Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

Monitoramento Espaço-Temporal da Detecção de Mudanças em Vegetação de Caatinga por Sensoriamento Remoto no Semiárido Brasileiro

Alan César Bezerra, alan.bezerra@ufrpe.br (Autor correspondente). Universidade Federal Rural de Pernambuco - Unidade Acadêmica de Serra Talhada,

Jhon Lennon Bezerra da Silva, Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil

Douglas Alberto de Oliveira Silva, Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.

Pedro Henrique Dias Batista, Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil

Liliane da Cruz Pinheiro, Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.

Pabrcio Marcos Oliveira Lopes, Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil

Geber Barbosa Albuquerque Moura Departamento de Agronomia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, Brasil

Artigo recebido em 19/04/2019 e aceito em 29/01/2020

RESUMO

O sensoriamento remoto pode ser utilizado no monitoramento ambiental de parâmetros biofísicos micrometeorológicos nas regiões semiáridas do Brasil. Objetivou-se monitorar o risco da degradação ambiental através da detecção de mudanças da superfície no semiárido por sensoriamento remoto. A pesquisa foi desenvolvida através do processamento digital de imagens de satélite para Serra Talhada, Pernambuco. Foram coletados dados de superfície para subsidiar o algoritmo do balanço de energia da superfície terrestre (SEBAL) na estimativa do albedo e temperatura da superfície e o índice de vegetação ajustado as condições do solo (SAVI). Além disso, se desenvolveu mapas temáticos do grau do risco de degradação. Os mapas da degradação foram submetidos a avaliação estatística de qualidade temática, por matriz de confusão. O SAVI apresentou-se sensível à chuva, tendo na estação chuvosa os maiores valores e na estação seca os menores, período que o albedo e a temperatura apresentaram valores elevados, indicando vulnerabilidade à degradação das áreas com pouca vegetação e solo exposto. Os mapas do risco de degradação destacaram características semelhantes aos padrões de respostas do SAVI, albedo e temperatura. O monitoramento espaço-temporal dos parâmetros biofísicos e do risco de degradação permitirá o planejamento e gestão dos recursos hídricos e naturais da região semiárida.

Palavras-chave: Agrometeorologia, Caatinga, Degradação Ambiental, Desmatamento, Impactos Ambientais.

Spatial-Temporal Monitoring Detection of Changes in Caatinga Vegetation by Remote Sensing in the Brazilian Semiarid

ABSTRACT

Remote sensing can be used for environmental monitoring of micrometeorological biophysical parameters in the semiarid regions of Brazil. The present investigation aimed to monitor the risk of environmental degradation by detecting surface changes in the semiarid by means of remote sensing. The research was developed through digital processing of satellite images for Serra Talhada, Pernambuco, Brazil. Surface data were collected to support the Surface Energy Balance algorithm (SEBAL) to estimate the albedo and the surface temperatures as well as the soil condition adjusted to the vegetation index (SAVI). Furthermore, thematic maps were developed for the levels of risk of degradation and statistical evaluation was performed on the thematic quality by means of confounding matrix. The SAVI was sensitive to precipitation, displaying the highest values for the rainy season and the lowest for the dry season, for which the albedo and the surface temperature presented higher values, thus indicating vulnerability to degradation in areas of scarce vegetation and exposed soil. The risk of degradation

maps highlighted characteristics similar to SAVI response patterns, albedo and surface temperature. The spatiotemporal monitoring of biophysical parameters and the risk of degradation will enable both the planning and the management of water and natural resources in the semiarid region.

Keywords: Agrometeorology, Caatinga, Environmental Degradation, Deforestation; Environmental Impacts.

Introdução

A região Nordeste do Brasil, especialmente o semiárido brasileiro, tem enfrentado sérias problemáticas ao longo dos anos, em destaque a escassez de água, cada vez mais presente em decorrência aos longos períodos de estiagem e seca. As alterações causadas nos cenários da vegetação natural dessas regiões estão atreladas a vários fatores, predominando também as ações antrópicas, que atuam com impactos ambientais constantes em suas atividades como, o desmatamento e queimadas, manejo inadequado da água de irrigação, a intensiva prática agropecuária, entre outros que favorecem o agravamento da degradação ambiental, ampliando as áreas de solo exposto e a consequente desertificação no semiárido (Hastenrath, 2011; Palácio et al., 2013; Rodriguez et al., 2015; Ribeiro et al., 2016; Mariano et al., 2018).

Deste modo, aumentam-se a pressão e preocupação quanto aos recursos hídricos e naturais das regiões semiáridas, que também nas últimas décadas adotam políticas públicas modernas de forma descentralizada e participativa, onde estudos da distribuição espaço-temporal dos diferentes componentes do ciclo hidrológico também são necessários, relacionados a meteorologia, hidrologia e mudança climática global, favorecendo o planejamento para uma gestão eficiente na tomadas de decisão em prol do acesso a água e desenvolvimento da agricultura de forma sustentável (Tang et al., 2013; Gutiérrez et al., 2014; Mariano et al., 2018; Silva et al., 2019).

No ambiente semiárido a análise da cobertura vegetal é considerada complexa devido à variabilidade interanual da precipitação, onde as mudanças ambientais detectadas na superfície podem ser resultado de uma alteração da precipitação, não tendo relação direta com os efeitos da ocupação antrópica nas áreas (Maia et al., 2018). As alterações do uso e ocupação da terra podem ser identificadas com o aumento do albedo e da temperatura da superfície, bem como através da redução de índices de vegetação, por meio de observações de sensoriamento remoto orbital (Tartari et al., 2015; Silva et al., 2019).

O estudo das mudanças de cobertura do solo torna-se viável quando avaliado em grandes áreas, assim, o sensoriamento remoto é uma ferramenta que através de um conjunto de técnicas junto a algoritmos permitem esse tipo de avaliação, além de um monitoramento espaço-temporal de áreas heterogêneas com alta precisão, avaliando principalmente a biomassa vegetal e o padrão de paisagem, assim como, as condições micrometeorológicas através de indicadores para detecção de mudanças na superfície. Existem diferentes aplicações disponíveis que permitem realizar previsões meteorológicas, mudanças climáticas e planejamento agroecológico, todos estes fatores essenciais para avaliar e monitorar o risco de degradação ambiental ao longo do tempo nas regiões semiáridas do Brasil (Xu et al., 2009; Bastiaanssen et al., 2010; Bezerra et al., 2014; Teixeira et al., 2014; Vorovencii, 2015; Zheng et al., 2016; Silva et al., 2019).

