ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

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

CO₂flux e temperatura da superfície edáfica em áreas de caatinga

Daniel da Silva Gomes¹, Sabrina Kelly dos Santos², João Henrique Constantino Sales Silva³, Teófilo de Medeiros Santos⁴, Ermerson de Vasconcelos Silva⁵, Alex da Silva Barbosa⁶

¹ MSc. em Ciências Agrárias (Agroecologia), Universidade Federal da Paraíba, s/n, CEP 58220-000, Bananeiras, Paraíba. (83) 9650-3838. danielsgea@gmail.com. ² Doutoranda em Agronomia, Universidade Federal da Paraíba, Rodovia PB 076 – km 12, s/n, CEP 58397-000, Areia, Paraíba. (83) 9869-1134. sabrinask11@gmail.com. ³ Mestrando em Ciências Agrárias (Agroecologia), Universidade Federal da Paraíba, s/n, CEP 58220-000, Bananeiras, Paraíba. (83) 9375-4490. joaohenriqueconst@gmail.com (autor correspondente). ⁴ Graduando em Agroecologia, Universidade Federal da Paraíba, s/n, CEP 58220-000, Bananeiras, Paraíba. (83) 8654-7888. theomedeiros92@gmail.com. ⁵ MSc. em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Acadêmico Hélio Ramos, s/n - 2º andar – DECart – Cidade Universitária, CEP 50740-467, Recife, Pernambuco. (81) 9887-4095. ermerson.geoif@gmail.com. ⁶ Professor do Departamento de Agricultura, Universidade Federal da Paraíba, s/n, CEP 58220-000, Bananeiras, Paraíba. (83) 3367-1200. aldasibarbosa@cchsa.ufpb.br.

Artigo recebido em 17/11/2020 e aceito em 24/05/2021.

RESUMO

As modificações que ocorrem na cobertura vegetal da Caatinga alteram a incidência de radiação solar na interface superfície-atmosfera. Para monitorar os fluxos de CO₂, através de geotecnologias, surge como alternativa o sensoriamento remoto. Assim, o objetivo deste trabalho foi determinar o sequestro de carbono e a temperatura da superfície em áreas de caatinga diante de variações sazonais através dos dados dos sensores OLI e TIRS do satélite Landsat 8. O estudo foi realizado com uma cena referente à estação seca e outra referente à estação chuvosa, em duas áreas, sendo uma com vegetação preservada de Caatinga e outra com intervenção agrícola, ambas no município de São José de Piranhas, Paraíba. O pré-processamento das imagens se deu a partir da transformação de números digitais para radiância espectral e em seguida para reflectância, já o processamento ocorreu a partir da aplicação dos índices de vegetação e de temperatura, resultando em CO₂flux e temperatura da superfície. A Caatinga sofreu grande influência da precipitação pluvial, afetando diretamente a fenologia desta vegetação. A variação na temperatura e o CO₂flux sofreram influência da sazonalidade, na estação seca houve um menor sequestro e temperaturas mais elevadas, enquanto que na estação chuvosa houve um maior sequestro e temperaturas mais baixas. O teste de comparações múltiplas mostrou que todas as variáveis estudadas apresentaram diferença estatística. A temperatura e o CO₂flux são influenciados pela sazonalidade. O sensoriamento remoto multiespectral é uma ferramenta que pode auxiliar no estudo da dinâmica da temperatura e do sequestro de carbono na Caatinga.

Palavras-chave: Caatinga, CO₂flux, Landsat 8, sensoriamento remoto.

CO₂flux and edaphic surface temperature in the caatinga areas

ABSTRACT

The changes that occur in the Caatinga vegetation cover alter the incidence of solar radiation at the surface-atmosphere interface. To monitor CO₂ flows, through geotechnologies, they appear as an alternative with remote sensing. Thus, the objective of this work was to determine the carbon sequestration and the surface temperature in caatinga areas in the face of seasonal variations using data from the Landsat 8 satellite OLI and TIRS sensors. The study was carried out with a scene referring to the dry season and another referring to the rainy season, in two areas, one with preserved Caatinga vegetation and the other with agricultural intervention, both in the municipality of São José de Piranhas, Paraíba. The pre-processing of the images took place from the transformation of digital numbers for spectral radiance and then for reflectance, since the processing occurred from the application of the vegetation and temperature indices, resulting in CO₂flux and surface temperature. The Caatinga was greatly influenced by rainfall, directly affecting the phenology of this vegetation. The variation in temperature and CO₂flux were influenced by seasonality, in the dry season there was less sequestration and higher temperatures, while in the rainy season there was greater sequestration and lower temperatures. The multiple comparison test showed that all the variables studied showed statistical differences. Temperature and CO₂flux are influenced by seasonality. Multispectral remote sensing is a tool that can assist in the study of temperature dynamics and carbon sequestration in the Caatinga.

Keywords: Caatinga, CO₂flux, Landsat 8, remote sensing.

