

XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

XVIII ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

ESTIMATIVA DE CARBONO E MODELAGEM AGROMETEOROLÓGICA ESPECTRAL EM ÁREA REFLORESTADA DA REGIÃO SEMIÁRIDA BRASILEIRA

Janice F. Leivas¹; Celina M. Takemura²; Antônio Heriberto de C. Teixeira³; Edlene A. M. Garçon⁴; Luiz Leite⁵

RESUMO – A partir de imagens do satélite Sentinel-2A e dados meteorológicos, foram obtidos indicadores biofísicos-espectrais, como evapotranspiração (ET), biomassa (BIO), Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), Índice de Reflectância Fotoquímica (PRI) e Fluxo de Carbono (CO₂Flux), em área de reflorestamento e agricultura familiar, no bioma caatinga, no Piauí. Foi utilizado o modelo agrometeorológico SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*), sendo processado em linguagem Python. O período de análise refere-se ao período seco de 2024, de maio a outubro, devido à disponibilidade de imagens sem cobertura de nuvens. Observou-se que as áreas reflorestadas e de mata nativa destacam-se nas imagens, sendo observados os maiores valores de BIO, ET e CO₂Flux. Com isso, infere-se que as áreas reflorestadas e mata nativa são imprescindíveis à manutenção do ecossistema caatinga e mitigação de mudanças climáticas, devido ao acúmulo de CO₂. Com os resultados obtidos, serão ampliadas as análises com a correlação de dados coletados em campo, com a finalidade de estimar Carbono orgânico do solo (COS), através de imagens de satélite, visando conservação de recursos naturais.

Palavras-chave: reflorestamento, carbono, biomassa, Sentinel-2A.

ABSTRACT– Based on Sentinel-2A satellite images and meteorological data, biophysical-spectral indicators such as evapotranspiration (ET), biomass (BIO), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Photochemical Reflectance Index (PRI), and Carbon Flux (CO₂Flux) were obtained in a reforestation and family farming area in the Caatinga biome, in Piauí. The SAFER (Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving) agrometeorological model was used, processed in Python. The analysis period refers to the dry season of 2024, from May to October, due to the availability of images without cloud cover. It was observed that reforested areas and native forest stand out in the images, showing the highest values of BIO, ET, and CO₂Flux. Therefore, it can be inferred that reforested areas and native forests are essential for maintaining the Caatinga ecosystem

¹) Embrapa Territorial, Av. Soldado Passarinho 303, bairro Jardim Chapadão, CEP 13070-115, Campinas, SP, fone: 19 32116200, email: janice.leivas@embrapa.br

²) Embrapa Territorial, Av. Soldado Passarinho 303, bairro Jardim Chapadão, CEP 13070-115, Campinas, SP, fone: 19 32116200, email: celina.takemura@embrapa.br

³) Universidade Federal de Sergipe, Av. Marcelo Deda Chagas, bairro Rosa Else, CEP 49107-230, São Cristóvão, SE, fone: 79 988627751, email: heribertoteixeira11@gmail.com@gmail.com

⁴) Embrapa Territorial, Av. Soldado Passarinho 303, bairro Jardim Chapadão, CEP 13070-115, Campinas, SP, fone: 19 32116200, email: edlene.garcon@embrapa.br

⁵) Embrapa Meio Norte, Avenida Duque de Caxias, nº 5650, bairro Buenos Aires, CEP: 64008-780, Teresina, PI, fone: 86 3198-0500, email: luiz.leite@embrapa.br

and mitigating climate change due to CO₂ accumulation. Based on the results obtained, further analyses will be conducted by correlating data collected in the field to estimate soil organic carbon (SOC) using satellite imagery, aiming at the conservation of natural resources.

Keywords: reforestation, carbon, biomass, Sentinel-2A.

INTRODUÇÃO

No atual cenário de mudanças climáticas globais, a compreensão do ciclo do carbono tornou-se estratégica para políticas de mitigação e conservação ambiental. As emissões de gases de efeito estufa continuam a subir, tornando as estratégias de remoção de dióxido de carbono (CO₂) essenciais para limitar o aquecimento global a 1,5°C (IPCC, 2023). Nesse contexto, os ecossistemas vegetais desempenham um importante papel por serem considerados como sumidouros de carbono, sendo a conservação e o manejo florestal, importantes atores na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas.

