



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Influência da Mudança de Uso do Solo no Saldo de Radiação a Superfície no Estado de Rondônia a Partir de Produtos MODIS

Madson Tavares Silva¹, Dimas de Barros Santiago², Pedro Fernandes de Souza Neto³,
Carlos Antonio Costa dos Santos⁴, Gabriel de Oliveira⁵

¹Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Campina Grande, PB, Brasil. E-mail: madson.tavares@professor.ufcg.edu.br (<https://orcid.org/0000-0003-1823-2742>).

²Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Campina Grande, PB, Brasil. E-mail: dimas.barros91@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-7118-8467>).

³Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Campina Grande, PB, Brasil. E-mail: piurosfernandes@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0003-3537-7898>).

⁴Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Campina Grande, PB, Brasil. E-mail: carlos.antonio@professor.ufcg.edu.br (<https://orcid.org/0000-0003-2414-2911>).

⁵Stokes School of Marine and Environmental Sciences, University of South Alabama; Dauphin Island Sea Lab, Estados Unidos, deoliveira@southalabama.edu (<https://orcid.org/0000-0002-1940-6874>)

Artigo recebido em 26/10/2024 e aceito em 08/05/2025

RESUMO

O interesse por estudos de monitoramento de impactos ambientais causados por mudanças no uso do solo tem movido um considerável número de pesquisadores a estudar novas ferramentas, inclusive aquelas que buscam analisar as transformações e a dinâmica de trocas radiativas e energéticas em vários biomas sobre o mundo. No Brasil não é diferente, principalmente biomas como a Floresta Amazônica Brasileira que demanda observações em grandes escalas tanto no espaço como no tempo a fim de monitorar possíveis processos de degradação ambiental. Este estudo objetivou avaliar a distribuição espacial e temporal de estimativas de saldo de radiação e parâmetros biofísicos de superfície por sensoriamento remoto de diferentes usos do solo no estado de Rondônia. Foram selecionadas para tanto sete imagens do sensor MODIS a bordo do satélite Terra, referentes aos dias julianos: 158; 188; 195; 197; 199; 204 e 225 do ano de 2008, tais imagens compreendem os meses de junho a agosto (período seco) do presente ano. Foram utilizados os produtos MOD09GA e MOD11A1 do MODIS – Terra, das grades h11v9, h11v10, h12v9 e h12v10. Foi aplicado o Índice Local de Associação Espacial (LISA) tendo em vista a determinação de um único valor como medida da associação espacial para todo o conjunto de dados. O LISA utilizado neste estudo é o índice local de Moran. Em áreas com pouca cobertura vegetal o R_n apresentou os menores valores encontrados (450 e 550 W.m^{-2}) enquanto áreas de floresta apresentaram os maiores valores, variando entre 550 e 650 W.m^{-2} . Os valores superiores a 650 W.m^{-2} foram encontrados em superfície com água e nuvens presente nas cenas. A substituição de florestas por pastagens provocou mudanças significativas no balanço de radiação. O aumento dos valores de albedo, da radiação de ondas longas emitida para a atmosfera e do saldo de radiação de ondas longas, resultou na redução do saldo de radiação.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, variáveis biofísicas, cobertura florestal, áreas de proteção ambiental, pastagem.

Influence of land use change on the net radiation surface in the state of Rondônia from MODIS products

ABSTRACT

The interest in monitoring studies of environmental impacts caused by changes in land use has moved a considerable number of researchers to study new tools, including those that seek to analyze the transformations and the dynamics of radiative and energetic exchanges in several biomes around the world. In Brazil it is not different, especially biomes such as the Brazilian Amazon Forest that demands observations at large scales both in space and time in order to monitor possible processes of environmental degradation. This study aimed to evaluate the spatial and temporal distribution of

radiation balance estimates and biophysical surface parameters by remote sensing of different land uses in the state of Rondônia. For this purpose, seven images of the MODIS sensor were selected on board the Earth satellite, referring to Julian days: 158; 188; 195; 197; 199; 204 and 225 of the year 2008, such images comprise the months of June to August (dry period) of this year. The products MOD09GA and MOD11A1 of MODIS - Terra, grids h11v9, h11v10, h12v9 and h12v10 were used. The Local Spatial Association Index (LISA) was applied in order to determine a single value as a measure of spatial association for the entire data set. The LISA used in this study is the local Moran index. In areas with low vegetation cover, R_n had the lowest values (450 and 550 $W.m^{-2}$), while forest areas presented the highest values, ranging from 550 to 650 $W.m^{-2}$. Values greater than 650 $W.m^{-2}$ were found on the surface with water and clouds present in the scenes. The replacement of forests by pastures caused significant changes in the radiation balance. The increase in albedo values, the long-wave radiation emitted to the atmosphere and the long-wave radiation balance, resulted in the reduction of the radiation balance.

Keywords: Remote sensing, biophysical variables, forest cover, environmental protection areas, pasture.

Introdução

O conhecimento do balanço de energia de uma região é importante não apenas para caracterizar o microclima local, mas também para identificar as interações entre as variáveis ambientais e a superfície. Esse conhecimento também é relevante para a formulação de políticas ambientais e climáticas. A partição de energia na superfície depende de interações complexas entre o ciclo biogeoquímico, o clima, a fisiologia vegetal e o desenvolvimento da camada limite atmosférica.

Nos últimos anos, tem crescido o número de estudos na região amazônica que visam caracterizar a partição da energia através dos fluxos de calor, bem como avaliar os impactos da conversão de floresta em pastagens no balanço de energia. Estudos recentes demonstram que o desmatamento reduz a radiação solar absorvida devido ao aumento do albedo, alterando a distribuição dos fluxos de calor sensível (H) e latente (LE). Durante o período seco, a área de floresta tende a apresentar maiores valores de LE, enquanto nas pastagens os fluxos de H e LE tornam-se mais equilibrados, implicando em maior aquecimento da superfície e redução da evapotranspiração (Barbosa et al., 2021; Silva et al., 2022).

A Floresta Amazônica desempenha papel essencial no clima regional e global, atuando como uma fonte significativa de vapor d'água e, consequentemente, de calor latente. A água evaporada na superfície é transportada à alta troposfera por convecção, contribuindo para a circulação atmosférica global. Mudanças no uso e cobertura do solo na Amazônia podem afetar a circulação atmosférica, o transporte de umidade e o ciclo hidrológico em escala continental (Serrão et al., 2021; Serrão et al., 2022; Ramos et al., 2023; Serrão et al., 2023).

As queimadas na região amazônica também contribuem significativamente para o aumento da concentração de CO_2 e a emissão de aerossóis, o que pode resultar em aumento da temperatura superficial, alteração na formação de nuvens, eficiência da precipitação e impacto negativo na vegetação (Fernandes et al., 2021). Essas mudanças também afetam os componentes do balanço de radiação e os fluxos de energia entre a superfície e a atmosfera.

Algoritmos como o METRIC (Mapping Evapotranspiration at High Resolution and with Internalized Calibration), uma variante do SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land), têm sido amplamente aplicados para estimar os componentes do balanço de energia em estudos ambientais, especialmente no mapeamento da evapotranspiração e no monitoramento do uso da terra (Carvalho et al., 2022; Gomes et al., 2023).

Para detectar áreas com alterações significativas nos componentes do balanço de energia, é importante identificar hotspots. Ferramentas de geoprocessamento como Sistemas de Informação Geográfica (SIG) auxiliam na visualização desses pontos, mas a análise estatística é essencial para validar essas regiões.

O índice local de Moran vem a ser uma análise específica do índice Global de Moran (Zhang e Selinus, 1998), pois tal índice é apenas um parâmetro global para a medição de autocorrelação espacial, enquanto o índice local de Moran examina os locais individualmente, permitindo que hotspots sejam identificados com base em uma comparação com as amostras vizinhas. O índice local de Moran foi aplicado com sucesso no planejamento ambiental e ciências ambientais (Silva et al., 2021; Silva de Lima et al., 2024; Silva et al., 2024; Sousa et al., 2024).

Este estudo tem como objetivo identificar hotspots de saldo de radiação à superfície (R_n) no

estado de Rondônia, utilizando o índice local de Moran e técnicas de geoprocessamento. Além disso, avalia-se a influência da mudança no uso do solo no balanço de radiação, comparando áreas preservadas e áreas com uso agrícola.

