

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Análise da evapotranspiração e balanço de energia por meio da
razão de Bowen e sensoriamento remoto nas culturas da batata e
soja**

Victor Proença do Amaral

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração:
Engenharia de Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2024**

Victor Proença do Amaral
Engenheiro Agrônomo

**Análise da evapotranspiração e balanço de energia por meio da razão de
Bowen e sensoriamento remoto nas culturas da batata e soja**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

Prof. Dr. **FELIPE GUSTAVO PILAU**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração:
Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2024

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Amaral, Victor Proença do

Análise da evapotranspiração e balanço de energia por meio da razão de Bowen e sensoriamento remoto nas culturas da batata e soja / Victor Proença do Amaral. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2024.

76 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Coeficiente de cultura 2. SEBAL 3. SSEBop 4. Demanda hídrica I.
Título

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade de São Paulo (USP/ESALQ), seu corpo docente, direção e administração pela oportunidade de melhorar a minha formação acadêmica e pessoal.

A minha mãe Liege Proença e a minha tia Carmen Proença, por me apoiarem na conquista de mais essa vitória e serem pessoas maravilhosas na minha vida.

Ao professor Dr. Felipe Gustavo Pilau, pela orientação, apoio e paciência durante esta jornada.

Aos meus amigos José Reinaldo, André Juliate, Marcos Munin, Mateus Pereira, Fagner Nery, Franciely Yovio, Ogue Brito, Fabricio Lobo, Anderson Fernandes, Fabricio Favacho pelo apoio incondicional.

Aos meus amigos que conquistei na pós-graduação: Maila Almeida e Edivaldo Abreu pela amizade e ensinamentos.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Por fim, agradeço a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT.....	7
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	9
Referências	10
2. ANÁLISE DOS FLUXOS DO BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM SUBPERÍODOS DE DESENVOLVIMENTO DA SOJA	15
Resumo.....	15
Abstract	15
2.1. Introdução	16
2.2. Materiais e Métodos	17
2.3. Resultados e Discussão	20
2.4. Conclusões	31
Referências	32
3. EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTURA (Kc) ATRAVÉS DO SENSORIAMENTO REMOTO NA CULTURA DA BATATA	39
Resumo.....	39
Abstract	41
3.1. Introdução	40
3.2. Material e Métodos.....	42
3.2.1. Localização e caracterização das área de estudo	42
3.2.2. Monitoramento das variáveis ambientais.....	43
3.2.3. Dados de sensoriamento remoto.....	43
3.2.4. Método Razão de Bowen	44
3.2.5. Aplicativo Google Earth Engine (GEE): geeSEBAL	46
3.2.6. Aplicativo Google Earth Engine (GEE): SSEBop ^{BR}	49
3.2.7. Estimativa do Índice de Área Foliar (LAI)	51
3.2.8. Coeficiente de cultura (Kc).....	51
3.2.9. Método de Penman-Montheith (FAO 56).....	51
3.2.10. Análise estatística	52
3.3. Resultados e Discussão.....	53

3.3.1. Evapotranspiração da cultura da batata.....	54
3.3.2. Avaliação do NDVI e LAI na cultura da batata	56
3.3.3. Aplicação do modelo SEBAL e SSEBop para estimativa da evapotranspiração da cultura da batata	57
3.3.4. Análise de desempenho.....	60
3.3.5. Coeficiente de cultura.....	62
3.4. Conclusões.....	65
Referências.....	66

RESUMO

Análise da evapotranspiração e balanço de energia por meio da razão de Bowen e sensoriamento remoto nas culturas da batata e soja

O presente trabalho teve como objetivos realizar a partição do balanço de energia e calcular a evapotranspiração real da cultura nos subperíodos de desenvolvimento da soja (*Glycine max (L.) Merril*), utilizando o método razão de Bowen. Avaliou-se o desempenho dos modelos SEBAL e SSEBop na estimativa da evapotranspiração da cultura e do Kc da batata (*Solanum tuberosum* L.) irrigada por pivô central. O estudo da cultura da soja foi conduzido no município de Londrina-PR, no período de dezembro de 2005 a abril de 2006. Já o estudo com a cultura da batata foi conduzido entre maio a setembro de 2016 no município de Vargem Grande do Sul - SP. Nos dois estudos, foi utilizado o método razão de Bowen para calcular o balanço de energia, além de medir a evapotranspiração e validar as estimativas obtidas pelos modelos SEBAL e SSEBop. A soja no período entre a fase vegetativa e o início do florescimento (V2-R1) apresentou um fluxo de calor latente (LE) que consumiu 57% da energia radiante, 35% em calor sensível (H) e apenas 8% em calor do solo (G). Porém, na fase de maturação fisiológica (R7-R8), o fluxo de calor sensível (H) representou 34% do saldo de radiação, enquanto o calor latente representou 55%. A evapotranspiração real acumulada foi de 301,76 mm, tendo uma média diária de 3,51 mm.d⁻¹. Para a cultura da batata, a ETc acumulada foi de 300,29 mm. O SEBAL apresentou R² de 0,79 e RMSE de 1,54 mm.d⁻¹, já pelo SSEBop R² foi de 0,85 e RMSE de 1,27 mm.d⁻¹. Os resultados apontaram que os algoritmos SEBAL e SSEBop foram consistentes com os valores medidos em campo, para estimar a ETc.

Palavras-chave: Coeficiente de cultura (Kc), SEBAL, SSEBop

ABSTRACT

Analysis of evapotranspiration and energy balance through Bowen ratio and remote sensing in potato and soybean crops

The objectives of this work were to partition the energy balance and calculate the actual evapotranspiration of the crop in the subperiods of soybean development (*Glycine max* (L.) Merrill), using Bowen's reason method. The performance of the SEBAL and SSEBop models was assessed in estimating the evapotranspiration of the crop and the Kc of the potato (*Solanum tuberosum* L.) irrigated by central pivot. The study of soy culture was conducted in the municipality of Londrina-PR, in the period from December 2005 to April 2006. The study with the potato culture was conducted between May and September 2016 in the municipality of Vargem Grande do Sul - SP. In both studies, the Bowen ratio method was used to calculate the energy balance, as well as to measure evapotranspiration and validate the estimates obtained by the SEBAL and SSEBop models. Soybean in the period between the vegetative phase and the beginning of flowering (V2-R1) showed a latent heat flow (LE) that consumed 57% of the radiant energy, 35% in heat sensitive (H) and only 8% in soil heat (G). However, in the phase of physiological maturity (R7-R8), the sensitive heat flow (H) represented 34% of the radiation balance, while the latent heat represented 55%. The actual accumulated evapotranspiration was 301.76 mm, with a daily average of 3.51 mm.d⁻¹. For potato culture, the accumulated ETc was 300,29 mm. The SEBAL presented R2 of 0.79 and RMSE of 1.54 mm.d⁻¹, already for the SSEBop R2 was of 0.85 and RMSA of 1.27mm.d-1. The results pointed out that the SEBAL and SSEBop algorithms were consistent with the field measured values, to estimate ETc.