A dinâmica do CO₂ por sensoriamento remoto tem sido avaliada também utilizando índices espectrais de vegetação. De acordo com Rahman et al. (2000), é possível determinar o sequestro de carbono na vegetação por meio da integração do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada ou Normalized Difference Vegetation Index – NDVI proposto por Rouse et al. (1973) e com o Índice de Reflectância Fotoquímica, Photochemical Reflectance Index (PRI), proposto por Gamon et al. (1997). O monitoramento espacial e temporal do CO₂ é extremamente importante, tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. Nesse sentido, a alta resolução temporal, espacial e espectral dos dados do Sentinel-2 pode ser explorada para monitorar o teor de carbono na camada superficial do solo em áreas agrícolas. (Castaldi et al., 2019).

O monitoramento ambiental por meio de imagens de satélites é essencial para a compreensão das mudanças de uso e ocupação do solo ao longo do tempo. O sensoriamento remoto por imagens de satélites, excluindo a necessidade de quantificação de outros parâmetros hidrológicos complexos, é apropriado para determinação e mapeamento da evapotranspiração (ET), biomassa (BIO), em ecossistemas mistos sob diferentes condições climáticas (Teixeira 2009; Miralles et al. 2011; Pôças et al. 2013). O modelo agrometeorológico espectral SAFER (*Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving*) foi desenvolvido e validado com dados de experimentos de campo e imagens de satélite, nas condições semiáridas brasileiras (Teixeira 2012a). Índices espectrais como NDVI, PRI e CO₂Flux, em larga escala, tendo sido utilizados para estimar as características de vigor da vegetação

O objetivo do presente trabalho foi estimar indicadores biofísicos de área de reflorestamento, mata nativa, em área de agricultura familiar, a partir de técnicas de sensoriamento remoto visando monitorar indicadores ambientais como CO₂, em tempos de mudanças climáticas.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo compreende área de reflorestamento e agricultura familiar, no bioma caatinga, nos municípios de Itainópolis, Jacobina do Piauí e Paulistana, localizadas no sudeste do Piauí. Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da região é caracterizado como Semiárido Quente (BSh), com temperatura média anual é superior a 18°C.

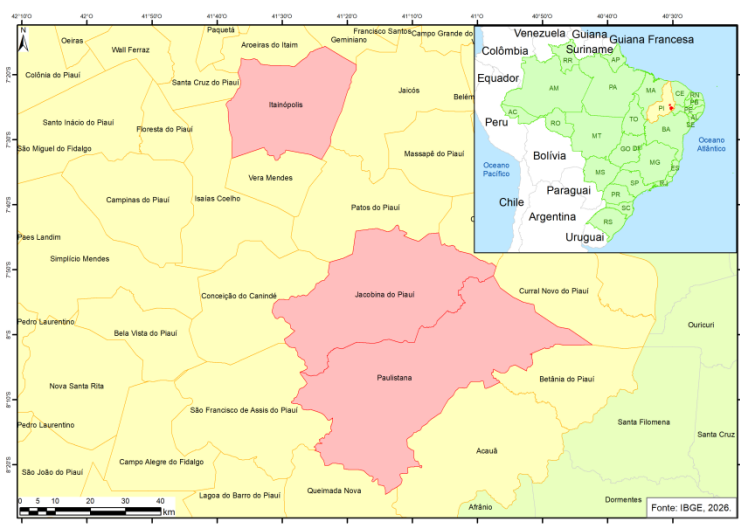
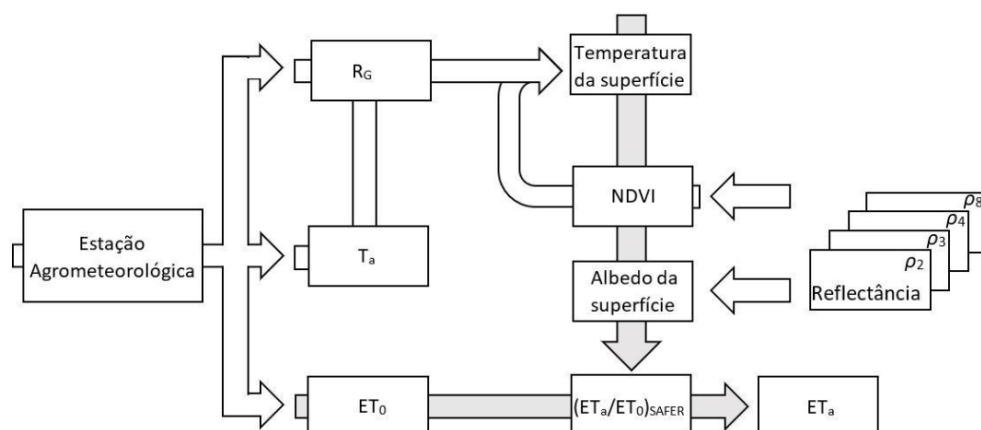