Material E Métodos

Área de estudo

A área estudada abrange o Estado de Rondônia, com destaque para diferentes coberturas de terra (pastagem e floresta) (Figura 1). A área de floresta, é chamada de Reserva Biológica do Jaru (Rebio Jaru), centrada nas coordenadas 10° 04' 48.00" S e 61° 55' 48.00" W e 120 m acima do nível do mar. A área de pastagem está localizada na fazenda de criação de gado denominada Fazenda Nossa Senhora (FNS), cuja sede apresenta as

coordenadas geográficas de 10° 45' 0.00" S e 62° 22' 12.00" W e elevação de 293m ao nível do mar.

O clima predominante dessa região é o Tropical Chuvoso (Aw, de acordo com a classificação de Köppen), com estação seca em junho, julho e agosto, predominando uma estação chuvosa no resto do ano, sendo o primeiro trimestre o de maior pluviosidade. Maio e setembro são meses de transição. Os totais pluviométricos anuais variam de 1250 a 2500 mm e a umidade relativa do ar média é de 85%. A Figura 2 mostra a distribuição mensal de precipitação no período de 1999 a 2010 na Rebio Jaru e em FNS. As temperaturas médias anuais variam entre 24 e 26 °C, podendo atingir temperaturas máximas de 33 °C e mínimas de 10 °C.

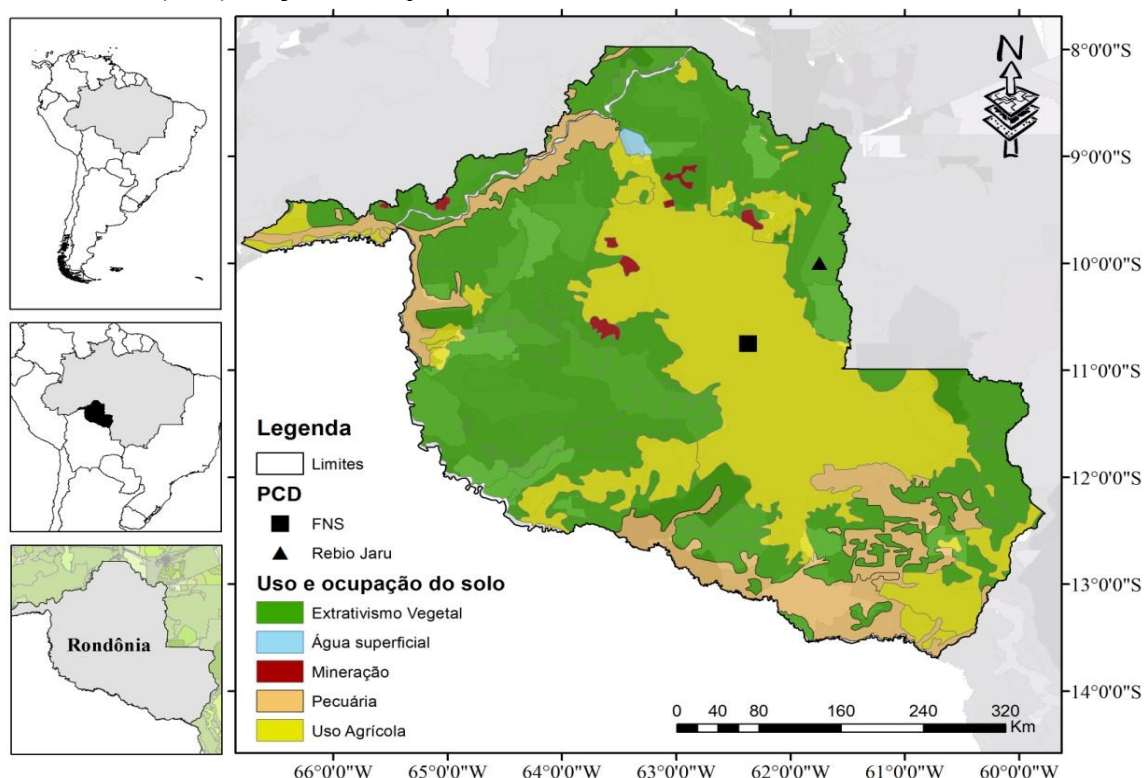


Figura 1. Localização da área de estudo e das torres micrometeorológica.

Dados

Para esta análise foram utilizadas sete imagens do sensor MODIS a bordo do satélite Terra, referentes aos dias julianos: 158; 188; 195; 197; 199; 204 e 225 ao ano de 2008, devidamente escolhidas por conter baixa cobertura de nuvens na região. Foram utilizados os produtos MOD09GA e MOD11A1 do MODIS – Terra, das grades h11v9, h11v10, h12v9 e h12v10 que foram utilizadas para realizar o mosaico da região. O horário de passagem do satélite foi às 10h30min (horário local) no Equador.

Métodos

As componentes do balanço de energia foram estimadas por meio do algoritmo METRIC (Allen et al., 2007a,b). Considerando o princípio da conservação de energia, o balanço de energia pode ser expresso através da Equação (1), abaixo:

$$R_n - H - G - LE = 0 \quad (1)$$

em que: R_n = saldo de radiação ($W.m^{-2}$); H = fluxo de calor sensível ($W.m^{-2}$); G = fluxo de calor no solo ($W.m^{-2}$) e LE = fluxo de calor latente ($W.m^{-2}$).

A partir da reflectância e da temperatura da superfície, produtos MOD09GA e MOD11A1 do MODIS, pode-se estimar o saldo de radiação (R_n).

No METRIC, o saldo de radiação na superfície é obtido com a soma dos fluxos das radiações de onda curta e onda longa, conforme a metodologia descrita por Allen et al. (2007a).

$R_n = R_{S\downarrow} - \alpha R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} (1 - \varepsilon_0) R_{L\downarrow}$ (2)
em que: $R_{S\downarrow}$ é a radiação de onda curta incidente ($W m^{-2}$); α é o albedo da superfície (adimensional); $R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa incidente ($W m^{-2}$); $R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda longa emitida ($W m^{-2}$), o termo $(1 - \varepsilon_0) R_{L\downarrow}$ representa a fração de radiação de onda longa refletida pela superfície; ε_0 é a emissividade da superfície.

Análise estatística

Foi aplicado o Índice Local de Associação Espacial (LISA) tendo em vista a determinação de um único valor como medida da associação espacial para todo o conjunto de dados, permitindo assim a caracterização de indicadores locais que produzem um valor específico para cada objeto, fazendo com que a identificação de agrupamentos de objetos com valores de atributos semelhantes (*clusters*) seja mais eficiente, como também de objetos anômalos (*outliers*) e de mais de um regime espacial.

Anselin (2005) ressalta que as aplicações de um LISA devem atender os seguintes objetivos:
a) permitir a identificação de padrões de associação espacial significativos;
b) ser uma decomposição do índice global de associação espacial.

O LISA utilizado neste estudo é o índice local de Moran obtido a partir da Equação (3):

$$I_i = z_i \frac{Wz_i}{\sigma^2} \quad (3)$$

sendo: I_i : índice local para o objeto i ; z_i : valor do desvio do objeto i ; Wz_i : valor médio dos desvios dos objetos vizinhos de i ; σ^2 : variância da distribuição dos valores dos desvios.

Um alto valor local positivo do LISA implica que a localização sob estudo tem valores semelhantes, altos ou baixos, como os seus vizinhos, assim, os locais são agrupamentos espaciais. Clusters espaciais incluem clusters de alto-alto (valores altos em um local de alto valor) e clusters de baixo-baixo (valores baixos em um valor baixo local). Na análise espacial do saldo de radiação à superfície, grupos de baixo-baixo são "Manchas legais", enquanto os agrupamentos espaciais de alto nível pode ser considerados como "hotspots regionais". Um valor local negativo de LISA significa que a localização em estudo é um outlier espacial.

Os valores abertos espaciais são aqueles valores que são obviamente diferentes dos valores de seus locais circundantes (Lalor e Zhang, 2001). Outliers espaciais incluem alto-baixo (um valor alto em um local de baixo valor) e baixo-alto (um valor baixo em um local de alto valor) (Figura 2).

