

Balanço de Energia em Floresta, Campo Natural e Área Agrícola no Município de Humaitá-AM

Energy Balance in Forest, Natural Field and Agricultural Area in the Municipality of Humaitá-AM

Kim Besinge Miranda Lobato*, Carlos Alexandre Santos Querino**, Luiz Octávio Fabrício dos Santos***, Juliane Kayse Albuquerque da Silva Querino****, Rosa Maria Nascimento dos Santos*****

*Programa de Pós-graduação em Clima e Ambiente, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, kbml.mcl21@uea.edu.br

** Instituto de Educação Agricultura e Ambiente - IEAA, Universidade Federal do Amazonas – UFAM, carlosquerino@ufam.edu.br

*** Programa de Pós-graduação em Física Ambiental – PPGCA, Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT, luizoctavio@fisica.ufmt.br

**** Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Educação Agricultura e Ambiente - IEAA, Universidade Federal do Amazonas-UFAM, julianekayse@ufam.edu.br

*****IN MEMORIAM

[http://dx.doi.org/ 10.5380/raega.v60i0.93097](http://dx.doi.org/10.5380/raega.v60i0.93097)

Resumo

As consequências climáticas das alterações de áreas de florestas podem ser avaliadas através da análise do Balanço de Energia em Superfície, seja por medidas *in loco* ou modelagem de dados remoto, como as realizadas pelo SEBAL. Assim, este trabalho teve como objetivo analisar a variação do balanço de energia na superfície em área de fazenda, campo natural e floresta para a região de Humaitá, AM, Brasil. Os dados de satélite foram coletados nos anos de 2000, 2005, 2015 e 2020 e processados no *geeSebal*. A técnica de calibração automática foi utilizada para identificar os pixels quente e frio. As variáveis do balanço de energia foram estimadas através da versão simplificada do algoritmo *Calibration Using Inverse Modeling at Extreme Conditions*, desenvolvido para o modelo METRIC e aplicável ao algoritmo SEBAL. A análise estatística foi realizada através da estatística descritiva, por meio do teste Kruskal-Wallis e o teste *post-hoc* de Dunn. Os resultados mostraram que o fluxo de calor no solo e o fluxo de calor sensível foi menor em floresta e maiores em campos e fazenda. O fluxo de calor latente e o saldo de Radiação assumiu os maiores valores em floresta e menores em campos e fazenda. O teste *post-hoc* Dunn mostrou uma semelhança entre as áreas de campos e fazenda. Por fim, o modelo SEBAL estimou de maneira satisfatória os componentes do balanço de energia na superfície, além de evidenciar o aumento do calor sensível e a diminuição do calor latente para as áreas de estudo.

Palavras-chave:

Fluxos energéticos, SEBAL, Clima, Sensoriamento Remoto.

Abstract

The climatic consequences of changes in forest areas can be assessed through the analysis of the Surface Energy Balance, through either in situ measurements or remote data modeling, such as those carried out by SEBAL. Thus, this work aimed to analyze the variation in the energy balance on the surface in a farm area, natural field and forest for the region of Humaitá, AM, Brazil. The satellite data was collected in the years 2000, 2005, 2015 and 2020 and processed in geeSebal. The automatic calibration technique was performed to identify the hot and cold pixels. The energy balance variables were estimated using the simplified version of the Calibration Using Inverse Modeling at Extreme Conditions algorithm, developed for the METRIC model and applicable to the SEBAL algorithm. Statistical analysis was performed using descriptive statistics, using the Kruskal-Wallis test and Dunn's post-hoc test. The results showed that soil heat flux and sensible heat flux were lower in forests and higher in fields and farms. The latent heat flux and net radiation assumed the highest values in forests and lowest in fields and farms. The post-hoc Dunn test showed a similarity between the fields and farm areas. Finally, the SEBAL model satisfactorily estimated the components of the energy balance at the surface, in addition to highlighting the increase in sensible heat and the decrease in latent heat for the study areas.

Keywords:

Energy fluxes, SEBAL, Climate, Remote Sensing.

I. INTRODUÇÃO

A Floresta Amazônica é a maior floresta tropical do mundo, e é importante para o controle climático em diferentes escalas, pois este bioma fornece a manutenção da ciclagem de água e do armazenamento do carbono (MARQUES et al., 2017). A maior parte da Amazônia está situada no estado do Amazonas, que está dividido em quatro mesorregiões: norte, sudoeste, centro e sul amazonense (IBGE, 2017). Mesmo com sua importante influência climática e rica biodiversidade, a Floresta Amazônica, nas últimas décadas, vem passando por mudanças estruturais, devido principalmente a atividades antrópicas, como alterações de áreas de florestas para áreas manejadas, terras agrícolas e pastagens (ROTHMUND et al., 2019). Essas modificações no uso e cobertura da superfície é mais perceptível na mesorregião sul do estado.

A mesorregião sul amazonense é responsável por grande parte da produção agrícola do estado do Amazonas (IDAM, 2018). O incentivo para o aumento das áreas de cultivo se deu devido a um conjunto de fatores como: baixos preços da terra, diminuição com as tarifas de transporte, desoneração dos tributos que incidem sobre a soja e seus derivados, entre outros (LIMA, 2008). Com os incentivos, o município de Humaitá foi o principal produtor do polo do Madeira. A produção de soja na região, para o ano de 2017, era de 500 hectares, com produtividade total de 1,3 tonelada. Na safra 2019/2020, houve um incremento na área do plantio para 2 mil hectares e um salto para cerca de 6 toneladas na produção (IDAM, 2020). Com isso, houve

um incremento na área agropecuária e madeireira, que fez com que as maiores taxas de desflorestamento de todo o estado fossem nessa mesorregião, que também está localizada na região conhecida como “arco do desflorestamento” (PAVÃO et al., 2014).

Estes incrementos nas áreas agrícolas e madeiras resultam em impacto na cobertura da terra (ANDRADE et al., 2021). Por conseguinte, mudanças na cobertura da terra modificam a transferência de vapor d'água para a atmosfera, alteram o balanço de radiação e, consequentemente, o balanço de energia na superfície (BIUDES et al., 2015; MACHADO et al., 2017). As alterações no balanço de energia na superfície causam mudanças no ciclo hidrológico e nas variáveis climáticas (MARQUES et al., 2017).

Contudo, ainda não há muitos estudos que mostrem quais os impactos que a substituição da cobertura natural da superfície por áreas de cultivos agrícolas, na mesorregião sul do Amazonas, causa nos padrões de variáveis climáticas (PAVÃO et al., 2017). Um dos meios de avaliar os impactos agrícolas é através da análise do balanço de energia na superfície, pois alterações na cobertura da terra tendem a modificar o albedo superficial, o balanço de onda curtas e longas e, consequentemente, o balanço energético da superfície (QUERINO et al., 2006; BIUDES et al., 2015; QUERINO et al., 2017; QUERINO et al., 2020). No entanto, devido à carência de torres micrometeorológicas na região para o monitoramento dos fluxos para estimativa do balanço de energia *in loco*, faz-se necessário o uso de meios e técnicas alternativas como a de sensoriamento remoto.

A técnica de sensoriamento remoto, usando imagens multiespectrais e térmicas nos algoritmos, se torna de suma importância, pois permite estimar o balanço de energia na superfície a partir de dados de satélites orbitais, que não necessitam de muitos dados meteorológicos e geram estimativas confiáveis em escala regional e local (ZHANG et al., 2016; CHEN et al., 2020). Para Chang et al. (2017), grande parte dessas estimativas baseiam-se em modelo unidimensional de fluxo que descrevem os mecanismos de troca de radiação e fluxos de calor, que ocorrem entre a superfície e a atmosfera, seguindo o princípio de conservação de energia. Dentre os modelos mais empregados, o Modelo de Balanço de Energia de Superfície para Terra (SEBAL) (BASTIAANSSEN et al., 1998) tem sido aplicado com êxito em diversas regiões climáticas e em diferentes coberturas do solo (BASTIAANSSEN et al., 2005; RUHOFF et al., 2012; TANG et al., 2013; WAGLE et al., 2017).

Assim, este trabalho teve como objetivo analisar, por meio do modelo SEBAL, a variação espaço-temporal do balanço de energia na superfície em áreas de cultivo de soja, campo natural e floresta densa para a região de Humaitá, sul do estado do Amazonas, Brasil.

II. MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi realizado em três áreas de aproximadamente 20 km² cada, com características fisiológicas distintas: Floresta, Campo Natural, Área Agrícola (fazenda destinada ao plantio de soja) (Figura 1). As áreas estão inseridas no município de Humaitá, localizado no sul do estado do Amazonas (Lat.: 7° 30' 22" S e Long.: 63° 1' 38" O). O município se encontra em uma região de matas abertas e complexos de campos, conhecida como "Campos Naturais", onde há a predominância de gramíneas e florestas mesófilas baixas, florestas perenifólias altas, palmeiras, castanhais, entre outras (VIDOTTO et al., 2007).

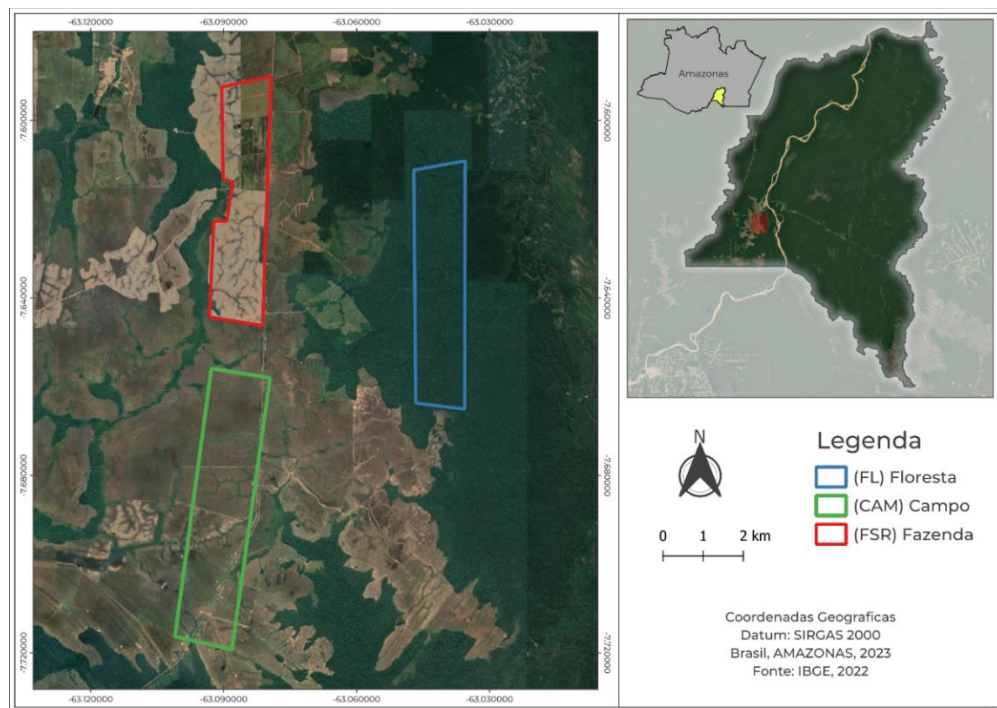


Figura 1 - Localização do município de Humaitá no estado do Amazonas e das áreas de Floresta (FL), Campo (CAM) e Fazenda (FSR), selecionadas para o estudo. Fonte: De autoria própria com uso de imagem do Google Earth.