Introdução

A Caatinga é um ecossistema que ocupa o semiárido nordestino e uma parte do norte de Minas Gerais (Sampaio e Costa, 2011), e apresenta uma área de 844.453 km², o que corresponde a 9,92% do território nacional (IBGE, 2004). Esse ecossistema é caracterizado por plantas anuais, cactos, bromélias, gramíneas, principalmente por arbustos e pequenas árvores, geralmente espinhosas e caducas, que perdem as folhas no início da estação seca, quando entram em fase de dormência (Santos et al., 2010), sendo este um importante mecanismo de sobrevivência das plantas.

Grande parte da Caatinga apresenta clima semiárido, com temperaturas médias elevadas entre 25° e 30°C, precipitação entre 400 e 1200 mm anuais (Tabarelli et al., 2018), com duas estações bem distintas durante o ano: uma estação chuvosa e outra seca, com regime pluviométrico irregular (Maia, 2004). As alterações que acontecem na cobertura vegetal deste ecossistema entre os períodos secos e chuvosos modificam o balanço de radiação que é o principal fator de interação da superfície com a atmosfera (Santos et al., 2012). Com isso, mudanças no padrão espacial e temporal das chuvas representam um fator determinante nas trocas de calor, vapor d'água e CO₂ entre o ecossistema e a atmosfera.

O carbono é um dos principais elementos da natureza. Ele é capaz de se organizar em diferentes arquiteturas à escala nanométrica, possui um tempo de vida curto e pode originar várias estruturas estáveis (Pastrana-Martínez et al., 2013). Os estoques deste importante elemento, na vegetação e no solo, estão relacionados com as formas de manejo da área (Don et al., 2011), na qual, aquelas que são cobertas com vegetação nativa de caatinga arbustiva e arbórea, possuem um estoque de biomassa vegetal maior que o de áreas cobertas com vegetação herbácea, como as pastagens abertas, e maior que as áreas plantadas com culturas de ciclo curto (Sampaio e Costa, 2011).

Os balanços de carbono podem ser estimados em diferentes escalas, para diversas regiões e ecossistemas do mundo (Gallaun et al., 2010), visando determinar o tamanho dos estoques em áreas diversas, e determinar os fluxos entre eles e com a atmosfera (Sampaio e Costa, 2011). O monitoramento dos fluxos de CO₂ geralmente é realizado através de procedimentos meteorológicos, o que inclui as geotecnologias, com destaque para o sensoriamento remoto, sendo este um método eficiente e bastante utilizado.

O sensoriamento remoto, nos últimos anos, vem adquirindo grande aceitação no meio

acadêmico devido o acesso a *hardwares*, *softwares* e produtos gratuitos como dados interferométricos, imagens de satélites, entre outros, e até mesmo auxiliando em análises e aplicações, como por exemplo as pesquisas geográficas (Coelho e Correa, 2013). Trata-se de uma ferramenta para o mapeamento de áreas, identificação de queimadas, desmatamento, estudos climáticos, entre outros (Silva Junior et al., 2018; Velasque et al., 2018). Esta técnica geotecnológica faz uso de imagens obtidas por sensores orbitais, que abrange o espectro visível e invisível ao olho humano.

As florestas tropicais brasileiras sazonalmente secas possuem um papel conhecido no sequestro de CO₂, contudo, ainda há necessidade de levantamentos aperfeiçoados e detalhados sobre cada região. Uma das formas de conhecer as diferentes formações florestais, principalmente as de difícil acesso, é por meio da aplicação dos índices de vegetação, que são obtidos através de imagens de sensoriamento remoto (Mendes et al., 2020; Pereira et al., 2020; Mendes et al., 2021).

Com o intuito de mapear os recursos naturais no mundo, a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) lançou o programa espacial Landsat (Mendes et al., 2019), e em fevereiro de 2013 entrou em operação o satélite Landsat 8, tendo como um dos objetivos medir e analisar a temperatura da superfície através de sensores imageadores que atuam conforme as faixas do espectro eletromagnético (Santos et al., 2017, Takatori et al., 2017).

O que diferencia o Landsat 8 dos demais satélites, é que ele possui dois novos sensores imageadores, o Operacional Terra Imager (OLI) e Thermal Infrared Sensor (TIRS) (Mendes et al., 2019). O OLI vem com as bandas multiespectrais de 1 a 7 e a banda 9, além de contar com a banda 8 pancromática com resolução espacial de 15 metros, já o TIRS conta com as bandas térmicas 10 e 11 que fornecem temperaturas de superfície mais precisas (Knight e Kvarab, 2014; Zhou et al., 2016).

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi verificar se a variação sazonal (seca e chuva) interfere no sequestro de carbono e na temperatura de superfície em áreas de Caatinga através dos dados dos sensores OLI e TIRS do satélite Landsat 8.

Material e métodos

Descrição e Caracterização da Área de Estudo

O estudo foi realizado com uma cena referente a estação seca e outra referente a estação chuvosa, em duas áreas, sendo uma com vegetação preservada de Caatinga e outra com intervenção agrícola no município de São José de Piranhas, Paraíba, Nordeste do Brasil (Figura 1).