Diante desse contexto, objetivou-se monitorar e avaliar o risco de degradação ambiental nos distintos usos e ocupação da terra através da detecção de mudanças por meio de análise e modelagem espaço-temporal de parâmetros biofísicos micrometeorológicos à superfície, utilizando dados de sensoriamento remoto e uso de imagens de satélite Landsat-8 no período de 2015 a 2017 em região semiárida no Nordeste do Brasil.

Material e Métodos

Selecionou-se para o presente estudo o município de Serra Talhada, Pernambuco, localizado entre os paralelos de 07° 47' 40,42'' S (UTM: 9138406 m) e 08° 30' 42,20'' S (UTM: 9058941 m), e entre os meridianos de 37° 50' 54,41'' W (UTM: 626745 m) e 38° 45' 36,26'' W (UTM: 526453 m), altitude de 444 m, a oeste do meridiano de Greenwich, mais especificamente na mesorregião do Sertão Pernambucano e na microrregião do Sertão do Pajeú, semiárido brasileiro. Conforme a classificação climática de Köppen, o clima da região é classificado como sendo do tipo BSw'h' – semiárido, quente e seco, com precipitação média total anual de 653 mm (série histórica de dados climatológicos de 32 anos,

entre 1986-2017) (ANA, 2019), distribuídos entre os meses de inverno e déficit nos meses de verão. Possui, ainda, uma temperatura média anual variando entre 22 e 26 °C (Alvares et al., 2013).

A vegetação predominante da região é basicamente composta por Caatinga Hiperxerófila com trechos de Floresta Caducifólia (Beltrão et al.,

2005). A Figura 1 apresenta a área de estudo através de imagem de satélite Landsat-8 de sensor OLI (*Operational Land Imager*), no Sistema de Projeção Cartográfica *Universal Transversa de Mercator* (UTM), DATUM: WGS84, zona 24 M. Destaca-se no mapa as estações do INMET e ANA, responsáveis pelos dados meteorológicos de superfície.

Figura 1. Mapa espacial de localização do município de Serra Talhada, Pernambuco, Brasil. Imagem de satélite Landsat-8 OLI no dia 15/05/2016, composição falsa cor infravermelho (bandas 5, 4, 3).

Foram utilizados dados meteorológicos de superfície, adquiridos na plataforma do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizada na própria área de estudo nas seguintes coordenadas de 07° 57' 15,38'' S (UTM: 9120691 m) e 38° 17'

42,29'' W (UTM: 577692 m) e altitude de 499 m, sendo apresentando a data e horário de passagem do satélite, os dados da temperatura do ar (T_{ar} , °C), umidade relativa do ar (UR, %) e pressão atmosférica do ar (P_o , kPa), conforme destacados na Tabela 1.

Tabela 1. Dados meteorológicos de superfície registrados pela estação do INMET no instante da passagem do satélite Landsat-8.

Data	Hora de passagem	T_{ar} (°C)	UR (%)	P_o (kPa)
27/04/2015	09h40min	27,8	54,0	95,91
21/11/2015	09h41min	31,0	29,0	95,67
15/05/2016	09h40min	27,7	52,0	95,87
23/11/2016	09h41min	30,5	33,0	95,63
26/11/2017	09h41min	28,7	32,0	95,85

Através dos dados de chuva coletados para o período de 1986 a 2017, aplicou-se a técnica dos Quantis para escala temporal anual proposta por Pinkayan (1966) e introduzida no Brasil conforme Xavier e Xavier (1999). A finalidade foi classificar as precipitações anuais em classes (muito seco, seco, normal, chuvoso e muito chuvoso), com as respectivas ordens quantílicas, probabilidades = 0,15; 0,35; 0,50; 0,65 e 0,85 (Lins et al., 2017). Sendo que, os anos de 2015, 2016 e 2017, anos referentes aos das imagens escolhidas, configuraram-se como

climaticamente secos. Os dados de chuva foram registrados pela estação meteorológica de código: 00838031, pertencente a Agência Nacional das Águas (ANA, 2019) localizada na própria área de estudo nas seguintes coordenadas de 08° 0' 2,16" S (UTM: 9115559 m) e 38° 14' 40,92" W (UTM: 583236 m), altitude de 435 m, município de Serra Talhada, Pernambuco. A Tabela 2 mostra os totais mensais da precipitação pluviométrica para os anos de estudo.

Tabela 2. Totais mensais de precipitação pluviométrica para os anos estudados na região semiárida.

Mês	Precipitação pluviométrica (mm)		
	2015 (Ano seco)	2016 (Ano seco)	2017 (Ano seco)
Janeiro	24,8	196,0	4,0
Fevereiro	77,9	22,8	110,8
Março	130,0	170,8	107,4
Abril	75,0	6,4	186,0
Maio	64,3	33,8	36,0
Junho	23,2	10,2	69,3
Julho	56,5	0,0	22,4
Agosto	3,8	0,0	2,0
Setembro	0,0	7,5	2,0
Outubro	0,0	0,0	1,3
Novembro	0,0	0,0	2,6
Dezembro	33,0	25,6	30,5
Total (mm)	488,5	473,1	574,3

Para o desenvolvimento do presente estudo, foram utilizadas cinco imagens orbitais do satélite Landsat-8, que possui sensores *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). As datas de imageamento foram 27/04/2015; 21/11/2015; 15/05/2016; 23/11/2016 e 26/11/2017. As imagens foram adquiridas através da base de dados espaciais americana da NASA/USGS (*National Aeronautics and Space Administration/United States Geological Survey*).

O processamento digital foi realizado através do *Software* ERDAS IMAGINE® 9.1, utilizado principalmente em processos como, empilhamento de bandas multiespectrais e o georreferenciamento perante o Sistema de Projeção Cartográfica UTM (*Universal Transversa Mercator*) DATUM: WGS84, zona 24 M, na qual encontra-se a área de estudo.

