



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Estimativa do Saldo de Radiação: Uma Aplicação a Região Agreste de Pernambuco

Irami Buarque do Amazonas¹, Maria do Rosário Alves Patriota², Armando da Silva Pereira Neto³.

¹Professor Adjunto da Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica de Pernambuco (POLI/UPE), Rua Benfica, 455 - Madalena - Recife/PE, CEP: 50720-001. E-mail: iba@poli.br.

²Professora da Universidade Federal do Ceará – Campus de Crateús. Avenida Professora Machadinho Lima, S/N. CEP:63708-835 – Crateús/CE. E-mail: rosariopatriota@crateus.ufc.br.

³Licenciado em Matemática – Universidade de Pernambuco – Campus Garanhuns (UPE/Garanhuns). Rua Capitão Pedro Rodrigues, 105 – São José - Garanhuns/PE, CEP: 55295-110. E-mail: armandoneto55@gmail.com.

Artigo recebido em 30/04/2024 e aceito em 13/01/2025

RESUMO

O equilíbrio existente entre a radiação solar e a vegetação local se constitui em uma das relações mais estreitas entre os fatores climáticos e as condições atmosféricas de tempo, uma vez que este funciona como um fator de equilíbrio entre a incidência dos raios solares sobre o solo e a umidade do ar, por meio da evapotranspiração. No município de Garanhuns, mesorregião do agreste de Pernambuco, dada as suas condições socioambientais predominantes, e de modo a otimizar o uso dos escassos recursos hídricos e energéticos, faz-se necessário um adequado cômputo do balanço hídrico e de energia, os quais têm como principal componente o saldo de radiação - Rn. Partindo da hipótese de que a degradação da vegetação nativa de uma região gera alterações na relação Superfície – Atmosfera, acarretando modificações das componentes biofísicas do Rn, este trabalho teve como objetivo estimar e avaliar a dinâmica dos componentes do Rn à superfície. Para tanto, foram empregadas as técnicas de sensoriamento remoto, por meio de onze imagens orbitais do satélite Landsat 8, obtidas no decorrer do ano de 2020, as quais foram processadas pelo algoritmo SEBAL. Por meio do cômputo do saldo de radiação, foi possível inferir uma alta variabilidade sazonal das variáveis biofísicas, principalmente os índices de vegetação e temperatura da superfície. Os valores dos índices de vegetação obtidos, em especial o NDVI, foram inferiores aos valores médios encontrados na literatura, evidenciando os efeitos da degradação da vegetação nativa da região, fator este que está diretamente relacionado ao aumento da temperatura da superfície e albedo.

Palavras – chave: Degradação da vegetação; SEBAL; Saldo de radiação.

Radiation Balance Estimation: An Application to Agreste Region of Pernambuco

ABSTRACT

The balance between solar radiation and local vegetation constitutes one of the closest relationships between climatic factors and weather atmospheric conditions, since it works as a balancing factor between the incidence of solar rays on the ground and air humidity through evapotranspiration. In the municipality of Garanhuns, a rural mesoregion of Pernambuco, given its predominant socio-environmental conditions, and in order to optimize the use of scarce water and energy resources, an adequate calculation of the water and energy balance is necessary, which have as main component the radiation balance - Rn. Based on the hypothesis that the degradation of native vegetation in a region generates changes in the Surface – Atmosphere relationship, leading to modifications in the biophysical components of Rn, this work aimed to estimate and evaluate the dynamics of Rn components at the surface. To this end, remote sensing techniques were used, using eleven orbital images from the Landsat 8 satellite, obtained during 2020, which were processed by the SEBAL algorithm. By calculating the radiation balance, it was possible to infer a high seasonal variability of biophysical variables, mainly vegetation indices and surface temperature. The values of the vegetation indices obtained, especially the NDVI, were lower than the average values found in the literature, highlighting the effects of degradation of the region's native vegetation, a factor that is directly related to the increase in surface temperature and albedo.

Key-Words: Vegetation degradation; SEBAL; Radiation balance.

Introdução

A região Nordeste do Brasil - NEB enfrenta historicamente uma notável e crescente problemática relacionada a vulnerabilidade e escassez dos seus recursos ambientais, em especial os recursos hídricos, pois em grande parte apresenta balanço hídrico negativo (Freire et al., 2011; Marengo, 2008; Silva et al., 2022).

A NEB ocupa cerca de 18% do território nacional, com 75% de sua área sendo classificada como regiões árida e semiárida. Dentro desta região se destaca o semi-árido, que está espalhado por oito estados nordestinos, dos quais apenas o Maranhão que não apresenta áreas semi-áridas, de modo que perfaz uma área de mais de um milhão de quilômetros quadrados, o que representa cerca de 75% da região nordeste ou pouco mais de 10% do território do Brasil (Silva et al., 2023; Martins et al., 2024; Manrique et al., 2024; Moraes et al., 2024). Por outro lado, além de Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia, o semi-árido ainda ocupa uma pequena parte do norte do estado de Minas Gerais, na região sudeste do Brasil.

A distribuição mensal das chuvas e o início do período chuvoso apresentam alta variabilidade espaço temporal, não podendo ser determinados de forma precisa. A seca periódica é caracterizada pela falta ou pela má distribuição das chuvas no período chuvoso, tornando a água insuficiente para a maioria das culturas agrícolas, o que torna a região uma das regiões semi-áridas mais quentes do globo. A temperatura média é mais ou menos constante ao longo do ano e relativamente uniforme em toda a região. As médias térmicas anuais oscilam entre 23° e 27°C. A amplitude térmica diária é próxima de 10°C, mantendo-se inalterada, tanto ao longo das latitudes, como em relação ao mar. Em virtude de sua proximidade do Equador e da pouca quantidade de nuvens na maior parte do ano, a luminosidade média anual é muito elevada, situando-se em torno de 2.800 horas de luz solar por ano (LOPES FILHO, 1995).

As atividades antrópicas desenvolvidas na NEB são praticadas de forma pouco sustentável, sendo a agropecuária uma atividade especialmente sensível no que diz respeito ao manejo do solo e retirada da vegetação nativa. Além dos fatores antrópicos, os biomas que compõem a NEB, a qual em quase sua totalidade é composta pelo bioma Caatinga, apresentam naturalmente

vulnerabilidade a degradação física e ambiental, que tem sido intensificada pelos efeitos das mudanças climáticas, a pesar da sua reconhecida resiliência.

A despeito da insuficiente atenção dada aos problemas sócio ambientais sistêmicos e perenes na NEB, cada vez mais são evidenciadas problemáticas ambientais, que intensificam a ocorrência de eventos extremos como, por exemplo, ciclos de seca prolongados e mais frequentes, inundações, processos erosivos e degradativos do solo, assim como alterações no microclima local, que são evidenciadas, principalmente, pelo aumento da temperatura do ar (Tar) e variações abruptas dos índices pluviométricos (Dantas et al., 2020; Silva et al., 2020; Rocha et al., 2021; Sales et al., 2023). Pode-se constatar que tais fatores ambientais e antrópicos contribuem para gerar importantes alterações na dinâmica de fluxos acoplados no Sistema contínuo Solo-Planta-Atmosfera (SSPA), causando mudanças nas componentes biofísicas do saldo de radiação (Rn) e balanço de energia, com potencial de aumentar o risco desertificação em áreas da NEB particularmente sensíveis a mudanças climáticas (Lobeto et al., 2021; Moraes et al., 2024).