Keywords: Crop coeficiente (Kc), SEBAL, SSEBop

1. INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura irrigada é crucial para garantir a sustentabilidade da produção de alimentos. Ela permite que as culturas agrícolas atinjam seu potencial máximo e evita a ocorrência do déficit hídrico (FAUVEL, 2023). No Brasil, existem 7,3 milhões de hectares irrigados, com potencial de expansão para mais de 60 milhões de hectares (ANA, 2019). No entanto, o país enfrenta o desafio de ampliar as oportunidades socioeconômicas relacionadas ao uso dos recursos hídricos (DOURADO NETO, 2017).

A dissipabilidade e a gestão hídrica são destaque na produção agrícola, pois o excesso ou a falta de água causam injúrias e reduzem a produtividade, especialmente nos estádios críticos da cultura (TAIZ & ZEIGER, 2013; QUEIROZ, 2023). Por isso, o conhecimento e entendimento em relação à quantidade de água necessária para a cultura tornam-se essenciais, o que permite um manejo consciente, garantindo o desenvolvimento satisfatório das plantas (PALHARES, 2003; KIPKLEI et al., 2022).

Para estimar a demanda hídrica da cultura, assim como para dimensionar adequadamente o sistema de irrigação, foram desenvolvidos mecanismos para determinar ou estimar a quantidade de água necessária pelas culturas (COSTA et al., 2017; ALMEIDA, 2023). Segundo Menenti & Choudhury (1993), existem dois tipos principais de mensurar essa variável: através de medidas diretas realizadas por equipamentos no campo, como torres de fluxo de vapor turbulento e lisímetros de drenagem e pesagem, métodos esses que frequentemente são utilizados para calibrar e validar outros modelos (WANG & DICKINSON, 2012). O segundo tipo envolve medidas indiretas, geralmente baseadas em equações empíricas que utilizam dados meteorológicos ou espectrais. A precisão dessas equações pode variar dependendo do ambiente em que são aplicadas (GOCIC & TRAJKOVIC, 2010; OLIVEIRA, 2022).

Porém, os métodos de medidas e estimativas da evapotranspiração citados anteriormente são limitados para a utilização em escalas regionais, já que as técnicas tradicionais para obtenção da evapotranspiração são aplicáveis para uma área relativamente homogênea no entorno dos equipamentos quem medem essa variável, o qual está exposto apenas aos fatores ambientais locais (TASUMI et al., 2005; COSTA, 2019).

A evapotranspiração, para ser estimada por sensoriamento remoto, necessita que os sensores a bordo de satélites ou drones que detectem as bandas do visível, infravermelho próximo e infravermelho térmico (GONÇALVES et al., 2022). Com base nessas informações, é possível obter a temperatura de superfície, emissividade, albedo de superfície, índices de vegetação e principalmente, o balanço de energia (FUENTE-SÁIZ et al. 2017; FILGUEIRAS et al., 2019).

O uso de sensores de satélite e de métodos de sensoriamento remoto atraiu grande atenção para a estimativa da evapotranspiração pelo método de balanço de energia (BASTIAANSEN et al., 1998), dentre os vários modelos existentes, se destacam o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL), proposto por Bastiaanssen (1995) e *Operational Simplified Surface Energy Balance* (SSEBop) desenvolvido por Senay et al. (2013).

Neste contexto, os objetivos desse trabalho foram realizar a partição do balanço de energia e calcular a evapotranspiração real da cultura nos subperíodos de desenvolvimento da soja, utilizando o método razão de Bowen, no município de Londrina, PR. Além de avaliar o desempenho dos modelos SEBAL e SSEBop em estimar a evapotranspiração da cultura da batata irrigada por pivô central, no município de Vargem Grande do Sul – SP.

Referências

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2019: Informe anual. Brasília, 2019a, 100p.

ALMEIDA, F. P. Evapotranspiração das culturas do milho e feijão no bioma cerrado utilizando sensoriamento remoto por drones. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2023. 89 p.

BASTIAANSEN, W.G.M. **Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain**, Ph.D. thesis, Agricultural University, Wageningen, 1995. 288 p.

- BASTIAANSSEN, 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**, v. 212, p. 198-212, 1998.
- COSTA, J.A.; RODRIGUES, G.P.; DA SILVA, N.D.; LOPES SOBRINHO, O.O.; COSTA, L.D.A. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Alagoas. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.25, n.1, p.173-179, 2017.
- COSTA, J.O. **Variabilidade espacial do consumo hídrico de cultivos irrigados utilizando sensoriamento remoto**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2019.
- DE LA FUENTE-SÁIZ, D., ORTEGA-FARIAS, S., FONSECA, D. et al. Calibration of METRIC model to estimate energy balance over a drip irrigated apple orchard. **Rem. Sens.** 9, 1–18, 2017.
- DOURADO NETO, D. **Análise territorial para o desenvolvimento da irrigação no Brasil**. Campinas: FIIB, 2017.
- FAUVEL, J.M.P. **Evapotranspiração como apoio à eficiência do uso da água na agropecuária**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023.
- FILGUEIRAS, R.; MANTOVANI, E. C.; ALTHOFF, D.; RIBEIRO, R. B.; VENANCIO, L. P.; SANTOS, R. A. DOS. Dynamics of actual crop evapotranspiration based in the comparative analysis of sebal and metric-eeflux. **Irriga**, v. 1, n. 1InovagriSpecialEdition, p. 72–80, 2019
- GOCIC, M., TRAJKOVIC, S. Software for estimating reference evapotranspiration using limited weather data. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 71, p. 158–162, 2010.

GONÇALVES, I.Z., RUHOFF, A., LAIPELT, L., BISPO, R.C., HERNANDEZ, F.B.T., NEALE, C.M.U., ... & MARIN, F.R. Remote sensing-based evapotranspiration modeling using geeSEBAL for sugarcane irrigation management in Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 274, p. 107965, 2022.