A partir da aplicação de operações matemáticas por meio da introdução do *Surface Energy Balance Algorithms for Land* (SEBAL) no *Software* ERDAS, realizou-se a conversão dos níveis de cinza das imagens para radiância espectral e refletância monocromática. Nesses processos foram utilizados coeficientes radiométricas de calibração

fornecidos pela NASA/USGS. Equações específicas do SEBAL foram utilizadas para estimativa dos parâmetros biofísicos (Albedo e temperatura da superfície e o índice de vegetação SAVI), conforme Bastiaanssen et al. (1998), Allen et al. (2002) e Silva et al. (2016).

Para a determinação da radiância espectral nas imagens do satélite Landsat-8 de sensor OLI, utilizou-se a Equação 1 (Chander e Markham, 2003; Silva et al., 2016).

$$L_b = \text{Add}_{\text{rad}} + \text{Mult}_{\text{rad}} \times \text{ND}_b \quad (1)$$

em que, L_b ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$) é a radiância espectral em cada banda do sensor OLI, com base nos termos aditivo (Add_{rad}) e multiplicativo (Mult_{rad}) relativos à radiância; ND_b é a intensidade de cada pixel em cada banda (b, subscrito).

A refletância monocromática foi determinada através da Equação 2 (Chander e Markham, 2003; Silva et al., 2016).

$$r_b = \frac{(\text{Add}_{\text{ref}} + \text{Mult}_{\text{ref}} \times \text{ND}_b)}{\cos \theta \times d_r} \quad (2)$$

em que, r_b ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$) é a refletância monocromática em cada banda do sensor OLI, também com base nos termos aditivo (Add_{ref}) e multiplicativo (Mult_{ref}), neste caso são relativos à refletância; $\cos \theta$ é o cosseno do ângulo zenital solar, obtido a partir do ângulo de elevação do Sol (E , graus). O d_r é o quadrado da razão entre as distâncias média e instantânea entre a Terra e o Sol em dado dia do ano imageado, determinado conforme a Equação 3 (Iqbal, 1983).

$$d_r = 1 + 0,033 \times \cos\left(\frac{\text{DSA} \times 2 \times \pi}{365}\right) \quad (3)$$

em que, DSA é o dia sequencial do ano, o argumento da função $\cos$ está em radianos.

Foram determinados os pesos (p_b) (Equação 5) das bandas refletivas, por meio da irradiância solar espectral (k_b , $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) (Equação 4) de cada banda do Landsat-8 (Chander e Markham, 2003; Silva et al., 2016).

$$k_b = \frac{\pi \times L_b}{r_b \times \cos \theta \times d_r} \quad (4)$$

$$p_b = \frac{k_b}{\sum k_b} \quad (5)$$

Para estimativa do albedo no topo da atmosfera (albedo planetário), empregou-se os valores dos respectivos pesos encontrados para cada banda conforme a Equação 6 (Silva et al., 2016).

$$\alpha_{\text{toa}} = p_2 \times r_2 + p_3 \times r_3 + p_4 \times r_4 + p_5 \times r_5 + p_6 \times r_6 + p_7 \times r_7 \quad (6)$$

em que, α_{toa} é o albedo planetário; p_2 , p_3 , p_4 , p_5 , p_6 e p_7 são os respectivos pesos de cada uma das bandas do satélite de sensor OLI; r_2 , r_3 , r_4 , r_5 , r_6 e r_7 são as respectivas refletâncias do OLI.

Uma das principais estimativas para análise foi o albedo da superfície corrigido para os efeitos atmosféricos, determinado conforme Equação 7 (Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2002; Bezerra et al., 2014; Silva et al., 2016).

$$\alpha_{\text{sup}} = \frac{\alpha_{\text{toa}} - \alpha_{\text{atm}}}{\tau_{\text{sw}}^2} \quad (7)$$

em que, α_{sup} é o albedo da superfície corrigido; α_{atm} é a refletância da própria atmosfera (Allen et al., 2002) e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica no domínio da radiação solar (Allen et al., 2007; Bezerra et al., 2014; Silva et al., 2016), obtida conforme modelo da Equação 8.

$$\tau_{\text{sw}} = 0,35 + 0,627 \times \exp\left[\frac{-0,00146 \times P_o}{K_t \times \cos \theta} - 0,075 \left(\frac{W}{\cos \theta}\right)^{0,4}\right] \quad (8)$$

em que, P_o (kPa) é a pressão atmosférica instantânea; K_t é o coeficiente de turbidez da atmosfera ($K_t = 1,0$, céu claro) conforme Allen et al. (2002) e Silva et al. (2016); W (mm) é a água precipitável, determinada conforme Equação 9 (Garrison e Adler, 1990).

$$W = 0,14 \times e_a \times P_o + 2,1 \quad (9)$$

em que, e_a (kPa) é a pressão real de vapor d'água atmosférico, determinada conforme a Equação 10.

$$e_a = \frac{\text{UR} \times e_s}{100} \quad (10)$$

em que, UR (%) é a umidade relativa do ar instantânea; e_s (kPa) é a pressão de saturação do vapor d'água, determinada conforme a Equação 11.

$$e_s = 0,6108 \times \exp\left(\frac{17,27 \times T_{\text{ar}}}{237,3 + T_{\text{ar}}}\right) \quad (11)$$

em que, T_{ar} ($^{\circ}\text{C}$) é a temperatura do ar instantânea.

Em seguida, foi determinado o índice de vegetação ajustado as condições do solo (*Soil Adjusted Vegetation Index* – SAVI). O SAVI busca amenizar os efeitos antecedentes do solo a partir do fator de ajuste, que é dependente do tipo de solo da determinada área de estudo (Huete, 1988; Ribeiro et al., 2016). A sua determinação foi conforme Equação 12 (Allen et al., 2002).

$$\text{SAVI} = \frac{(1 + L) \times (r_{b \text{ IV}} - r_{b \text{ V}})}{(L + r_{b \text{ IV}} + r_{b \text{ V}})} \quad (12)$$

em que, $r_{b \text{ IV}}$ e $r_{b \text{ V}}$ correspondem as bandas 5 e 4 do Landsat-8 OLI; L é o fator de ajuste ao solo, variando entre 0 e 1 de acordo com a densidade da cobertura

vegetal da localidade de estudo. O valor 1 é utilizado para áreas com pouca vegetação; 0,5 indica cobertura vegetal intermediária; 0,25 são para coberturas muito densas (Huete, 1988; Allen et al., 2007). Nesta pesquisa foi adotado o valor do fator de ajuste de 0,5, tendo em vista, minimizar erros devido a área de estudo estar localizada no semiárido brasileiro e por possuir vegetação de Caatinga (Silva e Galvêncio, 2012).

