertinentes em relação a mudanças de uso e cobertura do solo.

Dessa forma, considerando o potencial de aplicação de indicadores biofísicos do satélite em órbita geostacionária Meteosat-10 (Julien et al., 2018), mesmo em condição de alto ângulo de visada para o Brasil (45° a 80°), séries temporais de indicadores biofísicos de vegetação permitem compreender padrões sazonais e de cobertura do solo no âmbito de bacias hidrográficas. Esse artigo tem como objetivo avaliar a capacidade de indicadores biofísicos (NDVI e NDWI), provindos do satélite em órbita geostacionária Meteosat-10, no período 2013 a 2015, para o monitoramento ambiental da superfície do solo, para tanto fez-se uso de recorte de bacias hidrográficas Ottobacias nível 5.

Área de estudo

A área de estudo corresponde ao estado de Goiás incluindo o Distrito Federal que possuem, respectivamente, uma área de 340.111 km² e 5.802 km². Localizados na região Centro-Oeste do Brasil, e se estendem entre 12° 23' 46" S e 19° 29' S e entre 45° 54' 25 W e 53° 14' 54" W. Estão inseridos dentro do bioma Cerrado, tendo apenas uma pequena parte a sudeste do estado de Goiás caracterizada como Mata Atlântica (Brasil, 2015). Do ponto de vista hidrográfico, correspondem a uma área de dispersão dos cursos d'água que vão compor as grandes bacias hidrográficas brasileiras, como as bacias Tocantins, São Francisco e Paraná (ANA, 2020).

O clima é caracterizado como tropical semiúmido em boa parte do estado de Goiás e úmido na região sudoeste, com duas estações definidas: verão úmido e inverno seco. Com

características monçônicas marcantes, 80% das chuvas caem de novembro a março, enquanto que de maio a setembro, o tempo é seco com poucas chuvas (Neves, 2018), sendo os meses de transição abril e outubro, respectivamente, de estação chuvosa para seca e de estação seca para chuvosa. Quanto à cobertura vegetal, a área de estudo encontra-se destituída da vegetação original em grande parte de seu território, sendo que o cerrado no Brasil central foi amplamente convertido em agricultura e pastagem, e essa conversão tem implicações importantes para as mudanças climáticas e nas mudanças nos fluxos de carbono entre a atmosfera e a superfície terrestre (Fernandes et al., 2018).

Para o estudo das bacias hidrográficas foi utilizada a subdivisão de Ottobacias nível 5. Esse método de classificação e codificação de bacias hidrográficas, desenvolvido por Otto Pfafstetter, caracteriza-se por ser método natural, hierárquico, baseado na topografia da área drenada e na topologia da rede de drenagem e de fácil integração com os SIGs (Sistemas de Informação Geográfica), sendo o nível de codificação 5 adotado para fins de gestão dos recursos hídricos. Como referência de classes de uso do solo foi utilizado o mapa TerraClass Cerrado - Mapeamento do Uso e Cobertura Vegetal do Cerrado (Brasil, 2015). A Figura 1 apresenta a área de estudo e sua subdivisão em bacias hidrográficas, considerando as classes de uso da terra predominantes (área maior do que 50% para uma das classes de uso avaliadas), tendo-se a maioria das bacias

classificada como pastagem (182), seguida de vegetação natural (119) e agricultura anual (9). Porém, muitas bacias apresentam uso do solo mais diversificado, que foram classificadas com o termo “mistura” (84).

Metodologia

O diagrama da metodologia proposta é apresentado na Figura 2, no qual estão representadas as bases de dados de entrada (azul), os processos (cinza) e os resultados analisados (verde). Em relação às bases de dados utilizadas, os índices NDVI e NDWI com resolução temporal diária foram obtidos a partir de dados do satélite em órbita geostacionária da série MSG, o Meteosat-10. Ele fornece imagens em 12 bandas (1 visível, 3 infravermelho, 7 termais e 1 pancromática), a partir do sensor SEVIRI (*Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager*) com resolução temporal de 15 minutos, resolução radiométrica de 10 bits e resolução espacial de 3 km para as bandas multiespectrais e 1 km para a banda pancromática. Apresenta intervalo espectral de 560 a 710 nm da banda RED, 740 a 880 nm da banda NIR e 1.500 a 1.780 nm da banda SWIR (Silveira et al., 2019). Foram utilizados dados HRIT (*High-Rate Image Transmission*) nível 1.5, imagens georreferenciadas e radiometricamente pré-processadas com resolução espacial de 3 km.

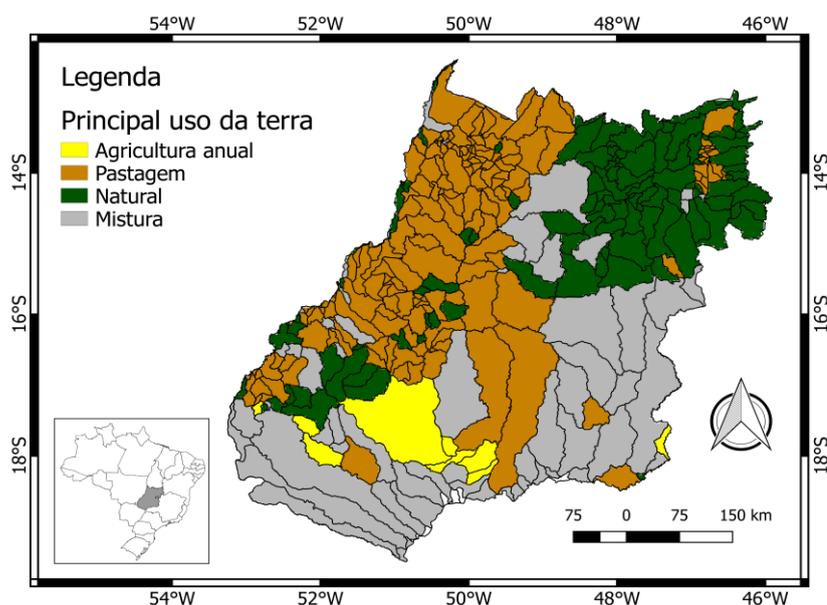


Figura 1. Área de estudo, estado de Goiás subdividido em Ottobacias nível 5, classificadas conforme predominância de uso do solo (maior do que 50% da área) conforme Mapa TerraClass 2013 (Brasil, 2015). Projeção cartográfica cilíndrica, datum WGS-84.

A precipitação mensal (mm) foi obtida a partir de produto 3A26 do TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*), que corresponde à precipitação mensal total para o período de um mês com resolução espacial de 5°, obtidos pelo site do GPM (*Global Precipitation Measurement*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). Os produtos deste satélite apresentam alta correlação com dados de estações meteorológicas de superfície para no estado de Goiás (Quirino et al., 2017; Moraes et al., 2019). O TRMM foi uma missão conjunta entre a NASA e a JAXA (Agência Japonesa de exploração Aeroespacial) projetado para monitorar e estudar as chuvas tropicais, disponibilizando dados no período de 1997 a 2015 (GPM, 2020).

Inicialmente, para obtenção do NDVI e NDWI com resolução temporal diária, fez-se a correção atmosférica utilizando a técnica 6S (*Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum*), nas bandas espectrais envolvidas (RED, NIR e SWIR). O 6S modela as interações

atmosféricas com a radiação a partir de um número discreto de camadas homogêneas (Lee et al., 2015). Em seguida, obtiveram-se os índices diários utilizando o procedimento MVC (*Maximum Value Composite*) com imagens no intervalo de 10:00 h às 12:00 h, hora local. Utilizou-se o produto máscara de nuvens (CLM) para filtrar a cobertura de nuvens sobre os pixels. A partir dos índices diários obtiveram-se os índices com resolução temporal de 12 dias e mensal. O intervalo de 12 dias foi utilizado por ser o menor intervalo de tempo em que se obtém alta cobertura sobre a área de estudo (mais do que 95%) e o intervalo mensal corresponde à média ponderada das imagens no intervalo de 12 dias que fazem parte do respectivo mês. Observa-se que para esse intervalo pode-se obter até 108 observações no período (nove imagens por dia durante 12 dias), diferente de satélites em órbita polar, como o satélite Terra MODIS, que obtém apenas uma imagem por dia. Foi utilizado um recorte temporal de três anos, no período 2013 a 2015.