Por ser a principal fonte de energia a ser repartida no aquecimento do solo e do ar, bem como no processo de evapotranspiração (ET) da vegetação nativa e das áreas irrigadas, o Rn desempenha papel fundamental nos processos biofísicos que envolvem as trocas de energia e massa no SSPA (Silva et al., 2005a; Wang e Davison, 2007; Giongo et al., 2010; Lopes et al., 2013; Souza et al., 2014; Souza et al., 2016; Silva et al., 2016; Querino, Lopes Júnior e Moura, 2022). Em regiões áridas e semiáridas o conhecimento dos fluxos radiativos de forma confiável se faz necessário para a criação e gerenciamento de planos de distribuição de água, já que a energia disponível à superfície para os processos de aquecimento do ar e do solo, fotossíntese e evaporação da água advém do saldo de radiação (Bezerra et al., 2021).

Segundo Santos et al. (2012), as alterações sofridas na cobertura vegetal de um bioma entre os períodos secos e chuvosos alteram o Rn, que é o principal fator de interação da superfície com a atmosfera. A energia total incidente afeta diretamente o Rn à superfície e isso ocorre de forma diferenciada, a depender de sua intensidade e das condições atmosféricas para absorção,

reflexão, transmitância, reemitância e espalhamento; além de fatores topográficos e diversos outros fatores ambientais e antrópicos (Santos et al., 2017).

Para Hendges, Follador e Andres (2020), uma das relações mais estreitas entre os fatores climáticos e as condições atmosféricas de tempo, encontra-se na relação existente entre a radiação solar incidente e o volume de vegetação local, uma vez que este funciona como um fator de equilíbrio entre a incidência dos raios solares sobre o solo e a umidade do ar, por meio da evapotranspiração (Oliveira, 2011).

Neste contexto, o comportamento espacial e temporal do Rn à superfície terrestre tem sido tema de diversos estudos (Debastiani et al., 2018; Hendges, Follador e Andres, 2020; Bezerra et al., 2021; Fernandes et al., 2021; Querino, Lopes Júnior e Moura 2022; Barbosa e Lopes 2022); no entanto, estudos destinados à região semiárida do Brasil, especialmente no ecossistema da Caatinga, ainda são insuficientes (Santos et al., 2017).

O Rn representa a energia disponível aos processos físicos e biológicos que ocorrem na superfície terrestre sendo definido como o balanço de radiação de todos os fluxos radiativos que chegam e saem de uma superfície (Klein et al., 1977; Weligepolage, 2005;) e divide-se entre Balanço de Ondas Curtas (BOC), que são parte da radiação solar refletida pela Terra e Balanço de Ondas Longas (BOL), que é o calor irradiado pela Terra sendo, portanto, indispensável sua estimativa para a implementação de modelos meteorológicos, agrometeorológicos e hidrológicos. É um componente fundamental para a estimativa do balanço de energia na superfície e para aplicações em atividades agrícolas (Cui et al., 2012; Aguilár et al., 2015; Debastiani et al., 2018).

Apesar da sua importância fundamental, o Rn não é usualmente medido em estações meteorológicas, uma vez que depende da natureza da superfície e, portanto, sofre grande influência do albedo e da temperatura da superfície (T_s), principalmente em áreas heterogêneas. Ademais, a grande parte das estações meteorológicas do Brasil não dispõem de saldo radiômetros, equipamentos usados para a medição do saldo de radiação, pelo fato de serem equipamentos de elevado custo financeiro e complexa manutenção e calibração dos sensores para que se tenha medições confiáveis; além do que, os saldo radiômetros fornecem medidas pontuais do Rn, sendo representativo

apenas de pequenas áreas homogêneas e não representa a variabilidade espacial requerida. Em virtude destes fatores, o Rn geralmente é estimado (Fietz e Fisch, 2009; Carmona et al., 2015), razão pela qual também o será neste trabalho.

No processo de estimativa do Rn, as técnicas de sensoriamento remoto veem se mostrando alternativas viáveis e confiáveis, nas quais o Rn pode ser computado de forma distribuída para todas as classes de uso da terra (Debastiani et al., 2018). Dentre as principais vantagens do sensoriamento remoto estão: (i) a abrangência de grandes coberturas espaciais; (ii) acesso a áreas remotas, que dificilmente se poderia ter acesso; (iii) facilidade na aquisição das imagens; (iv) capacidade de identificar e avaliar mudanças na estrutura, fisionomia e dinâmica da cobertura vegetal; (v) apresenta um caráter multiespectral, permitindo observar diversas escalas de radiação; (vi) possibilita acesso e a análise de componentes agrometeorológicos de forma mais simples e viável economicamente (Marques et al., 2017; Andrade et al., 2018).

As imagens produzidas a partir dos sensores Operational Land Imager (OLI) e Thermal Infrared Sensor (TIRS) a bordo do satélite Landsat 8, estão sendo amplamente utilizadas pela comunidade científica (Hendges, Follador e Andres, 2020; Debastiani et al., 2018; Silva et al., 2021; Fernandes et al., 2021; Querino, Lopes Júnior e Moura, 2022; Barbosa e Lopes, 2022), gerando resultados satisfatórios, nos quais o processamento das imagens pode ser feito por meio do algoritmo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), proposto por Bastiaanssen et al. (1998) para a estimativa do balanço radioativo.

Um dos fatores climáticos de grande significado para a região é a fortíssima evaporação que ocorre na região como um todo. Por conta disso, o bioma predominante é a Caatinga, com um clima que apresenta grande variabilidade espacial e temporal, caracterizado basicamente por duas estações que se destacam, uma seca e outra chuvosa, além de um baixo potencial hídrico. Entretanto, apesar das condições adversas, a região ainda apresenta uma cobertura vegetal diversificada, sendo predominante as espécies animais e vegetais adaptadas à seca ou estiagem prolongada. Ultimamente, tem crescido o interesse em desenvolver projetos de pesquisa, com a finalidade de monitorar tanto os processos físicos e ecológicos quanto os impactos antrópicos sobre o bioma Caatinga, especialmente no que se refere a

mudanças na cobertura vegetal e no uso e ocupação do solo, a ocorrência de desmatamentos e de queimadas, bem como os impactos destes fenômenos sobre o aumento da demanda hídrica. Mais recentemente, observa-se um aumento no interesse em pesquisar também as mudanças nos fluxos de energia, visando melhorar o conhecimento sobre as mudanças climáticas (Junior et al., 2023; Martins et al., 2024, Silva et al., 2024), no comportamento hidrológico, fluxos de calor, balanço de energia na superfície e outros parâmetros biofísicos, intrinsecamente ligados a evapotranspiração, sequestro de CO₂, índice de área foliar (IAF), fotossíntese.

O município de Garanhuns-PE está inserido na região Agreste de Pernambuco na qual, naturalmente, uma imensa parcela da produção agropecuária só pode ser obtida com o auxílio de técnicas de irrigação de modo a otimizar o uso dos escassos recursos hídricos e energéticos, cuja quantificação vem sendo alvo de estudos para um adequado cômputo do balanço hídrico e de energia. Para suprir certa deficiência na disponibilidade de dados ambientais necessários ao monitoramento das perdas evaporativas e para controlar os desperdícios e excessos de irrigação, faz-se necessário a obtenção precisa de informações do Rn.

Assim, a escolha do município de Garanhuns como área de estudo deste trabalho é fundamentada na necessidade existente acerca de informações das variáveis biofísicas, necessárias a elaboração e gestão de práticas agrícolas sustentáveis para a preservação dos seus recursos naturais, em especial os recursos hídricos, dada a

importância deste município para o desenvolvimento socioeconômico da região agreste de Pernambuco. Visto que possíveis alterações nas variáveis biofísicas do Rn podem ser indicadores do uso inadequado dos recursos ambientais, com destaque para o uso e manejo da cobertura do solo (afetados pela devastação da vegetação nativa), podendo causar variações locais nos índices de vegetação e de temperatura, gerando desconforto térmico.