Também foi determinado a temperatura da superfície (T_s), utilizando a radiância da banda termal (L_b), sendo a banda 10 do sensor TIRS do satélite Landsat-8, e a emissividade no domínio da banda termal (ϵ_{NB}) obtida de acordo com a Equação 13. Os mapas de temperatura foram obtidos em Kelvin (K), sendo realizada a conversão para graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$), Equação 14 (Allen et al., 2002).

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 \times \text{IAF} \quad (13)$$

em que, IAF é o índice de área foliar, que foi obtido através do índice de vegetação SAVI.

$$T_s = \frac{K_2}{\left(\frac{\epsilon_{NB} \times K_1}{L_b} + 1\right)} \quad (14)$$

em que, K_1 e K_2 são constantes de calibração da banda termal do satélite Landsat-8 de sensor TIRS fornecidas pela NASA/USGS, no valor de 774,89 $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ e 1321,08 K, respectivamente.

Avaliou-se também, além dos parâmetros biofísicos micrometeorológicos, o risco de degradação ambiental através de técnicas da intensidade de mudanças no espaço e no tempo da cobertura vegetal de Caatinga nos diferentes usos do solo da região semiárida.

Com isso, realizou-se uma classificação temática através do índice de vegetação SAVI, por meio da interpretação de uma matriz de confusão, para avaliar diferentes graus do risco de degradação na área de estudo.

Contudo, os mapas temáticos do risco de degradação ambiental foram baseados na heterogeneidade da região semiárida, gerando os

seguintes graus do risco de degradação: severa, alta, moderada e baixa.

Para observação das principais diferenças dos parâmetros biofísicos micrometeorológicos diante do clima local da região e também das ações antrópicas, os resultados foram analisados segundo estatística descritiva, com medidas de tendência central (média) e dispersão (mínimo e máximo, desvio padrão - DP e coeficiente de variação - CV). Foi analisado ainda, a variabilidade dos mapas temáticos, diante dos valores do CV, conforme os critérios de Warrick e Nielsen (1980): $\text{CV} < 12\%$ (baixa variabilidade); $12\% < \text{CV} < 60\%$ (média variabilidade) e $\text{CV} > 60\%$ (alta variabilidade).

Os mapas do risco de degradação ambiental da região foram avaliados estatisticamente por matriz de confusão, pelas medidas da avaliação de precisão e coeficiente Kappa (qualidade dos mapas temáticos, Landis e Koch, 1977) através da amostragem de vários pontos (pixels aleatórios) em cada imagem para os diferentes graus do risco de degradação ambiental na região semiárida (Xu et al., 2009; Vorovencii, 2015; Silva et al., 2019).

Resultados e Discussão

Os parâmetros biofísicos micrometeorológicos da superfície terrestre através das análises estatísticas promoveram padrões de respostas da dinâmica espaço-temporal dos diferentes usos do solo, permitindo avaliar e monitorar principalmente as principais mudanças da cobertura vegetal de Caatinga ao longo do tempo. Assim como, promoveu eficientemente mapas temáticos do risco de degradação ambiental em diferentes graus (degradação severa, alta, moderada e baixa), possibilitando a gestão no controle de ações e tomadas de decisões perante a região semiárida de Serra Talhada-PE.

Na Figura 2 está ilustrado a distribuição espaço-temporal do albedo da superfície (α_{sup}) sobre os distintos usos e ocupações do solo (destacando as áreas de Caatinga, urbana, irrigada e solo exposto) da região de Serra Talhada-PE. Os mapas temáticos do albedo variaram entre os valores de 0,01 e 0,47.

Legenda:

Albedo da superfície

Figura 2. Distribuição espaço-temporal do albedo da superfície para Serra Talhada-PE, entre os anos de 2015 e 2017.

Foram encontrados os menores valores do α_{sup} sobre corpos d'água e áreas irrigadas com presença da umidade, variando entre 0,01 e 0,16 (Figura 2). Giongo e Vettorazzi (2014) analisando parâmetros biofísicos também em região semiárida encontraram sobre superfícies de água valores do albedo superior a este estudo, entre 0,05 e 0,18 e nas áreas irrigadas variando de 0,15 a 0,22.

Rodrigues et al. (2009) também estudaram em região semiárida e destacaram que se tratando de valores inferiores a 0,04 são indicativos de condições de águas limpas, observados no período seco do ano, época responsável por apresentar pouca carga de sedimentos em suspensão, ao contrário do período chuvoso, tal qual observaram incremento nos valores, variando de 0,05 e 0,11, muito provavelmente pela acumulação de impurezas carregadas pelas chuvas.

Os elevados valores do α_{sup} foram encontrados na área urbana da região ($\alpha_{\text{sup}} = 0,23$ a 0,32), e principalmente sobre áreas com pouca e/ou nenhuma cobertura vegetal de Caatinga, como em áreas de solo exposto ($\alpha_{\text{sup}} = 0,33$ a 0,47) (Figura 2).

Tabela 3. Parâmetros estatísticos do albedo da superfície para Serra Talhada-PE.

Cunha et al. (2012) destacaram que o albedo é importante em estudos ambientais por apresentar forte correlação com a cobertura do solo. Silva et al. (2016) também encontraram sobre região semiárida, albedo elevado na área urbana, de 0,28 a 0,31.

A partir do monitoramento espaço-temporal da região semiárida por meio de mapas temáticos, pode-se destacar comportamento semelhante para alguns mapas como, por exemplo, os mapas dos dias 27/05/2015 (Figura 2A) e 15/05/2016 (Figura 2C), sendo esse período correspondente à época de chuvas da região. Porém, analisando as imagens de modo geral, percebe-se para o período seco e chuvoso, dentre os anos de estudo, áreas com altos valores do albedo. Essa distribuição de valores semelhantes ao longo tempo pode referenciar áreas em processo de degradação ou mesmo já degradadas na região.