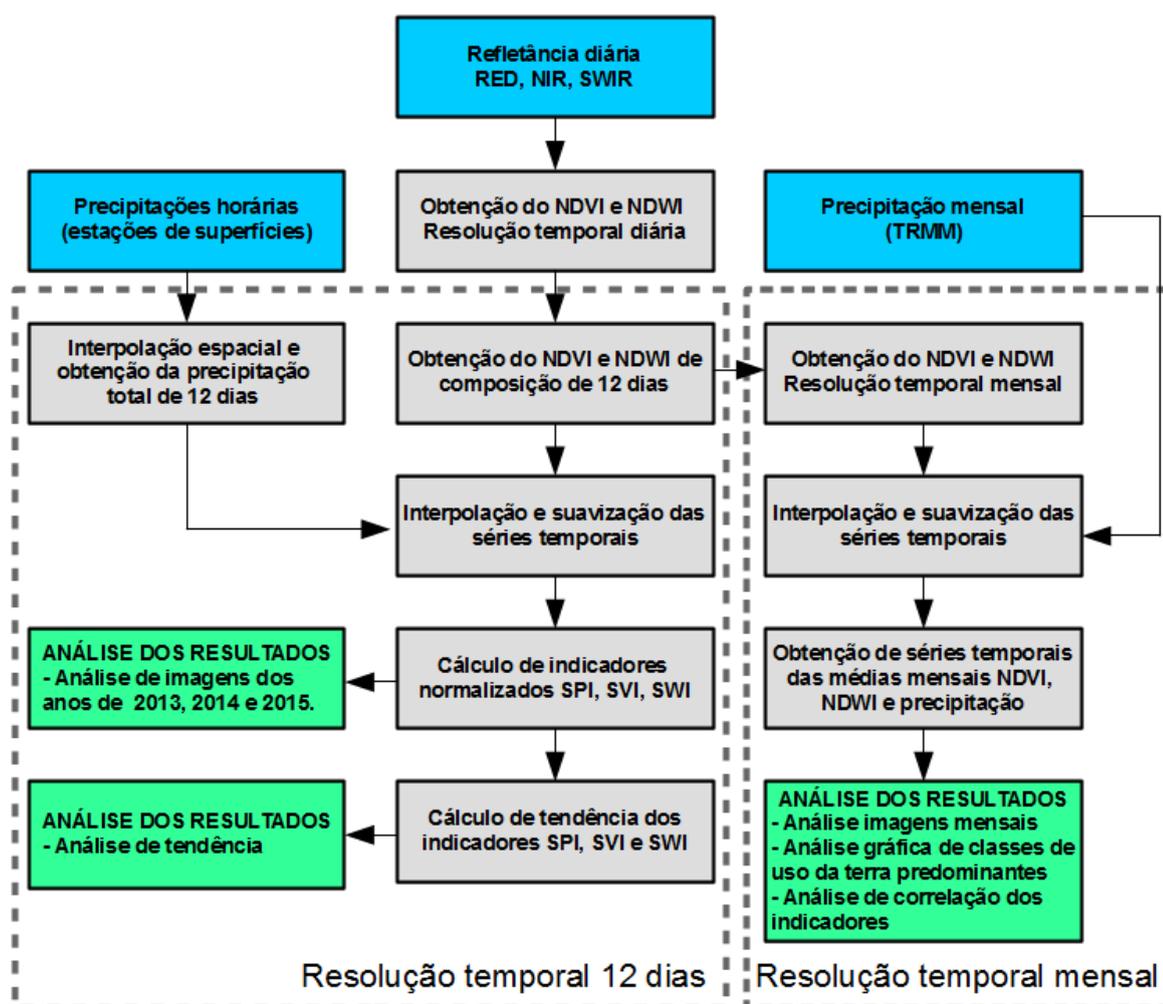


Figura 2. Diagrama da metodologia do trabalho, destacando processos em resolução temporal de 12 dias e mensal. Os retângulos representam bases de dados (azuis), processos (cinzas) e resultados avaliados (verdes).

Com o intuito de obter a precipitação pluvial com resolução de 12 dias, mesma resolução temporal da composição do Meteosat-10, utilizou-se dados de precipitação horária de estações meteorológicas automáticas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) (INMET, 2020). Fez-se a soma de precipitação de 12 dias e interpolação espacial para a área de estudo. Para tanto, utilizou-se a interpolação IDP (*Inverse Distance to a Power*), descrita por Zeng e Huang (2007) como um interpolador de média ponderada em que a influência de um ponto em relação ao outro decresce com a distância. A ponderação é associada com o dado através do uso de uma potência de ponderação, que controla como o fator, *ponderação*, decresce para fora com a distância entre os pontos. Foram utilizados dados de 92 estações meteorológicas, automáticas, sendo 26 localizadas dentro da área de estudo e as demais localizadas em outros estados (Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo, Bahia, Tocantins, Pará, Piauí e Maranhão) a uma distância que variou de 200 a 500 km dos limites da área de estudo, devido à baixa quantidade de estações meteorológicas principalmente ao Norte do estado de Goiás, e à distribuição esparsa em regiões pouco povoadas. Com efeito, ao se considerar as estações ao redor da área de estudos tem-se um maior quantitativo de dados para representar a precipitação, melhorando a qualidade da estimativa como um todo, principalmente em áreas com estações esparsas.

Para diminuir o ruído nas imagens do NDVI e NDWI realizaram-se os procedimentos de pré-processamento dos dados sendo interpolação de pixels sem informação, utilizando valores anterior e posterior própria série temporal, e de suavização da série temporal, utilizando o filtro Savitzky-Golay aplicado em cada um dos pixels, a partir de um polinômio característico de quinta ordem (Cao et al., 2018). Em seguida, fez-se uma média para cada um dos meses do ano, obtendo como resultado 12 imagens de NDVI, NDWI e precipitação com resolução temporal mensal. Os valores apresentados correspondem à média de valores para cada bacia hidrográfica. Nesta etapa utilizaram-se dados do TRMM com resolução temporal mensal. A resolução mensal foi utilizada por apresentar menos imagens do que a resolução de 12 dias, que resultaria em 30 imagens, além de destacar a variação sazonal com maior intensidade,

bem como apresentar um dado mais confiável para as regiões noroeste e norte do estado de Goiás, onde a distribuição de estações de superfície é mais esparsa.

Fez-se uma análise das imagens resultantes com o intuito de identificar padrões e especificidades sazonais. Também foram obtidos gráficos de séries temporais de bacias hidrográficas com predominância de diferentes classes de uso do solo, sendo a) agricultura anual, na bacia hidrográfica do ribeirão Santa Bárbara, nos municípios de Goiatuba (ao norte) e Bom Jesus de Goiás (ao sul); b) pastagem, na bacia hidrográfica do córrego Bandeirante, localizada no município de Nova Crixás; c) vegetação natural, na bacia hidrográfica do ribeirão do Meio, localizada no município de Cavalcante; d) “mistura” de usos do solo, sendo formado por agricultura anual (28%), pastagem (32%), vegetação natural (37%) e outros (2%), na bacia hidrográfica do rio dos Patos, localizada nos municípios de Barro Alto (ao norte), Vila Propícia (ao sul) e Goianésia (ao oeste) para melhor compreender as diferentes respostas sazonais em relação à precipitação pluvial. Para tanto, devido diferença de intervalo de valores de cada um dos indicadores, optou-se por utilizar os valores normalizados, a partir da média e desvio padrão das amostras de cada indicador, permitindo assim, uma comparação dos indicadores em mesmo intervalo de valores.

Com o intuito de identificar a similaridade entre os indicadores NDVI, NDWI e precipitação foram avaliadas as correlações lineares no tempo entre os indicadores. A normalidade dos dados foi confirmada com o teste de Shapiro-Wilk. Para análise de correlação entre a precipitação no tempo (t) e os indicadores NDVI e NDWI foram avaliados o mesmo intervalo de tempo (t) e, à posteriori, a precipitação nos tempos (t+1), (t+2) e (t+3). O numeral acrescido ao tempo (t) corresponde à quantidade de meses futuros.

A partir do NDVI, NDWI e precipitação de resolução temporal de 12 dias fez-se uma análise de tendência com o intuito de avaliar a capacidade dos indicadores de apresentarem as variações sazonais entre os anos de 2013 a 2015. Para tanto, os indicadores precipitação pluvial, NDVI, SDWI foram normalizados, conforme as fórmulas apresentadas na Tabela 1, e obtive-se, respectivamente, os indicadores ambientais SVI (*Standard Vegetation Index*), SWI (*Standard*

Water Index) e SPI (*Standard Precipitation Index*) com resolução temporal de 12 dias. Os três indicadores quando padronizados permitem a adoção das mesmas classes para verificar se os indicadores têm o mesmo desvio de suas médias, para cada pixel, para cada estação ou ano, durante o período estudado. Os valores podem ser classificados como Seca extrema (-2,00 ou menos), seca severa (-1,50 a -1,99), seca moderada (-1,00 a -1,49), próximo do normal (-0,99 a 0,99), moderadamente úmida (1,00–1,49), muito úmido (1,5–1,99) e extremamente úmido (2,00 ou mais). Tais indicadores foram utilizados para o monitoramento da estação de seca no Marrocos (Ezzine et al., 2014), para a análise de tendências da dinâmica da vegetação e a relação com a precipitação para a América do Sul (Barbosa et al., 2015) e no estudo da influência da variabilidade pluviométrica na dinâmica da vegetação sobre o Nordeste do Brasil (Barbosa e Lakshmi-Kumar, 2016). A Tabela 1 apresenta o nome, referência e fórmula dos indicadores normalizados.

A partir desses indicadores geraram-se imagens para a análise de diferenças sazonais interanuais. Bem como, a partir do cálculo do coeficiente angular pelo método dos mínimos quadrados, obteve-se como resultado imagens de tendência do indicador (positiva ou negativa), que indica bacias hidrográficas com mudanças que ocorreram na superfície durante o período avaliado.