Partindo da hipótese de que a degradação da vegetação nativa de uma região gera alterações na relação Superfície – Atmosfera, acarretando modificações das variáveis biofísicas do Rn, esta pesquisa teve como objetivo estimar e avaliar a dinâmica dos componentes do Rn à superfície, por meio de imagens orbitais do satélite Landsat 8 para uma área composta por fragmentos de vegetação nativa no município de Garanhuns-PE.

Material é métodos

Caracterização da área de estudo

Garanhuns é um município do estado de Pernambuco, localizado na mesoregião do agreste meridional, nas coordenadas 08° 53' 25'' de latitudes S e 36° 29' 34'' de longitude W, abrangendo uma área territorial total de 458, 552 km², distante 230 km da capital Recife (IBGE, 2020), conforme ilustrado na Figura 1. Garanhuns é o nono município mais populoso do Estado, com uma população estimada em aproximadamente 142.506 habitantes (IBGE, 2022).

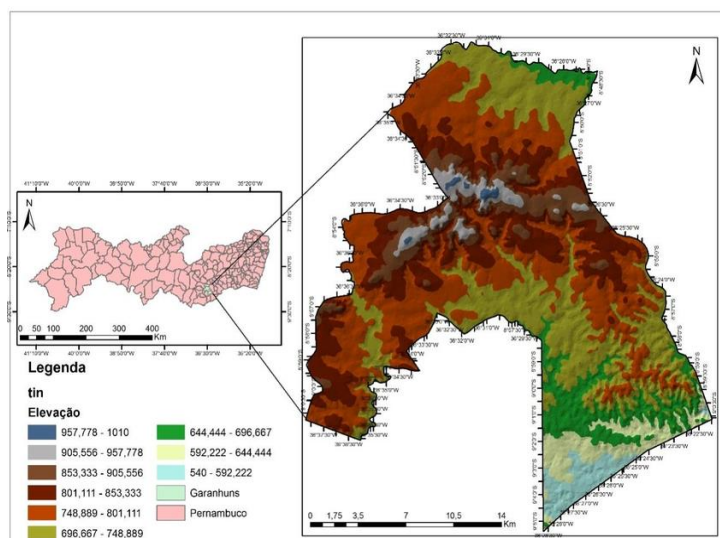


Figura 1. Mapa da localização do município de Garanhuns-PE, imagem Landsat 8.

Fonte: Adaptado de (Costa et al., 2015).

No que diz respeito às características físico naturais, Garanhuns possui uma estrutura geológica de terrenos predominantemente metamórficos, que sofreram falhamentos e dobramentos, cuja compartimentação do relevo é marcada pela presença do Planalto da Borborema (Barbosa et al., 2016).

O clima de Garanhuns é definido como tropical quente sub úmido seco, referentes as tipologias climáticas As', BShs' e Cs'a (quente e úmido com chuvas de outono-inverno, clima seco de baixas latitudes com chuvas de outono-inverno e mesotérmicos com verões quentes e chuvas de outono-inverno, respectivamente) segundo a classificação de Koppén (Lins, 1989). As temperaturas médias anuais variam entre 20,1°C e 22,0 °C, enquanto a pluviosidade varia entre 751mm e 1000mm anuais. Encontram-se altitudes entre 601m e 800 m em algumas áreas e outras entre 801m e 1000 m (Barbosa et al., 2016; Lopes et al., 2017).

Os recursos hídricos são integrados à unidade de planejamento Mundaú de bacias hidrográficas G14, referente a pequenos rios interiores, composta pelos rios Mundaú e tributários (Canhoto, Inhaúmas, Riacho do Mel, Corrente, Conceição e Salgado (Andrade, 2003, 2009; CONDEPE/FIDEM, 2011).

O local escolhido para a coleta de dados está localizado no município de Garanhuns-PE, nas proximidades da Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE), cujas coordenadas geográficas são, respectivamente: latitude 08° 54' 45" S e longitude 36° 29' 45" W, na altitude de 845 m. A área de estudo é composta por uma vegetação fragmentada, constituída por três tipologias vegetais características da região: floresta subperenifólia, Caatinga hipoxerófila e floresta subcaducifólia (Barbosa et al., 2016; Lopes et al., 2017). A Figura 2 mostra a área de estudo, numa vista panorâmica.



Figura 2. Vista panorâmica da área estudada e seu entorno, com destaque para a UFAPE.

Dados meteorológicos de superfície

Foram coletados dados meteorológicos de superfície necessários ao processamento das imagens do satélite Landsat 8, tais como: temperatura do ar (T_{ar} , °C), umidade relativa do ar

(UR, %), pressão atmosférica do ar (P_0 , Pa), indispensáveis a calibração e correção das imagens orbitais (Tabela 1).

Tabela 1. Dados meteorológicos de superfície da estação meteorológica automática do INMET localizada em Garanhuns-PE.

Data	T _a (°C)	UR (%)	P ₀ (Pa)	e _a (kPa)
28/01/2020	21,80	92,00	17,20	2,61
29/02/2020	19,80	97,00	43,00	2,30
01/04/2020	21,90	83,80	51,30	2,63
03/05/2020	27,60	59,40	9,92	3,69
20/06/2020	26,80	91,80	9,73	2,43
22/07/2020	22,30	79,90	32,85	2,69
23/08/2020	24,10	66,00	9,90	3,01
24/09/2020	24,50	63,60	11,59	3,07
26/10/2020	27,20	52,00	13,56	3,06
11/11/2020	23,10	79,43	28,26	2,83
13/12/2020	29,80	62,00	37,26	4,19
Estatística				
Máximo	29,80	97,00	51,30	4,19
Mínimo	19,80	52,00	9,73	2,30
Média	24,45	75,18	24,05	2,96
DP	2,91	14,55	14,42	0,53
CV (%)	11,92	19,35	60,00	17,98

Fonte. INMET (2020).

Os dados foram registrados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) através da estação meteorológica automática de Garanhuns.

Processamento das imagens

Para realização desta pesquisa utilizou-se onze imagens oriundas dos sensores (OLI) e (TIRS), a bordo do satélite Landsat 8. As imagens obtidas pelo Landsat 8 possuem resolução espacial de 30 m para as bandas refletivas (1 a 7), de 100 m

para as bandas termais (10 e 11), enquanto a banda 8 (pancromática) apresenta resolução de 15 m (NASA, 2020). As imagens foram obtidas mensalmente no decorrer do ano de 2020, exceto para o mês de março, em virtude do comprometimento da qualidade da imagem, pela grande presença de nuvens. Os parâmetros necessários a calibração do algoritmo SEBAL para o período estudado podem ser visualizados na (Tabela 2).

Tabela 2. Principais informações dos metadados das imagens orbitais do satélite Landsat 8.

Data	Hora da passagem do satélite	Ângulo azimutal	Ângulo de elevação solar	Distância terra-sol
28/01/2020	12h 35 min	31,8697°	58,1302°	1,0292
29/02/2020	12h 35 min	30,9566°	59,0433°	1,0169
01/04/2020	12h 35 min	57,9367°	32,0632°	0,9995
03/05/2020	12h 35 min	36,6980°	53,3019°	0,9823
20/06/2020	12h 35 min	42,6235°	47,3764°	0,9675
22/07/2020	12h 35 min	41,0991°	48,9008°	0,9632
23/08/2020	12h 35 min	34,8187°	55,1812°	0,9800
24/09/2020	12h 35 min	27,1230°	62,8769°	0,9967
26/10/2020	12h 35 min	23,9650°	66,0349°	1,0144
11/11/2020	12h 35 min	25,0701°	64,9298°	1,0219
13/12/2020	12h 35 min	29,3809°	60,6190°	1,0315

Fonte: Metadados das imagens Landsat 8.