A Tabela 3 apresenta os valores estatísticos do albedo da superfície ao longo do tempo, tendo um comportamento estatístico de média variabilidade (CV entre 23,0 a 26,0%) conforme Warrick e Nielsen (1980).

Data	Albedo da superfície (α_{sup})				
	Mínimo	Máximo	Média	DP	CV (%)
27/04/2015	0,02	0,34	0,16	0,04	25,0
21/11/2015	0,03	0,47	0,20	0,05	25,0
15/05/2016	0,01	0,35	0,17	0,04	23,0
23/11/2016	0,02	0,46	0,19	0,05	26,0
26/11/2017	0,02	0,46	0,19	0,05	26,0

O α_{sup} apresentou valores mínimos similares ao longo do tempo, sendo os valores máximos e médios semelhantes conforme a época do ano, ou seja, no período considerado chuvoso para a região, que é de novembro a abril, podendo estender-se ao meio do ano. No período considerado chuvoso, as imagens dos dias 27/04/2015 e 15/05/2016 obtiveram valores máximos do α_{sup} entre 0,34 e 0,35 e médios entre 0,16 e 0,17, respectivamente (Tabela 3). Tanto os respectivos meses das imagens quanto os anteriores ao imageamento tiveram eventos de chuva elevados (Tabela 2), favorecendo a rápida resposta do ambiente natural de Caatinga.

Entretanto, no período seco da região, as imagens dos dias 21/11/2015, 23/11/2016 e 26/11/2017 destacaram α_{sup} máximo entre 0,46 e 0,47 e médio entre 0,19 e 0,20, respectivamente (Tabela 3). Vale ressaltar que os meses das imagens, assim

como, os meses anteriores não apresentaram índices de chuvas influentes (Tabela 2), deste modo, não obtiveram resiliência em sua cobertura vegetal, favorecendo ao incremento nos valores do albedo. Também vale frisar, ainda, que os diferentes usos do solo, como a agricultura e desmatamento nas regiões semiáridas favorecem ao aumento de áreas de solo exposto e, principalmente, o crescimento de áreas degradadas e desertificadas, assim, elevando diretamente o albedo da superfície.

Na Figura 3 ilustra-se a distribuição espaço-temporal do índice de vegetação SAVI para a região de Serra Talhada-PE, entre o período de 2015 e 2017. Os mapas temáticos do índice SAVI que variou de -0,51 a 0,81, apresentando ao longo do tempo o comportamento e as condições da cobertura vegetal de Caatinga e demais usos do solo da região semiárida.

Legenda:**Índice de Vegetação - SAVI**

Figura 3. Distribuição espaço-temporal do índice de vegetação SAVI para Serra Talhada-PE, entre os anos de 2015 e 2017.

Os menores valores do SAVI foram encontrados sobre superfícies de água ($\text{SAVI} < 0$). Valores positivos, principalmente próximos a zero, localizaram-se sobre áreas de solo exposto e/ou com pouca vegetação de Caatinga, ou mesmo na área urbana da região. Comumente, percebe-se que as regiões próximas aos cursos d'água apresentam altos valores do SAVI, ou seja, elevação do vigor das plantas na região, devido a umidade e manutenção hídrica. Deste modo, os maiores valores do SAVI foram observados em áreas de superfície irrigada, áreas em plena atividade agrícola, e mais efetivamente sobre a Caatinga densa (Figura 3). Comportamento similar foi observado por Silva et al. (2019), em estudo realizado também no semiárido brasileiro, analisando índices de vegetação, especificamente o SAVI. Os autores observaram variação dos valores do SAVI entre -0,71 e 0,86.

As imagens dos mapas temáticos dos dias 27/04/2015 (Figura 3A) e 15/05/2016 (Figura 3C) destacaram-se por possuir alto vigor da cobertura vegetal (aumento da refletância verde), período do ano considerado como chuvoso para a região. Nas regiões norte, noroeste e nordeste dos mapas

temáticos estão situados os maiores valores do SAVI (Figura 3).

No entanto, os mapas dos dias 21/11/2015 (Figura 3B), 23/11/2016 (Figura 3D) e 26/11/2017 (Figura 3E) reportaram-se mudanças gradativas em sua dinâmica e distribuição da cobertura vegetal (diminuição da refletância verde). As regiões sul e sudeste apresentaram baixos resultados do SAVI, com comportamento semelhante para ambas as imagens, tal qual são do período seco, tais respostas podem pontualizar áreas degradadas ao longo do tempo. Essas respostas também foram observadas por Galvêncio et al. (2016), ao estudarem as alterações de cobertura do solo para o município de Belo Jardim-PE, os autores observaram a redução do vigor das plantas e aumento da superfície exposta entre o período chuvoso e seco.

A distribuição apresentada na análise espaço-temporal do SAVI (Figura 3), além dos diferentes usos do solo pelas atividades antrópicas, também se dá perante as variações bioclimáticas sazonais (Tabela 2). As regiões semiáridas, em períodos de seca possuem mecanismo de defesa marcante, como a queda das folhas da vegetação

natural de Caatinga, devido ao déficit hídrico acentuado, favorecendo a elevação de parâmetros como albedo da superfície através da exposição de áreas de solo exposto, e a diminuição do índice de vegetação, conforme foram observadas nas análises do albedo e SAVI do presente estudo (Bezerra et al., 2014; Silva et al., 2019). Nesse contexto, Bezerra et al. (2014), estudando também índices biofísicos,

afirmam que as atividades antrópicas junto aos longos períodos de seca, aceleram o processo de degradação e desertificação nas regiões semiáridas.

A Tabela 4 mostra os valores estatísticos do SAVI diante da análise espaço-temporal, com CV variando de 19,0 a 27,0%, com variabilidade média (Warrick e Nielsen, 1980).

Tabela 4. Parâmetros estatísticos do índice de vegetação SAVI para Serra Talhada-PE.