Este município está localizado no extremo oeste paraibano, nas coordenadas 07° 07' 14"S e 38° 30' 07"W e possui área de 677,305 km² com altitude de 320 m, e uma população estimada de 20.251 (IBGE, 2020).

Figura 1. Mapa de localização do município de São José de Piranhas - PB.

São José de Piranhas encontra-se inserido no semiárido nordestino que possui classificação climática Bsh, correspondente a muito quente (Köppen e Geiger, 1930). Com temperaturas elevadas durante o dia e baixas durante a noite, além de um regime irregular de chuvas, com média anual de 849,6 mm, típico do ecossistema Caatinga (Gomes et al., 2016). Segundo os mesmos autores, o município possui uma vegetação arbórea-arbustiva, com predominância de espécies como *Croton blanchetianus* (Baill), *Myracrodruon urundeuva* (Allemão) Engl., *Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poire e expressão baixa das cactáceas.

Aquisição e caracterização das cenas

O estudo foi realizado com duas cenas do ponto/órbita 216/065 (path/row) do satélite Landsat 8, que possuem uma resolução radiométrica de 16 bits, com projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), datum *World Geodetic System* (WGS84), sendo necessário a

reprojeção para o hemisfério Sul, uma vez que originalmente são obtidas com projeção para o hemisfério norte. A primeira cena refere-se a estação chuvosa, com data de 06 de junho de 2018 e a segunda representa a estação seca, com data de 28 de outubro de 2018.

Estas cenas foram adquiridas de forma gratuita através do Serviço Geológico dos Estados Unidos (do inglês, *United States Geological Survey* – USGS).

Transformação de Números Digitais (ND) para Radiância

O processo de transformação das bandas de Números Digitais (ND) para *Top Of Atmosphere* (TOA) em radiância espectral, foi realizado de acordo com os metadados da imagem e a seguinte equação (Eq. 1) proposta pela USGS (2018):

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

L_λ = Radiância espectral TOA ($W/(m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1})$);
 M_L = Fator de redimensionamento multiplicativo específico de banda a partir dos metadados da Radiância_Mult_Banda_ L , em que L corresponde ao número da banda;

A_L = Fator de reescalonamento multiplicativo específico da banda a partir dos metadados Radiância_Mult_Band_ L , em que L corresponde ao número da banda;

Q_{cal} = Valores de pixel de produto padrão quantificados e calibrados (ND).

Correção Atmosférica

O processo de correção atmosférica para reflectância TOA se deu através dos coeficientes de reflectância redimensionados presentes no arquivo de metadados MTL e de acordo com a seguinte equação (Eq. 2) proposta pela USGS (2018):

$$\rho\lambda' = M_\rho Q_{cal} + A_\rho \quad (2)$$

$\rho\lambda'$ = Refletância planetária TOA, sem correção do ângulo solar ($W/(m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1})$);

M_ρ = Fator de redimensionamento multiplicador específico de banda a partir dos metadados Reflectância_Mult_Band_ ρ , em que ρ corresponde ao número da banda;

A_ρ = Fator de reescalonamento aditivo específico de banda a partir dos metadados da Reflectância_Add_Band_ ρ , em que ρ corresponde ao número da banda;

Q_{cal} = Valores de pixel do produto padrão quantizados e calibrados (ND).

Aplicação dos Índices de Vegetação

Os índices de vegetação são algoritmos desenvolvidos com base na reflectância das vegetações e seus resultados são obtidos a partir do cálculo das reflectâncias das bandas espectrais obtidas através de sensoriamento remoto. Neste sentido, os índices são utilizados para analisar a vegetação através de suas propriedades espectrais, através de aritmética de bandas espectrais específicas do espectro visível e invisível devido ao antagonismo da reflectância vegetal nessas duas regiões (Francisco et al., 2020).

Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)

No presente estudo aplicou-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, (do inglês, *Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI) que é o índice mais utilizado, tanto para pesquisa, como no monitoramento de culturas agrícolas. Este índice leva em consideração a elevada absorção da clorofila que é observada na faixa

espectral do vermelho ($0,66 \mu m$) e na elevada reflectância evidenciada pela estrutura presente no interior das folhas que reflete na faixa do infravermelho próximo ($0,80 \mu m$) (Francisco et al., 2020).

O NDVI calcula a normalização da relação simples entre a banda do vermelho e a banda do infravermelho próximo e seu produto varia de -1 a 1, e no presente estudo foi calculado pela seguinte equação (Eq. 3) proposta por Rouse et al. (1973):

$$NDVI = \frac{(R_{nir} - R_{red})}{(R_{nir} + R_{red})} \quad (3)$$

R_{nir} = Valor de reflectância da banda 5 do sensor OLI em μm ;

R_{red} = Valor de reflectância da banda 4 do sensor OLI em μm .

Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI)

O Índice de Reflectância Fotoquímica (do inglês, *Photochemical Reflectance Index* - PRI) (Gamon, 1993), trata da relação entre a feição de absorção no azul e o pico máximo de reflectância do verde, se relacionando com o uso efetivo da luz durante o processo fotossintético (Baptista, 2003). Os resultados deste índice são expressos no intervalo entre -1 e 1 e são obtidos pela equação (Eq. 4) a seguir:

$$PRI = \frac{(R_{blue} - R_{green})}{(R_{blue} + R_{green})} \quad (4)$$

R_{blue} = Valor de reflectância da banda 2 do sensor OLI em μm ;

R_{green} = Valor de reflectância da banda 3 do sensor OLI em μm .

Com o objetivo de evitar dados negativos, o PRI necessita ter seus valores reescalados, passando a ser denominado de sPRI. Esse reescalonamento obterá resultados entre 0 e 1, sendo obtido pela seguinte equação (Eq. 5):

$$sPRI = \frac{(PRI + 1)}{(2)} \quad (5)$$

CO₂flux

Proposto por Rahman et al. (2000), o CO₂flux mensura a eficiência do sequestro de carbono pela vegetação, sendo determinado a partir dos resultados obtidos pelos índices NDVI e sPRI e seu resultado é expresso no intervalo entre -1 e 1 a partir da seguinte equação (Eq. 6) :

$$CO_2flux = NDVI * sPRI \quad (6)$$

Temperatura

A temperatura radiante considera a Terra como um corpo negro, ou seja, a emissividade corresponde a 1 e é expressa através da seguinte equação (Eq. 7) proposta pela USGS (2018).

$$T_{rad}(^{\circ}C) = \left(\frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \right) - 273 \quad (7)$$

$T_{rad}(^{\circ}C)$ = Temperatura radiante (K);

K_2 = Constante termal da banda específica

($K2_Constant_Band_10$);

K_1 = Constante termal da banda específica

($K2_Constant_Band_10$);

L_{λ} = Radiância espectral TOA ($W/(m^2 sr^{-1} \mu m^{-1})$).

Transectos

Os transectos foram linhas traçadas entre dois pontos em ambas as áreas com a finalidade de coletar os dados utilizados no estudo (Figura 2).

Figura 2. Localização esquemática dos transectos das duas áreas de estudo; (A) – Área de Caatinga preservada; (B) – Área de intervenções agrícolas.

Análise Estatística

Inicialmente aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk (W) com a finalidade de verificar a normalidade dos dados. Pode-se verificar que os dados não seguiam uma distribuição normal, aceitando-se a hipótese alternativa ($p < 0,05$) e dessa forma adotou-se a aplicação do teste não-paramétrico Kruskal Wallis (H), utilizado para comparar três ou mais amostras independentes, o que se adequa aos dados desta pesquisa.

Os dados foram submetidos ao teste H em função dos dois períodos avaliados e após analisar o resultado aceitou-se a hipótese alternativa ($p < 0,05$), sendo necessário aplicar um teste *post-hoc*, optando-se pelo teste de comparações múltiplas de Dunn.

Utilizou-se ainda o coeficiente de correlação de postos de Spearman (ρ) que se trata de uma medida de correlação não-paramétrica que avalia no intervalo de -1 e 1 e foi aplicado ao nível de significância de 1%.

Todos os testes foram realizados por meio do software estatístico R, versão 4.0.2 (R Core Team, 2020).

Resultados e discussão

A Caatinga sofreu grande influência da precipitação pluviométrica, afetando diretamente a fenologia desta vegetação. Desta forma, entender essa influência é essencial para compreender o sequestro de carbono neste ecossistema. A variação na temperatura ($^{\circ}C$) e o sequestro de CO_2

(CO₂flux) sofreram influência da sazonalidade, na estação seca houve um menor sequestro e temperaturas mais elevadas, enquanto que na

estação chuvosa houve um maior sequestro e temperaturas mais baixas (Figura 3).

Figura 3. Variação no CO₂flux e na temperatura (°C) entre as estações de seca e chuva.

Após as análises observou-se que há diferença estatística pelo teste de Kruskal–Wallis em todas variáveis em função da estação seca e chuvosa (Tabela 1). A diferença estatística foi

constatada através do valor de *p* de cada variável, uma vez que estes foram menores que o valor de significância estabelecida (5%).

Tabela 1. Resumo dos resultados obtidos a partir da comparação das variáveis em função dos períodos seco e chuvoso pelo teste de Kruskal–Wallis.

Variável	Estações	X ²	GL	Média ± DP	Mediana ± AI	Valor de <i>p</i>
CO ₂ flux Caatinga	Seca	57,673	1	0,230±0,021	0,23±0,02b	3,09 x 10 ^{-14**}
	Chuvosa			0,423±0,009	0,43±0,01a	
CO ₂ flux Agricultura	Seca	53,531	1	0,132±0,021	0,13±0,02b	2,55 x 10 ^{-13**}
	Chuvosa			0,271±0,054	0,27±0,05a	
Temperatura Caatinga	Seca	56,277	1	30,4±0,543	30,3±0,68a	6,30 x 10 ^{-14**}
	Chuvosa			21,3±0,353	21,2±0,42b	
Temperatura Agricultura	Seca	56,264	1	38,9±0,999	39,2±0,76a	6,34 x 10 ^{-14**}
	Chuvosa			27,0±1,140	27,3±1,23b	

X²: Qui-Quadrado; GL: Grau de Liberdade; DP: Desvio Padrão; AI: Amplitude Interquartil; (a, b): Valores medianos seguidos de letras diferentes diferem estatisticamente pelo teste *post-hoc* de Dunn; (***p*<0,01).