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen é do tipo tropical úmido (Am) e, segundo a classificação mais detalhada de Thornthwaite e Mather, é úmido com deficiência de água moderada no inverno (B4WA'a') (MARTINS et al., 2023). Ainda de acordo com os autores, a temperatura média do ar varia entre 25 e 27 °C, com máximas de 36 °C e mínimas que eventualmente podem chegar a 17 °C durante períodos de friagem. A média mensal da umidade relativa do ar varia entre 85 e 90%, podendo chegar a 50% durante a estação seca. O período chuvoso ocorre de outubro a abril, com totais pluviométricos médios de aproximadamente 300 mm mês⁻¹ enquanto o período seco, entre os meses de junho a agosto, apresenta totais pluviométricos médios de

50 mm mês⁻¹. Os meses de maio e setembro correspondem ao período de transição chuvosa-seca e a transição seca-chuvosa, respectivamente (PEDREIRA JUNIOR et al., 2018).

Dados de reanálises

Os dados de precipitação oriundos do produto de reanálise do ERA5-LAND, disponibilizado pela European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), foram utilizados para o cálculo da normal climatológica (30 anos, 1991-2020). Do mesmo banco de dados, foram extraídos os totais mensais e, posteriormente, após o processamento dos dados, foram calculadas as anomalias pluviométricas mensais para cada um dos anos do estudo.

Coleta das Imagens

As imagens utilizadas foram geradas pelo sensor Thematic Mapper – TM do satélite Landsat 5, para os anos de 2000, 2005 e 2010, e pelos sensores Operational Land Imager – OLI e Thermal Infrared Sensor – TIRS a bordo do Landsat 8 para os anos de 2015 e 2020 (Tabela 1). Para que não houvesse interferências negativas na obtenção dos fluxos energéticos, foram selecionadas imagens com ausência de nuvens entre os meses de junho a agosto (período seco da região).

Tabela 1 – Descrição das informações de datas, hora, tipo, caminho e órbita dos satélites que foram utilizados para a aquisição das imagens.

Datas	Hora Local	Landsat	Path Row	Órbita
06/07/2000	09:57:07	5	232	65
04/07/2005	10:07:56	5	232	65
19/08/2010	10:10:37	5	232	65
30/06/2015	10:19:42	8	232	65
29/07/2020	10:20:15	8	232	65

Fonte: Metadados das imagens baixadas do United States Geological Survey (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Processamento de dados

O processamento das imagens foi feito com a utilização da radiância espectral, reflectância da superfície para os satélites Landsat 5 e 8 e a temperatura de brilho nas bandas 6 e 10 para o Landsat 5 e Landsat 8, respectivamente. Também foram utilizadas as bandas do vermelho (Landsat 5: 0,63 – 0,69 µm; Landsat 8: 0,64 – 0,67 µm), infravermelho próximo (Landsat 5: 0,76 – 0,90 µm; Landsat 8: 0,85 – 0,88 µm) e a banda do infravermelho termal (Landsat 5: 10,4 – 12,5 µm; Landsat 8: 10,6 – 11,19 µm).

O processamento das imagens e a estimativa das componentes do balanço de energia foi realizado através do modelo SEBAL, que foi processado por meio de softwares livres: QGIS na versão 3.28.2 e Python 3.10. No QGIS, foram feitos os cortes para as regiões de estudo e, posteriormente, no Python, foi feita a modelagem das etapas adotadas pelo modelo SEBAL, a extração dos *pixels*, análises estatísticas e figuras no Python.

- *Modelo do Balanço de Energia de Superfície para Terra (SEBAL)*

O algoritmo SEBAL utiliza dados de sensoriamento remoto multiespectrais que, ao serem associados a dados meteorológicos, podem estimar instantaneamente os componentes do balanço de energia na superfície (RUHOFF et al., 2012).

Através da equação do balanço de energia na superfície (Equação 1), o SEBAL estima LE como resíduo dos demais componentes (Equação 2) (LAIPELT et al., 2020).

$$R_N = H + LE + G \quad (\text{Equação 1})$$

$$LE = R_N - H - G \quad (\text{Equação 2})$$

Onde todos os componentes da Equação 1, são dados em $W\ m^{-2}$, H é o fluxo de calor sensível (Equação 3), R_N é a radiação líquida (Equação 4) e G é o fluxo de calor no solo (Equação 5) (BASTIAANSEN, 2000):

$$H = \frac{\rho_a C_p dT}{r_{ah}} \quad (\text{Equação 3})$$

$$R_N = (1 - \alpha)R_{OC\downarrow} + R_{OL\downarrow} - R_{OL\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{OL\downarrow} \quad (\text{Equação 4})$$

$$\frac{G}{R_N} = \alpha(T_s - 273,15)(0,0038\alpha + 0,0074\alpha^2)(1 - 0,98NDVI^4) \quad (\text{Equação 5})$$

com α , sendo o albedo da superfície, ε_0 a emissividade da superfície, T_s a temperatura da superfície (Equação 6) (ALLEN et al., 2007):

$$T_s = \frac{Tb}{1 + \left(\frac{\delta Tb}{1,438e^{-2}}\right) \log(\varepsilon_{NB})} \quad (\text{Equação 6})$$

onde Tb é a banda de temperatura de brilho (K), δ o comprimento de onda (μm) e ε_{NB} é a emissividade da superfície para a banda termal que foi utilizada. T_s foi adaptada para uma elevação padrão levando-se em consideração o produto digital de elevação do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com uma taxa de variação de $0,0065\ ^\circ C^{-1}$ (LAIPELT et al., 2020).

Uma vez que H e a resistência aerodinâmica ao transporte turbulento de calor (r_{ah}) são desconhecidos, H (Equação 3) é estimado por meio de um método iterativo. Na Equação 3, temos C_p sendo a capacidade térmica específica e r_{ah} sendo a resistência aerodinâmica ao transporte turbulento de calor da superfície de

evaporação na altura z_1 para o ar acima da superfície de evaporação z_2 (LAIPELT et al., 2021). Se $H = 0$, então LE corresponde a toda a energia disponível (BASTIAANSEN et al., 1998a).

- *geeSebal*

O geeSEBAL foi elaborado dentro do GEE (versão 0.1.217) através das APIs JavaScript e Python (versão 3.6 ou superior). O algoritmo SEBAL foi implementado no GEE (geeSEBAL - versão 0.1.217) utilizando as APIs JavaScript e Python (Laipelt et al., 2021). O GEE fornece toda a coleção Landsat e dados meteorológicos do ERA5-Land por hora, permitindo que o processamento geeSEBAL seja aplicado em diferentes regiões do globo com computação de alto desempenho, mesmo em regiões onde os dados meteorológicos terrestres são totalmente limitados (GONÇALVES et al., 2022).

Laipelt et al. (2021) descreve que o geeSebal possui três funções que são consideradas principais: i) Imagem: estimativa de ET de uma imagem específica (JavaScript e Python); ii) Coleção de imagem: processo em lote que melhora a estimativa de ET para um determinado período (exclusivo para Python); iii) Séries temporais: estimativas de séries temporais de ET para períodos mais longos de acordo com as coordenadas fornecidas pelo usuário (exclusivo para Python).

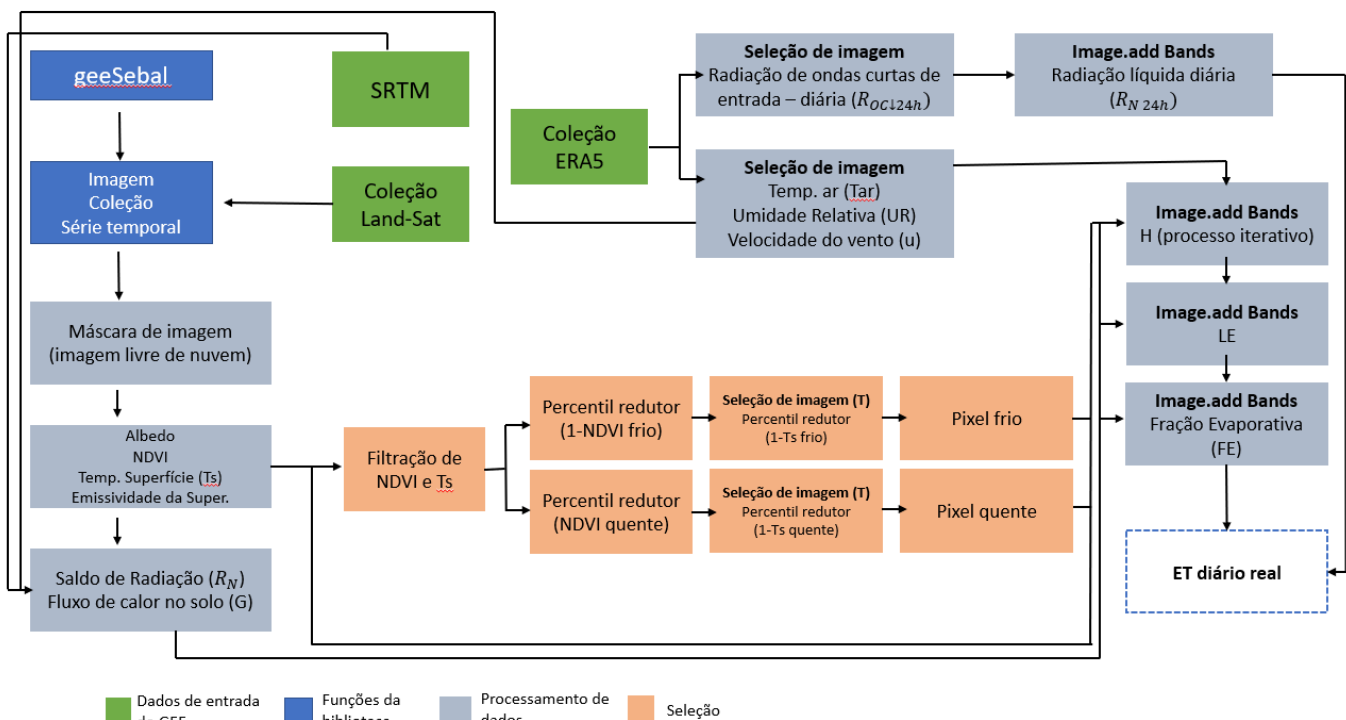


Figura 2 – Fluxo de trabalho do geeSEBAL, demonstrando dados de sensoriamento remoto e dados meteorológicos de entrada, bem como funções GEE de processamento de dados para estimativa de evapotranspiração diária. (Adaptado de Laipelt et al., 2021)

Calibração Automática

A técnica de calibração automática foi utilizada para identificar os pixels quente e frio e baseia-se em uma versão simplificada do algoritmo *Calibration using Inverse Modeling at Extreme Conditions* (CIMEC), que foi desenvolvido para o modelo METRIC sendo aplicável ao algoritmo SEBAL (ALLEN et al., 2013). O CIMEC emprega percentis de T_s e $NDVI$ para a seleção. O pixel frio é definido como aquele escolhido aleatoriamente dentro do conjunto de pixels candidatos que apresentam os maiores valores de $NDVI$ (5%) e, dentre estes, os menores valores de T_s (20%). Por outro lado, o pixel quente é identificado através da seleção dos 10% menores valores de $NDVI$ e dos 20% maiores valores de T_s .