Data	Índice de vegetação – SAVI				
	Mínimo	Máximo	Média	DP	CV (%)
27/04/2015	-0,44	0,83	0,49	0,12	24,0
21/11/2015	-0,33	0,81	0,21	0,04	19,0
15/05/2016	-0,51	0,83	0,41	0,11	27,0
23/11/2016	-0,39	0,80	0,21	0,04	19,0
26/11/2017	-0,36	0,83	0,22	0,05	23,0

O SAVI confirmou diante dos resultados estatísticos o período chuvoso e seco da região, em conformidade com as respostas do próprio albedo. Os mapas temáticos dos dias 27/04/2015 e 15/05/2016 apresentaram valores médios do SAVI de 0,49 e 0,41, respectivamente (Tabela 4). Os eventos de chuva antecedentes ao imageamento (Tabela 2) favoreceram a resiliência da vegetação de Caatinga (Arraes et al., 2012), sendo notório os rápidos efeitos das condições hídricas e climáticas sobre as atividades de fotossíntese e solo exposto (Silva et al., 2019).

Os mapas dos dias 21/11/2015, 23/11/2016 e 26/11/2017 obtiveram valores médios do SAVI

similares, entre 0,21 e 0,22, respectivamente (Tabela 4). São condições de baixo índice de vegetação, que mesmo estando no período seco da região, merece atenção para a possível existência de problemas como o processo de degradação ambiental. Visto que, os próprios efeitos severos da seca e ações vigentes do uso do solo neste período, intensificam ainda mais as áreas degradadas levando a desertificação, conforme também foi destacado por Silva et al. (2019).

A Figura 4 apresenta a distribuição espaço-temporal da temperatura da superfície para a região de Serra Talhada-PE, entre o período de 2015 e 2017, com valores variando de 14,83 a 51,90 °C.

Legenda:**Temperatura da superfície (°C)**

Figura 4. Distribuição espaço-temporal da temperatura da superfície para Serra Talhada-PE, entre os anos de 2015 e 2017.

As áreas de solo exposto, com pouca cobertura vegetal e área urbana, além dos baixos índices de chuvas e períodos de seca severos favoreceram ao aumento da temperatura da superfície. Devido à ausência de vegetação, os valores elevaram-se de 43,97 a 51,90 °C (pixels vermelhos), diversas áreas nos mapas temáticos apresentam-se com padrões de comportamento similares, áreas que merecem preocupação constante e monitoramento adequado, principalmente nas épocas secas quando os processos de degradação e desertificação se intensificam no semiárido brasileiro, sendo à agricultura irrigada nessas épocas

potencializadoras da degradação, pela intensidade dos manejos e alto consumo hídrico. Lins et al. (2017), avaliando parâmetros biofísicos no semiárido brasileiro, ressaltaram que ao passar de regiões com cobertura vegetal em abundância para áreas de solo exposto, a temperatura da superfície tem grande elevação de até 3,34 °C.

A Tabela 5 destaca os valores dos parâmetros estatísticos da temperatura a partir da análise espaço-temporal, com CV variando entre 7,0 e 8,0%, apresentando um comportamento de baixa variabilidade (Warrick e Nielsen, 1980).

Tabela 5. Parâmetros estatísticos da temperatura da superfície para Serra Talhada-PE.

Data	Temperatura da superfície (T _s , °C)				
	Mínimo	Máximo	Média	DP	CV (%)
27/04/2015	19,82	38,96	29,58	2,17	7,0
21/11/2015	26,73	51,90	41,26	3,06	7,0
15/05/2016	17,88	37,30	30,21	2,55	8,0
23/11/2016	27,12	50,97	40,06	2,75	7,0
26/11/2017	14,83	44,94	37,25	2,65	7,0

A análise estatística da temperatura da superfície obteve padrões de respostas nos diferentes usos do solo similares aos padrões de comportamento do albedo. Assim como no albedo, os dias 27/04/2015 (29,58 °C) e 15/05/2016 (30,21 °C) apresentaram as menores médias de temperatura no período chuvoso, quando teve maior disponibilidade hídrica e cobertura vegetal ativa e abundante, sendo as maiores T_s nos dias 21/11/2015 (41,26 °C), 23/11/2016 (40,06 °C) e 26/11/2017 (37,25 °C), justamente no período seco da área de estudo (Tabela 5).

O aumento da T_s é justificado pelas mudanças da cobertura vegetal ao longo do tempo, ou seja, pelos longos períodos de seca, que favorece um déficit hídrico acentuado e consequentemente aumenta a temperatura do solo; expansão da área urbana; desmatamento das florestas de Caatinga;

fragmentação de área irrigadas, criando assim ilhas de calor na região.

No que trata sobre ilhas de calor, Buyantuyev e Wu (2009) destacaram esse um fenômeno resultante das transformações da cobertura do solo, principalmente pela substituição da vegetação natural e terras agrícolas por superfícies impermeáveis (concreto, asfalto e telhados) associados com usos do solo urbano, no qual alteram o balanço de energia da superfície terrestre, reduzindo a evapotranspiração e aumentando a absorção da energia solar na superfície.

A Figura 5 está ilustrado através de mapas temáticos o monitoramento espaço-temporal do risco de degradação ambiental em diferentes graus através da intensidade de mudanças para a região de Serra Talhada-PE, entre o período de 2015 e 2017. Os mapas apresentam classes do risco de degradação severa, alta, moderada e baixa.

Figura 5. Distribuição espaço-temporal dos diferentes graus do risco de degradação ambiental para Serra Talhada-PE, entre os anos de 2015 e 2017.

O mapa do risco de degradação do dia 27/04/2015 (Figura 5A), época considerada chuvosa, destaca susceptibilidade para uma degradação severa na região sudeste, sendo que ao longo do tempo, como por exemplo, o dia 26/11/2017 (Figura 5E)

apresentou predominância do risco de degradação alta ou moderada, mesmo apesar do efeito da estação seca, o que pode ser explicado pela implantação de áreas com atividades agrícolas, tal qual vem crescendo na região.

Algumas regiões apresentaram padrões de comportamento similares em todas as imagens intermediado pelos graus do risco de degradação severa e alta, principalmente nas regiões norte, sul e sudeste da área de estudo ao longo do tempo (Figura 5). Essas áreas apresentaram baixo índice de vegetação e elevados valores do albedo e temperatura da superfície, independente da ocorrência de precipitação, assim, indicando que a seca afetou diretamente o ambiente natural de Caatinga. Além disso, Silva et al. (2019) ressaltaram nesse contexto, também, que as atividades antrópicas indisciplinares e intensificadas contribuem para o aumento das áreas de solo exposto das regiões semiáridas, quando geralmente ocorre a prática do desmatamento e

queimadas da cobertura vegetal principalmente para fins agrícolas.