O teste *post-hoc* de Dunn, utilizado para comparações múltiplas, mostrou que todas as variáveis apresentaram diferenças entre elas. O maior valor mediano de temperatura foi encontrado na estação seca, na área de agricultura (39,2 °C) (Tabela 1). Alguns fatores, a exemplo da baixa pluviosidade e ausência de vegetação

arbórea, podem ter influenciado este resultado, visto que se trata de uma área com baixa cobertura vegetal.

A supressão da vegetação ocasiona uma redução da matéria orgânica além de incidência direta dos raios solares, o que ocasiona alteração no fluxo de temperatura da superfície, já que há

uma relação direta entre cobertura e temperatura do solo. Em solos cobertos as variações térmicas são pequenas e o teor de água é maior, já em áreas manejadas há maior amplitude de variação térmica, desta forma a cobertura vegetal evita o aquecimento excessivo do solo (Wanzeler et al., 2016). Os sistemas de manejo influenciam diretamente a temperatura do solo (Veiga et al., 2010), já que a cobertura vegetal é responsável pela troca e armazenamento de energia térmica nos ecossistemas terrestres (Carneiro et al., 2013).

Com relação ao CO_2 flux, o maior valor mediano foi encontrado na estação chuvosa, na área de Caatinga (0,43). Isto ocorre devido às plantas xerófitas arbustivas e arbóreas reconstituírem sua área foliar nesta estação, havendo, portanto, um maior sequestro de carbono, pois parte deste elemento é captado da atmosfera e é utilizado em vários processos vitais do vegetal. Além disto, trata-se de uma área de

caatinga preservada, onde não houve mobilização, predominando a integridade do solo e da vegetação. Para Moraes et al. (2017) a volubilidade da precipitação influencia o sequestro de carbono pelas plantas da Caatinga e no período chuvoso ocorre um maior incremento de carbono na biomassa vegetal.

Em relação à temperatura, o maior valor foi encontrado na área de agricultura na estação seca (40 °C), uma vez que há maior desuniformidade vegetal. A preservação da umidade e as menores temperaturas na superfície do solo ocorrem quando há cobertura vegetal (Moitinho et al., 2013). A diminuição na cobertura vegetal ocasiona uma maior susceptibilidade do ambiente aos efeitos da radiação solar, acarretando em variações da temperatura, acelerando a atividade microbiana e as perdas de CO_2 do solo.

Figura 4. Distribuição empírica dos dados de CO_2 flux e Temperatura (°C) nas estações e áreas avaliadas.

Com relação à variabilidade dos dados de CO_2 flux em cada área durante as estações, a menor variabilidade foi identificada na área de Caatinga na estação chuvosa (Figura 4), este fato pode estar relacionado com uma maior uniformidade da vegetação, enquanto que a maior variabilidade foi observada na área de agricultura

na estação chuvosa e pode ter ocorrido em função de uma menor uniformidade vegetal.

Quanto à variabilidade dos dados de temperatura de superfície, a menor foi constatada na área de caatinga na estação chuvosa, que pode ter ocorrido devido uma maior cobertura vegetal, enquanto que a maior foi encontrada na área de

agricultura na estação chuvosa e pode ter ocorrido devido uma menor cobertura vegetal.

Já com relação à amplitude dos dados de CO₂flux, a menor foi observada na área de Caatinga, na estação chuvosa e pode ter sido ocasionada por uma maior uniformidade vegetacional, uma vez que nesta estação as plantas da Caatinga reconstituem a parte vegetativa, havendo assim maior sequestro de CO₂. Pereira et al. (2020) utilizando resultados de CO₂flux afirmam que áreas com maiores densidades florestais são mais eficientes no processo de sequestro de carbono.

Quanto aos dados de temperatura, a menor amplitude também ocorreu na área de caatinga na estação chuvosa, enquanto que a maior amplitude foi na área de agricultura também na estação chuvosa, contudo, o maior valor mediano de temperatura foi observado na área de agricultura na estação seca (39,2 °C). Gobel et al. (2019), destacam que há uma correlação entre a temperatura do solo influenciando as dinâmicas de absorção de CO₂ e a eficiência do processo de fotossíntese.

De acordo com Santos et al. (2012), as folhas são responsáveis pelas atividades fotossintéticas, contribuindo com a absorção de CO₂ e liberação de O₂ para a atmosfera. Ainda segundo os mesmos autores, nos meses mais secos, há predominância de liberação de CO₂ da vegetação para a atmosfera, já que, devido ao déficit hídrico, em grande parte das espécies as folhas caem e perdem água via transpiração. Além disso, a temperatura da superfície pode influenciar na dinâmica e no ciclo do carbono do solo, visto que com o aumento da temperatura do solo há maior liberação de CO₂ edáfico para a atmosfera, sobretudo em áreas com maior intervenção antrópica (Gomes et al., 2021).