Figura 1. Área de estudo, incluindo os municípios de Itainópolis, Jacobina do Piauí e Paulistana, estado do Piauí

Dados meteorológicos (temperatura do ar, precipitação, umidade relativa, radiação solar global e velocidade do vento) foram obtidos da estação do INMET, localizada no município de Paulistana (Piauí), para servirem como entrada no modelo agrometeorológico-espectral SAFER (Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving) (Teixeira, 2010). Os dados foram processados utilizando a linguagem de programação Python. Foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-2A, com resolução espacial de 10 m, referente à cena 24MTS. As imagens são corrigidas atmosféricamente, eliminando os efeitos da atmosfera sobre a luz refletida da superfície da Terra e que atinge o sensor. As imagens do Sentinel-2A e os dados meteorológicos foram processados para o período de janeiro de 2023 a outubro de 2024.

A biomassa foi calculada utilizando a eficiência de uso da radiação, o fluxo de calor latente, o balanço de radiação e a radiação fotossinteticamente absorvida pela vegetação. O CO₂Flux, que é

obtido a partir do NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) e pelo PRI (Photosynthetic Reflectance Index), que são indicadores que permitem, a partir da resposta espectral, obter informações quanto ao vigor vegetativo das plantas.



ET₀ – evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹), R_G – radiação global (MJ m⁻² dia⁻¹), T_a – temperatura média do ar (°C), ET_a – evapotranspiração atual (mm dia⁻¹).

Figura 2. Fluxograma das etapas do modelo SAFER (Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving), utilizando imagens Sentinel-2A, juntamente com dados meteorológicos.

Os Indicadores espectrais como NDVI, PRI, sPRI e CO₂Flux foram calculados utilizando as bandas do visível (VIS) e do infravermelho próximo (NIR), com o objetivo de analisar a cobertura vegetal e o fluxo de carbono.

O NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), proposto por Rouse et al. (1973), foi obtido através da relação entre as bandas do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (R) do espectro eletromagnético :

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

O PRI (Índice de Refletância Fotoquímica) foi gerado para medir os pigmentos carotenoides, como xantofila nas folhas. Esses pigmentos indicam a eficiência da fotossíntese luminosa ou a taxa de armazenamento de dióxido de carbono na folhagem. Esse índice é utilizado em estudos de estresse e produtividade vegetal. O índice é calculado com base na relação entre as bandas azul (B) e verde (G) e seu valor varia entre -1 e 1. (Gamon et al. (1992).

$$PRI = \frac{B - G}{B + G} \quad (2)$$

O índice PRI pode ser relacionado à eficiência do uso da luz no processo fotossintético. No entanto, os valores do índice PRI precisam ser reescalados para valores positivos, usados no cálculo do sequestro de carbono. Este novo índice é chamado sPRI e varia entre 0 e 1. (Baptista, 2004).

$$sPRI = \frac{PRI + 1}{2} \quad (3)$$

O sequestro de carbono pela vegetação depende da integração do NDVI com o PRI, gerando um novo índice, o CO₂flux, desenvolvido com o objetivo de medir o estoque de carbono na vegetação natural. Ao armazenar carbono, a vegetação ajuda a minimizar os efeitos do impacto do dióxido de carbono (CO₂) no ambiente, além de ser fundamental no processo de fotossíntese. O reescalonamento do índice PRI é necessário para permanecer na mesma escala que o NDVI e assim ser combinado, por meio de multiplicação, gerando o fluxo de CO₂. A metodologia do fluxo de CO₂ foi proposta por Rahman et al (2000).

$$\text{CO}_2\text{Flux} = \text{sPRI} \cdot \text{NDVI} \quad (4)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 observa-se que na área de reflorestamento, os valores de biomassa, evapotranspiração e estoque de carbono se destacam em relação à área circundante. Áreas com altos valores de fluxo de CO₂ estão localizadas em áreas florestadas ou com vegetação natural, como visto nas áreas em tons de verde escuro, sendo áreas com maior cobertura vegetal. Altos valores de fluxo de CO₂ indicam que a vegetação é bem desenvolvida enquanto que valores mais baixos indicam vegetação rasteira ou pastagens, absorvendo menos CO₂. Devido aos baixos índices pluviométricos no período seco, de maio a outubro, observou-se que as áreas reflorestadas destacam-se nas imagens, sendo observados os maiores de Biomassa, Evapotranspiração e estimativas de Fluxo de Carbono (CO₂Flux).