As imagens foram processadas seguindo-se as etapas do algoritmo SEBAL conforme a metodologia proposta por Silva et al., 2016. Inicialmente, obteve-se as refletâncias

monocromáticas das bandas (de 2 a 7) através da Eq.1, proposta por Chander & Markham (2003):

$$r_b = \frac{(Add_{ref,b} + Mult_{ref,b} ND_b)}{\cos Z_d r} \quad (1)$$

Onde $Add_{ref,b}$ e $Mult_{ref,b}$ - representam os termos aditivos e multiplicativos da refletância de cada banda, extraídos dos metadados de cada imagem (grupo = radiometric_rescaling), bem como o ângulo zenital do Sol - Z ; ND_b - intensidade de cada pixel e banda (valor entre 0 e 65365); b - subscrito representando cada uma das seis faixas do OLI; e dr - corresponde à correção da excentricidade da órbita terrestre, dada pela Eq.2:

$$d_r = \left(\frac{1}{d_{ES}}\right)^2 \quad (2)$$

Onde d_{ES} é a distância Terra-Sol (unidade astronômica) no dia de cada imagem, também extraída dos metadados.

Em seguida, foi computado o albedo planetário (α_{toa}), obtido pela combinação linear das refletâncias monocromáticas (r_b) das faixas refletivas (de 2 a 7) do OLI - Landsat 8 (Eq.1), de acordo com a seguinte equação:

$$\alpha_{toa} = r_2p_2 + r_3p_3 + r_4p_4 + r_5p_5 + r_6p_6 + r_7p_7 \quad (3)$$

Para a determinação de cada peso (p_b), é necessário estimar a constante solar (K_b , $Wm^{-2} \mu m^{-1}$) associada a cada uma das bandas refletivas do OLI e, para isso, a Eq. 4 foi utilizada de acordo com Chander e Markham (2003).

$$p_b = \frac{\pi L_b}{r_b \cos Z d_r} \quad (4)$$

Onde L_b ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) é a radiância de cada pixel da banda- b e os demais termos já foram descritos.

Para a determinação da L_b de cada pixel e banda, foram utilizados os termos aditivos ($Add_{rad,b}$) e multiplicativos ($Mult_{rad,b}$) relativos à radiância, também extraídos dos metadados de cada imagem, calculados de acordo com a Eq.5:

$$L_b = Add_{rad,b} + Mult_{rad,b} ND_b \quad (5)$$

O valor de cada peso (p_b) de cada banda espectral foi obtido pela razão entre os K_b dessa faixa e a soma de todos os valores de K_b utilizados no cálculo do albedo, semelhante ao que foi feito no SEBAL e no METRIC (Bastiaanssen et al., 1998; Allen et al., 2007; Tasumi et al., 2008).

Feito isso, obteve-se o albedo da superfície corrigido α , mediante a Eq.6:

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{atm}}{\tau_{sw}^2} \quad (6)$$

Onde, α_{toa} é o albedo planetário, α_{atm} é a refletância da própria atmosfera, que varia entre 0,025 e 0,04, mas que em várias aplicações recomenda-se o valor de 0,03 (Allen et al., 2002) e τ_{sw} é a transmissividade atmosférica no domínio da radiação solar, conforme a Eq. 7 (Allen et al., 2002, 2007).

$$\tau_{sw} = A + B \cdot \exp \left[\frac{-0,00146 \times P_0}{K_t \times \cos \theta} - 0,75 \left(\frac{w}{\cos \theta} \right)^{0,4} \right] \quad (7)$$

onde $A = 0,35$, $B = 0,637$, P_0 é a pressão atmosférica instantânea em (Pa), K_t é o coeficiente de turbidez da atmosfera, com ($K_t = 1$) para um dia com céu claro (Allen et al., 2002), W é a água precipitável (mm), estimada a partir da Eq.8 (Garrison & Adler, 1990).

$$w = 0,14 \times e_a \times P_0 + 2,1 \quad (8)$$

onde e_a (kPa) é a pressão real de vapor d'água atmosférico, estimada a partir da Eq.9:

$$e_a = \frac{UR \times e_s}{100} \quad (9)$$

onde UR é a umidade relativa do ar instantânea, e_s (kPa) a pressão de saturação do vapor d'água, estimada a partir da Eq. 10:

$$e_s = 0,6108 \times \exp \left(\frac{17,27 \times T_{ar}}{237,3 + T_{ar}} \right) \quad (10)$$

com T_{ar} ($^{\circ}C$) sendo a temperatura do ar instantânea, no momento da passagem do satélite.

Feito isto, a partir das bandas refletivas foram determinados os índices de vegetação: Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI); Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (SAVI) e o Índice de Área Foliar (IAF) através das Eqs. 11, 12 e 13, descritas a seguir:

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_5}{\rho_4 + \rho_5} \quad (11)$$

$$SAVI = \frac{(1+L) \cdot \rho_4 - \rho_5}{L + \rho_4 + \rho_5} \quad (12)$$

$$IAF = \frac{-\ln \frac{0,69 - SAVI}{0,59}}{0,91} \quad (13)$$

Onde ρ_4 e ρ_5 são as reflectâncias das bandas do infravermelho próximo e vermelho, L é uma função do tipo de solo. Em seguida, calculou-se a emissividade da banda termal ϵ_{NB} e a emissividade

no domínio da banda larga ε_0 dadas pelas Eqs. 14 e 15, simultaneamente:

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033IAF \quad (14)$$

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,011IAF \quad (15)$$

Após o cálculo das emissividades, obteve-se a temperatura da superfície conforme Eq. 16:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} \cdot K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (16)$$

onde K_1 e K_2 são as constantes de calibração do sensor TIRS (banda termal 10), dadas por: $K_1 = 774,89$ K e $K_2 = 1321,08$ K e L_λ é a radiância espectral.

De posse dos dados de temperatura, obteve-se a Radiação de Ondas Longas Emitida (ROL,emi), Radiação de Ondas Curtas Incidente (Rsol,inc) e a Radiação de Ondas Longas Atmosférica (ROL,atm), conforme as Eqs. 17, 19 e 19, respectivamente:

No decorrer do ano de 2020 o NDVI apresentou alta variabilidade mensal dada pelo CV superior a 512%. É importante destacar que a maioria dos valores negativos apresentados neste estudo, podem ser decorrentes da presença de corpos hídricos, já os valores próximos de zero e/ou nulos indicam áreas com pouca vegetação e/ou solo exposto, enquanto que os altos valores são indicadores da presença de vegetação verde densa na área.

Os resultados obtidos para o NDVI refletem as características da vegetação da área de estudo, isto é, uma vegetação fragmentada e

$$ROL_{emi} = \varepsilon_{NB} \cdot \sigma \cdot T \quad (17)$$

$$Rsol_{inc} = S \cdot \cos Z \cdot d_r \cdot \tau_{sw} \quad (18)$$

$$ROL_{atm} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_{ar}^4 \quad (19)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$) e T_{ar} é a temperatura do ar em (K). Com os dados das radiações calculou-se o saldo de radiação R_n (Wm^{-2}) utilizando-se a Eq. 20:

$$R_n = R_{sol,inc}(1 - \alpha) - ROL_{emi} + \varepsilon_0 \cdot ROL_{atm} \quad (20)$$

Resultados e discussão

Os índices de vegetação aqui computados são mostrados na Tabela 3. O NDVI apresentou um valor máximo de 0,27 e valor mínimo -0,29, para os dias 29/02/2020 e 03/05/20, respectivamente.

bastante aberta, composta por espécies vegetais rasteiras e cipós, as quais apresentam alta variabilidade, com a diminuição do volume de precipitação e aumento dos fluxos radioativos. Estas características contribuem para uma maior incidência dos fluxos radiativos. Também é importante destacar que, embora a vegetação seja composta por três tipos de florestas regionais, as espécies predominantes são da vegetação de Caatinga, a qual apresenta naturalmente fatores condicionantes a sua degradação física e ambiental e alta sensibilidade às variações pluviométricas (Antongiovanni et al., 2020).