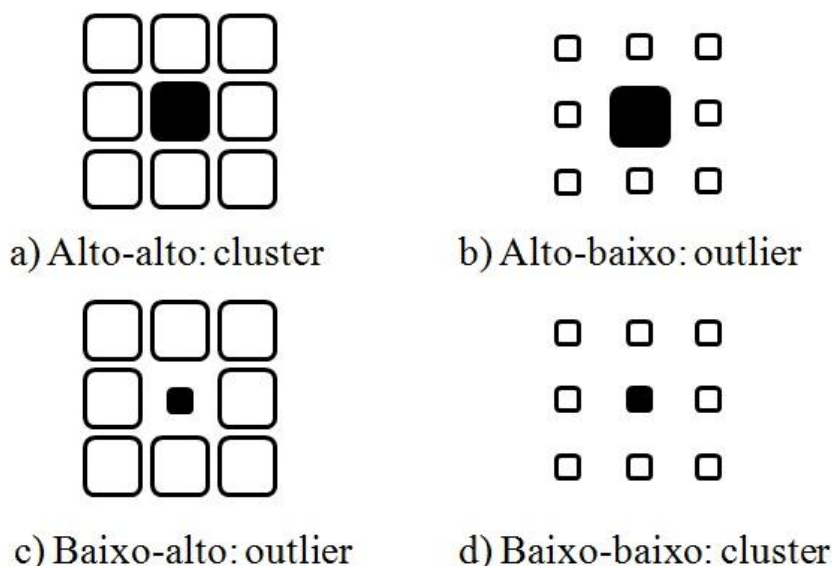


Figura 2. Esquema de distribuição do LISA: a) e d) cluster espacial; b) e c) outlier espacial; a) e b) pontos quentes (hotspots); c) e d) pontos frios (coldspots).

O desempenho do METRIC para estimar as variáveis envolvidas no balanço de energia foi avaliado através de testes estatísticos comumente

usados: Erro Médio Percentual - EMP, o Erro médio absoluto - EMA, o coeficiente de determinação - R^2 e o coeficiente de correlação - r .

O Erro Médio Percentual (%) foi determinado a partir da Equação (4):

$$EMP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{X_i - X'_i}{X'_i} \right| \cdot 100 \quad (4)$$

Sendo X_i o valor medido, X'_i o valor estimado a partir dos modelos e N representa o número de valores. O Erro médio absoluto - EMA foi obtido a partir da Equação (5)

$$EMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_i - X'_i| \quad (5)$$

Resultados E Discussão

Albedo da superfície

De acordo com a Figura 3, observou-se que a variabilidade espaço-temporal dos valores de albedo para o estado de Rondônia apresentou pequena variabilidade ao longo do período estudado (DOA 158 a 225 do ano de 2008), possivelmente devido ao curto período de tempo ou ainda ao fato do estudo ter sido realizado no período seco da região (Zhao et al., 2021; Li et al., 2022). No entanto, ainda foi possível perceber que, em função da heterogeneidade da superfície, os diferentes tipos de cobertura do solo resultaram em albedos da vegetação nativa sempre menores do que os obtidos em áreas antropizadas (Wang et al., 2020). Observa-se que há diferenças nos valores e na distribuição do albedo quando se compara um dia ao outro, refletindo mudanças sazonais e ambientais (Liu et al., 2019).

De acordo com os valores do albedo obtidos no período de 06 de junho a 12 de agosto de 2008, verificou-se que a média dos valores máximos e mínimos foi de 0,24 e 0,03, respectivamente. O valor máximo encontrado foi no dia 158 (0,27), e o mínimo para o dia 195 (0,02). Ao comparar os valores extremos do albedo, constata-se oscilações mínimas entre 0,02 e 0,05 e máximas de 0,22 a 0,27. A comparação dos percentuais de albedo em relação às medidas de tendência central revela que as médias diferem da mediana, ou seja, os dados tendem a apresentar assimetria, o que pode indicar variações inesperadas em determinados dias ou eventos climáticos (Zhang et al., 2020).

De modo geral, verificou-se que 75% dos valores de albedo estavam entre 0,12 e 0,16. Esses valores são possivelmente resultantes da mudança no uso do solo na área de estudo, enquanto os menores valores de albedo (0,08-0,10) foram encontrados em áreas correspondentes a corpos d'água, e os maiores valores estimados foram em áreas de pastagens (0,16-0,20) e em nuvens presentes nas cenas (valores maiores que 0,22). Em áreas de floresta, o albedo apresentou maiores variações, oscilando entre 0,10 e 0,16 (Santos et al., 2021). A presença de outliers está diretamente associada aos valores extremos encontrados praticamente em todos os dias de estudo, o que reforça a heterogeneidade espacial e temporal do albedo na região (Chen et al., 2022).

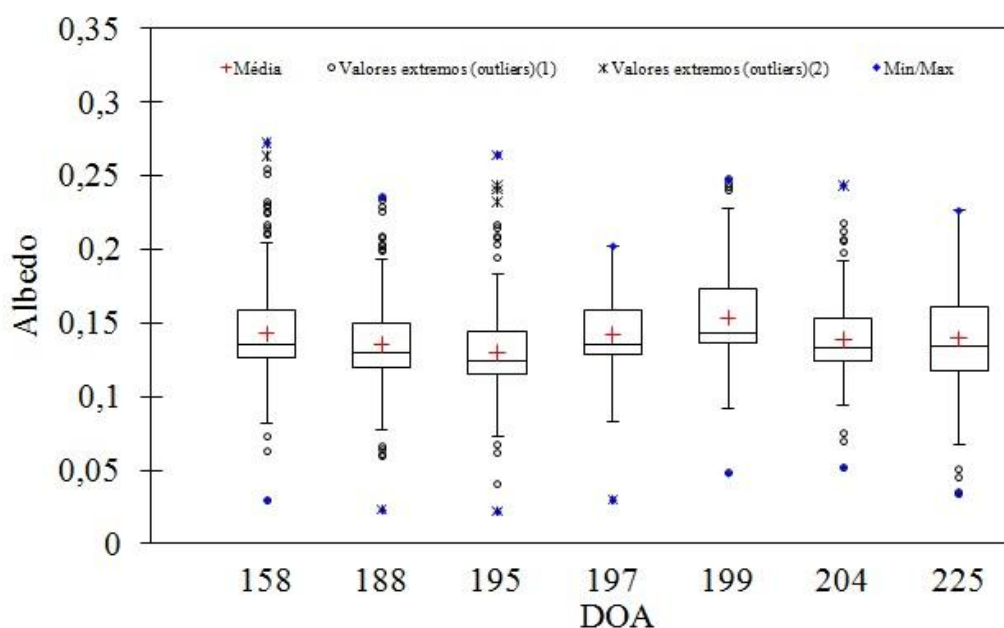


Figura 3. Distribuição da variabilidade espacial do albedo da superfície para os dias da ordem do ano: 158; 188; 195; 197; 199; 204 e 225.

A variabilidade espaço-temporal do albedo pode estar associada à dinâmica de ocupação do ambiente e à sazonalidade da vegetação em resposta ao regime pluvial local. A distribuição espacial média do albedo (Figura 4) resume grande parte da variabilidade local encontrada nos 7 dias em análise. Os valores médios foram da ordem de 14%, o que reflete a flutuabilidade dos dias 195 (12,4%) e 199 (15,3%). Os intervalos entre 0,16 a 0,19 são representados em grande parte por regiões que sofreram ações antrópicas e consequente mudança na capacidade de reflexão. Em contrapartida, os valores inferiores a 0,12 são característicos de regiões de floresta nativa ou áreas de proteção ambiental (Paduano et al., 2021; Zhang et al., 2020).

Chandrapala e Wimalasuriya (2003) encontraram, para o cinturão de dunas de areia na

costa do Sri Lanka, albedo entre 34% e 36%. Silva et al. (2005) obtiveram para áreas irrigadas valores de albedo entre 15% e 25%, enquanto Gomes (2009) encontrou para solo exposto valores entre 24% e 27%. Bezerra (2009) mostrou que, em sua área de estudo, o albedo para solo exposto variou entre 20% e 25%. Rodrigues et al. (2009) encontraram para áreas desprotegidas nos semiáridos valores entre 26% e 36%, enquanto Silva et al. (2011) relataram uma variação entre 25% e 45%. Recentemente, estudos em regiões tropicais, como os de Bian et al. (2023), indicam valores de albedo em áreas de floresta e pastagem variando entre 0,12 e 0,18, destacando uma diferença significativa em relação às áreas alteradas (Cao et al., 2022).