No contexto do modelo implementado no Google Earth Engine (GEE) e na biblioteca em Python, estes percentis foram configurados como padrão. Entretanto, os usuários têm a flexibilidade de ajustar esses valores para alcançar resultados mais precisos. Dessa forma, para cada região da área de estudo, foi manualmente selecionado um grupo de percentis otimizados com base na variação dos percentis originais do CIMEC. Neste estudo, a cena do Landsat abrange as três regiões da área de estudo. Foi calculada a média aritmética dos grupos de percentis para suavizar o impacto na seleção dos pixels quente e frio. Nesse cenário, os grupos de percentis foram utilizados conforme descrito por Laipelt et al. (2020; 2021) em regiões com a mesma cobertura da terra (Tabela 2).

Tabela 2 - Grupo de percentis utilizados para a média aritmética, para a seleção dos pixels quente e frio, na área de estudo.

	Floresta	Campo Natural	Fazenda	Média
$NDVI_{frio}$	5	5	5	5
T_{sfrio}	0.01	1	1	0,67
$NDVI_{quente}$	10	1	1	4
$T_{squente}$	0.01	10	10	6,67

Fonte: Laipelt et al. (2020; 2021). Adaptado pelos autores.

Análise de dados

O teste de Kruskal-Wallis foi criado por William Kruskal (1919 – 2005), matemático e estatístico americano, e por W. Allen Wallis (1912 – 1998), economista e estatístico americano. O teste é não paramétrico, e não leva em consideração as hipóteses de comparação dos parâmetros, não testa a hipótese de igualdade de médias e nem testa a igualdade de medianas. O teste de Kruskal-Wallis é utilizado para comparação de variáveis ordinais ou contínuas, e é indicado para avaliar a hipótese de que três ou mais amostras têm distribuição semelhante ou não (KRUSKAL et al., 1952).

O teste é baseado na hipótese de que as medianas das amostras são iguais. Contudo, somente através do teste não é possível identificar qual das amostras se difere da outra, sendo possível apenas identificar que há uma diferença estatisticamente significativa entre elas. Portanto, para identificar qual das amostras é

diferente, é necessário realizar um teste de comparação múltipla, como o teste post-hoc de Dunn (PONTES, 2000).

O teste post-hoc de Dunn é um teste estatístico de comparação múltipla utilizado na comparação da mediana de duas ou mais amostras independentes depois de realizar o teste de Kruskal-Wallis. Ele baseia-se na hipótese de que as medianas das amostras são semelhantes.

Para o teste Dunn, é preciso notar:

- H_0 : As medianas são iguais (entre os subgrupos analisados)
- H_1 : As medianas são diferentes

p-valor 0,05:

- se p-valor < 0,05, rejeita-se H_0 (e conclui-se que as medianas são diferentes)
- se p-valor $\geq$ 0,05, aceita-se H_0 (e conclui-se que as medianas são iguais)

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise da Pluviometria

O total pluviométrico anual, de acordo com a normal climatológica (NC 1991-2020) da região, é de 2459,75 mm e apresenta sazonalidade bem definida (Figura 3A). Observou-se um período seco (junho a agosto, área sombreada) e um chuvoso (outubro a abril) com maiores e menores índices pluviométricos observados em janeiro (337,41 mm) e julho (39,74 mm), respectivamente. Nos anos do estudo, todos apresentaram totais pluviométricos abaixo da normal climatológica, com destaque para o ano de 2005, 2010 e 2015, que apresentaram anomalias negativas de -226, -273 e -354 mm, respectivamente (Figuras 3C, 3D e 3E). Apesar de terem apresentado anomalias negativas, 2000 e 2020 apresentaram anomalias negativas de precipitação em meses específicos, e não por um longo período.

Nas primeiras duas décadas do século XXI, a Região Amazônica passou por 3 grandes eventos de seca, 2005, 2010 e 2015 (SHE et al., 2024). Os mesmos autores também afirmaram que estas secas variaram não apenas na intensidade, mas também nos mecanismos que as provocaram. Dentre os três eventos, 2010 destacou-se por ser a mais severa, enquanto a de 2005 foi a que acarretou menor impacto no que diz respeito a perspectiva fisiológica e estrutural da Floresta Amazônica. Já a seca de 2015 foi provocada pelo evento El Niño, que foi considerado um dos três maiores já observados dentro da era dos registros climáticos (SOUZA et al., 2022a e 2022b). Contudo, nos anos de 2005 e 2010, a temperatura na faixa equatorial do oceano Pacífico

apresentava condições de neutralidade e a seca foi provocada pelo aquecimento das águas do Atlântico Norte (ZENG et al., 2008). Ainda de acordo com os mesmos autores, estas secas acarretaram diversos impactos no transporte, pesca, agricultura, nas ocorrências de queimadas e na saúde da população local.

Destaca-se que ambos os eventos, El Niño e aquecimento do Atlântico, são responsáveis por modificar a circulação geral da atmosfera, principalmente na circulação das células de Walker e Hardley e, em geral, intensificam a subsidência de ar seco sobre a Amazônia, inibem a formação de nuvens convectivas profundas e, consequentemente, a formação de chuvas (ZENG et al., 2008). Os autores observaram também, que durante estes eventos, houve uma redução do transporte de umidade atmosférica do Atlântico para a Amazônia, que normalmente flui para o oeste, ascendendo na Amazônia, e é desviado para o sul ao longo dos Andes.

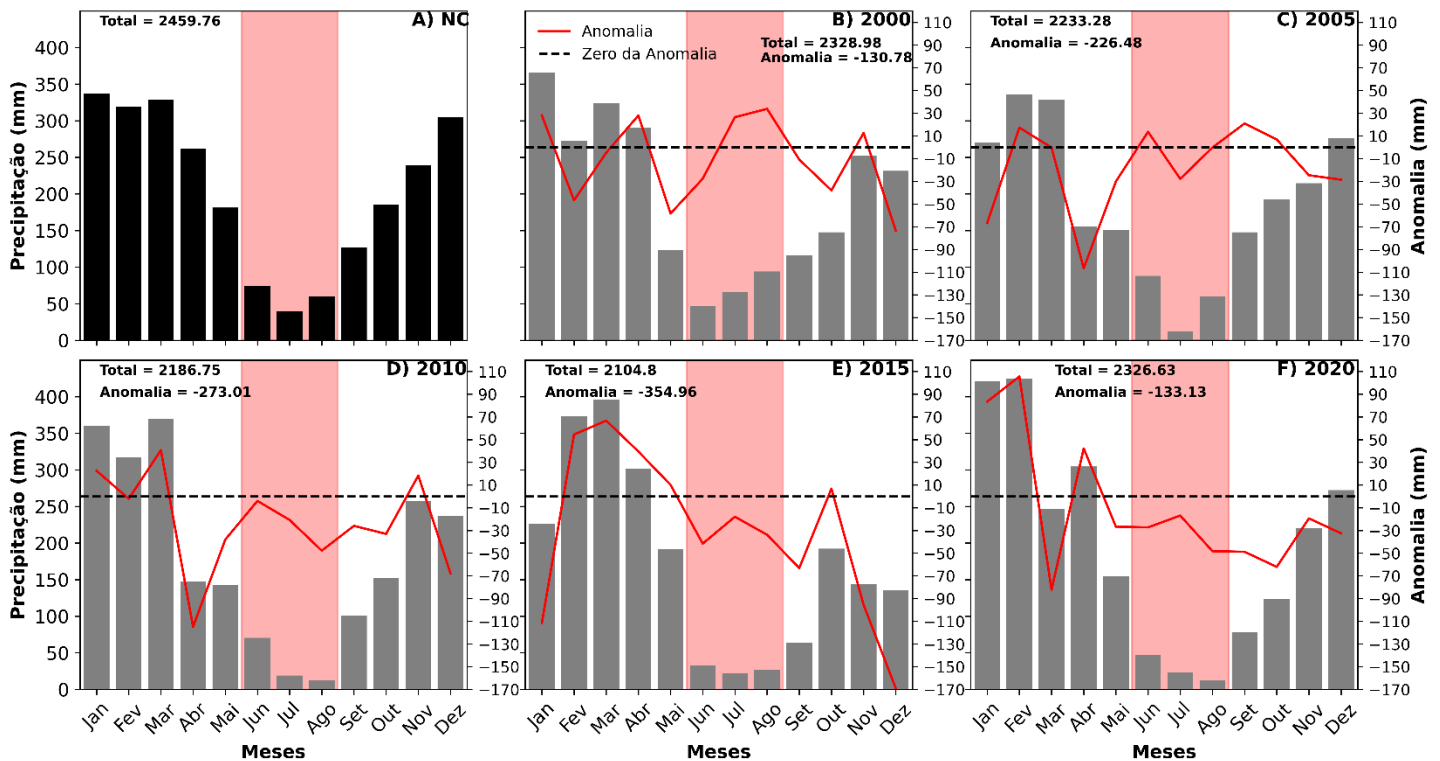


Figura 3 – Normal climatológica (NC) pluviométrica (A), totais mensais pluviométricos e anomalia mensal de precipitação para os anos de 2000 (B), 2005 (C), 2010 (D), 2015 (E) e 2020 (F), para o município de Humaitá, Amazonas, Brasil. A área em destaque corresponde aos meses do período seco.

Fluxo de Calor no Solo (G)

Os maiores valores de G foram encontrados nas regiões de Campos Naturais e Fazenda, com uma média de aproximadamente 48 W m^{-2} para ambas as áreas. Nos Campos Naturais, o valor médio máximo foi de $63,81 \text{ W m}^{-2}$ e a média mínima foi de $26,66 \text{ W m}^{-2}$ enquanto para Fazenda de Soja foi de $61,30 \text{ W m}^{-2}$ e $27,75 \text{ W m}^{-2}$ para médias máximas e mínimas, respectivamente. As áreas de Campos Naturais e Fazenda apresentaram no

segundo quartil (Q2) a mediana de $45,5 \text{ W m}^{-2}$ e $43,7 \text{ W m}^{-2}$ respectivamente, e no terceiro quartil (Q3) foi de $52,6 \text{ W m}^{-2}$ para ambas as áreas. Os valores médios de G na região de Floresta foram de aproximadamente 30 W m^{-2} , com médias máxima de $43,73 \text{ W m}^{-2}$ e mínima de $21,18 \text{ W m}^{-2}$. Em Q2, a mediana foi de $27,7 \text{ W m}^{-2}$ e, em Q3, foi de $43,8 \text{ W m}^{-2}$. O teste de Kuskal-Wallis mostrou que as amostras não são provenientes da mesma distribuição, 5.00e^{-02} e p-valor ≤ 1 , ****: $p \leq 1.00\text{e}^{-04}$. O teste de Dunn evidenciou a semelhança entre campo e fazenda, com p-valor corrigido de 5.139e^{-02} . O teste não mostrou semelhança entre as áreas ao serem comparadas com Floresta, com p-valor corrigido sendo 0 (Figura 4A).