Tabela 3. Estatística dos índices de vegetação.

Parâmetros			
Data	NDVI	SAVI	IAF
28/01/2020	-0,0428	0,00058	-0,1720
29/02/2020	0,2753	0,00053	-0,1712
01/04/2020	0,0910	-0,00017	-0,1723
03/05/2020	-0,2891	0,00039	-0,1714
20/06/2020	-0,2099	0,00029	-0,1716
22/07/2020	0,0504	-0,00010	-0,1722
23/08/2020	-0,2795	0,00037	-0,1715
24/09/2020	-0,1872	0,00024	-0,1717
26/10/2020	-0,0168	0,00002	-0,1720
11/11/2020	0,0804	-0,00012	-0,1722
13/12/2020	0,1479	-0,00026	-0,1725
Estatística			
Máximo	0,2753	0,0006	-0,1712
Mínimo	-0,2891	-0,0003	-0,1725
Média	0,0346	0,0002	0,1719
DP	0,1770	0,0003	0,0004
CV (%)	512,03	177,05	0,2315

O SAVI variou entre -1 e 1, com valor médio próximo a zero e alta variabilidade anual (CV de 177%). O qual constitui-se um bom indicador da biomassa de cada pixel nos mapas temáticos (Allen et al., 2002). O IAF apresentou somente valores negativos para o período estudado, com baixa variabilidade anual (CV de 0,23%). Fator este que está diretamente relacionado a uma tipologia de baixo porte da área estudada.

A variação sazonal da densidade da vegetação está diretamente associada ao comportamento dos elementos meteorológicos, principalmente, em relação à precipitação (Liu et al., 1992). Sendo assim, a alta variabilidade dos índices de vegetação aqui apresentada está intimamente relacionada a variação pluviométrica da região de estudo, e a presença das atividades antrópicas. Os valores encontrados para os índices de vegetação estão em concordância com os obtidos por (Silva et al., 2019; Barbosa e Lopes, 2022) para áreas de vegetação Caatinga.

Os valores obtidos para albedo conforme (Tabela 4), são coerentes e refletem a ligação proporcional entre o aumento das áreas de solo exposto e a elevação do albedo. O valor mínimo computado foi de 17% e o valor máximo de 23% para os dias 20/06/2020 e 01/04/2020, respectivamente, com média anual de 19,43%. O albedo apresentou um comportamento linear para o período estudado, com variação anual baixa, dada pelo (CV de 12%) aproximadamente. Em uma mesma área, os valores de albedo variam

continuamente no tempo e de maneira distinta para cada tipo de cobertura do solo, em função do desenvolvimento das culturas e da fenologia da vegetação natural (Santos et al., 2017). Os valores aqui encontrados para o albedo estão em concordância com os obtidos por (Santos et al., 2017; Silva et al., 2021), em um estudo para áreas vegetadas com Caatinga, que obtiveram valores médios do albedo variando entre 10% a 26%.

Contudo, foram inferiores aos valores computados por Luz e Galvêncio (2022), os quais obtiveram valores de albedo variando de 0,38 a 0,48, por meio do geoprocessamento de imagens capturadas por drones no semiárido Pernambucano. Os autores atribuíram os altos valores de α , ao fato da área estudada apresentar pouca cobertura vegetal que interfira na diminuição do albedo.

Embora a região aqui estudada apresente clima tropical, os valores apresentados para o albedo equipararam-se com os valores encontrados na literatura para regiões semiáridas do estado de Pernambuco, conforme estudos apresentados por (Silva et al., 2021, Silva et al., 2019), para o sertão-PE, para os municípios de Arco-Verde e Petrolina, respectivamente. Isto reflete o grau de degradação da vegetação e do solo da área estudada. Visto que, o desmatamento aumenta a reflectância da superfície (Fernandes et al., 2021). Ademais, podemos citar a proximidade com a área urbana do município de Garanhuns, o que pode ocasionar ilhas de calor.

Tabela 4. Estatísticas dos parâmetros biofísicos das emissividades, T_s e albedo.

Parâmetros				
Data	ϵ_0	ϵ_{NB}	T_s (°C)	Albedo- α
28/01/2020	0,9900	0,9850	16,94	0,1824
29/02/2020	0,9643	0,9482	30,5	0,2148
01/04/2020	0,9643	0,9482	35,94	0,2303
03/05/2020	0,9900	0,9850	15,25	0,1766
20/06/2020	0,9643	0,9482	8,71	0,1714
22/07/2020	0,9643	0,9483	29,27	0,2125
23/08/2020	0,9900	0,9850	13,69	0,1725
24/09/2020	0,9900	0,9850	16,56	0,1743
26/10/2020	0,9900	0,9850	22,01	0,1803
11/11/2020	0,9643	0,9483	26,92	0,1986
13/12/2020	0,9643	0,9483	35,61	0,2266
Estatística				
Máximo	0,9900	0,9850	35,94	0,2303
Mínimo	0,9643	0,9482	8,71	0,1714
Média	0,9760	0,9650	20,97	0,1946
DP	0,0134	0,0192	8,88	0,0227
CV (%)	1,3752	1,9889	42,33	11,6735

Os valores do albedo aqui computados são coerentes e refletem a ligação proporcional entre o aumento das áreas de solo exposto e a elevação do albedo, provocada pelos eventos de seca e escassez hídrica e, ainda, pelo manejo inadequado do uso do solo. O albedo da superfície no solo exerce um controle na quantidade de energia de onda curta absorvida pela superfície da terra, consequentemente, passa a ser um importante modulador do balanço de radiação à superfície (Arraes et al., 2012).

A temperatura da superfície (T_s) apresentou alta variabilidade anual (CV de 42%), com valor mínimo de 8,71°C e valor máximo de 35,94°C, com média anual de 21°C aproximadamente. Observa-se que as mudanças de temperatura não seguiram um padrão linear de aumento ou diminuição, muito menos um comportamento sazonal. Os valores da T_s foram inferiores aos computados por Barbosa e Lopes (2022) no sertão – PE, que obtiveram valores de T_s variando entre 20°C a 46 °C. Silva et al., (2021), também obtiveram valores de T_s superiores aos valores aqui computados com uma média que variou de 32 a 38 °C, atingindo valores máximos de 46 °C, com CV baixo que variou de 9 a 12%. A alta variabilidade anual aqui detectada para a temperatura está diretamente relacionada as características intrínsecas do clima de Garanhuns, o qual apresenta mudanças abruptas de temperatura no período de 24 h, por exemplo sua temperatura pode variar de 28°C no período de meio dia á 14 graus no início da noite. Contudo, é evidente que não podemos descartar que as alterações sofridas pela vegetação nativa, assim como os impactos causados pela urbanização e atividades antrópicas, têm contribuído muito para o aumento da temperatura da cidade, a exemplo o valor atípico de 35°C aqui computado.

A T_s está diretamente relacionada a distribuição de radiação solar na vegetação, onde as áreas com maior cobertura vegetal interceptam maiores quantidades de radiação (Andrade et al.,

2014). Os valores máximos aqui computados para a T_s (superior a 30°C) foram diretamente proporcionais aos valores máximos computados para o α (superior a 20%). Assim, é possível inferir que a remoção e degradação da vegetação nativa da região implicou em um aumento da T_s e do α , que podem estar causando a diminuição da disponibilidade de energia para a superfície.