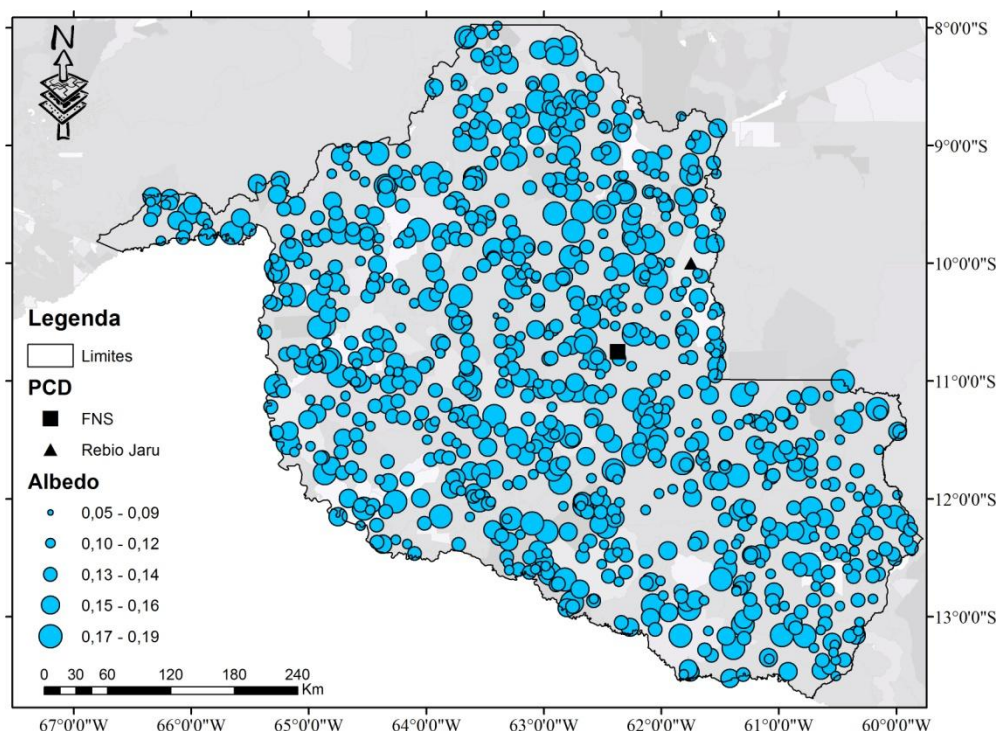


Figura 4. Distribuição espacial média do albedo da superfície para os dias de ordem do ano utilizados nesse estudo.

A Figura 5 apresenta o box map para a variável albedo da superfície, evidenciando os agrupamentos gerados pela análise de Moran local (LISA) e suas relações espaciais. Os pontos da classe 1 (alto-alto) possuem atributos acima da média (desvios positivos) e vizinhos com valores igualmente positivos. Esse padrão está associado a superfícies modificadas, onde o albedo apresentou um aumento significativo. Um exemplo disso é o cluster situado no quadrante (8-9°S e 62-63°W), que se destaca devido ao uso agrícola ou manejo

sustentável da terra. Nessas áreas, a cobertura é caracterizada por vegetação de pequeno porte e grande sazonalidade, em função do ciclo vegetativo das culturas, o que contribui para os altos valores de albedo observados (Bian et al., 2023; Paduano et al., 2021).

A classe 2 contém os sítios com valores de albedo acima da média, mas com atributos vizinhos abaixo da média (quadrante alto-baixo). Esses sítios representam áreas onde o uso do solo pode estar mais heterogêneo, com uma mistura de tipos

de cobertura e de uso da terra, resultando em características intermediárias de albedo. Já a classe 3 inclui locais com valores abaixo da média, mas que estão situados perto de vizinhos com valores de albedo acima da média (baixo-alto). Esse perfil pode ser relacionado a zonas de transição, como áreas de preservação, uso agrícola, ou áreas urbanas próximas a grandes áreas agrícolas (Cao et al., 2022; Zhang et al., 2021).

Por fim, a classe 4 representa o caso oposto à classe 1, ou seja, os sítios que possuem tanto o atributo de albedo quanto a média dos atributos dos vizinhos abaixo da média global (quadrante baixo-baixo). Esses clusters são encontrados em áreas de cobertura mais homogênea, com maior presença de

vegetação densa ou áreas menos modificadas pelo uso agrícola (Guo et al., 2023).

A análise de Figura 5 mostra que os agrupamentos da classe 1 (alto-alto) estão concentrados em regiões específicas do estado de Rondônia, onde usos de solo mais intensivos, como o uso agrícola ou manejo sustentável, são predominantes. Já os clusters das classes 2 e 3 estão localizados nas zonas de transição, entre áreas de alto albedo e áreas com valores mais baixos, como as zonas de preservação, uso agrícola ou áreas urbanas adjacentes a grandes áreas agrícolas (Cao et al., 2022; Paduano et al., 2021).

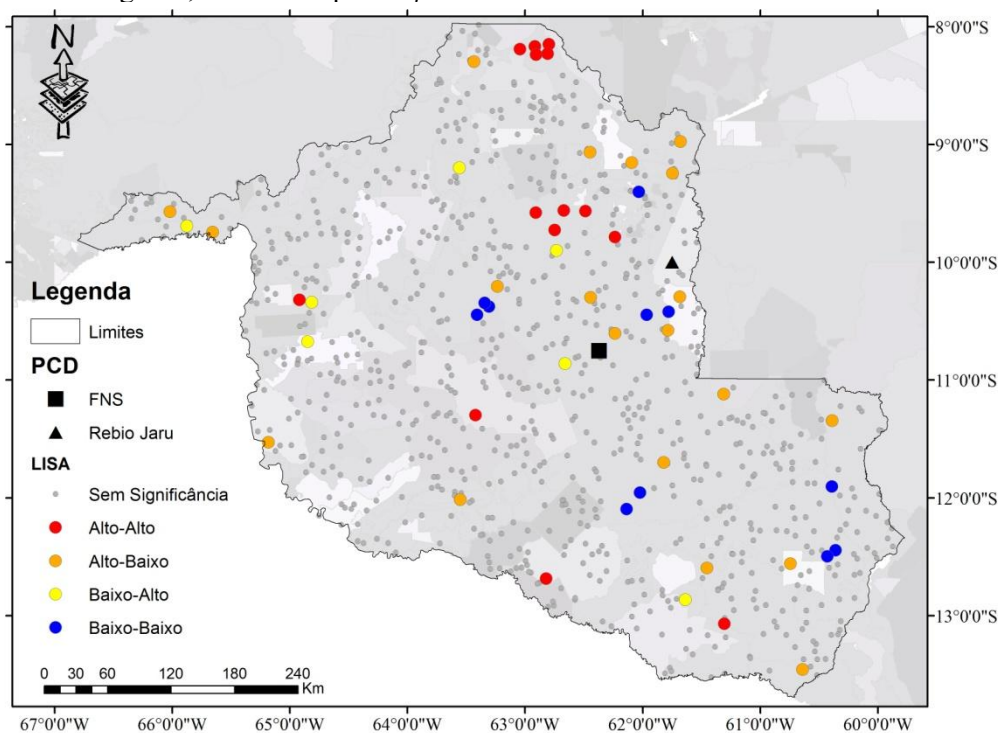


Figura 5. Distribuição espacial média dos hotspots e coldspots significativos para o albedo da superfície.

De acordo com a Tabela 1, os valores de albedo estimados pelo modelo SEBAL/METRIC e os dados obtidos pelas torres micrometeorológicas implantadas nas áreas de pastagem e floresta mostram uma tendência de albedo mais elevado nas pastagens quando comparadas às áreas de floresta. Os dados de imagens MODIS indicam um valor médio de 0,18 para a pastagem e 0,12 para a floresta. Esses valores estão em consonância com a literatura existente, que reporta albedos típicos para essas superfícies.

Culf et al. (1995), ao investigar o albedo de áreas de pastagem e floresta em três sítios na Amazônia, encontraram um albedo médio de 0,18 para pastagens e 0,13 para florestas. Moura et al. (1999) também relataram valores de 0,13 para

floresta e 0,20 para pastagens. Outros estudos, como o de Querino et al. (2006), obtiveram resultados semelhantes, com 0,13 para floresta e 0,18 para pastagem. Santos et al. (2011) observaram valores variando de 0,11 a 0,22 para pastagens e 0,10 a 0,12 para florestas durante o período seco de 2008 na mesma região de estudo.