KIPKULEI, H.K.; BELLIGRATH-KIMURA, S.D.; LANA, M. et al. Modelling cropland expansion and its drivers in Trans Nzoia Couty, Kenya. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 8, p. 5761-5778, 2022.

MENENTI, M.; CHOUDHARY, B. Parameterization of land surface evapotranspiration using a location dependent potential evapotranspiration and surface temperature range. **International Association of Hydrological Sciences Publication**, 1993.

OLIVEIRA, W.R.M. **Sensoriamento remoto orbital na estimativa de evapotranspiração em sistema de pivô central**. 148 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – Paraná, 2022.

PALHARES, M. **Distribuição e população de plantas e produtividade de grãos de milho**. Dissertação. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 90 p., 2003.

QUEIROZ, B.M. **Uso de machine learning no manejo da irrigação e estimativa da produtividade de milho em Piracicaba, SP**. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2023.

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, p. 577-591, 2013

TAIZ, L; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954 p.

TASUMI, M.; TREZZA, R.; ALLEN, R.G.; WRIGHT, J.L. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 19, n. 3, p. 355–376, 2005.

WANG, K.; DICKINSON, R.E. A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability. **Reviews of Geophysics**, v. 50, n. 2, p. 1-54, June, 2012.

2. ANÁLISE DOS FLUXOS DO BALANÇO DE ENERGIA E EVAPOTRANSPIRAÇÃO EM SUBPERÍODOS DE DESENVOLVIMENTO DA SOJA

Resumo

O estabelecimento de novos campos irrigados, principalmente sob sistemas de pivô central, exige maior conhecimento da demanda hídrica da soja para diferentes ambientes. Os objetivos do presente trabalho são particionar o balanço energético e calcular a evapotranspiração real da cultura (ETr) em um cultivo de soja sob sistema de plantio direto em Londrina-PR. A cultivar estudada foi Coodetec – CD206, em regime de sequeiro. Os sensores micrometeorológicas foram instalados em uma torre de 2,5 m. Na obtenção do balanço de energia e da ETr, utilizou-se o método razão de Bowen. O fluxo de calor latente (LE), sensível (H) e do solo (G) observado e respectivamente, 56%, 36% e 8% do saldo de radiação (Rn). A ETr total foi de 375,25 mm, sendo o valor máximo observado entre o florescimento e o início do enchimento de grãos (R1-R5) de 6,72 mm.dia⁻¹, é a partir da fase de enchimento e maturação dos grãos (R5-R7) ocorreu um declínio nos valores de ETr causado pela senescência na cultura.

Palavras-chave: Plantio direto, Sequeiro, Razão de Bowen

Abstract

Analysis of energy balance and evapotranspiration fluxes during different growth stages of soybean cultivation

The establishment of new irrigated fields, mainly under central pivot systems, requires greater knowledge of the soybean water demand for different environments. The objectives of the present work are to partition the energy balance and calculate the actual evapotranspiration of the crop (ETr) in a soybean growing under direct planting system in Londrina-PR. The cultivation studied was Coodetec – CD206, in drying regime. The micrometeorological sensors were installed in a 2.5 m tower. In obtaining the energy balance and ETR, the Bowen ratio method was used. The latent heat flow (LE), sensitive (H) and soil (G) observed and 56%, 36% and 8% of the radiation balance, respectively (Rn). The total ETR was 375,25 mm, the maximum value observed being between the stage flowering and beginning of grain filling (R1-R5) of 6.72 mm.d⁻¹, from the filling and ripening phase of the grains (R5-R7) there was a decline in the ETR values caused by senescence in the crop.

Keywords: No-tillage, Dryland, Bowen Ratio

2.1. Introdução

O Brasil, atualmente é o maior produtor e exportador mundial de soja, alcançou uma produção de 154 milhões de toneladas na safra 2022/23, representando 41% da produção global (CONAB, 2023; USDA, 2023). No entanto, apenas 11% dos 44 milhões de hectares destinados à produção de soja no país são irrigados (SILVA et al., 2019).

O déficit hídrico, agravado pela irregularidade da precipitação em algumas regiões produtoras, emerge como um dos principais fatores associados às oscilações na produtividade nacional (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007), é destaca a importância crítica das condições climáticas durante a safra para essa oleaginosa.

A expansão de novos campos irrigados, notadamente sob sistemas de pivô central, exige uma compreensão mais aprofundada da demanda hídrica da soja em diversos ambientes (BATTISTI et al., 2017; SILVA et al., 2019). A quantificação dessa demanda não apenas possibilita a previsão da quantidade de água necessária para o planejamento de projetos de irrigação (SOUZA, 2022) como também permite o dimensionamento adequado dos sistemas irrigantes (SILVA et al., 2015).

A evapotranspiração da cultura de soja (ET_c) pode ser mensurada diretamente, por meio de lisímetros (ANAPOLLI et al., 2018), ou indiretamente, por métodos micrometeorológicos (XYSTRAKIS & MATZARAKIS, 2011; ROJAS & SHEFFIELD, 2013), como a razão de Bowen (BOWEN, 1926).

O método de balanço de energia pela razão de Bowen (BOWEN, 1926) fundamenta-se em medidas micrometeorológicas, sendo considerado bastante consistente para a quantificação da evapotranspiração, determinação dos coeficientes de cultivo (K_c) e particionamento do balanço de energia em superfícies vegetadas (SALES et al., 2018).

Este trabalho tem como objetivos realizar a partição do balanço de energia e calcular a evapotranspiração real da cultura nos subperíodos de desenvolvimento da soja, utilizando o método razão de Bowen, no município de Londrina, PR.

2.2. Materiais e Métodos

O estudo foi realizado em uma área experimental da Embrapa Soja, no município de Londrina, Paraná (23°11'S; 51°11'O e 597m). O clima da região é o Cfa - clima subtropical úmido mesotérmico de acordo com a classificação de Köppen, com verões quentes e geadas pouco frequentes, tendência de concentração de chuvas nos meses de verão e temperatura média de 21°C (WREGGE et. al, 2011; ALVARES et. al, 2014). O solo da área experimental é o Latossolo Vermelho Distroférico

A área foi semeada em 05 de dezembro de 2005 com soja (*Glycine max (L.) Merril*), cultivar Coodetec – CD206, em regime de sequeiro, espaçamento de 0,50 m entre linhas e 15-18 plantas por metro linear, em um bloco de 0,28 ha.