O presente estudo corrobora com Santos et al (2023), que em experimento realizado no bioma caatinga, fluxos de CO₂ a partir do Índice de Sequestro Florestal de Carbono (CO₂flux) mostrou um grande potencial no uso de imagens multiespectrais para o monitoramento dos fluxos de CO₂, capturando os efeitos das mudanças sazonais da dinâmica dos fluxos de carbono na caatinga. Os fluxos de dióxido de carbono (CO₂) são de grande importância na compreensão do funcionamento dos agroecossistemas e na avaliação de mudanças existentes entre eles e a atmosfera em decorrência das alterações ambientais e das mudanças climáticas (Moura et al., 2011), de modo que a alteração do uso da terra e o manejo inadequado na agricultura afetam diretamente a dinâmica desses fluxos (Fleischer et al., 2016).

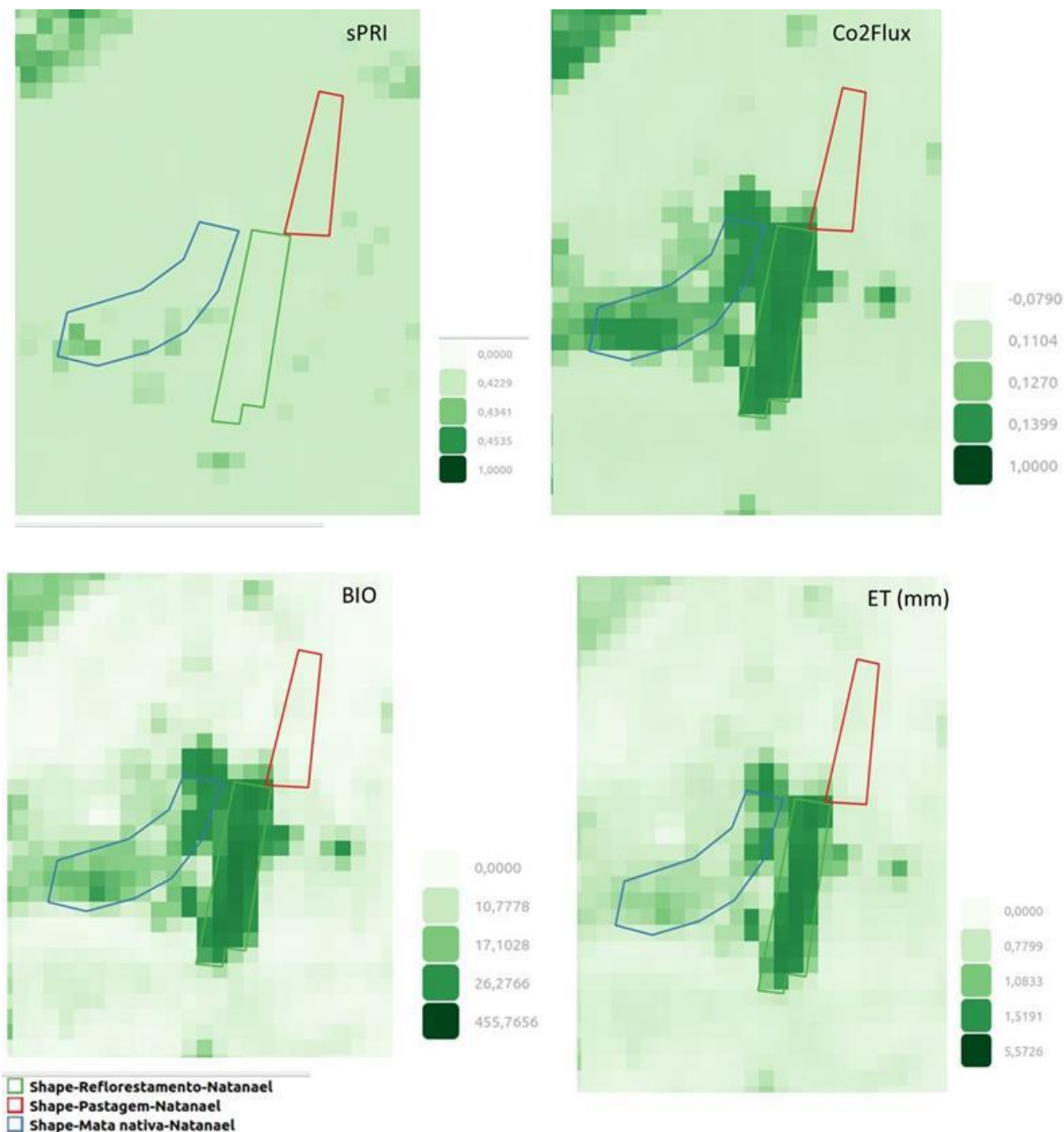


Figura 2. Indicadores espectrais como Biomassa, Fluxo de CO₂, Evapotranspiração, na área da fazenda analisada (Fazenda Natanael), com ênfase na área de floresta nativa e reflorestamento.

Nesse sentido, o CO₂ flux gerado a partir de dados do satélite Sentinel-2, se mostrou eficiente para registrar as dióxido de carbono pela vegetação, destacando a eficiência da área reflorestada em sequestrar CO₂ atmosférico. A medição dos estoques de carbono em áreas de vegetação natural/reflorestadas utilizando imagens de satélite, por meio de índices espectrais como o fluxo de

CO₂, é uma possibilidade para estimativas em larga escala. Medições de campo com análise de dados de carbono no solo serão adicionadas a esta análise preliminar.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo demonstram que a estimativa de fluxo de CO₂ foi satisfatória, destacando a distribuição da cobertura vegetal na área de estudo e a importância do reflorestamento para a conservação ambiental. As técnicas de sensoriamento remoto podem contribuir na extrapolação, para grandes áreas, gerando informações de vigor da vegetação, biomassa e fluxo de CO₂ em larga escala.