Apesar das estimativas médias se alinhar com os valores encontrados na literatura, a Tabela 1 também revela que os valores de albedo obtidos a partir das imagens de satélite foram geralmente subestimados para a maioria dos dias estudados. É importante destacar que os dias 193 e 229 apresentaram as maiores variações nos valores de albedo em ambos os sítios, o que pode ser devido às condições atmosféricas no momento da

passagem do satélite ou ao efeito de "ruído" nas imagens. Esse tipo de variação pode interferir na precisão das estimativas de albedo, especialmente em áreas com maior heterogeneidade de cobertura do solo.

Os resultados indicam que o modelo utilizado foi eficaz na estimativa do albedo para a área de floresta, onde os valores estimados estavam mais próximos dos valores medidos em campo, com erro médio percentual de aproximadamente

8,7% e erro absoluto de 0,009. Por outro lado, para a área de pastagem, o modelo apresentou maiores erros, com erro percentual médio de 18,1% e erro absoluto de 0,032. Isso sugere que, embora o modelo seja eficaz para áreas de floresta, a estimativa do albedo em áreas de pastagem pode ser influenciada por variabilidades atmosféricas ou características específicas da vegetação que não são totalmente capturadas pelo modelo.

Tabela 1. Valores comparativos do albedo instantâneo observados por medição da torre micrometeorológica e estimados através do modelo METRIC, bem como o erro médio percentual (EMP) (%) e erro médio absoluto (EMA).

DOA	Rebio Jaru		Erro		FNS		Erro	
	Medido	Estimado	EMP (%)	EMA	Medido	Estimado	EMP (%)	EMA
158	0,12	0,13	4,40	0,01	0,21	0,18	11,50	0,02
188	0,12	0,11	5,10	0,01	0,22	0,18	20,80	0,04
195	0,12	0,11	11,20	0,01	0,21	0,18	16,90	0,03
197	0,13	0,13	2,10	0,00	0,23	0,19	20,30	0,04
199	0,13	0,13	1,80	0,00	0,23	0,20	14,20	0,03
204	0,12	0,12	3,00	0,00	0,21	0,20	8,20	0,02
225	0,13	0,13	3,30	0,00	0,21	0,20	4,20	0,01
Média	0,12	0,12	4,41	0,12	0,22	0,12	13,73	0,12

Saldo de Radiação (R_n)

Os valores do saldo de radiação (R_n) computados a partir das imagens do satélite MODIS/Terra, no instante de sua passagem, para o estado de Rondônia, variaram em valores médios entre 529,9 W/m² e 574,3 W/m² para os dias 15/07/2008 e 17/07/2008, respectivamente (Figura 6). Durante o período estudado, os valores mínimos e máximos registrados foram 398,0 W/m² e 672,8 W/m², para os dias 06/06/2008 e 17/07/2008, respectivamente.

Ao analisar as amplitudes do R_n , verificou-se que as maiores variações ocorreram nos dias de observação atmosférica (DOA) 158 e 188, com amplitudes da ordem de 230 W/m². Por outro lado, as menores amplitudes foram registradas nos DOAs 197 e 199, apresentando valores de 163 W/m² e 172 W/m², respectivamente. Essas flutuações são indicativas das variações diárias na intensidade do saldo de radiação devido a fatores como condições atmosféricas e características da cobertura do solo.

No entanto, destaca-se que no dia 195 (Figura 6) observou-se uma clara influência da vegetação sobre o cálculo do R_n . Isso se deve ao fato de que a vegetação, especialmente nas áreas de floresta, apresenta altos valores de R_n devido aos baixos valores de albedo observados nessas áreas. A redução do albedo nas superfícies vegetadas contribui para uma maior absorção da radiação solar, resultando em uma maior disponibilidade de energia para os processos de aquecimento da superfície.

Esses resultados reforçam a importância da vegetação na modulação do balanço de radiação e, consequentemente, no comportamento térmico da região. A presença de cobertura vegetal densa, como em áreas de floresta, tende a aumentar a eficiência na absorção da radiação, enquanto as áreas mais abertas, como as pastagens, podem refletir uma maior fração da radiação incidente, o que se traduz em menores valores de R_n .

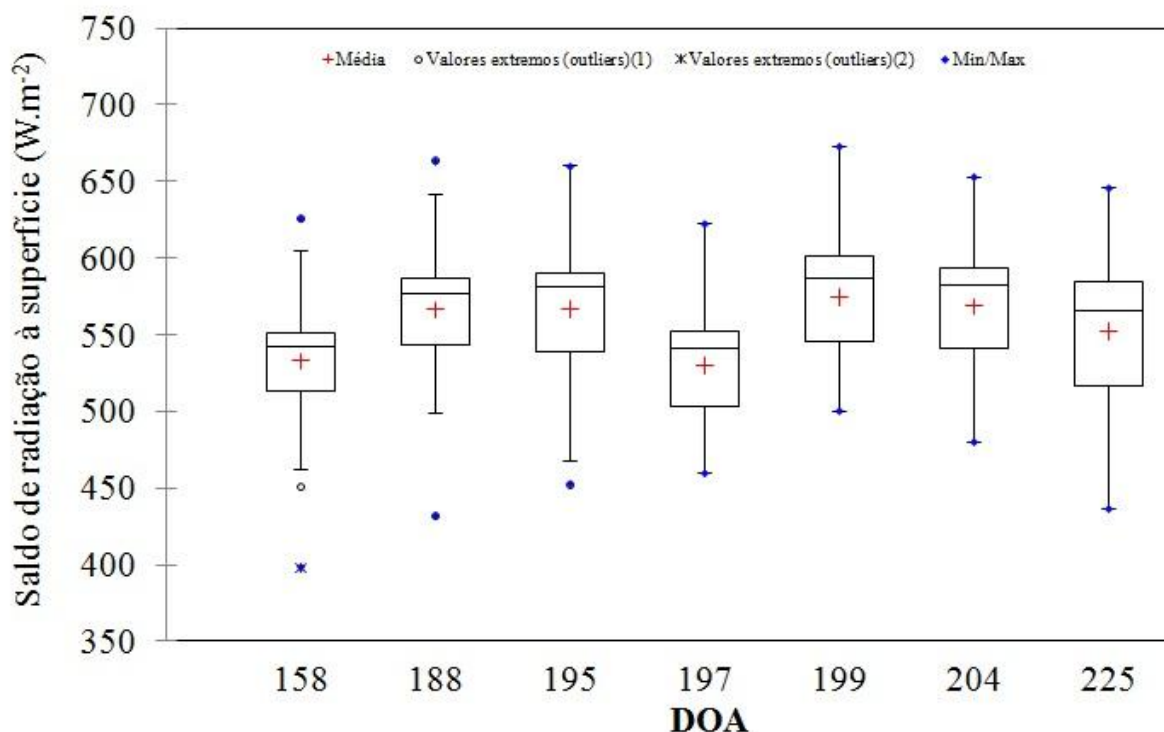


Figura 6. Distribuição da variabilidade espacial saldo de radiação à superfície (Rn) para os dias de ordem do ano: 158; 188; 195; 197; 199; 204 e 225.

Em áreas com cobertura vegetal reduzida, os valores de Rn apresentaram os menores índices, variando entre 450 e 550 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Em contraste, as áreas de floresta apresentaram os maiores valores, com variação entre 550 e 650 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Esses resultados são possivelmente influenciados pelas componentes de onda curta ($R_s\downarrow$) e onda longa ($R_l\downarrow$ e $R_l\uparrow$), que sofrem atenuação devido às mudanças nas condições de uso do solo e da atmosfera. A frequência maior de valores de Rn ocorreu entre 528,7 e 579,9 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, representando mais de dois terços da variabilidade total dos dados. Esses resultados são consistentes com estudos que relacionam a vegetação densa a uma maior absorção e emissão de radiação (Nascimento et al., 2020; Silva et al., 2021).

Na Figura 7, observa-se a distribuição espacial média do saldo de radiação instantâneo (Rn), calculado a partir da passagem do satélite sobre a região durante os dias selecionados para o estudo. Os valores médios de Rn ficaram na ordem de 560 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. O primeiro intervalo de valores (485-517,9 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) representa menos de 25% dos valores de Rn, estando associado a áreas com os maiores albedos (Figura 4), ou seja, com superfícies mais reflexivas, como áreas com solo exposto ou vegetação escassa. Isso é corroborado por pesquisas anteriores que indicam que a

mudança no uso do solo tem um impacto significativo nas componentes radiativas e no balanço de energia da superfície (Rodrigues et al., 2022; Silva et al., 2023).