Para o cálculo do SPI, $Z_{P(ijk)}$ é o desvio da média da precipitação em unidades de desvio padrão do pixel i do intervalo j do ano k , P_{ijk} é a medida de precipitação do pixel i do intervalo j do ano k , \underline{P}_{ij} a média de precipitação do pixel i do intervalo j , $P_{\sigma ij}$ o desvio padrão do pixel i do intervalo j . Para o cálculo do SVI, $Z_{NDVI(ijk)}$ é o desvio da média do NDVI em unidades de desvio padrão do pixel i do intervalo j do ano k , $NDVI_{ijk}$ é a medida de precipitação do pixel i do intervalo j do ano k , \underline{NDVI}_{ij} a média de precipitação do pixel i do intervalo j , $NDVI_{\sigma ij}$ o desvio padrão do pixel i do intervalo j . Para o cálculo do SWI, $Z_{NDWI(ijk)}$ é o desvio da média do NDWI em unidades de desvio padrão do pixel i do intervalo j do ano k , $NDWI_{ijk}$ é a medida de precipitação do pixel i do intervalo j do ano k , \underline{NDWI}_{ij} a média de precipitação do pixel i do intervalo j , $NDWI_{\sigma ij}$ o desvio padrão do pixel i do intervalo j . Sendo que o valor j corresponde à ordem de imagens obtidas em um ano no intervalo de 12 dias, representado por valores de 1 a 30. Nota-se que $Z_{P(ijk)}$, $Z_{NDVI(ijk)}$ e $Z_{NDWI(ijk)}$ foram considerados como funções de distribuição padrão normal com média 0 e desvio padrão 1. Sendo $prob$ a distribuição de probabilidade para cada um dos indicadores.

Tabela 1. Indicadores normalizados e respectivas referência e fórmula.

Indicadores normalizados	Referência	Fórmula
SPI (<i>Standard Precipitation Index</i>)	McKee et al. (1993)	$Z_{P(ijk)} = \frac{P_{ijk} - \underline{P}_{ij}}{P_{\sigma ij}}, SPI = prob(Z < Z_{P(ijk)})$
SVI (<i>Standard Vegetation Index</i>)	Peters et al. (2002)	$Z_{NDVI(ijk)} = \frac{NDVI_{ijk} - \underline{NDVI}_{ij}}{NDVI_{\sigma ij}}, SVI = prob(Z < Z_{NDVI(ijk)})$
SWI (<i>Standard Water Index</i>)	Ezzine et al. (2014)	$Z_{NDWI(ijk)} = \frac{NDWI_{ijk} - \underline{NDWI}_{ij}}{NDWI_{\sigma ij}}, SWI = prob(Z < Z_{NDWI(ijk)})$

Resultados e discussão

Para analisar os resultados obtidos com os indicadores biofísicos provindos do Meteosat-10 as Figuras 3, 4 e 5 apresentam, respectivamente, as médias mensais de precipitação, NDVI e NDWI para a área de estudo, subdividida em bacias hidrográficas, no período de 2013 a 2015. O

número na parte inferior direita de cada ilustração corresponde ao mês de referência, de janeiro (01) a dezembro (12).

Analisando as médias mensais dos indicadores NDVI e NDWI observa-se a sazonalidade das bacias hidrográficas nas diferentes regiões da área de estudo. No noroeste do estado de Goiás a precipitação (Figura 3) concentra-se nos meses de dezembro e janeiro (12

e 01) e, como nessas bacias ocorre predominância de pastagem, há um menor desenvolvimento vegetativo comparado ao centro e sudoeste do estado de Goiás, diferença que se destacam nas imagens do NDWI e de forma mais sutil no NDVI. No nordeste do estado de Goiás, próximo à fronteira com o estado da Bahia, as bacias apresentam baixa precipitação durante o ano, sendo maior apenas em novembro e dezembro (11 e 12) e, como a vegetação natural predominante é rasteira, o desenvolvimento vegetativo é menor, o que é demonstrado pelos baixos valores de NDVI e menores ainda para o NDWI. As bacias na região central do estado de Goiás apresentam menor precipitação do que as bacias no sudoeste e noroeste goianos, no entanto, possuem maior desenvolvimento vegetativo durante mais tempo (meses de janeiro a maio).

Analisando as diferentes regiões da área de estudo destacam-se o alto NDVI no sudoeste goiano (Figura 4) em dois intervalos de meses distintos e que indicam o desenvolvimento vegetativo da primeira safra de dezembro a janeiro (12 a 01) e da segunda safra de abril a maio (04 a 05), sendo relativamente maior no período da primeira safra, que representa a principal safra do ano, sendo predominantemente de soja. Observa-se que o NDWI também apresenta essa característica, porém destaca mais o período de primeira safra (Figura 5). Isso se deve ao maior quantitativo de precipitação nos meses anteriores e diferenças climáticas em relação ao restante da área de estudo, como também influências de áreas irrigadas para o cultivo, sobretudo para a soja (Landau et al., 2013).

De modo geral, o NDWI (Figura 5) apresenta acentuada sensibilidade ao processo de secagem da vegetação, devido baixa precipitação pluvial, com valores baixos (menores do que -0,20) para os meses de julho (07) a novembro (11). Ao comparar com as imagens de precipitação pluvial (Figura 3), observa-se que no mês de maio a precipitação diminui consideravelmente, em relação aos meses anteriores (01 a 04), sendo o comportamento perceptível com a diminuição considerável dos valores do NDWI entre as imagens dos meses de maio (05) para o mês de

junho (06). Como a precipitação continua muito baixa (ou nula) nos meses seguintes, os valores do NDWI se mantêm negativos. A precipitação volta a aumentar no mês de outubro (10), sendo mais intensa nos meses seguintes (11 e 12), porém o aumento do NDWI ocorre apenas no mês de dezembro (12). Por outro lado, para o NDVI (Figura 4) os meses que apresentam menores valores são de julho a outubro (07 a 10), sendo que a precipitação do mês de outubro, mesmo sendo baixa, já ocasiona um aumento no NDVI no mês posterior (11).

Para análise de séries temporais de diferentes classes de uso da terra a Figura 6 apresenta gráficos dos indicadores NDVI, NDWI e precipitação. Na figura 6 os gráficos de séries temporais correspondem a bacias hidrográficas com predominância de cada uma das classes avaliadas durante o ano de 2013.

As séries temporais demonstram similaridade entre os indicadores NDVI e NDWI (Figura 6), no entanto com algumas particularidades conforme a classe de uso do solo predominante. Na bacia hidrográfica com predominância de gráfico agricultura anual, a bacia hidrográfica do Córrego Bandeirante (Figura 6a) o NDWI é maior que o NDVI, destacando-se no período da seca, demonstrando a capacidade de retenção de água dos cultivos, quando comparado às outras classes de uso da terra. No entanto, é importante considerar que essas regiões de predominância de agricultura anual apresentam maior investimento tecnológico no uso do solo, como também, faz uso de irrigação, aumentando relativamente o teor de água presente nas plantas, conforme apresentado no mapeamento de áreas irrigadas por pivôs centrais no estado de Goiás (Landau et al., 2013). No gráfico de Agricultura Anual (Figura 6a) observam-se dois picos de menores valores de NDVI e NDWI, o que correspondente aos picos do período de fim da primeira safra e início da segunda safra (entre os meses de fevereiro e abril) e o período de fim da segunda safra e início da primeira safra (meses de agosto a outubro).

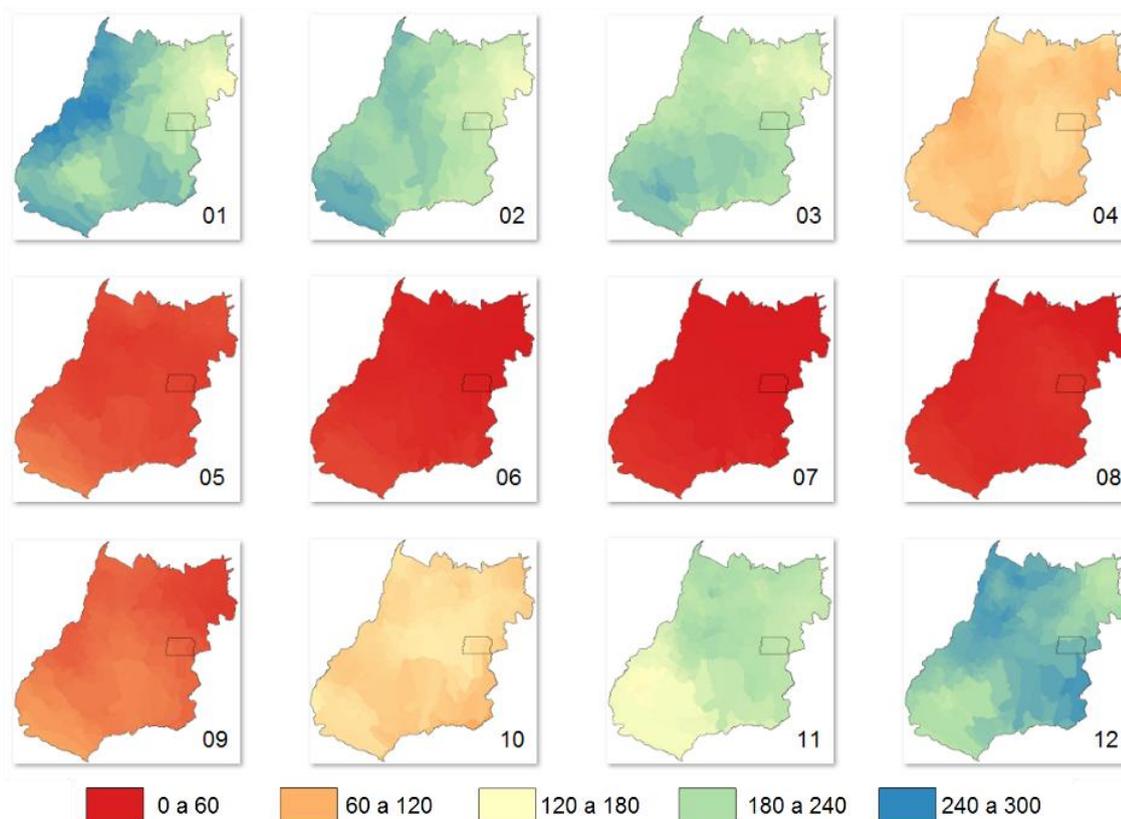


Figura 3. Média mensal de precipitação (mm) para o estado de Goiás no período de 2013 a 2015. O número na parte inferior direita de cada mapa corresponde ao mês de referência.