Para Biudes et al. (2015), a elevação da T_s pode causar desconforto térmico, devido ao fato de que a ausência de vegetação origina uma menor absorção de radiação de ondas curtas (OC) e maior direcionamento dessa energia para a forma de calor sensível, responsável pelo aquecimento do ar/superfície.

A Tabela 5 destaca os parâmetros estatísticos e a variabilidade quantitativa do saldo de radiação à superfície para a região subtropical de Garanhuns-PE.. O R_n apresentou comportamento sazonal, cujos valores mínimos concentraram-se no trimestre de junho a agosto, correspondente ao período de inverno para o município de Garanhuns, onde estão registradas as menores temperaturas do ano. O valor mínimo obtido foi de 307,25 Wm⁻² para o dia 20/06/2020. Já os valores máximos para o R_n foram obtidos no quadrimestre de outubro a janeiro (estação de verão), com valor máximo de 708,86 Wm⁻² para o dia 28/01/2020, tendo maior energia disponível a ser repartida pelos processos do balanço de energia. Não foram observadas alta variabilidade anual para o R_n dada pelo CV inferior 18%.

O valor médio anual aqui computado para R_n foi de 627,66 Wm⁻², valores semelhantes foram obtidos por Silva et al. (2021) para a região semiárida de Pernambuco. Também ficou muito próximo do valor médio de (541,62 Wm⁻²) obtido por Barbosa e Lopes (2022) para o município de Ibimirim – PE. Contudo, foi inferior aos valores médios computados por Silva et al. (2017), para áreas vegetadas com Caatinga no semiárido da Paraíba.

Tabela 5: Estatística dos fluxos radioativos.

Parâmetros				
Data	Rol,emi (Wm ⁻²)	Rol,atm (Wm ⁻²)	Rsol,inc (Wm ⁻²)	Rn (Wm ⁻²)
28/01/2020	395,50	316,88	969,03	708,86
29/02/2020	303,65	317,65	890,96	543,66
01/04/2020	490,78	330,20	835,80	465,63
03/05/2020	386,42	340,08	887,48	679,28
20/06/2020	339,38	307,25	814,38	626,79
22/07/2020	449,72	328,09	750,18	452,12
23/08/2020	378,06	322,67	917,41	698,94
24/09/2020	393,46	325,26	1006,16	757,69
26/10/2020	423,88	339,88	1033,62	758,11
11/11/2020	435,93	327,92	983,44	663,09
13/12/2020	488,68	366,17	894,17	550,09
Estatística				
Máximo	490,78	366,17	1033,62	758,11
Mínimo	303,65	307,25	750,18	452,12
Média	407,77	329,28	907,52	627,66
DP	57,85	15,58	86,43	109,38
CV (%)	14,19	4,732	9,52	17,43

Conforme mostra a Figura 3, a radiação de onda longa atmosférica apresentou um comportamento linear, onde não foram constatadas

variações abruptas em sua incidência, conforme o CV inferior a 5%, com média anual de 329 Wm⁻².

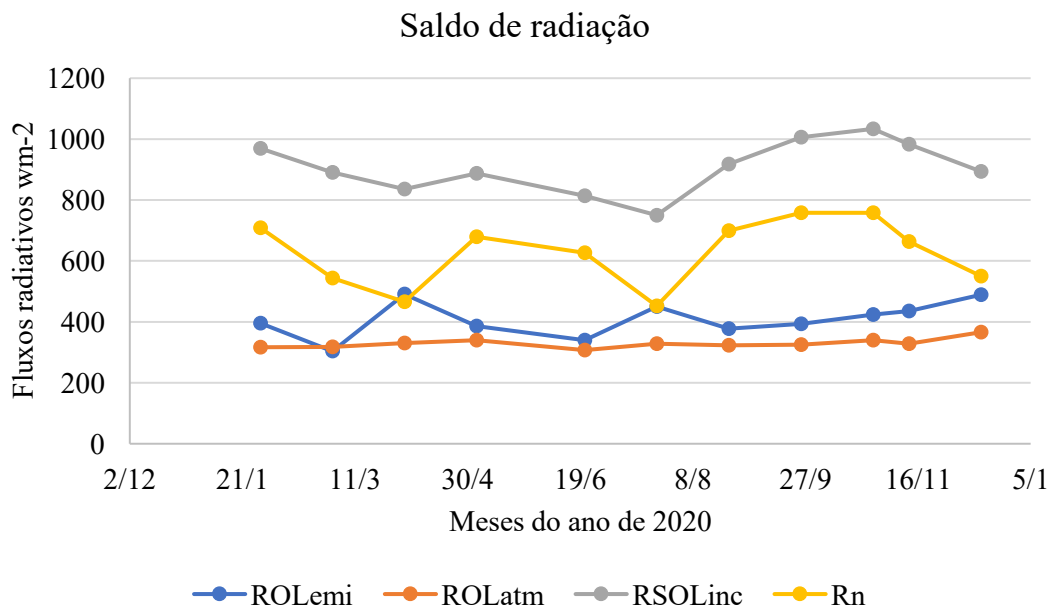


Figura 3. Gráfico da tabela 5: Fluxos radiativos.

A radiação solar emitida também seguiu praticamente o mesmo padrão de comportamento do Rn, CV inferior a 15%, com picos registrados nos meses de abril, julho e dezembro, aproximadamente 490 Wm⁻². A radiação solar incidente foi o fluxo que atingiu valores superiores a 1000 Wm⁻²,

com média mensal superior a 900 Wm⁻² e baixa variabilidade mensal dada pelo CV inferior a 10%, contribuindo diretamente para o aumento da Ts, uma vez que, dada a fragmentação da vegetação da área de estudo, a mesma pouco interfere na interceptação dos raios solares.

Conclusões

Por meio do cômputo do saldo de radiação (R_n) para o município de Garanhuns, foi possível inferir uma alta variabilidade sazonal das variáveis biofísicas, principalmente, os índices de vegetação (NDVI, IAF e SAVI) e T_s .

Os valores dos índices de vegetação, em especial o NDVI, foram inferiores aos valores médios encontrados na literatura, evidenciando os efeitos da degradação da vegetação na relação Superfície-Atmosfera, fator este que está diretamente relacionado ao aumento da temperatura da superfície e albedo.

As alterações aqui observadas nos valores e relações existentes entre variáveis biofísicas do saldo de radiação da área de estudo, constituem a resposta do meio ambiente, a devastação da vegetação nativa, especialmente. Essas modificações, podem causar sérias alterações no ciclo hidrológico, devido as alterações oriundas do balanço de energia, assim como mudanças no microclima local, as quais podem ser intensificadas a longo prazo.

Por meio do uso de imagens orbitais do satélite Landsat 8, foi possível compreender a variação temporal dos componentes do balanço de radiação a nível local. Porém, faz-se necessário a realização de mais estudos sobre o comportamento das variáveis biofísicas da região estudada, para com isso corroborar os resultados aqui encontrados e promover ações de mitigações necessárias a conservação ambiental dos recursos naturais de Garanhuns.