A adubação foi realizada no momento da semeadura, utilizando 250 kg ha⁻¹ do adubo granulado NPK 0-28-20. O controle de ervas daninhas e os tratamentos fitossanitários foram realizados sempre que necessários, seguindo recomendações técnicas existentes.

A análise do desenvolvimento da soja foi feita usando a classificação dos estádios de desenvolvimento proposta por Fehr e Caviness (1977), definindo os estádios de emergência de plântula (E), segundo nó ou segunda folha trifoliada (V2), início do florescimento (R1), início do enchimento de grãos (R5), início da maturação (R7) e maturação plena (R8).

O índice de área foliar (IAF) foi estimado indiretamente através do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), de acordo com a metodologia proposta respectivamente por Allen et al. (2014) e Tasumi et al. (2005), conforme as equações (1) e (2). O NDVI foi obtido de imagens sem cobertura de nuvens do satélite Landsat 5 e 7, e processado no *Google Earth Engine* (GORELICK et al., 2017).

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (\text{Eq 1})$$

$$IAF = 7 NDVI^3 \quad (\text{Eq 2})$$

sendo NIR o infravermelho próximo; RED o vermelho.

Uma torre instrumentada de 2,5 m de altura foi montada na área, com sensores micrometeorológicos (Tabela 1) necessários ao cômputo do balanço de energia (BOWEN, 1926), ligados a uma *datalogger* marca Campbell, modelo CR21X. Dados foram armazenados a cada 15 minutos.

Tabela 1. Instrumentação utilizada na estação micrometeorológica, em Londrina (PR).

Variável Meteorológica	Instrumento (marca/modelo)	Nível (m) / Posição de Instalação
Saldo de radiação (Rn)	REBS Net Radiometer, Q-7.1	2,0
Temperatura de bulbo seco (t _s)	Psicrômetro ventilados (Marin et al.,	0,65 e 1,65
Temperatura de bulbo úmido (t _u)	2001)	0,65 e 1,65
		0,05 na Linha de
Fluxo de calor no solo (G)	REBS Soil Heat Flux Plate, HTF 3.1	Semeadura/Entrelinha de semeadura

A partir da temperatura do termômetro de bulbo seco foi calculada a pressão saturante de vapor d'água no ar (equação 3) para cada nível de medida indicada (Tabela 1):

$$e_s = 0,6108 \cdot 10^{\frac{(7,5 t_s)}{(237,3+t_s)}} \quad (\text{Eq 3})$$

sendo e_s a pressão de saturação de vapor (kPa); T é a temperatura do ar (°C).

Com os dados de temperatura dos termômetros de bulbo seco e bulbo úmido foi calculada a pressão parcial de vapor de acordo com a equação 4:

$$e_a = e_{stu} - A P (t_s - t_u) \quad (\text{Eq 4})$$

sendo e_a a pressão parcial atual de vapor (kPa), e_{stu} é a pressão de saturação de vapor d'água (kPa) calculada para a temperatura do bulbo úmido (t_u), A é o coeficiente psicrométrico (°C⁻¹), P é a pressão atmosférica (kPa), t_s é a temperatura

do termômetro de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$), t_u a temperatura do termômetro de bulbo úmido ($^{\circ}\text{C}$).

O coeficiente psicrométrico (γ) foi calculado conforme a equação 5:

$$\gamma = \frac{c_p}{0,622L} \quad (\text{Eq 5})$$

γ é o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); c_p é o calor específico do ar à pressão constante $1,0313 \text{ kJ kg}^{-1}$; L calor latente de vaporização da água $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$.

A evapotranspiração real (E_{Tr}) foi obtida pelo método do balanço energia por intermédio da razão de Bowen (β), em função do fluxo de calor latente (LE) entre a superfície e a atmosfera, de acordo com a equação 6:

$$E_{Tr} = \frac{LE}{\lambda} \quad (\text{Eq 6})$$

em que LE é o fluxo de calor latente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), λ é o calor de latente de evaporação da água (J kg^{-1}), obtido por meio da equação 7:

$$\lambda = [(2,501 \cdot 10^6) - (2,361 \cdot 10^3 t_s)] \quad (\text{Eq 7})$$

Seguindo as recomendações de Arya (2001), o componente LE foi obtido por meio da razão de Bowen (β) medida através das relações do transporte vertical de calor e vapor d'água, assumindo que existe igualdade nos coeficientes de transporte turbulento (K_H e K_{LE}) de acordo com as equações (8) e (9):

$$LE = \frac{R_n - G}{(1 + \beta)} \quad (\text{Eq 8})$$

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (\text{Eq 9})$$

Onde R_n é o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), γ o coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), ΔT ($^{\circ}\text{C}$) e Δe (kPa), ambos são a diferença da temperatura do ar e da pressão de vapor d'água entre dois níveis de medida (Tabela 1).

Posteriormente foram eliminados dados errôneos, de acordo com a metodologia proposta por Perez et al. (1999), para a análise da consistência dos

dados gerados pela razão de Bowen em função dos sinais observados na relação fluxo-gradiente entre os componentes e de quais valores de β próximos de (-1) foram desprezados. A evapotranspiração real da soja foi então obtida pela soma dos valores positivos de LE no intervalo do nascer ao pôr do sol.

Com o objetivo de monitorar o armazenamento de água no solo, utilizou-se o cálculo do balanço hídrico climatológico (BHC) através da metodologia proposta por Thornthwaite & Mather (1955). A capacidade de armazenamento de água no solo foi determinada de acordo com Doorenbos & Kassam (1979), pela equação (10):

$$CAD = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) z \text{ (Eq 10)}$$