Para todas as áreas do estudo, nota-se que, a partir do ano de 2005, há um aumento no fluxo de G , com destaque para o ano de 2010, onde os valores de magnitude são próximos à 65 W m^{-2} na floresta e próximo aos 80 W m^{-2} em área de campos e fazenda. O aumento de G na região de fazenda iniciou-se com plantação de soja (na região de estudo) nos anos de 2003/2005, onde, até o ano de 2018, havia em torno de 500 hectares de soja, saltando para 2000 hectares na safra 2019/2020 (CORREIO et al., 2019). Os menores valores na floresta, quando comparados com as demais regiões de estudo, além da densa cobertura florestal, que causa a diminuição da magnitude de G (Figura 4A), são causados também pela existência de uma camada de serrapilheira sobre o solo, que torna ainda menor o contato do solo com a atmosfera (CARNEIRO et al., 2013). Ainda segundo os mesmos autores, a serrapilheira é bastante comum em região de floresta tropical e é caracterizada como um grande reservatório de matéria orgânica que tem influência e ajuda na regulação de boa parte dos processos funcionais que ocorrem em um ecossistema. A serrapilheira em floresta é basicamente composta por folhas, raízes, frutos, sementes, arbustos, gramíneas, caules e outras plantas nativas, além de resíduos animais.

Quando comparados os valores interanuais, os maiores valores de 2010 provavelmente estão atrelados à seca ocorrida na época, conforme já discutido anteriormente e mostrado na Figura 3. A seca de 2010 foi generalizada, afetando 57,7% da floresta Amazônica, particularmente nas regiões oeste, sudeste e bordas norte (SHE et al., 2024). Ainda de acordo com os autores, a atividade fotossintética, o verde e a área foliar das florestas amazônicas sofreram supressão em 2010. Esta supressão possivelmente resultou em diminuição da taxa de acumulação de biomassa acima do solo, como observado por Tian et al. (2023) em uma floresta tropical na China e, consequentemente, pode aumentar a quantidade de energia que atinge mais diretamente a superfície e, por este motivo, observou-se uma generalização no incremento de G (Figura 4D).

Estudos a respeito da modelagem do fluxo de calor no solo por sensoriamento remoto tem apresentado bons resultados quando comparados com dados de fluxo medidos *in situ*. Pesquisa realizada no Mediterrâneo, no qual os autores estimaram balanço de energia superficial por sensoriamento remoto, encontraram um erro

médio de 7% para estimativas dos fluxos do solo, quando comparadas com dados medidos *in situ* (AWADA et al., 2024). Van der Tol (2012) comparou e validou na Espanha, em área similar a savana, estimativa de satélite com dados de superfícies. O autor afirma que, em sua validação, encontrou resultados precisos quando estimou o fluxo de calor do solo sobre o solo descoberto. Segundo o autor, uma comparação entre os métodos de sensoriamento remoto aplicados à radiometria mostrou-se viável para a recuperação do fluxo de calor terrestre baseado em satélite.

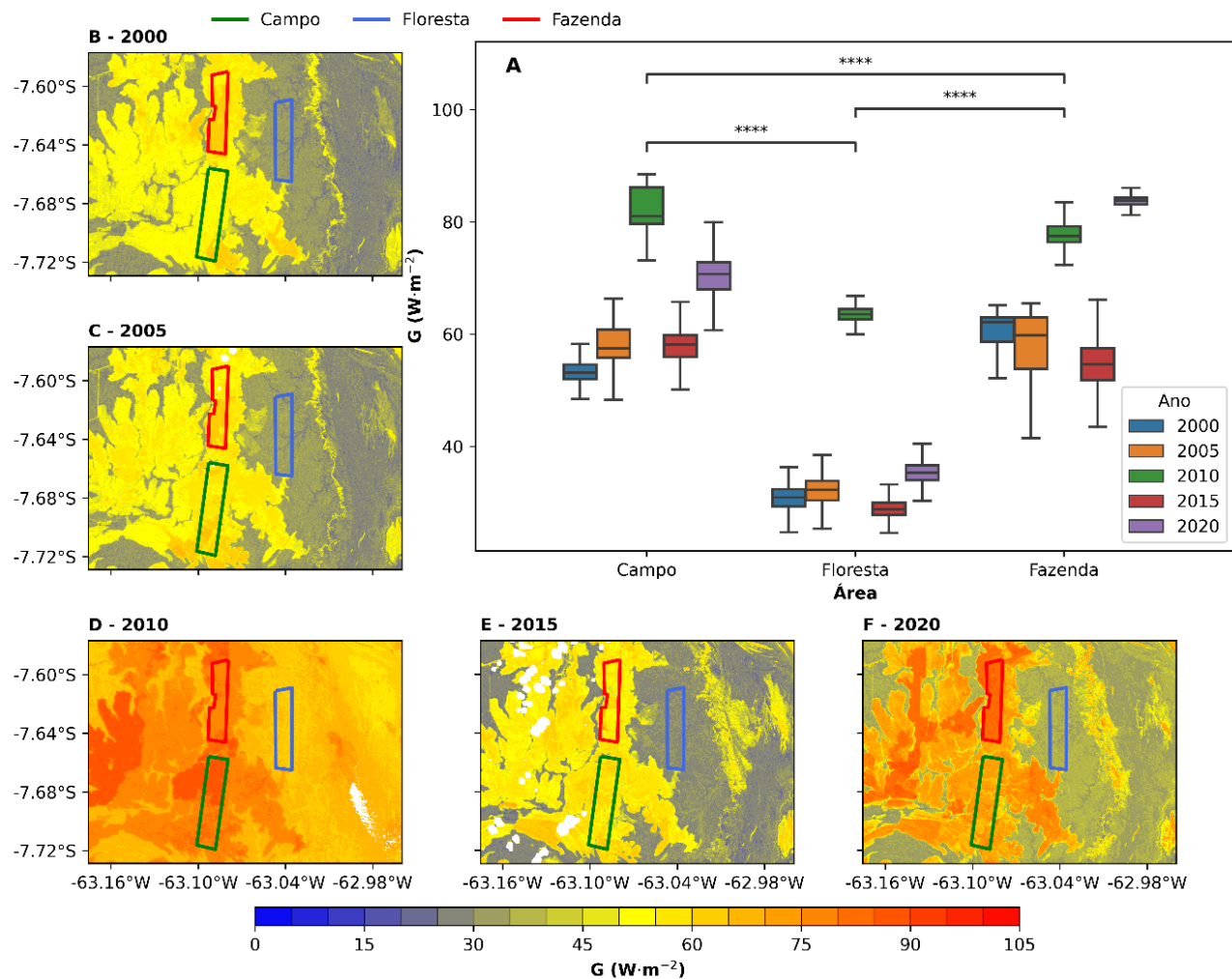


Figura 4 - Análise estatística do teste de Dunn e boxplot do fluxo de calor no solo (G) para as áreas de Campo, Fazenda e Floresta (A), e espacialização dos valores de G para os anos de 2000 (B), 2005 (C), 2010 (D), 2015 (E) e 2020 (F). **** correspondem ao p-valor do teste de Kruskal-Wallis.

Saldo de Radiação (R_N)

Os maiores valores de R_N se concentram na região de floresta com uma média de $518,24 W \cdot m^{-2}$, com médias máxima de $559,3 W \cdot m^{-2}$ e mínimo de $469,26 W \cdot m^{-2}$, mediana Q2 de $506,6 W \cdot m^{-2}$ e Q3 de $530 W \cdot m^{-2}$. A média de R_N para a área de campo e fazenda foi bem próxima: $493,6 W \cdot m^{-2}$ e $485,27 W \cdot m^{-2}$, respectivamente

e, a mediana Q2 de 485,7 W m⁻² e Q3 de 502,3 W m⁻² para área de campos, e Q2 igual a 476,9 W m⁻² e Q3 de 494 W m⁻² para fazenda (Figura 5A). Notou-se que, em todas as áreas, os maiores valores de R_N concentraram-se nos anos de 2010 e 2015, com exceção da área da fazenda, que obteve o maior valor em 2020 e não em 2015. Os menores valores ocorreram, para todos os sítios, no ano de 2005, o que foi também observado na área agrícola, com magnitude de aproximadamente 450 W m⁻². O teste de Kuskal-Wallis mostrou que as amostras não são provenientes da mesma distribuição (****: $p < 0,05$). O teste de Dunn evidenciou a semelhança entre campo e floresta, e apontou p-valor $p < 0,05$. O teste não mostrou semelhança entre as áreas ao serem comparadas com floresta, com p-valor corrigido sendo 0.

As áreas em que há pouca vegetação e menor disponibilidade hídrica (campos e fazenda), quando comparadas com florestas, tendem a possuir menores valores no balanço de ondas curtas por possuírem maior albedo superficial, o que resulta em um baixo R_N (QUERINO et al., 2017). Contudo, o contrário ocorre quando a vegetação é densa. Neste caso, regiões como as de florestas possuem menor albedo superficial e uma maior capacidade de absorção de radiação de ondas curtas e, conseqüentemente, maiores valores para R_N (dos SANTOS et al., 2011) (Figura 5A). Esta energia que fica em maior quantidade no sistema é mais utilizada nos diversos processos de ordem física, química e biológica, como, por exemplo, evapotranspiração, decomposição de matéria orgânica, entre outros (QUERINO et al., 2013; BIUDES et al., 2015)

Querino et al. (2016), em estudo sobre albedo e temperatura da superfície na região do sudoeste da Amazônia, atribuíram os baixos valores de R_N como consequência dos maiores valores de albedo e da temperatura da superfície na floresta. Os autores observaram que em áreas de solo exposto, como em campos e fazenda, apresentaram menor R_N e atribuíram a uma maior quantidade de energia refletida de volta para o espaço, por conseguinte, menos energia permanece à disposição para os processos biofísicos e químicos da superfície.

O R_N é formado pelo balanço de ondas curtas e longas sobre determinada superfície. O balanço de ondas curtas é controlado pela radiação solar incidente e refletida sobre uma superfície, como explicado anteriormente. Já a componente de ondas longas está diretamente relacionada com temperatura da superfície (neste caso, superfície terrestre) ou do meio, como, por exemplo, a atmosfera (QUERINO et al., 2020). A menor temperatura da superfície na área da floresta contribui para o aumento do balanço de ondas longas e, assim, para o aumento do R_N (FAUSTO et al., 2014). Desta forma, os valores elevados de R_N , em área de floresta, são uma combinação direta de baixos valores de albedo superficial, maior quantidade de água, maior índice de vegetação e menor temperatura da superfície (MARQUES et al., 2017).

A variabilidade interanual do R_N pode estar atribuída a condições climáticas específica de cada ano. Em condição de seca, principalmente quando estas ocorrem na estação chuvosa, há uma supressão na formação das nuvens e maior incidência de radiação solar e, conseqüentemente, tendem a aumentar o balanço de ondas curtas (ZENG et al., 2008). Situações de seca modificam por completo a quantidade de precipitação (Figura 3), bem como favorece o aumento da temperatura da superfície e do ar (SHE et al., 2024).