Após a aplicação do coeficiente de correlação de postos de Spearman (ρ), observou-se que, entre CO₂flux e temperatura, todas as correlações foram forte negativas. Enquanto que para CO₂flux (Caatinga) e CO₂flux (agricultura) a correlação foi forte positiva, o mesmo ocorreu entre temperatura (agricultura) e temperatura (Caatinga) (Figura 5).

Figura 5. Correlação de Spearman (ρ) entre as quatro variáveis estudadas.

Zhang et al. (2020), ao avaliarem a correlação entre índices de vegetação e temperatura, encontraram uma correlação negativa, indicando que a dinâmica vegetacional foi impactada negativamente pela temperatura. Nessa mesma perspectiva, Nova et al. (2021), avaliando índices de vegetação e temperatura de superfície, observaram correlação inversa e obtiveram correlações forte negativas e moderada negativas.

Tendo em vista que a ação antrópica pode ocasionar alterações na composição da fitofisionomia da caatinga, reduzindo o estrato arbóreo-arbustivo e, consequentemente, diminuindo o sequestro de carbono (Morais et al., 2017), os resultados dessa pesquisa sugerem que medidas que visem à preservação dos remanescentes de caatinga e a recuperação de áreas degradadas no município de São José de Piranhas – PB sejam adotadas, como forma de contribuir para a conservação do ecossistema e a mitigação do aquecimento global.

Conclusões

A temperatura (°C) e o CO₂flux são influenciados pela sazonalidade.

O sensoriamento remoto multiespectral é uma ferramenta que pode auxiliar no estudo da dinâmica da temperatura e do sequestro de carbono na Caatinga.

Agradecimentos

Ao Colégio Agrícola Vidal de Negreiros (CAVN) e ao Grupo de Pesquisa em Ecologia da

Produção Vegetal no Semiárido (ECOVAR - CNPq).

Referências

- Baptista, G.M.M., 2003. Validação da modelagem de sequestro de carbono para ambientes tropicais de cerrado, por meio de dados AVIRIS e HYPERION. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11, 1037-1044.
- Carneiro, R.G., Moura, M.A.L., Silva, V.P.R., Silva Júnior, R.S., Andrade, A.M.D., Santos, A.B., 2013. Estudo da temperatura do solo em dois biomas florestais nos períodos, chuvoso e seco. Revista Brasileira de Geografia Física, 6, 1009-1022.
- Coelho, A.L.N., Correa, W.D.S.C., 2013. Temperatura de Superfície Celsius do Sensor TIRS/Landsat-8: metodologia e aplicações. Revista Geográfica Acadêmica, 7(1):31-45.
- Don, A., Schumacher, J., Freibauer, A., 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis. Global Change Biology, 17(4):1658-1670.
- Francisco, C.N., Ruiz, P.R.S., Almeida, C.M., Gruber, N.C., Anjos, C.S., 2020. Análise do impacto da correção atmosférica no cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada a partir de Imagem Landsat 8/OLI. Revista Brasileira de Geografia Física, 13(1):076-086.
- Gallaun, H., Zanchi, G., Nabuurs, G.J., Hengeveld, G., Schardt, M., Verkerk, P.J., 2010. EU-wide maps of growing stock and above-ground biomass in forests based on remote sensing and field measurements. Forest Ecology and Management, 260(3):252-261.
- Gamon, J.A., 1993. The Dynamic 531-Nanometer A Reflectance Si qnal: A Survey of Twenty Angiosperm Species. Gilmore Hall 202-3050 Maile Way Honolulu, Hawaii 96822 Office of the Director August 26, 1993, 172 p.
- Gomes, D.S., Barbosa, A.S., Santos, T.M., Santos, S.K., Silva, J.H.C.S., Aquino, Í.S., 2021. Cinética de liberação de CO₂ e decomposição da fitomassa em sistemas de uso e manejo do solo. Research, Society and Development, 10(1): e9810111413.
- Gomes, D.S., Ribeiro, J.E.S., Lucena, R.F.P., 2016. Uso e disponibilidade local da aroeira *Myracrodruon urundeuva* (Allemão) Engl. (Magnoliopsida: Anacardiaceae) em uma comunidade rural da Depressão Sertaneja, São José de Piranhas, Estado da Paraíba, Brasil. Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, 3(6):265-276.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), 2004. IBGE lança o Mapa de Biomas do Brasil e o Mapa de Vegetação do Brasil, em comemoração ao Dia Mundial da Biodiversidade. Disponível em: < <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/> >. Acesso em 25 ago. 2020.
- Knight, E., Kvaran, G., 2014. Landsat-8 operational land imager design, characterization and performance. Remote Sensing, 6(11):10286-10305.
- Köppen, W., Geiger, R., 1930. Handbuch der klimatologie. Berlin: Gebrüder Borntraeger.
- Maia, G.N., 2004. Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades. São Paulo: Leitura & Arte Editora.
- Mendes, K.R. Campos, S., Silva, L.L., Mutti, P.R., Ferreira, R.R., et al., 2020. Seasonal variation in net ecosystem CO₂ exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. Scientific Reports, 10(1):1-16.
- Mendes, K.R., Campos S., Mutti, P.R., Ferreira, R.R., Ramos, T.M., et al., 2021. Assessment of SITE for CO₂ and Energy Fluxes Simulations in a Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga Ecosystem). Forests, 12 (1):86.
- Mendes, O.R., Danelichen, V.H.M., Pereira, O.A., 2019. Avaliação da temperatura da superfície no Pantanal Mato-grossense por sensoriamento remoto. Revista Brasileira de Geografia Física, 12(5):1784-1793.
- Moitinho, M.R., Padovan, M.P., Panosso, A.R., La Scala Jr, N., 2013. Efeito do preparo do solo e resíduo da colheita de cana-de-açúcar sobre a emissão de CO₂. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 37(6):1720-1728.
- Morais, Y.C.B.M.; Araújo, M.S.B.; Moura, M.S.B.; Galvêncio, J.D.; Miranda, R.Q., 2017. Análise do Sequestro de Carbono em áreas de Caatinga do Semiárido Pernambucano. Revista Brasileira de Meteorologia, 32(4):585 - 599.
- Nova, R.A.V., Gonçalves, R.M., Lima, F.V.M.S., 2021. Análise Temporal de Ilhas de Calor Através da Temperatura de Superfície e do Índice de Vegetação em Recife-PE, Brasil. Revista Brasileira de Cartografia, 73 (2):598-614.
- Pastrana-Martínez, L.; Morales-Torres, S.; Gomes, H.; Silva, A., 2013. Nanotubos e grafeno: os primos mais jovens na família do carbono! Química, 128, 21-27.
- Pereira, L.C., Nunes, A.B., Rocha, I. L., Oliveira, J.L., Brandão, M.L.S.M., Leite, L.F.C., Iwata, B.F., 2020. Fluxo de CO₂ e os índices de vegetação do Parque Nacional das Nascentes do Rio Parnaíba, Piauí, Brasil. Revista