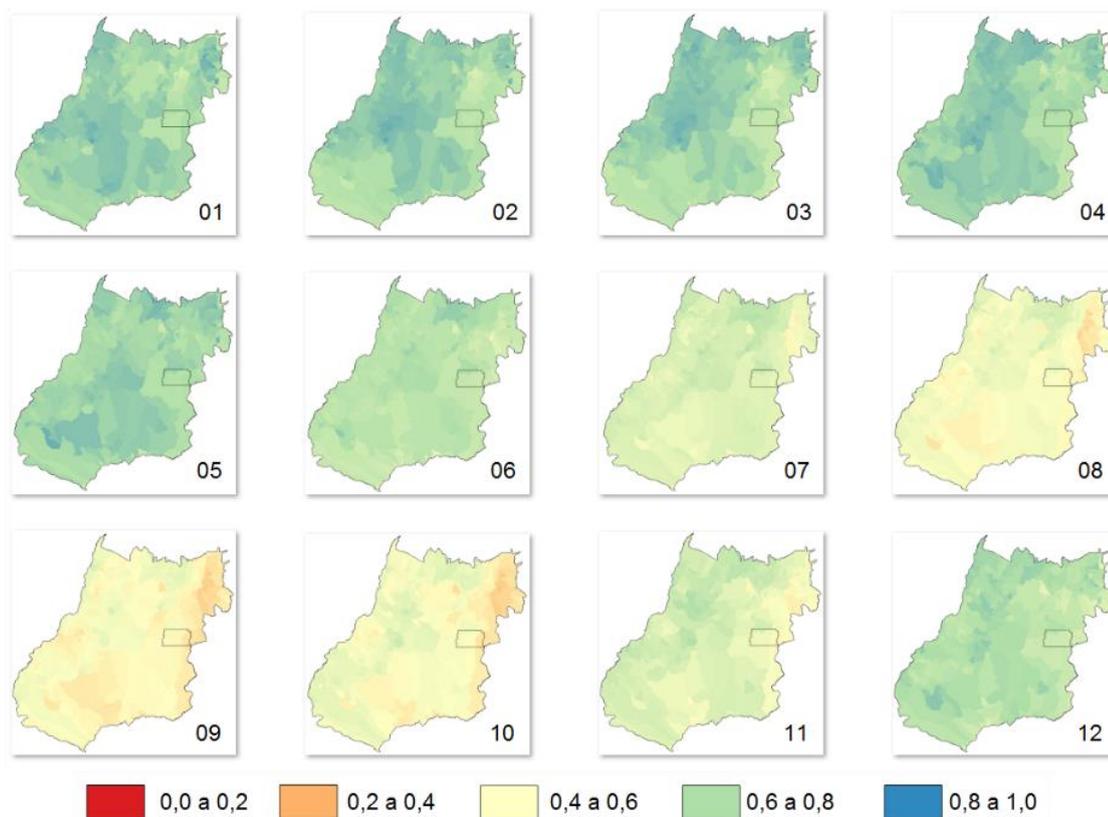


Figura 4. Média mensal do NDVI para o estado de Goiás no período de 2013 a 2015. O número na parte inferior direita de cada mapa corresponde ao mês de referência.

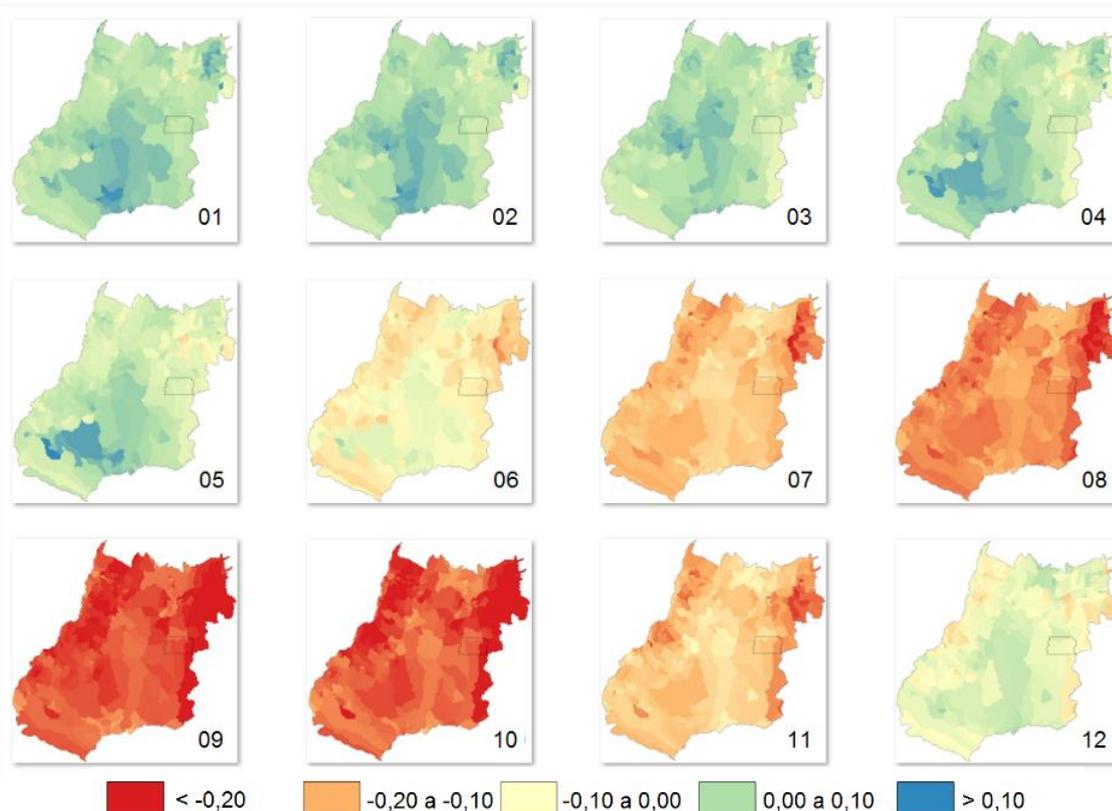


Figura 5. Média mensal do NDWI para o estado de Goiás no período de 2013 a 2015. O número na parte inferior direita de cada mapa corresponde ao mês de referência.

Na bacia hidrográfica com predominância de pastagem, a bacia hidrográfica do Córrego Bandeirante (Fig. 6b), o NDVI mantém-se visivelmente maior do que o NDWI, sendo maior a partir de outubro em que os indicadores de vegetação respondem à precipitação iniciada no mês de agosto. Isso se deve à menor infiltração e disponibilidade de água no solo da pastagem causada pelo pisoteio do gado e consequente compactação do solo, especialmente o Latossolo (Paulo e Almeida, 2016).

Já na bacia de predominância de vegetação natural, a bacia hidrográfica do ribeirão do Meio (Figura 6c) a diferença entre o NDVI e NDWI é mais pronunciada, sendo o NDVI visivelmente maior do que o NDWI, como também o período de alto estresse hídrico (menor do que -2,0) dura mais tempo do que para outras classes, cerca de quatro meses (maio a setembro). As bacias com predominância de vegetação natural apresentam características que explicam essa diferença: a fitofisionomia predominante é Savana Arborizada com uma pequena parcela de Savana Parque, conforme classificação do Mapa de Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado do PROBIO (Projeto de

Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira) (Brasil, 2006; Brasil, 2007) e apresentam alta quantidade de folhas que respondem pelo NDVI; o solo é predominantemente degradado e montanhoso, sendo um solo classificado como de baixa de qualidade (Abdala et al., 2016) e, devido a distribuição esparsa da vegetação em determinadas área existe solo exposto que é captado pelo NDWI; apresenta menor precipitação anual (1.100 a 1.300 mm) em relação ao restante da área de estudo (1300 a 1600 mm). Com efeito, essa vegetação natural sofre estresse hídrico por um período maior do que as bacias de pastagem e agricultura avaliadas. Para a bacia com predominância de “mistura” no uso do solo (Figura 6d) observa-se um padrão de baixa precipitação, similar ao observado na vegetação natural (Figura 6c), entretanto o NDVI e NDWI apresentam quase os mesmos valores.

Observa-se que em alguns meses do período de seca (maio a agosto) impacta nos meses futuros que vão apresentar os menores valores dos indicadores NDVI e NDWI (agosto a outubro). Ao comparar os gráficos (Figura 6), o NDVI mostra que o impacto é igual para a agricultura anual e

pastagem, uma vez que apresentam mesmo comportamento, tendo mesmo valor de pico negativo (-2,0), porém, o NDWI mostra que o estresse hídrico da vegetação é maior na pastagem. Enquanto o NDWI da agricultura anual tem um

comportamento de parábola (com concavidade voltada para baixo) na pastagem esse comportamento é de uma reta (decréscante e depois crescente), tendo o pico negativo (-2,4) no mês de outubro.