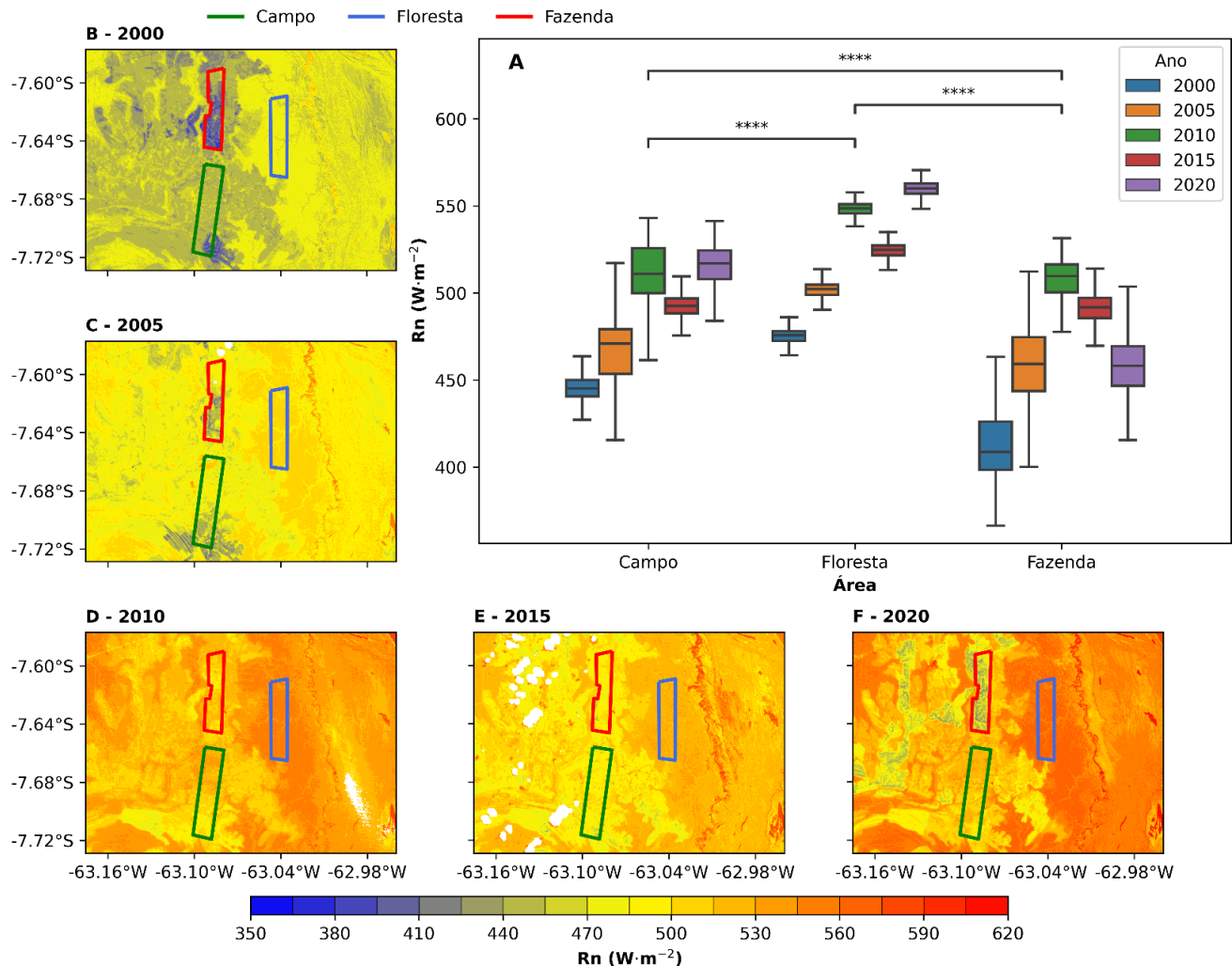


Figura 5 - Análise estatística do teste de Dunn e boxplot do Saldo de Radiação (R_N) para as áreas de Campo (CAM), Fazenda e Floresta (FL) (A) e espacialização dos valores de R_N para os anos de 2000 (B), 2005 (C), 2010 (D), 2015 (E) e 2020 (F). **** correspondem ao p-valor do teste de Kruskal-Wallis.

Fluxo de Calor Sensível (H) e Calor Latente (LE)

Os maiores valores médios de H foram observados nas regiões que possuem menor cobertura vegetativa, ou seja, em campos ($333,17 W m^{-2}$) e fazenda ($279,06 W m^{-2}$). Nos campos, a mediana Q2 foi de $287,2 W m^{-2}$ e Q3 foi de $403 W m^{-2}$, enquanto para fazenda, os quartis apresentaram uma mediana um pouco menor, $201 W m^{-2}$ para Q2 e $376 W m^{-2}$ para Q3. Observou-se que, além dos menores valores médios, a floresta

também apresentou as menores medianas com Q2 de 63,5 $W m^{-2}$ e Q3 de 170,6 $W m^{-2}$. O fluxo de LE comportou-se contrário ao fluxo de H , ou seja, apresentou os menores valores médios para as regiões com menor quantidade de vegetação, campos e fazenda (Figura 6). Para áreas de campos e fazenda foram observados mediana de Q2 sendo 43,3 $W m^{-2}$ e 154 $W m^{-2}$ e Q3 de 32,8 $W m^{-2}$ e 237,6 $W m^{-2}$, respectivamente. Por outro lado, para floresta, as menores médias foram de aproximadamente 400 $W m^{-2}$ e as máximas de 500 $W m^{-2}$.

Assim, como em todas as demais variáveis, o teste de Kuskal-Wallis mostrou que as amostras de H e LE não são provenientes da mesma distribuição, ****: $p \leq 0,05$. O teste de Dunn evidenciou a semelhança entre campos e fazenda, com p-valor corrigido também menor que 0,05. O teste não mostrou semelhança entre as áreas ao serem comparadas com floresta, com p-valor corrigido igual a 0 (Figuras 6 e 7).

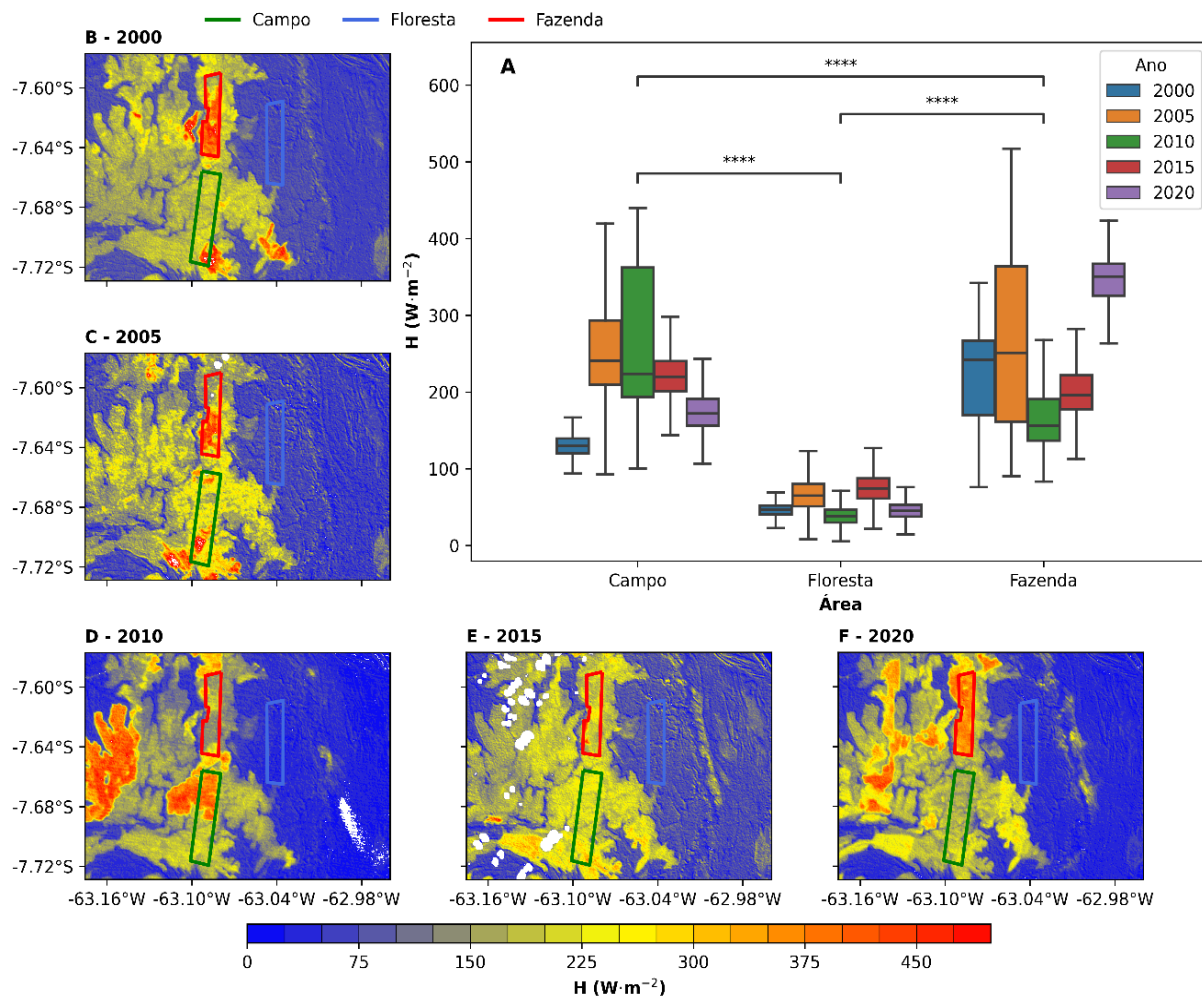


Figura 6 - Análise estatística do teste de Dunn e boxplot do fluxo de calor sensível (H) para as áreas de Campo (CAM), Fazenda e Floresta (FL) (A) e espacialização dos valores de H para os anos de 2000 (B), 2005 (C), 2010 (D), 2015 (E) e 2020 (F). **** correspondem ao p-valor do teste de Kruskal-Wallis.