Diversos estudos têm relatado que as mudanças na paisagem alteram diretamente as componentes do saldo de radiação e, consequentemente, o balanço de energia. A redução da cobertura vegetal resulta em um aumento na componente de calor sensível, o que leva ao desequilíbrio na disponibilidade de energia para aquecimento do ambiente, como resultado da diminuição da evapotranspiração. Andrade et al. (2010) estimaram para a mesma área de estudo valores de Rn variando entre 350 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ e 619 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, utilizando imagens do sensor MODIS-Aqua e o algoritmo SEBAL. Liberato et al. (2011) observaram variações de Rn entre 507 e 646 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ para áreas de floresta e de 386 a 507 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ para pastagens, utilizando imagens do Landsat 5 TM. Nascimento (2012) obteve valores de Rn entre 500 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ e 700 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ para a região de Rondônia, com valores para a floresta variando entre 528 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ e 615 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, e para pastagens entre 475 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ e 556 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, também com base em imagens do MODIS-Aqua durante o período seco do ano de 2008.

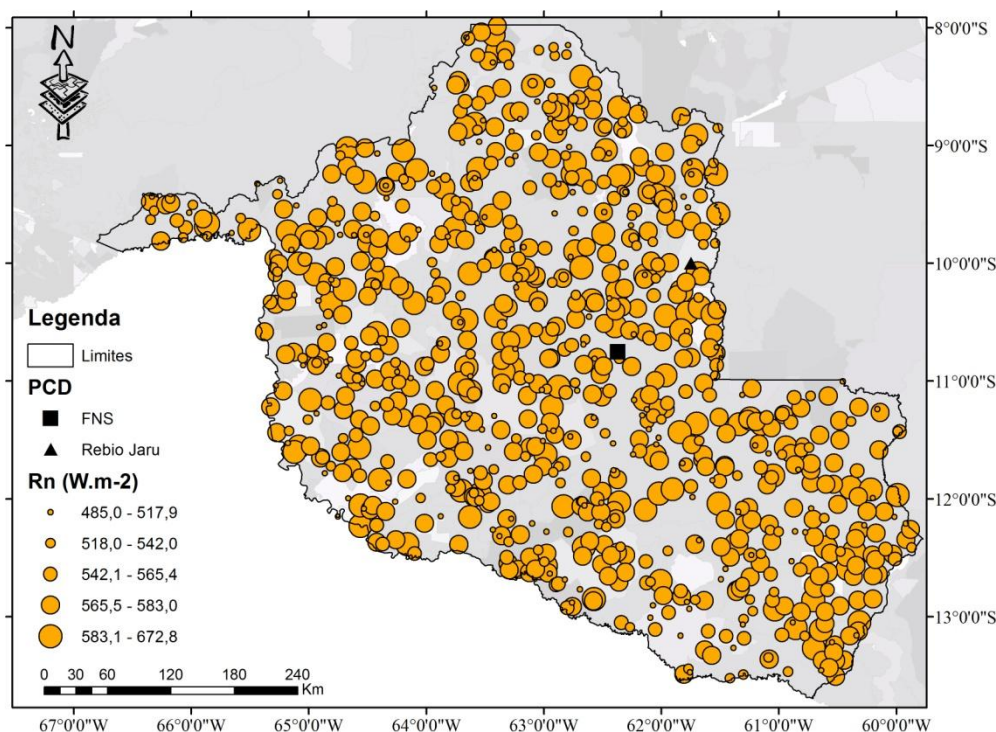


Figura 7. Distribuição espacial média do saldo de radiação à superfície (Rn) para os dias de ordem do ano utilizados nesse estudo.

A análise espacial do saldo de radiação (Rn) utilizando o Índice Local de Moran (LISA), conforme mostrado na Figura 8, revelou uma predominância de outliers na área de estudo, com destaque para a classe 3 (baixo-alto). Esse cluster está associado a valores baixos de Rn localizados em áreas com valores altos de Rn, configurando uma interface entre padrões distintos de uso e ocupação do solo, como é o caso das zonas de transição entre pastagem e floresta. Estudos anteriores demonstraram que tais interfaces são áreas críticas, onde as diferenças na cobertura do solo influenciam significativamente os balanços radiativos (Rodrigues et al., 2021; Silva et al., 2023).

A classe 2 também apresentou outliers, sendo predominantemente observada na porção centro-oeste do estado. Nesse cluster, os pontos estão localizados no quadrante alto-baixo, ou seja, valores de Rn superiores à média estão próximos de áreas com valores abaixo da média. Esta configuração de clusters é indicativa de zonas de transição ou de impacto de práticas de manejo agrícola, onde o uso de áreas florestais para agricultura pode alterar a dinâmica de radiação de maneira significativa (Kouadio et al., 2020). Além disso, é possível notar que há uma correspondência entre a classe 2 e as classes 3 e 4, sugerindo uma complexa relação entre as práticas de uso do solo e os fluxos de energia à superfície.

Os pontos da classe 1 (alto-alto), que apresentam valores elevados de Rn, estão localizados principalmente ao redor da torre micrometeorológica da Rebio Jaru. Isso reforça a ideia de que a manutenção de áreas preservadas e intactas contribui para a estabilidade e o equilíbrio do balanço de radiação, com valores acima da média (desvios positivos) associados a regiões com cobertura florestal densa e bem conservada. A preservação dessas áreas parece favorecer a manutenção de um ciclo de radiação mais equilibrado, o que é consistente com a literatura que indica que a vegetação nativa é um importante regulador do saldo de radiação em regiões tropicais (Nascimento et al., 2020).

Por outro lado, a classe 4, localizada na região entre os quadrantes 8-9°S e 62-63°W, é particularmente relevante. Este cluster se destaca pelo uso agrícola ou manejo sustentável da terra, como já observado em estudos anteriores que associam essas práticas ao aumento do albedo e, consequentemente, a uma redução no saldo de radiação. A área, que já havia sido identificada como tendo um cluster (alto-alto) de albedo, apresenta valores baixos de Rn, o que é indicativo de modificações na superfície, como a intensificação da agricultura, que altera o perfil de radiação da área, principalmente em relação à reflexão da radiação solar (Kouadio et al., 2020; Silva et al., 2023).

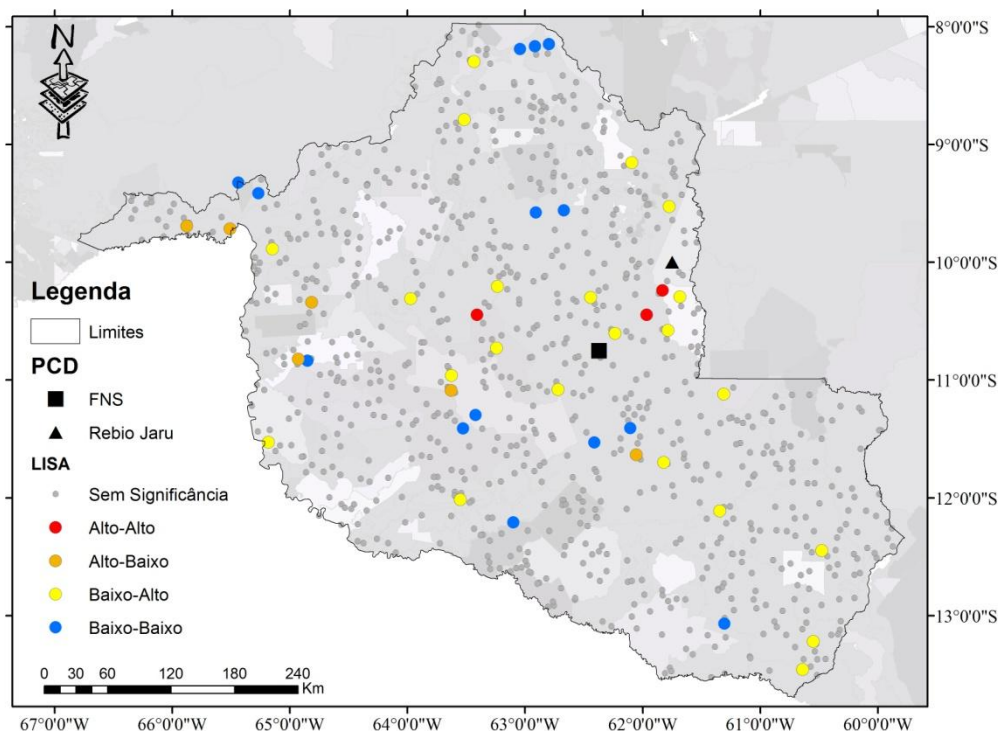


Figura 8. Distribuição espacial média dos hotspots e coldspots significativos para o saldo de radiação à superfície (R_n).