- Brasileira de Geografia Física, 13(7):3585-3601.
- R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. 2020. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Rahman, A.F., Gamon, J.A., Fuentes, D.A., Roberts, D., Prentiss, D., Qiu, H., 2000. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. In: AVIRIS Workshop.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D. W., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS In Third Earth Resources Technology Satellite-1. December. Goddard Space Flight Center: NASA, 309-317.
- Sampaio, E.V.S.B., Costa, T.L., 2011. Estoques e fluxos de carbono no semi-árido nordestino: estimativas preliminares. Revista Brasileira de Geografia Física, 6, 1275-1291.
- Santos, M.M., Machado, I. E., Carvalho, E.V., Viola, M. R., Giongo, M., 2017. Estimativa de parâmetros florestais em área de cerrado a partir de imagens do sensor Landsat 8. Floresta, 47(1):75-8.
- Santos, M.V.F.D., Lira, M.D.A., Dubeux Junior, J.C.B., Guim, A., Mello, A.C.L.D., Cunha, M.V.D., 2010. Potencial de plantas forrageiras da Caatinga na alimentação de ruminantes. Revista Brasileira de Zootecnia, 39, 204-215.
- Santos, S.A., Correia, M.F., Aragão, M.R.S., Silva, P.K.O., 2012. Aspectos da Variabilidade Sazonal da Radiação, Fluxos de Energia e CO₂ em Área de Caatinga. Revista Brasileira de Geografia Física, 5(4):761-773.
- Silva Junior, C.H., Anderson, L., Aragão, L.E., Rodrigues, B., 2018. Dinâmica das queimadas no Cerrado do Estado do Maranhão, Nordeste do Brasil. Revista do Departamento de Geografia, 35, 1-14.
- Tabarelli, M., Leal, I.R., Scarano, F.R., Silva, J., 2018. Caatinga: legado, trajetória e desafios rumo à sustentabilidade. Ciência e Cultura, 70(4), 25-29.
- Takatori, M.M.O., Gamarra, R.B., Faggioni, G.P., Dalmas, F.B., Paranhos Filho, A.C., 2017. Uso de geotecnologias na análise da estrutura e dinâmica da paisagem na região do Nabileque. Revista Geociências-UNG-Ser, 16(1):87-101.
- USGS. United States Geological Survey, 2018. Landsat Missions. Disponível em: < <http://landsat.usgs.gov/> >. Acesso: 23 jul. 2020.
- Veiga, M., Reinert, D.J., Reichert, J.M. 2010. Tillage systems and nutrient sources affecting soil cover, temperature and moisture in clayey Oxisol under corn. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 34, 2011-2020.
- Velasque, M.C.S., Biudes, M.S., Machado, N.G., Danelichen, V.H.M., Vourlitis, G.L., Nogueira, J.S. 2018. Modelling Gross Primary Production of Tropical Forest by Remote Sensing. Revista Brasileira de Climatologia, 22, 38-54.
- Wanzeler, R.T.S., Costa, J.D.P.R., Santos, C.A., 2016. Variabilidade horária do perfil de temperatura do solo em um pomar de mangueiras (*Mangifera indica* L.), na localidade de Cuiarana, Salinópolis-PA. Estação Científica (UNIFAP), 6(1):117-124.
- Zhang, P.; Cai, Y.; Yang, W.; Yi, Y.; Yang, Z.; Fu, Q., 2020. Contributions of climatic and anthropogenic drivers to vegetation .
- Novick, K.A., Stoy, P.C., Katul, G.G., Ellsworth, D.S., Siqueira, M.S.B., Juang, J., Oren, R., 2004. Carbon dioxide and water vapor exchange in a warm temperate grassland. Oecologia 138, 259-274.
- Oliveira, M.B.L., Santos, A.J.B., Manzi, A.O., Alvalá, R.C.S., Correia, M.F., Moura, M.S.B., 2006. Trocas de energia e fluxo de carbono entre a vegetação de caatinga e atmosfera no nordeste brasileiro. Revista Brasileira de Meteorologia 21, 166-174.
- Paiva, C.M., 2005. Estimativa do balanço de energia e da temperatura da superfície via satélite NOAA-AVHRR. Tese (Doutorado). Rio de Janeiro, UFRJ.
- Pereira, A.R., Angelocci, L.R., Sentelhas, P.C., 2002. Agrometeorologia – fundamentos e aplicações práticas. Agropecuária, Guaíba.
- Querino, C.A.S., Moura, M.A.L., Querino, J.K.A.S.Q., Von Randow, C., Marques Filho, A.O., 2011. Estudo da radiação solar global e índice de transmissividade (kt) externo e interno, em uma floresta de mangue em alagoas – Brasil. Revista Brasileira de Meteorologia 26, 204-294.
- Radin, B., Bergamaschi, H., Junior, C.R., Barni, N.A., Matzenauer, R., Didoné, I.A., 2003. Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pela cultura do tomateiro em diferentes ambientes. Pesquisa Agropecuária Brasileira 38, 1017-1023.
- Rotenberg, E., Yakir, D., 2010. Contribution of semi-arid forests to the climate system. Science 327, 451-454.
- Santos, S.A., Correia, M.F., Aragão, M.R.S., Silva, P.K.O., 2012. Aspectos da variabilidade sazonal da radiação, fluxos de energia e CO₂ em área de Caatinga. Revista Brasileira de Geografia Física 4, 761-773.
- Silva, B.B., Lopes, G.M., Azevedo, P.V., 2005. Determinação do albedo de áreas irrigadas com