Referências

- Antongiovanni, M., Venticinque, E. M., Matsu-moto, M., & Fonseca, C. R. (2020). Chronic anthropogenic disturbance on Caatinga dry forest fragments. *Journal of Applied Ecology*, 57(10), 2064-2074. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13686>.
- Andrade, A., Moura, M. A. L., Santos, A. B. D., Carneiro, R. G., & Silva Junior, R. S. D. (2014). Incident and reflected Photosynthetically Active Radiation above and below canopy in the Mata Atlantica forest in Coruripe, Alagoas. *Volume 29, Número 1, Pages. 68-79*.
- Andrade, M. C. D. (2009). Geografia de Pernambuco: Ambiente e sociedade. *João Pessoa-PB. Editora Grafset, 35p*.
- Andrade, M. C. D. O. (2003). Atlas escolar de Pernambuco. *Grafset, João Pessoa*.
- Andrade, R. G., Hott, M. C., & de Magalhães Junior, W. C. P. (2018). Estimativa da evapotranspiração em áreas de pastagens usando algoritmo SEBAL e imagens Landsat 5-TM. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 1(2), 362-372.
- Aguilar, J. L. C., Gentle, A. R., Smith, G. B., & Chen, D. (2015). A method to measure total atmospheric long-wave down-welling radiation using a low cost infrared thermometer tilted to the vertical. *Energy*, 81, 233-244.
- 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(4), 380-394.
- Allen, R. G.; Tasumi, M.; Trezza, R.; Bastiaanssen, W. G. M. (2002). SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land) – Advance Training and Users Manual–Idaho Implementation, version 1.0, 98p.
- Arraes, F. D. D., de Andrade, E. M., & da Silva, B. B. (2012). Dinâmica do balanço de energia sobre o açude Orós e suas adjacências. *Revista Caatinga*, 25(1), 119-127.
- Barbosa, L. D. S. A., & Lopes, P. M. O. (2022). Spatio-temporal variation of evapotranspiration around the Engenheiro Francisco Saboia Reservoir, Ibimirim-PE. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* v, 12(2), 28-35. <https://doi.org/10.29150/22372202.2022.252721>.
- Barbosa, V. V., Souza, W. M., Galvêncio, J. D., & Costa, V. S. O. (2016). Análise da variabilidade climática do município de Garanhuns, Pernambuco–Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(2), 353-367.
- Bastiaanssen, W. G., Menenti, M., Feddes, R. A., & Holtslag, A. A. M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology*, 212, 198-212.
- Bezerra, H. N., Bezerra, J. M., Sobrinho, J. E., Silva, W. B., & Rêgo, A. T. A. (2021). Avaliação espaço-temporal do saldo de radiação para área heterogênea em região semiárida. *Revista de Geografia*, 38(3), 18–36. <https://doi.org/10.51359/22386211.2021.244692>.
- Biudes, M. S., Vourlitis, G. L., Machado, N. G., de Arruda, P. H. Z., Neves, G. A. R., de Almeida Lobo, F., & de Souza Nogueira, J. (2015). Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil. *Agricultural and forest Meteorology*, 202, 112-124. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.12.008>.

- Carmona, F., Rivas, R., & Caselles, V. (2015). Development of a general model to estimate the instantaneous, daily, and daytime net radiation with satellite data on clear-sky days. *Remote Sensing of Environment*, 171, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.10.003>.
- CONDEPE/FIDEM. Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco, 2011. Pernambuco em mapas. Recife.
- Costa, S. O. de S., Ramos, R. P. da S., Deus, R. A. da S. G. de, Silva, S. de A., & Gomes, D. D. M. (2015). Physiographic characterization of the municipality of Garanhuns –PE. *Revista Eletrônica Em Gestão, Educação E Tecnologia Ambiental*, 19(2), 913–922. <https://doi.org/10.5902/2236117015549>.
- Chander, G., & Markham, B. (2003). Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 41(11), 2674-2677.
- Cui, Y., Liu, J., Hu, Y., Wang, J., & Kuang, W. (2012). Modeling the radiation balance of different urban underlying surfaces. *Chinese Science Bulletin*, 57, 1046-1054.
- DantaS, R. T., Marengo, J. A., Ambrizzi, T., & Torres, R. R. (2020). Climate change scenarios over Northeast Brazil for the 21st century using the Eta regional climate model at 5-km resolution. *Journal of Climate*, 33(8), 3063-3082.
- Debastiani, A. B., Sá, E. A. S., Neto, R. P. M., & Schimalski, M. B. (2018). Mapeamento do saldo de radiação no Parque Nacional de São Joaquim–SC. *Advances in Forestry Science*, 5(3), 363-367. DOI: 10.34062/afs.v5i3.5012.
- Fernandes, G. S. T., Lopes, P. M. O., de Melo, C. G. B., Lima, R. L. F., dos Santos, A., & de Oliveira Silva, D. A. (2021). Balanço de radiação em áreas de expansão agrícola no Sudoeste do Piauí. *Revista de Geociências do Nordeste*, 7(1), 13-20. <https://doi.org/10.21680/24473359.2021v7n1ID19704>.
- Fietz, C. R., & Fisch, G. F. (2009). Avaliação de modelos de estimativa do saldo de radiação e do método de Priestley-Taylor para a região de Dourados, MS. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 13, 449-453.
- Freire, J. L. M., Lima, J. R. A., & Cavalcanti, E. P. (2011). Análise de aspectos meteorológicos sobre o Nordeste do Brasil em anos de El Niño e La Niña. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 3(1), 429-444.
- Garrison, J. D., & Adler, G. P. (1990). Estimation of precipitable water over the United States for application to the division of solar radiation into its direct and diffuse components. *Solar Energy*, 44(4), 225-241.
- GIONGO, P. R., Moura, G. B. D. A., Silva, B. B., Rocha, H. R. D., de Medeiros, S. R., & Nazareno, A. C. (2010). Albedo à superfície a partir de imagens Landsat 5 em áreas de cana-de-açúcar e cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14, 279-287.
- Hendges, E. R., Follador, F. A. C., & Andres, J. (2022). Correlation study between land use and covering with surface temperature registered by Landsat 8 satellite. *Sociedade & Natureza*, 32, 338-347. <https://doi.org/10.14393/SN-v32-2020-42828>.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Censo demográfico 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/garanhuns.html>. Acesso: 15 maio 2023.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Área territorial 2020. Disponível: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pe/garanhuns.html>. Acesso: 15 maio 2021.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia (Download de dados da estação meteorológica), 2020. Disponível em: < <https://mapas.inmet.gov.br/>>. Acesso em 01 janeiro de 2020.
- Júnior, J. M. L., Querino, C. A. S., de Andrade, A. M. D., Carneiro, R. G., & Moura, M. A. L. (2023). Balanço de radiação da cana-de-açúcar na região de tabuleiros costeiros de Alagoas, Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 32, 83-101. doi:<https://doi.org/10.55761/ab-clima.v32i19.15785>.
- KLEIN, S. A. (1977). Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. *Solar energy*, 19(4), 325-329.
- Lins, R.C., 1989. Áreas de exceção do Agreste Pernambucano. SUDENE/PSU/SER, Recife. (Estudos Regionais, 20).
- Liu, W. T., Massambani, O., & Festa, M. (1992). Normalized difference vegetation index for the South American continent used as a climatic variability indicator. In: *Proceedings of the twenty-fourth international symposium on remote sensing of environment. Volume 2*.
- Lobeto, H.; Menendez, M. & Losada, I. 2021. Future behavior of wind wave extremes due to climate change. *Scientific Reports*, 11:7869. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86524-4>.
- Lopes, P. M., Valeriano, D. M., Silva, B. B. D., Moura, G. B. D. A., & Silva, A. O. D. (2013). Simulação do saldo de radiação na Serra da Mantiqueira. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17, 780-789.
- da Luz, G. G., & Galvinctio, J. D. (2022). Balanço de radiação com imagens captadas com Drones.

Revista Brasileira de Geografia Física, 15(02), 1169-1179.