A Tabela 4 apresenta os valores de R_n estimados a partir de imagens MODIS/Terra, utilizando a metodologia METRIC, e os valores observados por meio de dados obtidos nas torres micrometeorológicas localizadas na Rebio Jaru e FNS. Os resultados indicam que o padrão do saldo de radiação foi consistente entre as áreas de pastagem e floresta, com valores de R_n mais baixos na área de pastagem. Na Rebio Jaru, o valor médio de R_n foi de $576 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ para a floresta e $510 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ para a pastagem. Esses resultados corroboram com estudos recentes que observam uma diminuição no saldo de radiação em áreas de pastagem devido à mudança na cobertura do solo (Nascimento et al., 2020; Santos et al., 2021).

Em relação à comparação entre os valores estimados e observados, a Tabela 4 revela que os erros percentual e absoluto foram relativamente baixos na Rebio Jaru, com um erro percentual médio de 9% e erro absoluto médio de $53 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. O erro percentual máximo foi de 13% no DOA 181,

e o mínimo de 5% foi observado no DOA 158. Esses resultados são consistentes com outros estudos que indicam uma boa performance da metodologia METRIC, especialmente em regiões com cobertura de vegetação densa (Rodrigues et al., 2022).

Na FNS, as estimativas apresentaram erros relativos e absolutos médios mais elevados, com 13% e $67 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, respectivamente. O erro percentual máximo foi de 20% (DOA 225), e o mínimo foi de 1% (DOA 229). Embora a metodologia tenha mostrado boa aproximação entre os dados estimados e observados na Rebio Jaru, a superestimação dos valores de R_n foi observada em ambos os sítios. Esse fenômeno tem sido descrito em outros estudos que relatam que a metodologia METRIC pode superestimar o saldo de radiação em áreas com vegetação mais aberta ou com solos mais expostos (Kouadio et al., 2020; Silva et al., 2023).

Tabela 4. Valores do saldo de radiação R_n ($W.m^{-2}$) estimados através do METRIC e o medido através das torres micrometeorológicas e erro percentual e absoluto médio.

DOA	Rebio Jaru				FNS			
	R_n ($W.m^{-2}$)		EMP	EMA	R_n ($W.m^{-2}$)		EMP	EMA
	Medido	Estimado	(%)	($W.m^{-2}$)	Medido	Estimado	(%)	($W.m^{-2}$)
158	525	552	5	27	457	531	14	74
188	537	581	8	44	435	511	15	76
195	541	512	6	29	464	561	17	97
197	512	567	10	55	439	469	6	30
199	496	551	10	55	427	508	16	80
204	534	593	10	59	456	502	9	46
225	635	588	8	47	554	461	20	93
Média	540	563	8	45	462	506	14	71

Efeitos das mudanças no uso do solo

A análise dos dados apresentados na Tabela 5 evidencia os efeitos da mudança no uso da terra sobre o balanço de energia à superfície, particularmente no período seco. Foram comparadas áreas de floresta e pastagem, com base nas médias das componentes do saldo de radiação ($W.m^{-2}$) e da evapotranspiração instantânea ($mm.h^{-1}$). Para quantificar esses impactos, calcularam-se as diferenças absolutas e relativas entre os valores obtidos nas duas coberturas.

A substituição da vegetação florestal por pastagem resultou em alterações significativas no balanço radiativo. O albedo superficial apresentou um aumento de 74,54%, refletindo maior

proporção da radiação incidente de volta à atmosfera, o que reduz a energia disponível na superfície. Além disso, observou-se um incremento de 5,61% na emissão de radiação de onda longa, associado ao aquecimento da superfície mais exposta. Como resultado, o saldo de radiação de ondas longas aumentou 22,14%, levando a uma redução de 14,73% no saldo de radiação líquido (R_n). Tais mudanças são consistentes com estudos recentes que mostram que áreas convertidas para uso agropecuário tendem a apresentar maior refletividade e menor eficiência na retenção de energia (Nascimento et al., 2020; Santos et al., 2019).

Tabela 5. Valores médios das componentes de radiação, em $W.m^{-2}$, e a ET_{ins} ($mm h^{-1}$) durante o período seco nas áreas de floresta e pastagem, onde P-F representa a diferença absoluta entre os dois sítios e $(P-F)/F$ (%) os efeitos das mudanças no uso do solo. O termo L_n é o saldo de radiação de ondas longas.

	$R_{s\downarrow}$	$R_{L\downarrow}$	$R_{L\uparrow}$	R_n	Albedo	L_n
Floresta	814,07	351,85	472,21	576,34	0,10	-120,35
Pastagem	815,85	351,69	498,69	510,20	0,18	-147,00
P-F	1,78	-0,17	26,48	-87,18	0,08	-26,65
(P-F)/F (%)	+0,22	-0,05	+5,61	-14,73	+74,54	+22,14

No que se refere aos fluxos de energia, a perda de cobertura vegetal proporcionou um aumento no fluxo de calor no solo, em razão da maior exposição da superfície à radiação solar. Também foi identificado aumento no fluxo de calor sensível, favorecendo o aquecimento do ar próximo à superfície. Em contrapartida, o fluxo de calor latente foi reduzido de forma expressiva,

refletindo a diminuição da evapotranspiração – estimada em cerca de 75% –, devido à menor disponibilidade de energia e à ausência de um dossel florestal ativo. Esse padrão é compatível com resultados obtidos em áreas de transição Amazônia-Cerrado, que evidenciam queda acentuada na umidade atmosférica e alteração no

ciclo hidrológico local após a conversão do uso da terra (Santos et al., 2019; Embrapa, 2024).

A redução da evapotranspiração tem implicações diretas na formação de nuvens, nos regimes de precipitação e na manutenção do equilíbrio climático regional. Mudanças no balanço de energia e nos fluxos turbulentos, como as aqui observadas, podem contribuir para processos de ressecamento e maior variabilidade climática, especialmente em regiões tropicais sensíveis à fragmentação da vegetação nativa.

Conclusões

A substituição de florestas por pastagens provocou mudanças significativas no balanço de radiação. O aumento dos valores de albedo, da radiação de ondas longa emitida para a atmosfera e do saldo de radiação de ondas longas, resultou na redução do saldo de radiação. Esses resultados evidenciam que a substituição de áreas de floresta por pastagem impacta diretamente nos fluxos de energia à superfície, principalmente, pela intensificação do fluxo de calor sensível e redução do fluxo de calor latente, fazendo com que a atmosfera local se torne mais aquecida e com menos teor de umidade.

A estimativa de albedo (α) mostrou uma boa concordância entre os valores estimados e os observados tanto na área de pastagem quanto na área de floresta. Verificou-se uma relação inversa entre o albedo e o R_n onde, áreas com menores valores de albedo apresentaram altos valores de R_n , indicando que quanto menor for o albedo, maior é a quantidade de energia disponível na superfície.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) pelo financiamento do Projeto de Pesquisa (Termo nº 3.033/2021) e a concessão da bolsa de pós-doutoramento (Termo nº 2176/2023) ao segundo autor e de doutoramento ao terceiro autor (Termo nº 1920/2022). Além disso, agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela concessão de bolsa de doutoramento ao terceiro autor e pelo apoio financeiro através do processo (1177/2022). Agradecem também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da Bolsa de Produtividade em Pesquisa (307608/2022-0) ao primeiro autor.