Diante do exposto, este monitoramento serve de alerta sobre os usos do solo da região, visto que, indicam áreas com graus avançados e susceptível a degradação, o que favorece a intensidade de mudanças na superfície terrestre e consequente degradação do ambiente, principalmente na estação seca da região semiárida.

A Tabela 6 apresenta os resultados estatísticos quanto à avaliação de precisão e qualidade dos mapas temáticos do risco de degradação ambiental do município de Serra Talhada-PE.

Tabela 6. Avaliação estatística de precisão por matriz de confusão dos mapas temáticos do risco de degradação ambiental para Serra Talhada-PE.

Data	Índices de avaliação de precisão e qualidade temática dos mapas	
	Precisão geral (%)	Coefficiente Kappa
27/04/2015	98,07	0,97
21/11/2015	93,39	0,86
15/05/2016	99,55	0,99
23/11/2016	99,48	0,99
26/11/2017	97,83	0,96

Os valores estatísticos de precisão e qualidade da avaliação dos mapas temáticos do risco de degradação, classificação geral dos diferentes graus, variaram para precisão entre 93,39 e 99,55%, e entre 0,86 e 0,99 para o coeficiente Kappa (Tabela 6), assim, apresentando-os qualidades temáticas com nível de excelência, avaliado segundo os critérios de classificação de Landis e Koch (1977).

Diversos estudos também apresentaram boas qualidades temáticas na maioria dos mapas, Xu et al. (2009) verificaram precisão entre 90 e 92,60%, e coeficiente Kappa entre 0,87 e 0,90. Vorovencii (2015) observou precisão variando de 85,21 a 90,42%, resultados semelhantes as faixas de valores encontrados no presente estudo. Silva et al. (2019), que também estudaram a degradação ambiental em uma região semiárida de Pernambuco, obtiveram precisão entre 92,99 e 99,96% e Kappa variando de 0,88 e 0,99.

Conclusões

Os mapas temáticos do risco de degradação ambiental destacaram alternância do padrão de

paisagem em áreas específicas, incidindo risco de degradação severa para risco alto e moderado, todavia, ademais áreas demonstraram que os riscos severo, alto e moderado permaneceram constantes ao longo do tempo em ambos os mapas, apresentando índices estatísticos de precisão e qualidade temática excelente.

Contudo, os mapas do risco de degradação apresentaram características similares aos padrões de respostas do índice de vegetação SAVI, albedo e temperatura da superfície, evidenciando a vulnerabilidade da região semiárida principalmente na estação seca.

Os parâmetros biofísicos micrometeorológicos da superfície terrestre destacaram-se como ótimos indicadores da susceptibilidade a degradação ambiental na região semiárida, identificados pela variabilidade quantitativa e o monitoramento espacial-temporal, detectando mudanças na superfície do ambiente natural de Caatinga, com ausência e/ou presença de chuvas.

O sensoriamento remoto é um forte aliado dos estudos ambientais nas regiões semiárida, principalmente as áreas que não se dispõem de dados de superfície suficientes, impossibilitando a

compreensão das diversas mudanças e vulnerabilidades de sua cobertura vegetal, tornando-se uma ferramenta de contribuição para o planejamento na tomada de decisão sobre a gestão da água e recursos naturais, minimizando os processos de degradação ambiental e desertificação em regiões do semiárido brasileiro.

Agradecimentos

À Universidade Federal Rural de Pernambuco; Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola; O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e Agência Nacional de Águas (ANA) pelo fornecimento dos dados meteorológicos de superfície e a NASA/USGS pelo fornecimento das imagens orbitais de satélite.

Referências

Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., 2007. Satellite-Based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 133, 380-394.

Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R., Bastiaanssen, W.G.M., 2002. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). *Advance Training and Users Manual–Idaho Implementation*. 97p.

Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., Moraes, G., Leonardo, J., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22, 711-728.

ANA. 2019. Agência Nacional das Águas. Portal HidroWeb: Acervo de dados hidrológicos. Séries Históricas de Estações (1986-2017). http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf. 27 Fev. 2019.

Arraes, F.D.D., Andrade, E.M., Silva, B.B., 2012. Dinâmica do balanço de energia sobre o açude Orós e suas adjacências. *Revista Caatinga* 25, 119-127.

Bastiaanssen, W., Thoreson, B., Clark, B., Davids, G., 2010. Discussion of "Application of SEBAL

Model for Mapping Evapotranspiration and Estimating Surface Energy Fluxes in South-Central Nebraska" by Ramesh K. Singh, Ayse Irmak, Suat Irmak, and Derrel L. Martin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce* 136, 282-283.

Bastiaanssen, W.G.M., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J.F., Roerink, G.J., Van der Wal, T., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 2: Validation. *Journal of Hydrology* 212-213, 213-229.

Beltrão, B.A., Mascarenhas, J.C., Miranda, J.L.F., Souza Junior, L.C., Galvão, M.J.T.G., Pereira, S.N., 2005. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea. Diagnóstico do município de Serra Talhada, Estado de Pernambuco. CPRM/ PRODEEM, Recife. <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/16837>. 20 Jun. 2019. 12 p.

Bezerra, J.M., Moura, G.B.A., Silva, B.B., Lopes, P.M.O., Silva, E.F.F., 2014. Parâmetros biofísicos obtidos por sensoriamento remoto em região semiárida do estado do Rio Grande do Norte, Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 18, 73-84.

Buyantuyev, A., Wu, J., 2009. Urbanization alters spatiotemporal patterns of ecosystem primary production: A case study of the Phoenix metropolitan region, USA. *Journal of Arid Environments* 73, 512-520.

Chander, G., Markhan, B., 2003. Revised Landsat 5 - TM radiometric calibration procedures and post calibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing* 41, 2674-2677.

Cunha, J.E.B.L., Rufino, I.A.A., Silva, B.B., Chaves, I.B., 2012. Dinâmica da cobertura vegetal para a Bacia de São João do Rio do Peixe, PB, utilizando-se sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 16, 539-548.