- Manrique, Diego Rosyur Castro; Lopes, Fabrício Marcos Oliveira; Nascimento, Cristina Rodrigues; Ribeiro, Ebersson Pessoa and Anderson Santos da Silva. Phenological Monitoring of Irrigated Sugarcane Using Google Earth Engine, Time Series, and TIMESAT in the Brazilian Semi-Arid. *AgriEngineering* 2024, 6, 3799–3822. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6040217>.
- Marengo, J. A. (2008). Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. *Parcerias estratégicas*, 27, 149-175.
- MARQUES, H. O., Biudes, M. S., Pavão, V. M., Machado, N. G., Querino, C. A. S., & Danelichen, V. H. D. M(2017). Estimated net radiation in an Amazon–Cerrado transition forest by Landsat 5 TM. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(4), 046020-046020. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.046020>.
- Martins, Kyegla Beatriz da Silva; Souto, Patrícia Carneiro; Souto, Jacob Silva; Leite, Arliston Pereira; Monteiro, Mikaella Meira; de Moraes, Gerlanny Vieira; de Souza, Jaltier Bezerra. Reflectância, variação da temperatura e conteúdo de água do solo em caatinga degradada na Paraíba. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto* (v.5, n.2 – 2024).
- MMA – Ministério do Meio Ambiente. Cadastro Nacional de Unidades de Conservação. <https://antigo.mma.gov.br/areas-protegidas/cadastro-nacional-de-ucs.html>. Acesso: 30 janeiro de 2022.
- Moraes, J. B. et al. (2024). Áreas suscetíveis a desertificação no Nordeste do Brasil e projeção para cenário de mudanças climáticas. *RBGF*, v. 17, n.06. 4003-4014. <https://doi.org/00.0000/0.JRS.00.000000>.
- NASA - AERONÁUTICA NACIONAL E ADMINISTRAÇÃO DO ESPAÇO. Landsat Science, 2020. Disponível em: Acesso em 01 janeiro 2020.
- Oliveira, A. S. (2011). Influência da vegetação arbórea no microclima e uso de praças públicas. *Cuiabá: UFMT*.
- Querino, C. A. S., Júnior, J. M. L., & Moura, M. A. L. (2022). Balanço de Radiação no Bioma Caatinga no Semiárido Alagoano. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(06), 2715-2729.
- Rocha, A. H., Ambrizzi, T., Marengo, J. A., & Kayano, M. T. (2021). Precipitation and surface air temperature variability over northeastern Brazil under different El Niño–Southern Oscillation regimes. *International Journal of Climatology*, 41(1), E30-E50. <https://doi.org/10.1002/joc.661>.
- Sales, E. S. G., ARAUJO, F. D. S., MATSUNAGA, W. K., & BRITO, J. I. (2023). Relação do NDVI e EVI com os índices climáticos do Nordeste do Brasil. *Geoambiente On-line*, (47). Disponível em: <https://revistas.ufjf.edu.br/geoambiente/article/view/76511>. Acesso em: 25 out. 2022.
- Santos, A. S., de Fátima Correia, M., da Silva Aragão, M. R., & de Oliveira Silva, P. K. (2012). Aspectos da Variabilidade Sazonal da Radiação, Fluxos de Energia e CO2 em Área de Caatinga (Seasonal Variability Aspects of Radiation and Fluxes of Energy and CO2 in a Caatinga Area). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 5(4), 761-773.
- Santos, C. A. C., Gomes Costa, M. V., Silva, M. T., da Silva, L. L., Costa Santos, F. A., Bezerra, B. G., & de Sousa Medeiros, S. (2017). Obtenção de parâmetros ambientais na Região Semiárida da Paraíba por dados MODIS. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32, 633-647.
- Silva, B. B. D., Braga, A. C., Braga, C. C., de 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. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p3-8>.
- Silva, B. B., Lopes, G. M., & de Azevedo, P. V. (2005a). Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5-TM. *Rev Bras Agrometeorologia*, 13(2), 201-211.
- Silva, C. V. S., da SILVA, J. L. B., de Albuquerque Moura, G. B., Lopes, P. M. O., Nascimento, C. R., & da SILVA, L. C. (2019). Monitoramento da cobertura vegetal por sensoriamento remoto no semiárido brasileiro através de índices de vegetação. *Nativa*, 7(6), 708-717. <https://doi.org/10.31413/nativa.v7i6.7646>.
- Silva, D. A. D. O., Lopes, P. M. O., Moura, G. B. D. A., Silva, Ê. F. D. F., Silva, J. L. B. D., & Bezerra, A. C. (2019). Evolução espaço-temporal do risco de degradação da cobertura vegetal de Petrolina-PE. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 34, 89-99. <https://doi.org/10.1590/0102-7786334018>. <https://doi.org/10.55905/rde-losv16.n47-023>.
- Silva, M. E. S., Santos, T. A., Marengo, J. A., & Correa, D. S. (2020). A Comparative Analysis of GCM and RCM Projections of Precipitation Extremes over Northeast Brazil. *Water*, 12(7), 1985. <https://doi.org/10.3390/w12071985>.
- Silva, L. C., da Silva, J. L. B., de Albuquerque Moura, G. B., de Oliveira Silva, D. A., Lopes, P. M. O., Nascimento, C. R., & Batista, P. H. D. (2021). Índices biofísicos e o saldo de radiação

- à superfície via sensoriamento remoto no semi-árido pernambucano. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 6(1), 012-023. <https://doi.org/10.24221/jeap.6.1.2021.2876.012-023>.
- Silva, E. M. D., Sousa, M. N. M. D., Silva, F. B. S. D., Silva, L. L. D., & Barbosa, W. A. (2022). A Relação entre a Climatologia e as Infrações Ambientais na área de Proteção Ambiental da Serra de Baturité no Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 37, 157-165. <https://doi.org/10.1590/0102-77863710024>
- Silva, M. T., de Oliveira, V. G., dos Santos, C. A. C., da Silva, L. L., Santos, F. A. C., & de Oliveira Serrão, E. A. (2022). Net Radiation in the Semiarid Region of the States of Paraíba and Rio Grande do Norte Using the MODIS Sensor. *Anuário do Instituto de Geociências*, 45, 1-14.
- Silva, Jhon Lennon Bezerra da; Refati, Daiana Caroline; Lima, Ricardo da Cunha Correia; Carvalho, Ailton Alves de; Silva, Marcos Vinícius da. Padrão de mudança espaço-temporal no bioma Caatinga utilizando técnicas de sensoriamento remoto no Semiárido Brasileiro. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible, Curitiba*, 16., 2883-2905, 2023.
- Silva, J. L. B., Soares, G. A. S., Tiburcio, I. M., & Barros, J. P. F. G. (2024). Estimativas de sequestro de carbono por diferentes métodos em ecossistemas florestais: uma abordagem sobre a floresta tropical sazonalmente seca (Caatinga). *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 12(1).
- Souza, J. D., Ceballos, J. C., & da Silva, B. B. (2014). Surface albedo obtained with MODIS images in cases of low and high aerosol loading in the atmosphere. *Brazilian Journal of Geophysics*, 32(1), 5-20.
- Souza, J. F. D., Silva, R. M., & Silva, A. M. (2016). Influência do uso e ocupação do solo na temperatura da superfície: o estudo de caso de João Pessoa-PB. *Ambiente Construído*, 16, 21-37. <https://doi.org/10.1590/s16786212016000100058>.
- Tasumi, M., Allen, R. G., & Trezza, R. (2008). At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. *Journal of hydrologic engineering*, 13(2), 51-63.
- Wang, S., & Davidson, A. (2007). Impact of climate variations on surface albedo of a temperate grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 142(2-4), 133-142.
- Weligepolage, K. (2005). Estimation of spatial and temporal distribution of evapotranspiration by satellite remote sensing—A case study in Hupselse Beek. *The Netherlands*, 114.