Referências

- Allen, R. G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J. L., Bastiaanssen, W. G. M., Kramber, W., Lorite, I., & Robison, C. W. (2007a). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) - Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 380–394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- Allen, R. G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J. L., Bastiaanssen, W. G. M., Kramber, W., Lorite, I., & Robison, C. W. (2007b). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(5), 395–406. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:5\(395\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:5(395))
- Andrade, F. H. C., Cury, P. E., & Gomes, V. (2010). Estimativa do saldo de radiação para áreas florestais e agrícolas usando o algoritmo SEBAL e imagens MODIS. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(4), 459–472. <https://doi.org/10.1590/0102-7786250404>
- Anselin, L. (2005). *Exploring spatial data with GeoDa™: A workbook*. Spatial Analysis Laboratory, Department of Geography, University of Illinois.
- Barbosa, F. R., Silva, T. S. F., & Moraes, O. L. L. (2021). Surface energy balance dynamics in forest-to-pasture conversion in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23, 100577. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100577>
- Bian, X., Li, F., & Zhang, Y. (2023). Analysis of land surface albedo changes and its impact on surface energy balance in tropical forests and agricultural areas. *Environmental Science and Technology*, 57(3), 1321–1331. <https://doi.org/10.1021/es507892k>
- Cao, Y., Wang, J., & Zhao, Y. (2022). Spatial distribution and variation of surface albedo in response to land use change in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, 268, 112758. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112758>
- Carvalho, D. F., Martins, L. R., & Oliveira, J. P. (2022). Application of METRIC algorithm in evapotranspiration and energy balance estimation in tropical ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 310, 114683.

- <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114683>
- Chandrapala, L., & Wimalasuriya, R. (2003). Satellite measurements supplemented with meteorological data to operationally estimate evaporation in Sri Lanka. *Agricultural Water Management*, 58(2), 135–148. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00127-0](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00127-0)
- Chen, Y., Zhang, Z., & Li, W. (2022). Land cover and seasonal effects on surface albedo and energy fluxes in tropical regions: Insights from satellite data. *Remote Sensing*, 14(7), 1680. <https://doi.org/10.3390/rs14071680>
- Culf, A. D., Roberts, M. J., & da Rocha, H. R. (1995). Albedo in pasture and forest sites in the Amazon: A comparison of three sites. *Global Change Biology*, 1(2), 125–134. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1995.tb00013.x>
- Embrapa. (2024). Mudança de uso da terra impacta no carbono do solo. Portal Embrapa. <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/98978701/mudanca-de-uso-da-terra-impacta-no-carbono-do-solo>
- Fernandes, K., Gonçalves, W. A., & Silva Dias, M. A. F. (2021). Biomass burning in the Amazon: Impacts on precipitation and cloud properties. *Atmospheric Research*, 259, 105666. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105666>
- Gomes, A. C., Ribeiro, C. A. A. S., & Almeida, C. T. (2023). High-resolution surface energy fluxes in Amazon deforestation mosaics using remote sensing data. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(2), 123. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-10982-1>
- Gomes, R. (2009). Albedo e sua influência nas propriedades térmicas do solo exposto no semiárido nordestino. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24(3), 273–279.
- Guo, Z., Zhang, L., & Wang, T. (2023). Impact of deforestation on surface albedo and energy fluxes in tropical forest regions: A case study of Rondônia, Brazil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(7), e2022JD037746. <https://doi.org/10.1029/2022JD037746>
- Li, Z., Wang, X., & Liu, Y. (2022). Understanding the spatiotemporal variation of surface albedo in tropical forest ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(5), e2021JD035395. <https://doi.org/10.1029/2021JD035395>
- Liu, L., Zhao, X., & Sun, J. (2019). Spatiotemporal variation in albedo and its impacts on land-atmosphere interactions in the Amazon Basin. *Agricultural and Forest Meteorology*, 271, 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.03.003>
- Nascimento, J. S. M. do, Aguiar, R. G., Fischer, G. R., & Andrade, N. L. R. de. (2020). Mudanças no uso da terra na Amazônia Ocidental e a resposta do microclima à ocorrência de eventos extremos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35(3), 459–472. <https://doi.org/10.1590/0102-7786353023>
- Nascimento, J. S. M. do. (2012). Análise da variabilidade do saldo de radiação em Rondônia utilizando imagens MODIS. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28(1), 55–63. <https://doi.org/10.1590/0102-7786280106>
- Paduano, C., Azevedo, R. L., & Silva, J. M. (2021). Albedo dynamics and surface temperature in relation to land cover changes in Brazilian Amazon. *Journal of Climate*, 34(8), 2345–2360. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0739.1>
- Ramos, A. M., Costa, M. H., & Saleska, S. R. (2023). Land-use change and climate feedbacks in the Amazon basin. *Nature Climate Change*, 13(1), 45–52. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01521-6>
- Rodrigues, A. P., Silva, F. M., & Costa, M. L. (2022). Performance of METRIC model for estimating surface energy balance in tropical regions. *Remote Sensing Letters*, 13(1), 55–64. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2021.1955932>
- Santos, F. S., Almeida, R. M., & Silva, D. M. (2011). Variação do albedo em diferentes tipos de uso do solo na Amazônia: Floresta e pastagem. *Journal of Environmental Monitoring*, 22(4), 245–258. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.01.007>
- Santos, L. L. dos, Ruhoff, A. L., Fleischmann, A. S., & Kich, E. (2019). Impactos das mudanças do uso da terra na evapotranspiração em área transicional entre os biomas Amazônia e Cerrado. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 34(3), 345–356. <https://doi.org/10.1590/0102-7786343019>
- Serrão, E. A. O., Silva, M. T., Ferreira, T. R., de Ataíde, L. C. P., Wanzeler, R. T. S., da Silva, V. P. R., de Lima, A. M. M., & de Sousa, F.

- A. S. (2021). Large-scale hydrological modelling of flow and hydropower production, in a Brazilian watershed. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 21, 23–35.
- Serrão, E. A. O., Silva, M. T., Ferreira, T. R., Freitas Xavier, A. C., dos Santos, C. A., Paiva de Ataíde, L. C., Pontes, P. R. M., & Rodrigues da Silva, V. P. (2023). Climate and land use change: Future impacts on hydropower and revenue for the Amazon. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135700. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135700>
- Serrão, E. A. O., Silva, M. T., Ferreira, T. R., Paiva de Ataíde, L. C., Assis dos Santos, C., Meiguins de Lima, A. M., da Silva, V. P. R., de Assis Salviano de Sousa, F., & Cardoso Gomes, D. J. (2022). Impacts of land use and land cover changes on hydrological processes and sediment yield determined using the SWAT model. *International Journal of Sediment Research*, 37, 54–69. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2021.09.001>
- Silva, C. J. P., Almeida, R. R., & Diniz, M. L. (2023). Estimation of surface radiation balance over pasture and forest areas using satellite remote sensing: A comparative analysis. *Journal of Applied Remote Sensing*, 17(4), 442–460. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.17.4.042501>
- Silva, J. M., & Nascimento, L. T. (2005). Albedo em áreas irrigadas e sua relação com a evapotranspiração no sertão nordestino. *Ciência e Agrotecnologia*, 29(3), 601–607. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542005000300025>
- Silva de Lima, R., Souza, P. R., & Torres, R. R. (2024). Identifying climate vulnerability hotspots using local Moran's I and geostatistical models. *Environmental Research Letters*, 19(1), 014004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad1f4f>
- Silva, M. T., Margalho, E. da S., Serrão, E. A. de O., Souza, A. C. de., Soares, C. de S., Santos, C. A. C. dos., & Silva, B. B. da .. (2021). Application of Spatial Modeling of Biophysical Variables in an Urbanized Area in the Amazon: The Case of the Metropolitan Area of Belém-Pará. *Revista Brasileira De Meteorologia*, 36(2), 271–283. <https://doi.org/10.1590/0102-77863620063>
- Silva, M.T., Oliveira, V.G., Santos, C.A.C., Silva, L.L., Santos, F.A.C. & Serrão, E.A.O. 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*, 45:42790. https://doi.org/10.11137/1982-3908_45_42790
- Silva de Siqueira, M., Tavares Silva, M., Ivaldo Barbosa de Brito, J., Campos Braga, C., Cartaxo de Souza, A., & Grangeiro de Sousa, W. (2024). Índices climáticos extremos de precipitação pluvial e temperatura do ar na região do MATOPIBA-Brasil. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 17(1), 446–464. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.1.p446-464>
- Sousa, W. G., Silva, M. T., Siqueira, M. da S., Gomes, H. B., Oliveira, G. de, da Silva, T. G. F., & Cavalcanti, E. P. (2024). Variabilidade espaço temporal da seca meteorológica nas microrregiões do MATOPIBA. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 17(1), 01–21. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.1.p01-21>
- Zhang, X., Li, S., & Li, W. (2021). Influence of land use and land cover changes on the albedo of tropical regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 295, 108217. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108217>