Galvêncio, J.D., Pereira, J.A.D.S., França, L.M.D.A., Lins, T.M.P., 2016. Análise da variação da vegetação dos períodos secos e chuvosos através de SAVI e albedo de superfície no município de Belo Jardim-PE. *Revista Eletrônica do PRODEMA* 10, 133-146.

Garrison, J.D., Adler, G.P., 1990. Estimation of precipitable water over the United State for application to the division of solar radiation into its direct and diffuse components. *Solar Energy* 44, 225-241.

- Giongo, P.R., Vettorazzi, C.A., 2014. Albedo da superfície por meio de imagens TM-Landsat 5 e modelo numérico do terreno. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 18, 833-838.
- Gutiérrez, A.P.A., Engle, N.L., De Nys, E., Molejón, C., Martins, E.S., 2014. Drought preparedness in Brazil. *Weather and Climate Extremes* 3, 95-106.
- Hastenrath, S., 2012. Exploring the climate problems of Brazil's Nordeste: a review. *Climatic Change* 112, 243-251.
- Huete, A.R., 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25, 295-309.
- Iqbal, M., 1983. An introduction to solar radiation. London: Academic Press., 390 p.
- Landis, J.R., Koch, G.G., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *International Biometric Society* 33, 159-174.
- Lins, F.A.C., Santos Araújo, D.C., Silva, J.L.B., Lopes, P.M.O., Oliveira, J.D.A., Silva, A.T.C.S.G., 2017. Estimativa de parâmetros biofísicos e evapotranspiração real no semiárido pernambucano utilizando sensoriamento remoto. *Irriga* 1, 64-75.
- Maia, A.R.S., Lopes, F.B., Andrade, E.M., 2018. Influence of Climatic Seasonality on a Survey of Land Use and Cover in the Semi-arid Region. *Journal of Agricultural Science* 10, 311-325.
- Mariano, D.A., Santos, C.A., Wardlow, B.D., Anderson, M.C., Schiltmeyer, A.V., Tadesse, T., Svoboda, M.D., 2018. 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* 213, 129-143.
- Palácio, H.A.Q., Andrade, E.M., Santos, J.C.N., Araújo Neto, J.R., BrasiL, P.P., 2013. Energy evaluation of semi-arid watersheds under different management strategies. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 56, 1357-1363.
- Pinkayan, S., 1966. Conditional probabilities of occurrence of Wet and Dry Years Over a Large Continental Area. Colorado: State University, Boulder-Co (Hidrology Papers, 12).
- Ribeiro, E.P., Nóbrega, R.S., Mota Filho, F.O., Moreira, E.B., 2016. Estimativa dos índices de vegetação na detecção de mudanças ambientais na bacia hidrográfica do rio Pajeú. *Geosul* 31, 59-92.
- Rodrigues, J.D., Andrade, E.D., Teixeira, A.D.S., Silva, B.D., 2009. Sazonalidade de variáveis biofísicas em regiões semiáridas pelo emprego do sensoriamento remoto. *Engenharia Agrícola* 29, 452-465.
- Rodriguez, R.D.G., Singh, V.P., Pruski, F.F., Calegario, A.T., 2015. Using entropy theory to improve the definition of homogeneous regions in the semi-arid region of Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, 7, 2096-2109.
- Silva, B.B.D., Braga, A.C., Braga, C.C., Oliveira, L.M., Montenegro, S.M., Barbosa Junior, B., 2016. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 20, 3-8.
- Silva, D.A.O., Lopes, P.M.O., Moura, G.B.A., Silva, E.F.F., Silva, J.L.B., Bezerra, A.C., 2019. Evolução Espaço-Temporal do Risco de Degradação da Cobertura Vegetal de Petrolina-PE. *Revista Brasileira de Meteorologia* 34, 1-11.
- Silva, J.L.B., Moura, G.B.A., Silva, E.F.F., Lopes, P.M.O., Silva, T.T.F., Lins, F.A.C., Silva, D.A.O., Ortiz, P.F.S., 2019. Spatial-temporal dynamics of the Caatinga vegetation cover by remote sensing in municipality of the Brazilian semi-arid. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 14, 1-10.
- Silva, L.G., Galvêncio, J.D., 2012. Análise comparativa da variação nos índices NDVI e SAVI no Sítio PELD – 22, em Petrolina – PE, na primeira década do século XXI. *Revista Brasileira de Geografia Física* 5, 1446-1456.
- Tang, R., Li, Z.L., Chen, K.S., Jia, Y., Li, C., Sun, X., 2013. Spatial-scale effect on the SEBAL model for evapotranspiration estimation using remote sensing data. *Agricultural and forest meteorology* 174-175, 28-42.
- Tartari, R., Machado, N.G., Anjos, M.R.D., Cunha, J.M.D., Musis, C.R.D., Nogueira, J.D.S., Biudes, M.S., 2015. Evaluation of biophysical indices from TM Landsat 5 images in heterogeneous landscape in Southwestern Amazon. *Revista Ambiente & Água* 10, 943-953.
- Teixeira, A.H.D.C., Hernandez, F.B., Andrade, R.G., Leivas, J.F., Bolfe, E.L., 2014. Energy balance with Landsat images in irrigated central pivots with corn crop in the São Paulo State, Brazil. *Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVI* 9239, 1-10.
- Vorovencii, I., 2015. Assessing and monitoring the risk of desertification in Dobrogea, Romania, using Landsat data and decision tree classifier. *Environmental monitoring and assessment* 187:204, 1-17.

- Warrick A.W., Nielsen, D.R., 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D., ed. Applications of soil physics. New York, Academic Press., 350p.
- Xavier, T.M.B.S., Xavier, A.F.S., 1999. Caracterização de períodos secos ou excessivamente chuvosos no estado do Ceará através da técnica dos Quantis: 1964-1998. Revista Brasileira de Meteorologia 14, 63-78.
- Xu, D., Kang, X., Qiu, D., Zhuang, D., Pan, J., 2009. Quantitative Assessment of Desertification Using Landsat Data on a Regional Scale – A Case Study in the Ordos Plateau, China. Sensors 9, 1738-1753.
- Zheng, C., Wang, Q., Li, P., 2016. Coupling SEBAL with a new radiation module and MODIS products for better estimation of evapotranspiration. Hydrological Sciences Journal 61, 1535-1547.