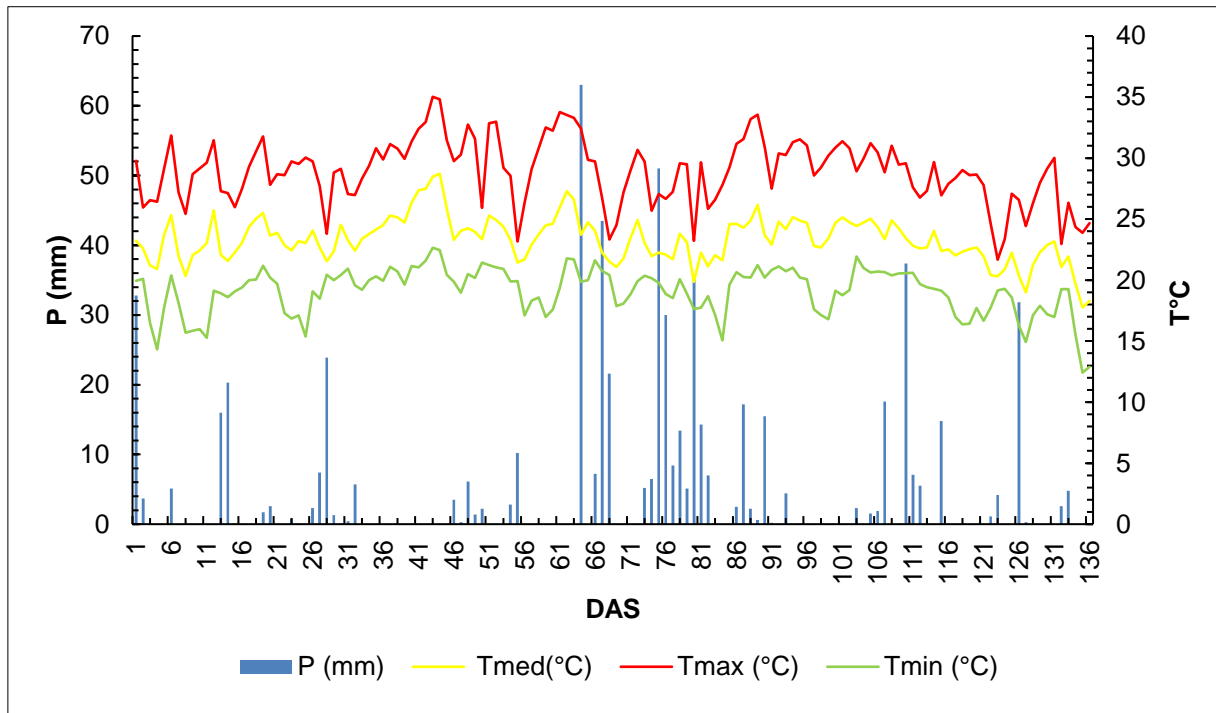
onde CAD é a capacidade de armazenamento de água no solo (mm), θ_{cc} é a umidade do solo à capacidade de campo, de $0,443 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (OLIVEIRA & VILLA NOVA, 1996), θ_{pmp} a umidade do solo no ponto de murcha permanente, de $0,330 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (OLIVEIRA & VILLA NOVA, 1996), z é a profundidade efetiva do sistema radicular, igual a 500 mm.

Para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) foi utilizado o método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) com dados obtidos da estação meteorológica da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA SOJA).

2.3. Resultados e Discussão

A temperatura média do ar durante o período de produção da soja foi de 23,3°C. A temperatura máxima não excedeu os 35°C e a mínima manteve-se superior aos 10°C (Figura 1), dentro da faixa térmica favorável à soja (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007). Assim, efeitos térmicos adversos podem ser desconsiderados, já que a soja tem o florescimento induzido apenas em temperaturas superiores a 13°C, e temperatura maior que 40°C interfere negativamente no metabolismo, causando redução do crescimento da planta (FARIAS et al., 2007; ELY, 2018).

Figura 1. Condições meteorológicas no ciclo de desenvolvimento da soja.



Análise da precipitação acumulada em cada um dos subperíodos (Tabela 1), observa-se que, entre os estádios V2-R1, foram acumulados 143 mm de chuva. Já nos 18 dias entre floração e início de formação dos grãos, estágios R1-R5, foram acumulados 241,60 mm, correspondendo a 66,6% do total do ciclo. Esse subperíodo (R1-R5) é considerado uma das fases críticas da soja, pois engloba o florescimento e a formação dos grãos, estádios nos quais a cultura apresenta elevada demanda hídrica e sensibilidade ao estresse (TEJO et al., 2019). Ao fim do ciclo, entre os estádios R7-R8 (123 a 136 DAS), a redução das chuvas (43,70 mm acumulados) favoreceu a maturação.

Tabela 2. Subperíodos de desenvolvimento da soja com respectivos tempos de duração, dias chuvosos, chuva acumulada, radiação solar global (Qg) e evapotranspiração de referência durante o ciclo da soja.

Subperíodo	Duração (dias)	Dias de chuva	Chuva (mm)	Qg (MJ m⁻² d⁻¹)	ETo (mm d⁻¹)
V2-R1	48	15 (31,2%)	143,0	19,9	4,5
R1-R5	18	12 (66,6%)	241,6	15,6	3,4
R5-R7	38	14 (36,8%)	132,0	17,2	3,9
R7-R8	14	4 (28,5%)	43,7	12,7	3,1
Ciclo¹	118 ¹	45 (38,1%)	560,3 ²	17,5 ³	3,9 ⁴

¹Foram desconsiderados 18 dias do ciclo, da data de semeadura (S) ao estágio V2. ²Chuva acumulada.

³Radiação solar global média durante o ciclo da soja. ⁴Evapotranspiração de referência média durante do ciclo da soja.

Com base nos resultados do balanço hídrico (Figura 2), notou-se que, embora a área de estudo tenha registrado um volume de precipitação superior ao necessário para o pleno desenvolvimento da cultura da soja, essas chuvas se distribuíram de forma irregular ao longo de tempo, resultando em um saldo negativo de água no solo por vários dias. O período de maior deficiência hídrica ocorreu durante a fase V2-R1, compreendendo de 16 DAS a 63 DAS, totalizando 68,6 mm. Em contrapartida, um excedente hídrico significativo foi observado durante a fase R1-R5, entre 69 DAS ao 83 DAS, totalizando 159 mm.

Analisando a Figura 3, foi observado os picos mais altos no armazenamento de água no solo nos períodos de 64 DAS a 94 DAS e de 110 DAS a 134 DAS que atingiu sua capacidade máxima em vários momentos. Por outro lado, os valores mais baixos foram registrados entre 45 DAS e 63 DAS, devido à escassa precipitação nesse intervalo, com variação de 15,40 mm a 11,20 mm. Essas variações no armazenamento de água no solo refletiram diretamente as variações na precipitação.

Figura 2. Extrato do balanço hídrico no ciclo de desenvolvimento da soja.