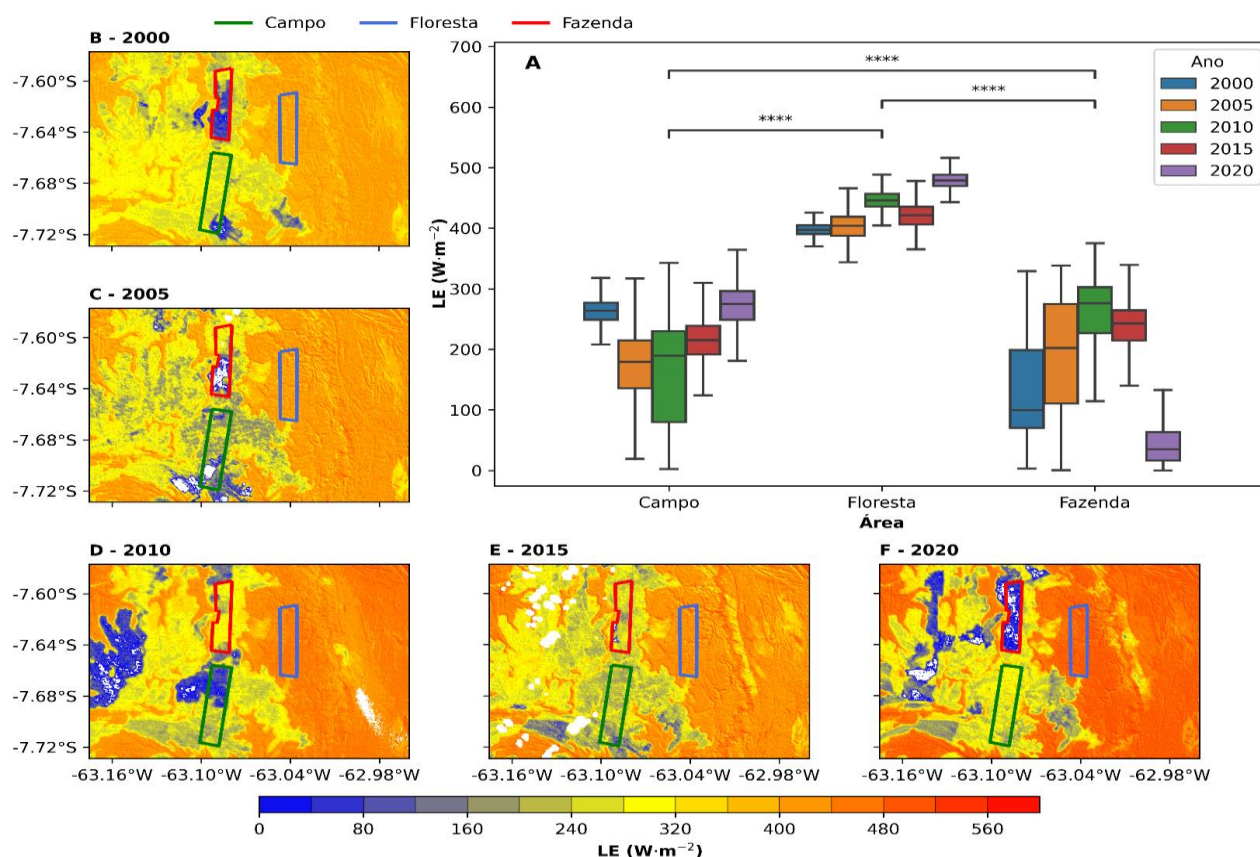


Figura 7 - Análise estatística do teste de Dunn e boxplot do fluxo de calor latente (LE) para as áreas de Campo (CAM), Fazenda Santa Rita (FSR) e Floresta (FL), para os anos de 2000 a 2020. **** corresponde ao p-valor do teste de Kruskal-Wallis.

Estudo comparando estimativas do fluxo de calor sensível e latente por satélite com medições terrestres, em vegetação de savana na Austrália, mostrou que os valores estimados de H e LE apresentou diferença média de acordo com erros relatados na literatura (BAZARRA et al., 2019). Ainda de acordo com autores, esses resultados indicam que a assimilação das sequências do produto Copernicus, como, por exemplo, os do ERA5-LAND, podem auxiliar no particionamento dos fluxos de calor sensível e latente, o que permite o uso destes modelos para estudos destas variáveis em áreas que não possuam dados de superfícies, como as áreas propostas neste artigo.

Nas regiões de campos e da fazenda, há uma tendência a uma menor disponibilidade de vapor d'água, quando comparadas com a floresta que possui uma extensa cobertura vegetativa. Assim, os menores valores de H são respostas do ambiente em relação ao G e ao R_N e quantidade de água disponível em cada ambiente. A maior parte da energia absorvida na floresta é utilizada nos diversos processos de ordem física, química e biológica. Assim, a maior parte da energia passa a ser utilizada pelas plantas em processos evapotranspirativos que ocasionam a diminuição do H e, conseqüentemente, resfria a superfície vegetada e o ar nas suas proximidades (BIUDES et al., 2015; ANGELINI et al., 2021). Estudos sobre balanço energético em florestas

deciduais nos Estados Unidos apontaram que parte da água contida no sistema é utilizada nos processos de crescimento da floresta e assimilação de carbono e, conseqüentemente, são liberadas no processo evapotranspirativo na forma de LE (ELIZABETH e ARAIN, 2023).

A região da floresta teve os maiores valores para LE , o que ocorre por conta da maior disponibilidade de vapor d'água na superfície, o que não ocorre nas regiões de campos e fazenda, que são regiões com o solo mais exposto e com menor disponibilidade de vapor d'água. De qualquer forma, tanto o fluxo de calor sensível como de calor latente tende a acompanhar a disponibilidade do R_N (VENÄLÄINEN et al., 1999). Os autores observaram que os maiores fluxos de H ocorriam próximo ao meio-dia e o LE reduzia nos anos secos. Provavelmente, a diminuição do LE está relacionada com a diminuição da umidade, mesmo na região de floresta, por conta da redução na precipitação (Figura 3), conforme também observado por Ataíde et al. (2020). A diferença no particionamento de energia entre os ambientes aqui estudados pode estar relacionada com elementos de estresse ambiental. Variáveis como clima (períodos de secas como as apresentadas na Figura 3) e o ciclo fenológico de todos os sítios podem ter impactos significativos no uso da água em cada ambiente, diminuindo o LE e aumentos do H (SETT et al., 2023). Os mesmos autores afirmaram também que diferentes espécies de plantas, sob condições geográficas semelhantes, com condições climáticas diferentes, apresentaram respostas fisiológicas diferentes, a depender de cada espécie de planta que possui características únicas e, conseqüentemente, impacta no particionamento dos fluxos de calor sensível e latente.

IV. CONCLUSÕES

O trabalho buscou comparar as componentes do balanço de energia, estimada pelo SEBAL, em áreas de floresta, campos e fazenda de cultivo de soja. Os resultados apresentaram semelhanças no balanço de energia na superfície para campos e fazenda, por apresentarem vegetação menos densa, que permite uma maior exposição do solo, e se distinguiram da região de floresta. Estas semelhanças e diferenças entre as áreas foram explicitadas pelo teste de Dunn, que mostrou por meio do p-valor ajustado, uma semelhança entre os componentes do balanço de energia entre as áreas de campo e fazenda e diferença quando comparadas com as áreas de florestas.

Nas comparações interanuais, ficou evidente o fator climático. Os anos que apresentaram déficit pluviométricos mais intensos impactaram diretamente no fluxo de calor no solo e R_N e, por conseguinte, nas componentes energéticas de H e LE .

Evidenciou-se o impacto da mudança de cobertura da terra, quando há a conversão de áreas de florestas em áreas de cultivo. Contudo, o estudo mostra que não há quase impacto no balanço energético se houver a substituição de áreas de campos naturais por áreas de cultivo de soja.

V. REFERÊNCIAS

ALLEN, R.; IRMAK, A.; TREZZA, R.; HENDRICKX, J. M. H.; BASTIAANSEN, W.; KJAERGAARD, J. Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrological Processes*, v. 25, n. 26, 2011, p. 4011–4027. <https://doi.org/10.1002/hyp.8408>.

ANDRADE, M. B. T.; FERRANTE, L.; FEARNSIDE, P. M. Brazil's Highway BR-319 demonstrates a crucial lack of environmental governance in Amazonia. In *Environmental Conservation*. v. 48, n. 3, 2021 p. 161–164. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/S0376892921000084>.

ANGELINI, L. P.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; GELI, H. M. E.; VOURLITIS, G. L.; RUHOFF, A.; NOGUEIRA, J. de S. Surface albedo and temperature models for surface energy balance fluxes and evapotranspiration using Sebal and Landsat 8 over Cerrado-Pantanal, Brazil. *Sensors*, 21 (21), 2021. <https://doi.org/10.3390/s21217196>.

ARYALEKSHMI, B. N.; BIRADAR, R. C.; CHANDRASEKAR, K.; MOHAMMED AHAMED, J. Analysis of various surface energy balance models for evapotranspiration estimation using satellite data. In *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, v. 24, n. 3, 2021, p. 1119–1126. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.11.007>.

ATAIDE, W. L. S.; OLIVEIRA, F. S.; PINTO, C. A. Balanço de radiação, energia e fechamento do balanço em uma floresta prístina na Amazônia oriental. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, 2020, p. 2603-2627. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.6.p2603-2627>.

AWADA H., SIRCA, C.; MARRAS, S.; CASTELLINI, M.; SPANO D.; PIRASTRU M. Modelling soil moisture and daily actual evapotranspiration: Integrating remote sensing surface energy balance and 1D Richards equation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 128, 103744, 2024, p. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103744>.

BARBER, C. P.; COCHRANE, M. A.; SOUZA, C. M.; LAURANCE, W. F. Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas in the Amazon. *Biological Conservation*, v. 177, 2014 p.203–209. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.07.004>.

BARRAZA, V.; GRINGS, F.; FRANCO, M.; DOUNA, V.; ENTEKHABI, D.; RESTREPO-COUBE, N.; HUETE, A.; GASSMANN, M.; ROITBERG, E. Estimation of latent heat flux using satellite land surface temperature and a variational data assimilation scheme over a eucalypt forest savanna in Northern Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 268, p. 341-353. ISSN 0168-1923. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.01.032>.

BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, vol. 212-213, 1998, p. 198-212. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4).

BASTIAANSEN, W. G. M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, vol. 229, n. 1-2, 2000, p. 87-100. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00202-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00202-4).

BASTIAANSSEN, W. G. M.; NOORDMAN, E. J. M.; PELGRUM, H.; DAVIDS, G.; THORESON, B. P.; ALLEN, R. G. SEBAL Model with Remotely Sensed Data to Improve Water-Resources Management under Actual Field Conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 131, n. 1, 2005, p. 85–93. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(85\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(85)).

BECK, H. E.; VAN DIJK, A. I. J. M.; LEVIZZANI, V.; SCHELLEKENS, J.; MIRALLES, D. G.; MARTENS, B.; de ROO, A. MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 21, n. 1, 2017, p. 589–615. <https://doi.org/10.5194/hess-21-589-2017>.

BHATTARAI, N.; LIU, T. LandMOD ET mapper: A new matlab-based graphical user interface (GUI) for automated implementation of SEBAL and METRIC models in thermal imagery. *Environmental Modelling and Software*, vol. 118, 2019p. 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.04.007>.

BIUDES, M. S.; VOURLITIS, G. L.; MACHADO, N. G.; de ARRUDA, P. H. Z.; NEVES, G. A. R.; de ALMEIDA LOBO, F.; NEALE, C. M. U.; de SOUZA NOGUEIRA, J. Patterns of energy exchange for tropical ecosystems across a climate gradient in Mato Grosso, Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 202, 2015, p. 112–124. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.12.008>.

CAMPOS, M. B. de L. M. B.; DANELICHEN, V. H. M. Sensoriamento Remoto e Estudos de Clima Urbano. *Ensaio e Ciência Biológicas Agrárias e da Saúde*, v. 25, n. 2, 2021, p. 195–199. <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2021v25n2p195-199>.