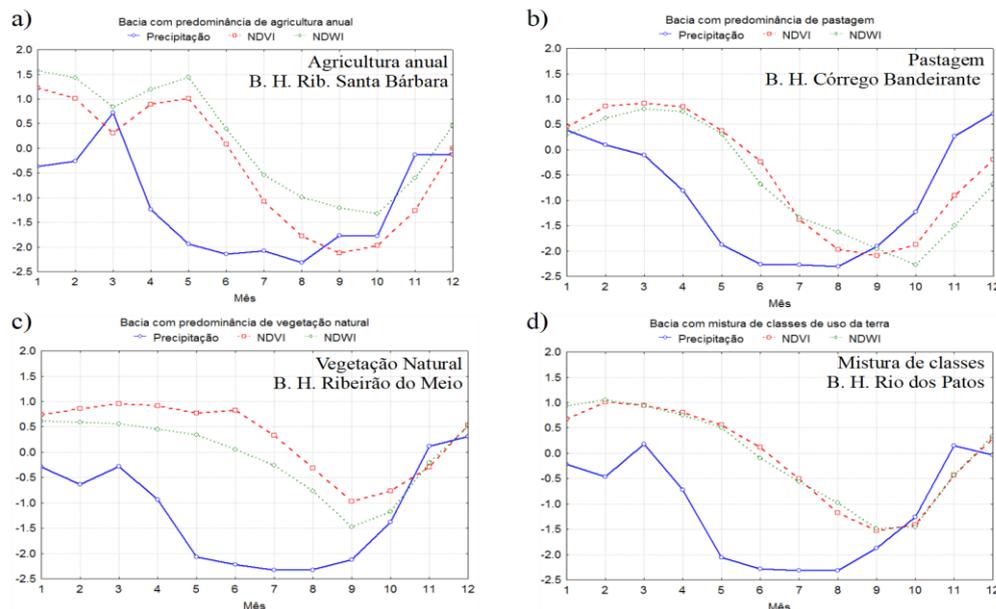


Figura 6. Gráficos de séries temporais em bacias com predominância de agricultura (a), pastagem (b), vegetação natural (c) e mistura (d) para os indicadores NDVI, NDWI e precipitação normalizada para o estado de Goiás nos meses do ano de 2013. Sendo B. H. abreviação de Bacia Hidrográfica.

Essa diferença é considerável para ser atribuída à pequena diferença de precipitação nos meses anteriores (junho a agosto). Assim, como afirmado por Zhang et al. (2018) a queda mais acentuada nos valores de NDWI significa que, durante o período de seca, a vegetação do pasto teve maior perda de teor de água.

Ao analisar as séries temporais de precipitação percebe-se um relativo atraso em relação ao NDVI e NDWI. Para tanto, a Tabela 2 apresenta os coeficientes de correlação linear entre a precipitação pluvial e os indicadores NDVI e NDWI à posteriori nos tempos (t + 1), (t+2) e (t+3). Obteve-se que a maior correlação corresponde a dois meses futuros tanto para o NDVI ($r > 0,84$) quanto para o NDWI ($r > 0,87$). Da mesma forma, Ávila et al. (2009), utilizando dados de precipitação de radar e estações meteorológicas, afirmam que o NDVI mostra-se sensível a eventos de precipitação com uma defasagem de dois meses para cultura de cana-de-açúcar; Nicácio et al. (2009) encontraram resultados similares na análise da bacia hidrográfica do Rio Coxim, no estado de Mato Grosso do Sul. Nesta análise não foram observadas diferenças de correlação relevantes entre as classes de uso avaliadas. Entretanto, esse atraso de dois meses não pode ser generalizado

uma vez que pode ser maior para outras regiões do Brasil como demonstrado por Barbosa et al. (2016) que no estudo na região Nordeste do Brasil, com dados de estações meteorológicas no período de 1982 a 2001, identificou variações espaço-temporais do NDVI estão intimamente ligadas à precipitação com a melhor correlação entre NDVI e três meses anteriores da precipitação pluvial.

Assim, a superfície do solo não apresenta uma resposta rápida em relação à precipitação, no entanto, esse atraso em uma análise mensal é o mesmo para o NDVI e o NDWI. Isso demonstra que a vegetação necessita de um tempo para responder à variação da precipitação; a água leva um tempo para penetrar nas raízes, e a planta necessita de iluminação solar durante certo período de tempo para se desenvolver e isso se refletir na variação dos indicadores (Nicácio et al., 2009). Assim, como o NDWI caracteriza melhor o teor de água na vegetação possui uma relação ligeiramente maior com a precipitação do que o NDVI (Tabela 2). Tal relação também encontrada por Karamihalaki et al. (2016) na investigação da resposta da vegetação na floresta conífera do Mediterrâneo, na Grécia, no período de 2003 a 2013, em que o NDWI apresentou uma relação mais forte com a precipitação do que o NDVI,

indicando melhor capacidade de investigar o estado da água da vegetação.

A Figura 7 apresenta gráficos de dispersão dos indicadores. Como a correlação entre a precipitação e o NDVI e NDWI mostra-se maior para o período de dois meses futuros (t+2) escolheu-se apresentar o gráfico de dispersão desta correlação. Observam-se nos gráficos de precipitação muitos valores de precipitação próximos de zero, que corresponde ao período de seca. Ao avaliar a correlação de cada bacia separadamente tanto para o NDVI quanto para o NDWI a maioria das bacias (92%) apresenta maior coeficiente de correlação com a precipitação de dois meses anteriores ($r = 0,8640$; $p = 0,0$), sendo poucas bacias (8%) que apresentam maior coeficiente de correlação com a precipitação de um mês anterior ($r = 0,8910$; $p = 0,0$). As bacias que apresentam coeficiente de correlação do NDVI e NDWI de apenas um mês (48 bacias) possuem a mesma proporção de pastagem e vegetação natural (41%), tendo como “mistura” o restante (18%).

Para a análise de tendências fez-se inicialmente o cálculo dos indicadores normalizados SPI, SVI e SWI com resolução temporal de 12 dias para o período de 2013 a 2015. A Figura 8 apresenta imagens resultantes para as bacias hidrográficas. Para ilustrar foram escolhidas imagens de estação chuvosa (dia do ano 85) para o SVI e SWI, sendo a imagem de precipitação defasada em 60 dias, que corresponde a dois meses (dia do ano 025), para os anos de 2013 a 2015. Na parte superior esquerda o termo apresentado é o indicador de data (ano e dia do ano), separador (“_”) e o nome do indicador (SPI, SVI e SWI, respectivamente). Por exemplo, observa-se que a precipitação em mesmo intervalo (025) é maior para o ano de 2013 (tons verdes) em toda área de estudo e menor (tons vermelho e laranja) para o ano de 2014.

Na análise comparativa de imagens dos indicadores SPI, SVI e SWI (Figura 8) percebe-se

diferença de precipitação entre os anos, sendo menor em 2014. Observa-se que essa diferença de precipitação afeta diretamente o desenvolvimento da vegetação neste ano, como pode ser visto em dois meses futuros do NDVI, e principalmente do NDWI, quando comparado com os outros anos (2013 e 2015), principalmente nas regiões central e sul do estado de Goiás. Particularmente, essas regiões se destacam pela produção agrícola e neste ano houve uma queda de produtividade agrícola devido baixa precipitação no período da primeira safra 2013/2014 constatado por organizações de produtores agrícolas (FAEG, 2018) e levantamento de safras no estado de Goiás (GOIÁS, 2017). Por exemplo, o cultivo de soja, maior área plantada e agricultura de primeira fase, apresentou um aumento de área plantada (7,78%) na safra 2013/2014, devido expectativas de alta produção alimentadas pelos resultados da safra anterior (2012/2013). Porém, devido à pouca chuva dos meses iniciais do ano de 2014, a safra 2013/2014 apresentou considerável queda de produtividade (-6,95%), quando comparado à primeira safra do ano de 2012/2013 (GOIÁS, 2017). Essas imagens demonstram o potencial dos indicadores normalizados utilizados para comparação entre anos da sazonalidade da vegetação, como demonstrado por Su et al. (2017) para o monitoramento de seca em regiões agrícolas no norte da China. A Figura 9 apresenta as imagens das tendências dos indicadores NDVI, NDWI e precipitação pluvial resultantes dos cálculos do SVI, SWI e SPI, respectivamente, para o período de 2013 a 2015. Os valores de tendência encontrados, para o período de análise, concentram-se em limiares específicos e com pouca variação, sendo quase nula para o SPI e SVI (menor do que 0,0001), e um pouco maior para o SWI (de 0,0001 a 0,0003)

Tabela 2. Correlação linear entre a precipitação no tempo (t) e os indicadores NDVI e NDWI no mesmo tempo (t) e à posteriori nos tempos (t + 1), (t+2) e (t+3).