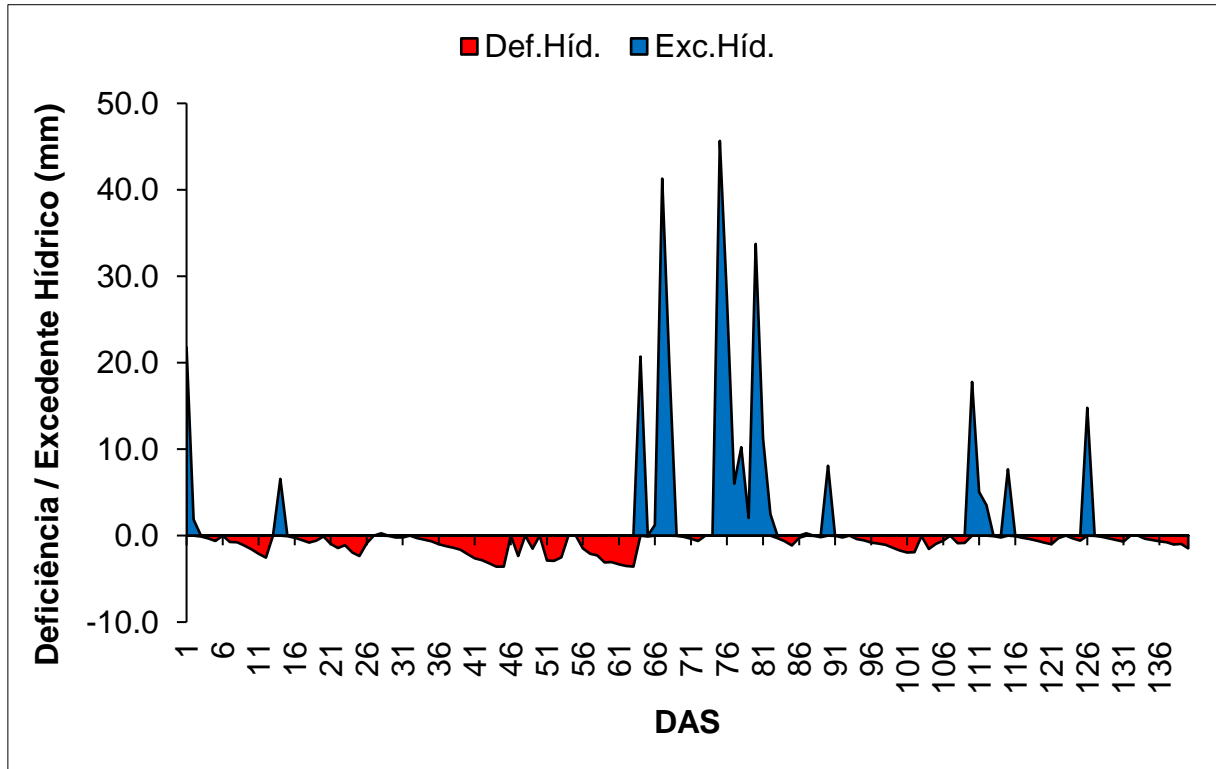
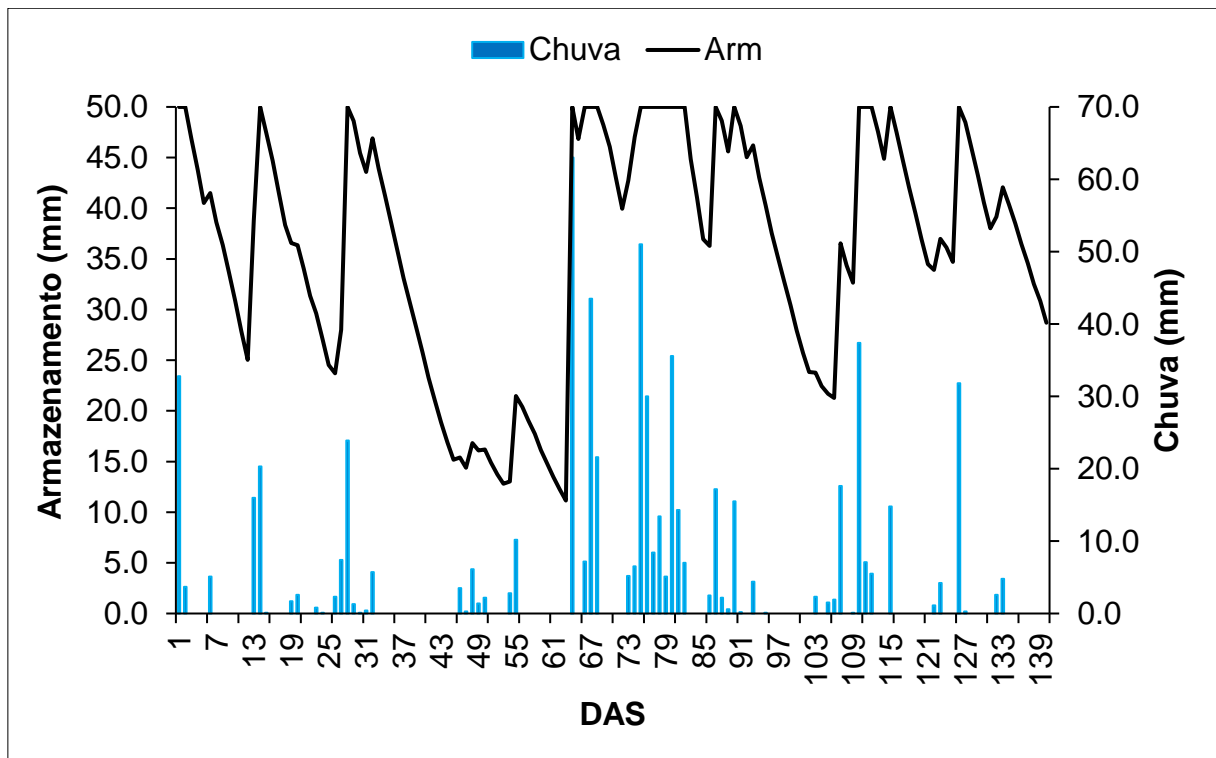


Figura 3. Variação do armazenamento de água no solo durante o ciclo de desenvolvimento da soja.