CARNEIRO, R. G.; MOURA, M. A. L.; LYRA, R. F. DA F.; ANDRADE, A. M. D. DE; SANTOS, A. B. DOS; MAIA, R. G. X. Fluxo de calor do solo e saldo de radiação dentro de uma área de Mata Atlântica em comparação com uma área de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 6, n. 3, 2013, p. 555-565. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v6.3.p555-565>.

CARNEIRO, R. G.; BORGES, C. K.; SANTOS, C. A.; de OLIVEIRA, G.; STACHLEWSKA, I. S.; FISCH, G.; dos SANTOS, C. A. C. Energy balance closure and evapotranspiration hysteresis in central Amazon under contrasting conditions during the GoAmazon project in 2014 and 2015. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 132, 2023, p. 104686. ISSN 0895-9811. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2023.104686>.

CHANG, Y.; DING, Y.; ZHAO, Q.; ZHANG, S. Remote estimation of terrestrial evapotranspiration by Landsat 5 TM and the SEBAL model in cold and high-altitude regions: a case study of the upper reach of the Shule River Basin, China. *Hydrological Processes*, v. 31, n. 3, 2017, p. 514-524. <https://doi.org/10.1002/hyp.10854>.

CORRÊA, P. B.; CÂNDIDO, L. A.; de SOUZA, R. A. F.; ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. Heat islands in Manaus City: Study with remote sensing data, modeling and meteorological data. *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 31, n. 2, 2016, p. 167–176. <https://doi.org/10.1590/0102-778631220150012>.

COSTA JÚNIOR, V. G.; SANTOS, C. A. C. dos; SILVA, T. L. do V. Balanço de energia à superfície em áreas heterogêneas através de algoritmos de sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 10, n. 2, 2017, p. 454-467. <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20170028>.

DOMINGUES, M. S.; BERMANN, C. O arco de desflorestamento na Amazônia: da pecuária à soja. *Ambiente & Sociedade*, v. 15, n. 2, 2012, p. 1–22. <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2012000200002>.

ELIZABETH, A. R.; ARAIN, M. A. Impacts of heat and drought on the dynamics of water fluxes in a temperate deciduous forest from 2012 to 2020. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 344, 2024, p. 109791. ISSN 0168-1923. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109791>.

FAUSTO, M. A.; MACHADO, N. G.; NOGUEIRA, J. S.; BIUDES, M. S. Net radiation estimated by remote sensing in Cerrado areas in the Upper Paraguay River Basin. *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 8, 2014, p. 083541.

FEARNSIDE, P. Deforestation of the Brazilian Amazon. In *Oxford Research Encyclopedia of Environmental Science*. Oxford University Press, 2017, p. 1-49. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389414.013.102>.

FIEDLER, F.; PANOFKY, H. A. The geostrophic drag coefficient and the 'effective' roughness length. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 98, n. 415, p. 213–220, 1972. <https://doi.org/10.1002/qj.49709841519>.

GÓMEZ, M.; OLIOSO, A.; SOBRINO, J. A.; JACOB, F. Retrieval of evapotranspiration over the Alpillés/ReSeDA experimental site using airborne POLDER sensor and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, v. 96, n. 3–4, 2005, p. 399–408. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.006>.

GONÇALVES, I. Z.; RUHOFF, A.; LAIPELT, L.; BISPO R. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; NEALE, C. M. U.; TEIXEIRA, A. H. C.; MARIN, F. R. Remote sensing-based evapotranspiration modeling using geeSEBAL for sugarcane irrigation management in Brazil. *Agricultural Water Management*, v. 274, 2022, p. 1-12. ISSN 0378-3774, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107965>.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 3 mai. 2022.

Instituto de Desenvolvimento Agropecuário e Florestal Sustentável do Estado do Amazonas (IDAM). 2018. Disponível em: <https://www.idam.gov.br>. Acesso em: 10 mai. 2022.

Instituto de Desenvolvimento Agropecuário e Florestal Sustentável do Estado do Amazonas (IDAM). 2020. Disponível em: <https://www.idam.gov.br>. Acesso em: 22 de set. 2023.

JAAFAR, H. H.; AHMAD, F. A. Time series trends of Landsat-based ET using automated calibration in METRIC and SEBAL: The Bekaa Valley, Lebanon. *Remote Sensing of Environment*, v. 238, 2021, p. 111034. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.033>.

KREBS-KANZOW, U.; GIERZ, P.; RODEHACKE, C. B.; XU, S.; YANG, H.; LOHMANN, G. The diurnal Energy Balance Model (dEBM): A convenient surface mass balance solution for ice sheets in Earth system modeling. *Cryosphere*, v. 15, n. 5, 2021, p. 2295–2313. <https://doi.org/10.5194/tc-15-2295-2021>.

KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, vol. 47, n. 260, 1952, p. 583-621. [dx.doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441](https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441).

LAIPELT, L.; KAYSER, R. H. B.; FLEISCHMANN, A. S.; RUHOFF, A.; BASTIAANSSEN, W.; ERICKSON, T. A.; MELTON, F. Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 178, 2021, p. 81–96. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.05.018>.

LI, G.; JING, Y.; WU, Y.; ZHANG, F. Improvement of two evapotranspiration estimation models using a linear spectral mixture model over a small agricultural watershed. *Water (Switzerland)*, vol. 10, n. 4, 2018, p. 1-17. <https://doi.org/10.3390/w10040474>.

LI, Y.; KUSTAS, W. P.; HUANG, C.; NIETO, H.; HAGHIGHI, E.; ANDERSON, M. C.; DOMINGO, F.; GARCIA, M.; SCOTT, R. L. Evaluating Soil Resistance Formulations in Thermal-Based Two-Source Energy Balance (TSEB) Model: Implications for Heterogeneous Semiarid and Arid Regions. *Water Resources Research*, v. 55, n. 2, 2019, p. 1059-1078. <https://doi.org/10.1029/2018WR022981>.

LIMA, M. do S. B. de. Políticas públicas e territórios: uma discussão sobre os determinantes da soja no sul do Amazonas. 390f. Tese. (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MACHADO, C. C.; SILVA, B. B. da; ALBUQUERQUE, M. de B.; Domiciano Galvíncio, J. Estimativa do balanço de energia utilizando imagens Tm-Landsat 5 e o algoritmo Sebal no litoral Sul de Pernambuco. *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 29, n. 1, 2014 p. 55 - 67.

MARQUES, H. O. Estimativa do saldo de radiação de uma floresta de transição Amazônia-Cerrado por Sensoriamento Remoto. 53 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2015.

MARQUES, H. O.; BIUDES, M. S.; PAVÃO, V. M.; MACHADO, N. G.; QUERINO, C. A. S.; DANIELICHEN, V. H. de M. Estimated net radiation in an Amazon–Cerrado transition forest by Landsat 5 TM. *Journal of Applied Remote Sensing*, v. 11, n. 04, 2017, p. 1046020-1 - 046020-12. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.11.046020>.

MARTINS, P. A. da S. Normais Climatológicas, Balanço Hídrico e Classificação Climática para a Mesorregião Sul do Amazonas. 87 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade Federal do Amazonas, Humaitá, 2019.

MARTINS, P. A. da S.; QUERINO, C. A. dos S.; QUERINO, J. K. A. da S.; MOURA, M. A. L.; NUNES, D. D.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S. Updating of the Köppen and Thornthwaite and Mather (1955) climate classification system for the Southern Amazonas. *Revista do Departamento de Geografia da USP*, vol. 43, 2023, p. 1-13 e191137. <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2023.191137>.

MATSUNAGA, W. K.; RODRIGUES, H. J. B.; RODRIGUES, P. G. Microbiological attributes of the soil, associated to microfauna activities of soil in the Amazonia Forest. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 41, n. 3, p. 630–638. <https://doi.org/10.11137/20183630638>.

MIRANDA, E. de; CARVALHO, C. A. de; ROBERTO, P.; MARTINHO, R.; OSHIRO, O. T. Contribuições do geoprocessamento à compreensão do mundo rural e do desmatamento no bioma Amazônia. *Colóquio - Revista do Desenvolvimento Regional-Faccat-Taquara/RS*, vol. 17, n. 1, 2020, p. 16 - 34.

MOURA, A. R. de M.; QUERINO, C. A. S.; QUERINO, J. K. A. da S.; PEDREIRA JUNIOR, A. L.; SANTOS, L. O. F. dos; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S. Impact of a dam construction on the surface biophysical parameters in Amazonia. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 15, 2019, p. 1 - 8. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100243>.

MULLAN, K.; CAVIGLIA-HARRIS, J. L.; SILLS, E. O. Sustainability of agricultural production following deforestation in the tropics: Evidence on the value of newly-deforested, long-deforested and forested land in the Brazilian Amazon. *Land Use Policy*, v. 108, 2021, p. 1 - 13. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105660>.

NINA, M. M.; SANTOS, C. P. dos; ROCHA, S. F. da; CAVALCANTE, F. S. A.; LIMA, R. A. Potencialidade de Manihot esculenta Crantz (Euphorbiaceae) na Floresta Amazônica, Brasil. *Diversitas Journal*, v. 6, n. 2, 2021, p. 2247–2260. <https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v6i2-1253>.

O'BRIEN, P. L.; DAIGH, A. L. M. Tillage practices alter the surface energy balance – A review. In *Soil and Tillage Research*, v. 195, 2019, p. 1 - 7. Elsevier B.V. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104354>.

PAVÃO, V. M.; QUERINO, C. A. S.; BENEDITTI, C. A.; PAVÃO, L. L.; QUERINO, J. K. A. da S.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S. Variação espacial e temporal do saldo de radiação superficial em uma área do Sul do Amazonas. *Revista Ra'e Ga –Curitiba*, v. 37, 2016, p. 333-352.

PEDREIRA JUNIOR, A. L.; QUERINO, C. A. S.; QUERINO, J. K. A. da S.; SANTOS, L. O. F. dos; MOURA, A. R. de M.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S. Variabilidade horária e intensidade sazonal da precipitação no município de Humaitá-AM. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 22, 2018, p. 463 - 475. <https://doi.org/10.5380/abclima.v22i0.58089>.

PONTES, A. C. F. Obtenção dos níveis de significância para os testes de Kruskal-Wallis, Friedman e comparações múltiplas não-paramétricas. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agronômica) Biblioteca Digital (USP), 2000. <https://doi.org/10.11606/D.11.2000.tde-15032002-093020>.

QUERINO, C. A. S.; BENEDITTI, C. A.; MACHADO, N. G.; da SILVA, M. J. G.; QUERINO, J. K. A. da S.; NETO, L. A. dos S.; BIUDES, M. S. Spatiotemporal NDVI, LAI, albedo, and surface temperature dynamics in the southwest of the Brazilian Amazon forest. *J. Appl. Remote Sens*, v. 10, n.2, 2016, p. 026007. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.026007>.

QUERINO, C. A. S.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; QUERINO, J. K. A. S.; MOURA, M. A. L.; ALVES, P. V. Modelling parametrization to estimate atmospheric long wave radiation in the Northern Mato Grosso, Brazil. *Ciência e Natura*, v. 42, 2020, p. e105.