NDVI (t)	NDVI (t+1)	NDVI (t+2)	NDVI (t+3)
$r = 0,4618$; $p = 0,0$	$r = 0,7745$; $p = 0,0$	$r = 0,8431$; $p = 0,0$	$r = 0,6687$; $p = 0,0$
NDWI (t)	NDWI (t+1)	NDWI (t+2)	NDWI (t+3)
$r = 0,4842$; $p = 0,0$	$r = 0,6494$; $p = 0,0$	$r = 0,8762$; $p = 0,0$	$r = 0,6799$; $p = 0,0$

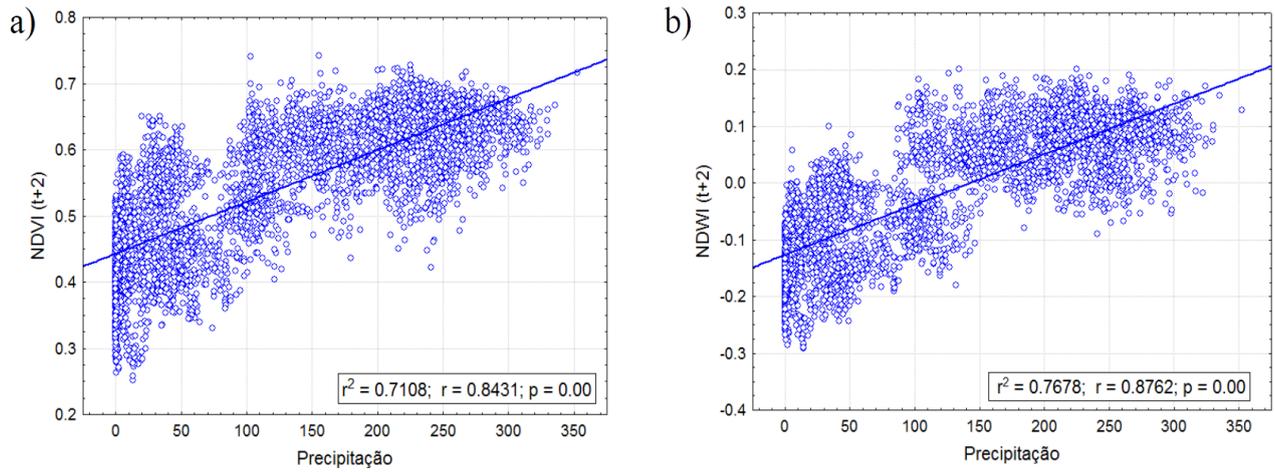


Figura 7. Gráficos de dispersão do (a) NDVI (t+2) x precipitação (t), (b) NDWI (t+2) x precipitação (t) para o estado de Goiás no período de 2013 a 2015.

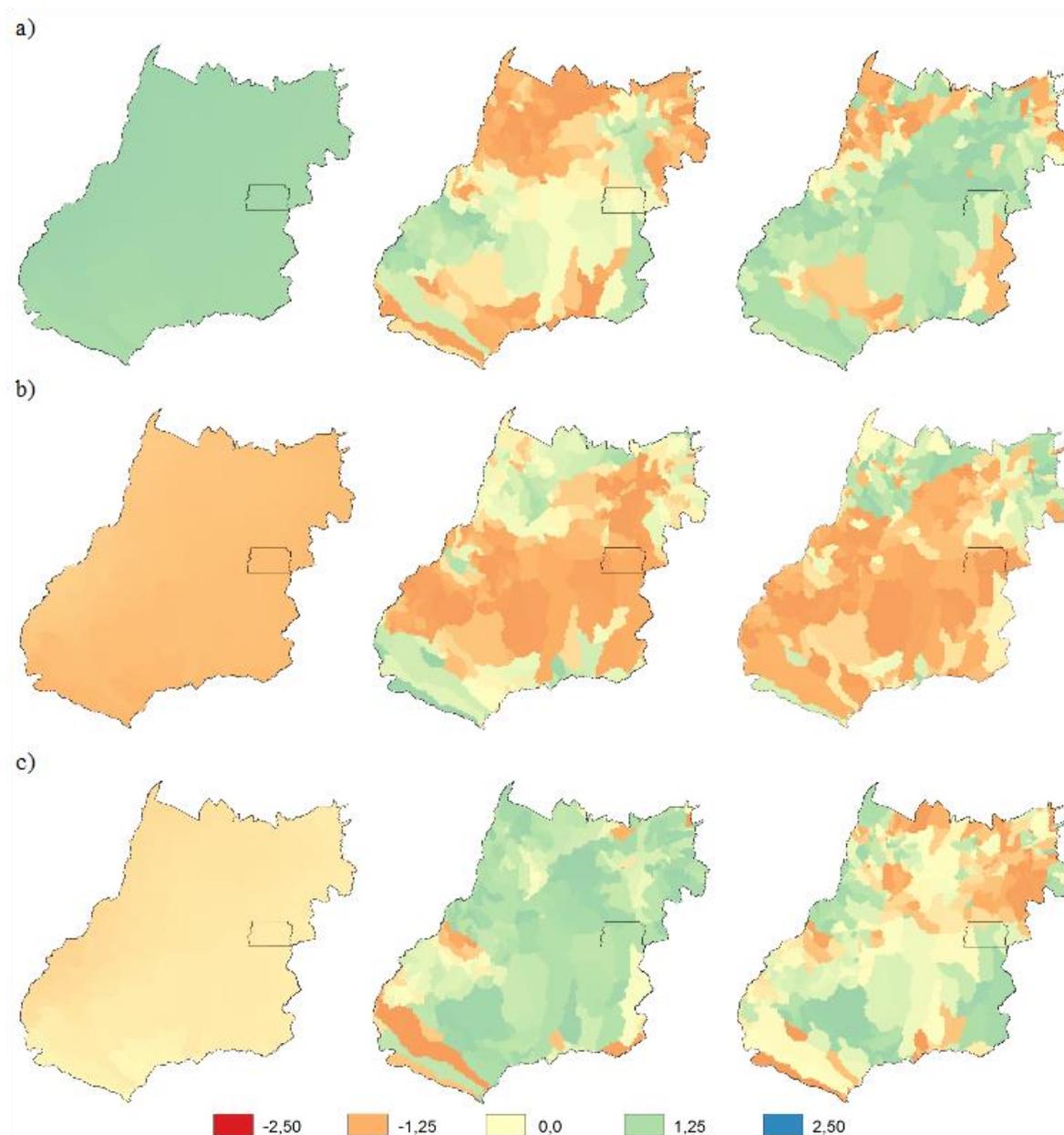


Figura 8. Imagens resultantes do cálculo do SPI, SVI e SWI com resolução temporal de 12 dias para os anos de 2013 (a), 2014 (b) e 2015 (c) para o estado de Goiás. Foram escolhidas imagens do período de estação chuvosa (dia do ano 85) para o SVI e SWI, sendo a imagem de precipitação defasada em dois meses (dia do ano 25).

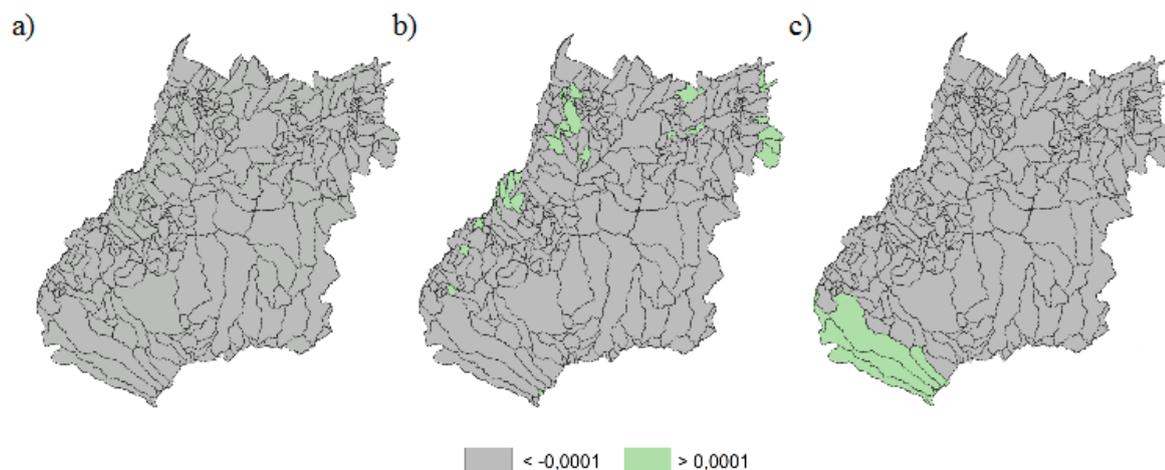


Figura 9. Mapas temáticos do SPI (*Standardized Precipitation Index*) (a), SVI (*Standardized Difference Vegetation Index*) (b), SWI (*Standardized Difference Water Index*) (c) para o estado de Goiás no período de 2013 a 2015 ilustrando a tendência de aumento ou diminuição do valor do indicador a partir do coeficiente angular obtido pelo do método dos mínimos quadrados.

As imagens resultantes dos cálculos de tendências (Figura 9) apresentam a sensibilidade dos índices NDWI e NDVI em perceber mudanças da vegetação da superfície, utilizando para isso os índices SWI e SVI, respectivamente. O SVI (Figura 9b) apresenta tendência de diminuição do NDVI em toda área de estudo, porém em um intervalo de valores pequeno. Por outro lado, o SWI (Figura 9c) apresenta tendências tanto de aumento quanto diminuição do NDWI, demonstrando mais sensibilidade no tempo. Já em relação ao SPI (Figura 9a), ocorre aumento no período em bacias ao extremo sudoeste do estado de Goiás e diminuição no restante da área de estudo, tendência que possivelmente está relacionada às diferenças climáticas da região sudoeste (clima tropical úmido) com o restante do estado de Goiás (clima tropical semiúmido), como observado por Nascimento e Oliveira (2018) no estudo de pluviometria como base os anos-padrão habitual (2011), seco (2007) e chuvoso (2009).