O monitorar amento do crescimento, sobretudo a evolução da área foliar da soja, está presente na Tabela 2. Com base na regressão quadrática dos valores de NDVI ao longo do ciclo da soja (Figura 4 A), obteve-se relação típica entre o índice de vegetação e o crescimento soja (Figura 4 B), caracterizado por baixos valores de NDVI no início do desenvolvimento da cultura, seguido de um gradativo aumento a partir do subperíodo V2-R1. Nesse momento, o valor máximo de NDVI foi de 0,82 no 41 DAS que coincide com o observado em áreas de soja sob condição hídrica adequada (SILVA et al., 2017). Entre R1 e R5, aos 81 DAS, observou-se a manutenção do pico de NDVI, no entanto após o 89 DAS (Figura 4 A) foi perceptível uma queda nos valores do NDVI, os quais alcançaram níveis semelhantes aos do solo exposto ou da palhada, isso ocorre devido o processo de senescência e degradação da clorofila.

Com a variação temporal do NDVI foi possível estimar os valores médios de IAF para cada subperíodo analisado (Tabela 2). Entretanto, não foi possível obter um modelo para estimar o IAF diário, devido ao fato de a regressão linear não ser significativa, por conta da pequena quantidade de dados disponível.

O IAF é considerado um parâmetro importante para avaliação de condições da estrutura das plantas, já que interfere na interceptação da radiação solar e no sombreamento do terço inferior das plantas pelo excesso de folhas no terço superior (BOARD & HARVILLE, 1992; STEFFLER, 2023).

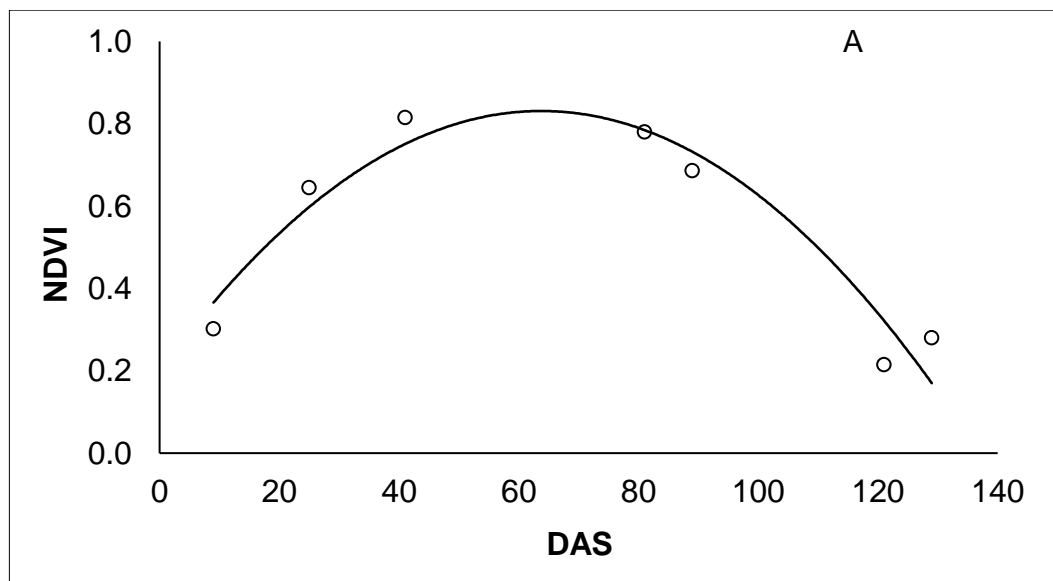
No presente estudo (Tabela 2) verificou-se que o IAF máximo foi observado entre V2-R1, com valor estimado de 3,79. De acordo com Zanon et al. (2015) o valor máximo de IAF na soja, é preferível que ocorra na fase de início de enchimento de grão (R5), visto que a planta apresenta uma maior produção de fotoassimilados e uma maior taxa de acúmulo de biomassa maior para os grãos (BALBINOT JÚNIOR et al., 2018).

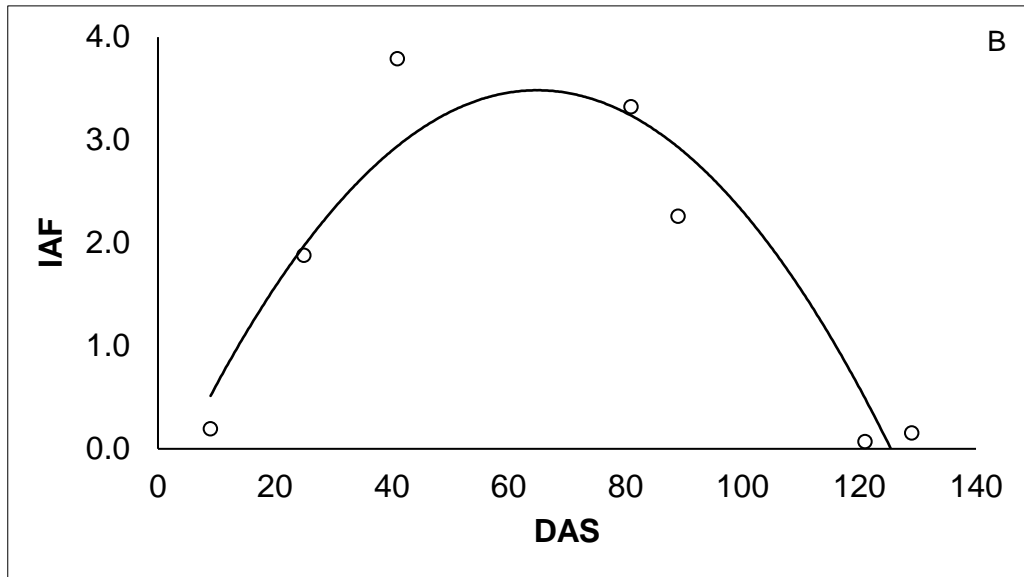
Valores máximos de IAF na cultura da soja podem chegar até 8,0, entretanto em locais com ocorrência de longos períodos de déficit hídrico, principalmente na fase vegetativa, os valores chegam próximo a 5,0, em cultivares de crescimento indeterminado (BALBINOT JÚNIOR et al., 2018). A diminuição da área foliar pode ser considerada uma resposta fisiológica das plantas quando são submetidas à deficiência hídrica, é essa redução tem como objetivo diminuir a transpiração e perda de água (TAIZ & ZEIGER, 2013; BARCELOS, 2022).

Tabela 3. Subperíodos de desenvolvimento da soja com respectivos tempos de duração, índice de área foliar do cultivo da soja.