QUERINO, C. A. S.; BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; QUERINO, J. K. A. S.; SANTOS NETO, L. A.; SILVA, M. J. G. da, ARRUDA, P.; NOGUEIRA, J. S. Balanço de ondas curtas sobre floresta sazonalmente alagável do Pantanal Mato-Grossense. *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 20, 2017, p. 252-266.

QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; LYRA, R. F. F.; MARIANO, G. L. Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zênital na região amazônica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 21, n. Especial, 2006, p. 42-49.

QUERINO, C. A. S.; MOURA, M. A. L.; QUERINO, J. K. A. da S. Impacto do desmatamento de uma área de mangue no albedo superficial. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 28, 2013, p. 401-408.

REIS, F. da S.; ROCHA, K. da S. Áreas protegidas e o desmatamento no Sudoeste Amazônico: Método remoto de avaliação / Protected areas and deforestation in the southwest amazon: remote assessment method. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 12, 2022, p.121850–121865. <https://doi.org/10.34117/bjdv7n12-785>.

REIS, M. dos; GRAÇA, P. M. L. de A.; YANAI, A. M.; RAMOS, C. J. P.; FEARNSIDE, P. M. Forest fires and deforestation in the central Amazon: Effects of landscape and climate on spatial and temporal dynamics. *Journal of Environmental Management*, v. 288, 2021, p. 1 - 12. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112310>

ROCHA, N. S. da; KÄFER, P. S.; SKOKOVIC, D.; VEECK, G.; DIAZ, L. R.; KAISER, E. A.; CARVALHO, C. M.; CRUZ, R. C.; SOBRINO, J. A.; ROBERTI, D. R.; ROLIM, S. B. A. The influence of land surface temperature in evapotranspiration estimated by the s-sebi model. *Atmosphere*, v. 11 n. 10, 2020, p. 1 - 18. <https://doi.org/10.3390/atmos11101059>.

ROERINK, G. J.; SU, Z.; MENENTI, M. S-SEBI: A Simple Remote Sensing Algorithm to Estimate the Surface Energy Balance. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B*, v. 25, n. 2, 2000, p. 147 - 157. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(99\)00128-8](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(99)00128-8).

ROTHMUNDO, L. D; ALMEIDA JÚNIOR, E. S; LIMA, L. P. de A.; MASSAD, H. A. B.; PALÁCIOS, R. da S.; BIUDES, M. S; MACHADO, N. G, NOGUEIRA, J. S. Impacto da alteração da cobertura do solo nos parâmetros biofísicos no Sul da Floresta Amazônica por sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Climatologia*. vol. 25, n. jul/dez, 2019, p. 122 - 137. <https://doi.org/10.5380/abclima.v25i0.62677>.

RUHOFF, A.; PAZ, A.; COLLISCHONN, W.; ARAGÃO, L.; ROCHA, H. S.; MALHI, Y. A MODIS Based Energy Balance to Estimate Evapotranspiration for Clear-Sky Days. In Brazilian Tropical Savannas, Remote Sensing, vol. 4, n. 3, 2012 p. 703-725. <https://doi.org/10.3390/rs4030703>.

SANTOS, C. A. dos; NASCIMENTO, R. L. do; RAO, T. V. R. Net radiation estimation under pasture and forest in Rondônia, Brazil, with TM Landsat 5 images. *Atmosfera*, v. 24, n. 4, 2011, p. 435-446.

SENAY, G. B.; BOHMS, S.; SINGH, R. K.; GOWDA, P. H.; VELPURI, N. M.; ALEMU, H.; VERDIN, J. P. Operational Evapotranspiration Mapping Using Remote Sensing and Weather Datasets: A New Parameterization for the SSEB Approach. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 49, n. 3, 2013, p. 577–591. <https://doi.org/10.1111/jawr.12057>.

SETT, T.; NANDY, S.; PATEL, N. R.; PADALIA, H.; SRINET, R.; WATHAM, T. Spatio-temporal dynamics of water use efficiency over forest ecosystems using time series satellite data and carbon flux measurements. *Forest Ecology and Management*, v.548, 2023, p. 1 - 12. ISSN 0378-1127. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121385>.

SHE, X.; LI, Y.; JIAO, W.; SUN, Y.; NI, X.; ZUO, Z.; KNYAZIKHIN, Y.; MYNENI, R. B. Varied responses of Amazon forests to the 2005, 2010, and 2015/2016 droughts inferred from multi-source satellite data. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 353, 2024, p. 1 - 10. ISSN 0168-1923. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110051>.

SILVA, C. A.; SANTILLI, G.; EYJI SANO, E.; RODRIGUES, S. W. P. Análise Qualitativa do Desmatamento na Floresta Amazônica a partir de Sensores SAR, Óptico e Termal (Qualitative Analysis of Deforestation in the Amazonian Rainforest from SAR, Optical and Thermal Sensors). *Anuário do Instituto de Geociências (UFRJ)*, v. 42, n. 4, 2019, p. 18-29. https://doi.org/10.11137/2019_4_1_18_29.

SILVA, C. de O. F. da; MAGNONI, P. H. J.; MANZIO, R. L. Sensoriamento remoto orbital para modelagem da evapotranspiração: síntese teórica e aplicações em computação na nuvem. *Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas*, v. 15, n. 3, 2021, p. 425–468. <https://doi.org/10.18011/bioeng2021v15n3p425-468>.

SILVA, V. V. da; ARAÚJO, J. N.; LIMA, L. A. P. O Agronegócio e as transformações na fronteira no Sul do Amazonas. In: *Anais do XIV ENANPEGE*. Campina Grande: Realize Editora, 2021.

SILVA, V. V. da; SILVA, R. G. da C.; LIMA, L. A. P. A estruturação da fronteira agrícola no Sul do estado do Amazonas. *Geographia Opportuno Tempore*, v.5, n. 1, 2019, p. 67–82. <https://doi.org/10.5433/got.2019.v5.37193>.

SINGH, R. K.; SENAY, G. B. Comparison of four different energy balance models for estimating EvapoTranspiration in the Midwestern United States. *Water (Switzerland)*, v. 8, n. 1, 2016, p. 1 - 19. <https://doi.org/10.3390/w8010009>.

SONG, L.; LIU, S.; KUSTAS, W. P.; ZHOU, J.; XU, Z.; XIA, T.; LI, M. Application of remote sensing-based two-source energy balance model for mapping field surface fluxes with composite and component surface temperatures. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 230–231, 2016, p. 8–19. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.01.005>.

SOUZA, A. C. de. Análise de Tendências e Fatores determinantes da intensificação de sistemas convectivos de mesoescala e linhas de instabilidade na costa Norte-Nordeste da América do Sul. 160 f. Tese (Doutorado em Clima e Ambiente) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2020.

SOUZA, S. A. S., QUERINO, C. A. S.; QUERINO, J. K. A. S.; MARTINS, P. A. S.; VAZ, M. A. B. Variabilidade da precipitação na mesorregião sul do Amazonas em decorrência de eventos de El Niño. *Revista Ra'eGa - O Espaço Geográfico em Análise*, v. 54, 2022, p. 23-36. <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v54i0.73972>.

SOUZA, S. A. S.; QUERINO, C. A. S.; FERREIRA, N. C.; MOURA, M. A. L.; MARCELO, S. B.; MACHADO, N. G.; VOGT, R. H. M.; QUERINO, J. K. A. S.; ROHLER, L. A. S. Spatiotemporal variability of precipitation and surface temperature in the southern mesoregion of Amazonas, Brazil, during the occurrence of ENSO. *Ciência e Natura*, vol. 44, 2022, p. 1 - 20. <http://dx.doi.org/10.5902/2179460x65690>.

SU, Z. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 6, n. 1, 2002, p. 85 - 100. <https://doi.org/10.5194/hess-6-85-2002>.

TANG, R.; LI, Z. L.; CHEN, K. S.; JIA, Y.; LI, C.; SUN, X. Spatial-scale effect on the SEBAL model for evapotranspiration estimation using remote sensing data. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 174–175, 2013, p. 28–42. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.01.008>

TEIXEIRA, A. H. de C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil. Part A: Calibration and validation. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 149, n. 3–4, 2009, p. 462–476. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.09.016>.

TIAN L.; TONG Y.; CHENG Y.; LI M.; LETCHER S. G.; ZANG R.; DING Y. Drought diminishes aboveground biomass accumulation rate during secondary succession in a tropical forest on Hainan Island, China. *Forest Ecology and Management*, v. 544, 2023, p. 1 - 10. ISSN 0378-1127. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121222>.

VAN DER TOL, C. Validation of remote sensing of bare soil ground heat flux. *Remote Sensing of Environment*, v. 121, 2012, p. 275-286. ISSN 0034-4257, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.009>.

VARGHA, A.; DELANEY, H. D. The Kruskal-Wallis Test and Stochastic Homogeneity. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, vol. 23, n. 2, 1998, p. 170 - 192.

VELOSO, G. A. Análise espaço temporal dos componentes do balanço de radiação, energia e evapotranspiração, usando técnicas de sensoriamento remoto em áreas irrigadas do Projeto Jaíba/MG. 136f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

VELOSO, T.; SANTOS, D.; FONTANA, D. C.; CÁSSIA, R.; ALVES, M. Avaliação de fluxos de calor e evapotranspiração pelo modelo SEBAL com uso de dados do sensor ASTER (Evaluation of heat fluxes and evapotranspiration using SEBAL model with data from ASTER sensor). *Pesq. agropec. bras.* Brasília, vol. 45, n. 5, 2010, p. 488-496.

VENÄLÄINEN, A.; FRECH, M.; HEIKINHEIMO, M.; GRELL, A. Comparison of latent and sensible heat fluxes over boreal lakes with concurrent fluxes over a forest: implications for regional averaging. *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 98–99, 1999, p. 535-546. ISSN 0168-1923. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00100-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00100-8).

VILA NOVA, R. A. Técnicas do sensoriamento remoto aplicadas a estudos ambientais. 78 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) - Universidade Federal de Pernambuco - Centro de Tecnologia e Geociências, Recife, 2021.

WAGLE, P.; BHATTARAI, N.; GOWDA, P. H.; KAKANI, V. G. Performance of five surface energy balance models for estimating daily evapotranspiration in high biomass sorghum. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 128, 2017, p. 192–203. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.03.022>.

WEST, T. A. P.; FEARNSIDE, P. M. Brazil's conservation reform and the reduction of deforestation in Amazonia. *Land Use Policy*, vol.100, 2021, p. 1 - 12. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105072>.

YAO, Y.; MALLIK, A. U. Estimation of actual evapotranspiration and water stress in the Lijiang River Basin, China using a modified Operational Simplified Surface Energy Balance (SSEBop) model. *Journal of Hydro-Environment Research*, v. 41, 2022, p. 1–11 2022.

ZENG, N.; YOON, J.H.; MARENGO, J. A.; SUBRAMANIAM, A.; NOBRE, C. A.; MARIOTTI, A.; NEELIN, J. D. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. *Environmental Research Letters*. v. 3, 2008, p. 1 - 10. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/3/1/014002>.

ZHANG, H. L.; BAEYENS, J.; CÁCERES, G., DEGREVÈ, J.; LV, Y. Modular object-orient methodology for the resolution of molten salt storage tanks for CSP plants. *Process in Energy and Combustion Science*, vol. 53, 2016, p.1-40.