Ao avaliar a tendência do SWI (Figura 9b) percebe-se que algumas bacias apresentam tendências positivas, na maioria, localizadas a nordeste e a oeste do estado de Goiás. As bacias que apresentam tendência positiva a nordeste, nos limites com o estado da Bahia, apresentam as mudanças de uso do solo, como o avanço da pastagem plantada e a intensificação produtiva em áreas de agricultura, devido avanço da área de influência do MATOPIBA (acrônimo para a região dos estados de Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia) que representa uma nova fronteira agrícola do Brasil (Embrapa, 2020) no estado de Goiás

(Rudorff et al., 2015). Já a oeste, em que há predominância de uso do solo para pastagem, essa tendência positiva nas bacias hidrográficas pode representar menor estresse hídrico na pastagem devido melhoria do manejo da pastagem ou diminuição de cabeças de gado por área.

Essas análises da superfície do solo a partir de tendências de estresse hídrico demonstram o potencial do NDWI, principalmente devido à maior sensibilidade que o NDVI na identificação de mudanças de uso e cobertura do solo, o que corrobora com a afirmação de Ezzine et al. (2014) que destacam o NDWI como um indicador relativamente novo, necessitando de maiores investigações para melhor compreensão de seu potencial e aplicabilidade.

Conclusão

Os indicadores obtidos a partir do Meteosat-10 apresentam potencial para o estudo da sazonalidade nas bacias hidrográficas do estado de Goiás, incluindo o Distrito Federal. Em uma análise de séries-temporais das classes de uso do solo predominantes é possível identificar particularidades intrínsecas do comportamento sazonal, como o desenvolvimento da vegetação devido precipitação, impacto do período de seca na vegetação, períodos de primeira e segunda safra na agricultura e o estresse hídrico da pastagem. Tanto o NDVI quanto o NDWI apresentam maior correlação com a precipitação de dois meses anteriores.

Com o uso dos indicadores normalizados SVI e SWI percebe-se que o NDWI apresenta

maior sensibilidade do que o NDVI na identificação da sazonalidade da vegetação. Assim, o comportamento do NDWI (e SWI) demonstra seu potencial do indicador como relevante para ser utilizado em conjunto com o NDVI, para o monitoramento de diferentes classes de uso do solo.

A baixa resolução espacial dos indicadores provindos do Meteosat-10 não chega a representar uma limitação em análises de menor escala espacial, como em bacias hidrográficas, uma vez que é possível abstrair diversas informações da superfície. O estudo demonstra o potencial de indicadores de vegetação provindos de dados de satélite em órbita geoestacionária. Da mesma forma, fornece subsídios para estudar indicadores ambientais de superfície do solo provindos de dados do sensor ABI (*Advanced Baseline Imager*) da nova série GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), satélite em órbita geoestacionária que apresenta como vantagens, em relação à série MSG, menor resolução espacial e menor ângulo de visada para o Brasil.

Agradecimentos

Agradecimentos à FAPEG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás), pela concessão de bolsa de doutorado do edital nº 03/2014, número 201414267000416, ao IFG (Instituto Federal de Goiás), pelo apoio no desenvolvimento de pesquisas e LAPIG (Imagem Laboratório de Processamento e SIG) por todo o suporte e apoio.

Referências

Abdala, K.O., Ribeiro, F.L., Ferreira, M.E., 2016. Risco de impactos ambientais gerados pela dinâmica de uso do solo no estado de Goiás: uma abordagem multimétodos. *Revista Brasileira de Cartografia* [online] 2016. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44391>. Acesso: 10 abr. 2020.

Albuquerque, E.M., 2014. Análise do comportamento do NDVI e NDWI sob diferentes intensidades pluviométricas no município de Sousa-PB. *Revista Estudos Geoambientais* [online] 1. Disponível em: https://pdfs.semanticscholar.org/ae34/7613b8388eb7f5440ec1a72bda2dcb4f42d9.pdf?_ga=2.180305892.1932130440.1585501322-421267539.1585501322. Acesso: 10 abr. 2020.

ANA. Agência Nacional das Águas, 2016. Sistema de Informações Hidrológicas. Regiões

Hidrográficas do Brasil. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/apresentacao>. Acesso: 10 abr. 2020.

Anjos, D.M., Soares, D.M.A., Simões, E.M., Leite, A.C.C.P., Ramos, T.M., Bakke, I.A., 2017. Temporal analysis of water volume at Capoeira Reservoir Mãe d'Água, Paraíba, Brazil. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável* [online] 12. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v12i1.5115>. Acesso: 10 abr. 2020.

Ávila, A.M.H., Gonçalves, R.R.V., Pinto, H.S., Zullo, J., 2009. Relação entre a precipitação e o NDVI em imagens AVHRR/NOAA para a cana-de-açúcar no Estado de São Paulo. In XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Anais... Natal, Brasil. Disponível em: marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.16.20/doc/553-560.pdf. Acesso: 10 abr. 2020.

Barbosa, E.F.F.M., Félix, R.A., Nunes, E.F.S., 2018. A bacia hidrográfica como unidade de estudo de educação ambiental, *Revista Brasileira de Educação, Cultura e Linguagem* [online] 3. Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/index.php/educacaoculturalinguagem/article/view/3266>Acesso: 10 mai. 2020.

Barbosa, H.A., Lakshmi-Kumar, T.V., Silva, L.R.M., 2015. Recent Trends in Vegetation Dynamics in the South America and Their Relationship to Rainfall. *Natural Hazards* [online] 77. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1635-8>. Acesso: 10 abr. 2020.

Barbosa, H.A., Lakshmi-Kumar, T.V., 2016. Influence of rainfall variability on the vegetation dynamics over Northeastern Brazil. *Journal of Arid Environments* [online] 124. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.08.015>. Acesso: 10 abr. 2020.

Barbosa, H.A., Kumar, T.V.L., Paredes, F., Elliott, S., Ayuga, J.G., 2019. Assessment of Caatinga response to drought using Meteosat-SEVIRI Normalized Difference Vegetation Index (2008–2016). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* [online] 148. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.12.014>. Acesso: 10 abr. 2020.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, 2006. PROBIO. Mapa de cobertura vegetal do bioma Cerrado. Disponível em: <http://mapas.mma.gov.br/mapas/aplic/probio/datadownload.htm?cerrado>. Acesso: 10 abr. 2020.

- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, 2007. PROBIO. Mapeamento de Cobertura Vegetal do Bioma Cerrado. Relatório Final. Disponível em: http://mapas.mma.gov.br/geodados/brasil/vegetacao/vegetacao2002/cerrado/documentos/relatorio_final.pdf. Acesso: 10 abr. 2020.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, 2015. Mapeamento do Uso e Cobertura do Cerrado: Projeto TerraClass Cerrado. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/tccerrado/>. Acesso: 10 abr. 2020.
- BRASIL. Presidência da República. Casa Civil, 1997. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.
- Cao, R., Chen, Y., Shen, M., Chen, J., Zhou, J., Wang, C., Yang, W., 2018. A simple method to improve the quality of NDVI time-series data by integrating spatiotemporal information with the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment* [online] 217. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.022>. Acesso: 10 mai. 2020.
- Cerezini, M.T., Hanai, F.Y., 2017. Gestão Sustentável e Integrada da Água em Bacias Hidrográficas: 20 anos da Lei das Águas no Brasil. *Caminhos da Geografia* [online] 18. Disponível em: <http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/40924/21649>. Acesso: 10 mai. 2020.
- Cunha, C.F., Cardoso, S.B., Teramoto, E.H., Chang, H.K., 2020. Modelo área-volume para a represa Guarapiranga empregando o índice NDWI. *Holos Environment* [online] 20. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14295/holos.v20i1.12370>. Acesso: 10 abr. 2020.
- Demisse, G.B., Tadesse, T., Bayissa, Y., Atnafu, S., Argaw, M., Nedaw, D., 2018. Vegetation condition prediction for drought monitoring in pastoralist areas: a case study in Ethiopia, *International Journal of Remote Sensing* [online] 39. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1421797>. Acesso: 10 mai. 2019.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2020. Espaço temático: Matopiba. Disponível em: <https://www.embrapa.br/tema-matopiba>. Acesso: 10 abr. 2020.
- Ezzine, H., Bouziane, A., Ouazar, D., 2014. Seasonal comparisons of meteorological and agricultural drought indices in Morocco using open short time-series data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* [online] 26. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.005>. Acesso: 10 abr. 2020.
- FAEG. Federação da Agricultura e Pecuária de Goiás, 2018. Efeitos da seca refletem na queda de produção em Goiás e no Brasil. Disponível em: <https://sistemafaeg.com.br/faeg/noticias/noticias/efeitos-da-seca-refletem-na-queda-de-producao>. Acesso: 10 abr. 2020.
- Fernandes, F.H.S., Sano, E.E., Ferreira, L.G., Baptista, G.M.M., Victoria, D.C., Fassoni-Andrade, A.C., 2018. Degradation trends based on MODIS-derived estimates of productivity and water use efficiency: A case study for the cultivated pastures in the Brazilian Cerrado, *Remote Sensing Applications: Society and Environment* [online] 11. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.04.014>. Acesso: 10 mai. 2020.
- Fonseca, E.L., Locatelli, M., Filho, E.P.S., 2018. NDVI aplicado na detecção de degradação de pastagens cultivadas, *Confins* [online] 35. Disponível em: <https://doi.org/10.4000/confins.13180>. Acesso: 10 mai. 2020.
- Gao, B., 1996. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment* [online] 58. Disponível em: http://ceeserver.cce.cornell.edu/wdp2/cee6150/Readings/Gao_1996_RSE_58_257-266_NDWI.pdf. Acesso: 10 abr. 2020.
- GOIÁS. Governo de Goiás, 2017. Secretaria de Desenvolvimento. Levantamento de Safras. Disponível em: <http://www.desenvolvimento.go.gov.br/component/content/article/51-area-de-atuacao/agricultura-e-pecuaria/2225-levantamento-de-safras.html>. Acesso: 10 abr. 2020.
- GPM. Global Precipitation Measurement, 2020. Disponível em: <https://gpm.nasa.gov/trmm>. Acesso; 10 mai. 2020.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia, 2020. Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso: 10 abr. 2020.
- Jovanovic, N., Garcia, C.L., Bugan, R.D.H., Teich, I., Rodriguez, C.M.G., 2014. Validation of Remotely-Sensed Evapotranspiration and NDWI Using Ground Measurements at Riverlands South Africa, *Water SA* [online] 40. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v40i2.3>. Acesso: 10 abr. 2020.
- Julien, Y., Sobrino, J.A., Jiménez-Muñoz, J.-C., Sória, G., Skokovic, D., Gomis-Cebolla, J.,