- bas em imagens LANDSAT 5-TM. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 13, 11-21.
- Silva, T.G.F., Moura, M.S.B., Zolnier, S., Soares, J.M., Souza, L.S.B., Brandão, E.O., 2011. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no Semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Online)* 15, 139-147.
- Silva, T.G.F., Zolnier, S., Moura, M.S.B., Souza, L.S.B., 2013. Sazonalidade do Controle de Evapotranspiração pela Cana-de-Açúcar Irrigada e Características Aerodinâmicas da Cultura no Semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física* 6, 621-634.
- Souza, P.J.O.P., Rocha, E.J.P., Ribeiro, A., Souza, E.B., 2010. Radiation balance in a soybean ecosystem in the Amazon. *Revista Ciência Agronômica* 41, 582-592.
- Souza, A.P., Escobedo, J.F., 2013. Estimativas da radiação global incidente em superfícies inclinadas com base na razão de insolação. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias* 8, 483-491.
- Teixeira, A.H.C., Bastiaanssen, W.G.M., Ahmad, N.D., Moura, M.S.B.de., Bos, M.G., 2008. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. *Journal of Hydrology* 362, 110-127.
- Varejão-Silva, M.A., 2006. *Meteorologia e Climatologia*. Versão digital, 2. ed. Recife.
- Wang, H., Jia, G., Fu, C., Feng, J., Zhao, T., Ma, Z., 2010. Deriving maximal light use efficiency from coordinated flux measurements and satellite data for regional gross primary production modeling. *Remote Sensing of Environment* 114, 2248-2258.
- Wang, H., Prentice, I.C., Davis, T.W., 2014. Biophysical constraints on gross primary production by the terrestrial biosphere. *Bioessences* 11, 5987-6001.
- Yuan, W., Liu, S., Yu, G., Bonnefond, J.M., Chen, J., Davis, K., Desai, A.R.; Goldstein, A.H., Gianelle, D., Rossi, F., Suyker, A.E., Verma, S.B., 2010. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment* 114, 1416-1431.
- Zhang, X., Gu, S., Zhao, X., Cui, X., Zhao, L., Xu, S., Du, M., Jiang, S., Gao, Y., Ma, C., Tang, Y., 2010. Radiation partitioning and its relation to environmental factors above a meadow ecosystem on the Qinghai Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research* 115.