REFERÊNCIAS

- CASTALDI, F., CHABRILLAT, S., DON, A., VAN WESEMAEL, B. *Soil organic carbono mapping using LUCAS topsoil database and Sentinel-2 data: An approach to reduce soil moisture and crop residue effects*. Remote Sensing, 2019. 11, 2121.
- FLEICHSHER, E.; KHASHIMOV, I.; HÖZEL, N.; KLEMM, O. O. Carbon exchange fluxes over peatlands on Western Siberia; Possible feedback between land-use change and climate change. Science of the Total Environment, 2016, 545, 424-433.
- GAMON JA, SERRANO L, SURFUS JS. *The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels*. Oecologia. 1997 Nov, 112, 4. Pp. 492-501
- IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 pp., doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- MOURA, M. S. B.; SILVA, T. G. F.; RANDOW, C. R.; LACERDA, F. F.; SOUZA, L. S. B. *Monitoramento dos fluxos de radiação, energia, CO₂ e vapor d'água em superfícies vegetadas*. In: Galvêncio J. D. (Org.). Mudanças climáticas e modelos ambientais: caracterização e aplicação. Recife: UFPE, 2011.
- RAHMAN, A. F.; GAMON, J.A.; FUENTES, D.A.; ROBERTS, D.; PRENTISS, D.; QIU, H. Modeling CO₂ flux of boreal forests using narrow-band indices from AVIRIS imagery. AVIRIS Workshop. Pasadena: JPL/NASA, 2000.
- ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. ERTS-1 Symposium. Proceedings... NASA, United States, 1973, 3. 309-317.
- SANTOS, C.V.B.; BAPTISTA, G.M. DE M.; MOURA, M.S.B.; SILVA, A. DE B.; FRANCA-ROCHA, W. DE J.A., CARVALHO, H.F.DE S., GALVÍNCIO . J. D. *Validação de um modelo espectral para determinação de fluxos de CO₂ em áreas do Bioma Caatinga*. Journal of Environmental Analysis and Progress, 2023, v.08, n.03, pp. 226-239.
- TEIXEIRA, A.H.C. *Determining Regional Actual Evapotranspiration of Irrigated Crops and Natural Vegetation in the São Francisco River Basin (Brazil) Using Remote Sensing and Penman-Monteith Equation*. Remote Sensing. 2010, 2, 1287.