- Garcia Monteiro, S., 2018. Using MSG-SEVIRI Data to Monitor the Planet in Near Real Time. Anais... IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518647>. Acesso: 10 abr. 2020.
- Karamihalaki, M., Stagakis, S., Sykioti, O., Kyparissis, A., Parcharidis, I., 2016. Monitoring drought effects on Mediterranean Conifer Forests using Spot-vegetation NDVI and NDWI timeseries. Anais... Living Planet Symposium. Praga, República Tcheca. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2016ESASP.740E.188K/abstract>. Acesso: 10 abr. 2020.
- Landau, E.C., Guimarães, D.P., Reis, R.J., 2013. Mapeamento das áreas irrigadas por pivôs centrais no Estado de Goiás e no Distrito Federal-Brasil. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/974474/mapeamento-das-areas-irrigadas-por-pivos-centrais-no-estado-de-goias-e-no-distrito-federal-brasil>. Acesso: 10 abr. 2020.
- Lee, C.S., Yeom, J.M., Lee, H.L., Kim, J. J., Han, K.S., 2015. Sensitivity analysis of 6S-based look-up table for surface reflectance retrieval. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences [online] 51. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13143-015-0062-9>. Acesso: 10 mai. 2020.
- Machado, S.L.D., Silva, C. R., Araújo, A.A., 2018. Descrição temporal do comportamento do Cerrado sensu strictu usando séries temporais, Ciência e Natura [online] 40. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X27712>. Acesso: 10 mai. 2020.
- Mckee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., 1993 The relationship of drought frequency and duration to time scales. Anais... 8TH Conference On Applied Climatology. Califórnia, Estados Unidos. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.462.4342&rep=rep1&type=pdf>. Acesso: 10 abr. 2020.
- Moraes, V.H., Giongo, P.R., Arantes, B.H.T., Costa, E.M., Ventura, M.V.A., Cavalcante, T.J., Giongo, A.M.M., 2019. Evaluation of precipitation and evapotranspiration obtained by remote sensing with meteorological stations in the state of Goiás, Journal of Agricultural Science [online] 11. Disponível em: <https://doi.org/10.5539/jas.v11n4p356>
- Nascimento, D., Oliveira, I., 2018. Aplicação das estimativas de precipitação do Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) no estudo da pluviometria habitual e excepcional de Goiás e Distrito Federal, Revista Brasileira de Geografia Física [online] 11. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v11i.5.p1664-1679>. Acesso: 10 mai. 2020.
- Neves, G.Z.F., 2018. A chuva no estado de Goiás e Distrito Federal: aspectos espaciais, temporais e dinâmicos, Revista Brasileira de Climatologia [online] Edição Especial. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v0i0.66147>. Acesso: 10 mai. 2020.
- Nicácio, R.M., Araújo, L.L., Gonzaga, E.P., Libos, M.I.P.C., Oliveira, L.M.T., 2009. Relação NDVI e precipitação na bacia do rio Coxim – MS, Geografia [online] 34. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/ageteo/article/view/4855>. Acesso: 10 abr. 2020.
- Paulo, L.C.C.V, Almeida, A.A.S., 2016. Resistência à penetração em Latossolo sob floresta ripária e submetido ao pisoteio animal. Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science [online] 11. Disponível em: doi:10.4136/ambi-agua.1899. Acesso: 10 abr. 2020.
- Peixoto, F.S., Silveira, R.N.C.M., 2017. Bacia hidrográfica: tendências e perspectivas da aplicabilidade no meio urbano, Revista Brasileira de Geografia Física [online] 10. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20170054>. Acesso: 10 mai. 2020.
- Pereira, O.J.R., Ferreira, L.G., Pinto, F., Baumgarten, L., 2018. Assessing Pasture Degradation in the Brazilian Cerrado Based on the Analysis of MODIS NDVI Time-Series, Remote Sensing [online] 10. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs10111761>. Acesso: 10 mai. 2020.
- Peters, A.J., Walter-Shea, E.A., Ji, L., Viña, A., Hayes, M., Svoboda, M.D., 2002. Drought monitoring with NDVI-based standardized vegetation index, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing [online] 68. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/778b/cf08400090a59c9f9aef95ac0dd5af0cae14.pdf>. Acesso: 10 mai. 2020.
- Quirino, D.T., Casaroli, D., Oliveira, R.A.J., Mesquita, M., Evangelista, A.W.P., Júnior, J.J., 2017. Evaluation of TRMM satellite rainfall estimates (algorithms 3B42 V7 & RT) over the Santo Antônio county (Goiás, Brazil), Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín [online] 70. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.15446/rfna.v70n3.61805>. Acesso em: 10 mai.2020.

- Rudorff, B., Risso, J., et al., 2015. Análise Geoespacial da Dinâmica das Culturas Anuais no Bioma Cerrado: 2000 a 2014. Agrosatélite Geotecnologia Aplicada Ltda. Disponível em: http://biomas.agrosatelite.com.br/img/Analise_geoespacial_da_dinamica_das_culturas_anuais_no_bioma_Cerrado_2000a2014.pdf. Acesso: 10 abr. 2020.
- Santos, P., Martins, A., 2018. Análise da Vulnerabilidade Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Claro (GO) utilizando Geotecnologias, Revista do Departamento de Geografia [online] 36. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/rdg.v36i0.143665>. Acesso: 10 mai. 2020.
- Schmetz, J., Pili, P., Tjemkes, S., Just, D., Kerkmann, J., Rota, S., Ratier, A., 2002. An Introduction to Meteosat Second Generation (MSG), Bulletin of the American Meteorological Society [online] 83. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2002\)083<0977:AITMSG>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2002)083<0977:AITMSG>2.3.CO;2). Acesso: 10 abr. 2020.
- Silva, D.C.C., Filho, J.L.A., Oliveira, R.A., Lourenço, R.W., 2017. Aplicação do NDWI para avaliar a disponibilidade de água em bacias hidrográficas, Revista da Universidade Vale do Rio Verde [online] 15. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5892/ruvrd.v15i1.2842>. Acesso: 10 abr. 2020.
- Silveira, C.R.S., Ferreira, L.G., Silva, B.B., 2019. Characteristics and challenges of NDVI generation to Brazil from Meteosat-10 geostationary orbit satellite data, Revista Brasileira de Geografia Física [online] 12. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.3.p1142-1155>. Acesso: 10 mai. 2020.
- Sun, L., Liu, W., Wang, Y., Yuan, S., 2017. Evaluation of Typical Spectral Vegetation Indices for Drought Monitoring in Cropland of the North China Plain, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing [online] 10. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2734800>. Acesso: 10 mai. 2017.
- Szabó, S., Gácsi, Z., Balázs, B., 2016. Specific features NDVI, NDWI and MNDWI as reflected in land cover categories, Landscape & Environment [online] 10. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21120/LE/10/3-4/13>. Acesso: 10 mai. 2020.
- Tian, E., Fensholt, R., Verbesselt, J., Grogan, K., Horion, S., Wang, Y., 2015. Evaluating temporal consistency of long-term global NDVI datasets for trend analysis. Remote Sensing of Environment [online] 163. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.03.031>. Acesso: 10 abr. 2020.
- Tucker, C.J., 1979. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation, Remote Sensing of Environment [online] 150. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0). Acesso: 10 abr. 2020.
- Xu, C., Qu, J.J., Hao, X., Cosh, M.H., Zhu, Z., Gutenberg, L., 2020. Monitoring crop water content for corn and soybean fields through data fusion of MODIS and Landsat measurements in Iowa, Remote Sensing [online] 227. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105844>. Acesso: 10 mai. 2020.
- Yan, D., Zhang, X., Yu, Y., Guo, W., 2016. A Comparison of Tropical Rainforest Phenology Retrieved from Geostationary (SEVIRI) and Polar-Orbiting (MODIS) Sensors across the Congo Basin, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing [online] 54. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2552462>. Acesso: 10 mai. 2020.
- Zhang, C., Pattey, E., Liu, J., Cai, H., Shang, J., Dong, T., 2018. Retrieving leaf and canopy water content of winter wheat using vegetation water indices, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing [online] 11. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2773625>. Acesso: 10 mai. 2020.