Subperíodo	DAS	NDVI	IAF
V2-R1	25	0,65	1,88
V2-R1	41	0,82	3,79
R1-R5	81	0,78	3,32
R5-R7	89	0,69	2,26
R7-R8	129	0,28	0,15

Figura 4. Índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (A) e índice de área foliar (B) estimado para o ciclo de desenvolvimento da soja.





O saldo de radiação (Tabela 4) variou conforme a sazonalidade apresentada pela radiação global (Tabela 2). No início do ciclo desenvolvimento da soja, com Rn representando 56% de Qg, apresentando o maior valor registrado no período estudado. Durante a fase R1-R5, o saldo de radiação representou 46% da radiação global, enquanto nas fases R5-R7 e R7-R8 os valores na relação Rn/Qg foram aproximadamente 43% e 46%, respectivamente. De maneira geral, notou-se uma tendência de redução na razão Rn/Qg à medida que o IAF aumentava. Segundo Souza & Escobedo (1997), esse comportamento decorre, em parte, de uma maior perda por reflexão de ondas curtas que pode ser favorecida por maior perda em ondas longas, graças a um maior aquecimento do dossel da cultura.

Ao analisar os componentes do balanço de energia (Tabela 4), destaca-se que a maior parcela da energia disponível foi direcionada para LE, resultante da alta disponibilidade de água no solo, alcançou valores médios de $6,38 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ na fase V2-R1. Posteriormente, a redução na disponibilidade de Rn provocou uma diminuição de LE, que registou valores abaixo de $5,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ nos demais subperíodos. Enquanto isso, os valores de G permaneceram consistentemente positivos, com média de $0,71 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, exibindo pouca variação ao longo do tempo.

O H apresentou valor médio de $3,81 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ durante V2-R1, enquanto na fase R1-R5 atingiu $3,00 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, representando os maiores valores observados. No entanto, a partir desta fase, os valores médios de H diminuíram, mantendo-se abaixo de $3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ nas outras fases fenológicas.

Tabela 4. Subperíodos de desenvolvimento da soja com respectivos tempos de duração, chuva acumulada, fluxos e partição energética do cultivo da soja.

Subperíodo	Duração (dias)	Rn (MJ m ⁻² d ⁻¹)	Rn/ Qg	G	LE (MJ m ⁻² d ⁻¹)	H	G/Rn	LE/Rn	H/Rn
V2-R1	48	11,17	0,56	0,98	6,38	3,81	0,08	0,57	0,35
R1-R5	18	8,05	0,46	0,51	4,53	3,00	0,06	0,54	0,40
R5-R7	38	7,53	0,43	0,62	4,24	2,66	0,08	0,57	0,35
R7-R8	14	6,59	0,46	0,72	3,61	2,24	0,11	0,55	0,34
Ciclo¹	118 ¹	8,34	0,48	0,71	4,69	2,93	0,08	0,56	0,36

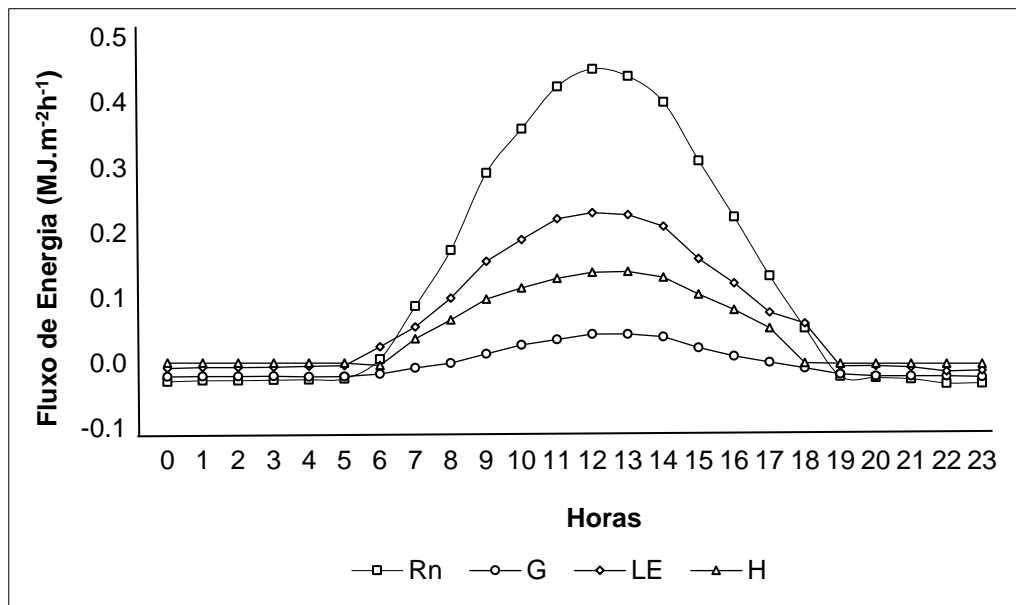
¹Foram desconsiderados 18 dias do ciclo, da data de semeadura ao estágio V2.

Com relação a partição do saldo de radiação (Tabela 4), na fase V2-R1, o LE consumiu 57% da energia radiante, 35% em H e apenas 8% em G. Já na R1 – R5, 40% corresponderam a H, 54% a LE e 6% a G.

A partir da fase R5-R7 (Tabela 4), observa-se uma diminuição na utilização da energia na forma de H, enquanto LE manteve o valor registrado na fase anterior. Na fase de maturação fisiológica (R7-R8), H representou 34% do saldo de radiação, enquanto o calor latente representou 55%.

Os valores, em média, de LE ao longo do cultivo da soja foram de 56%, já o H correspondeu 36% e G 8% do saldo de radiação (Rn). Esse valor elevado de LE está relacionado diretamente com o regime de precipitação que ocorreu na área somada a presença da palhada que cobria no solo, faz com que a camada superficial do solo se mantivesse úmida e conseqüentemente a maior parte do saldo de radiação fosse utilizado no processo de evapotranspiração (PIEDORNÁ et al, 2019).

Através da caracterização horária média para todo o ciclo da soja do saldo de radiação (Rn) (Figura 5), observa-se que a maior parte da energia incidente sob a vegetação foi consumida em evapotranspiração, na forma de calor latente (LE), seguindo pelo fluxo de calor sensível (H). Além do mais, é importante ressaltar que os fluxos de calor latente e sensível são diretamente dependentes do saldo de radiação (Rn) (SOUZA et al., 2011).

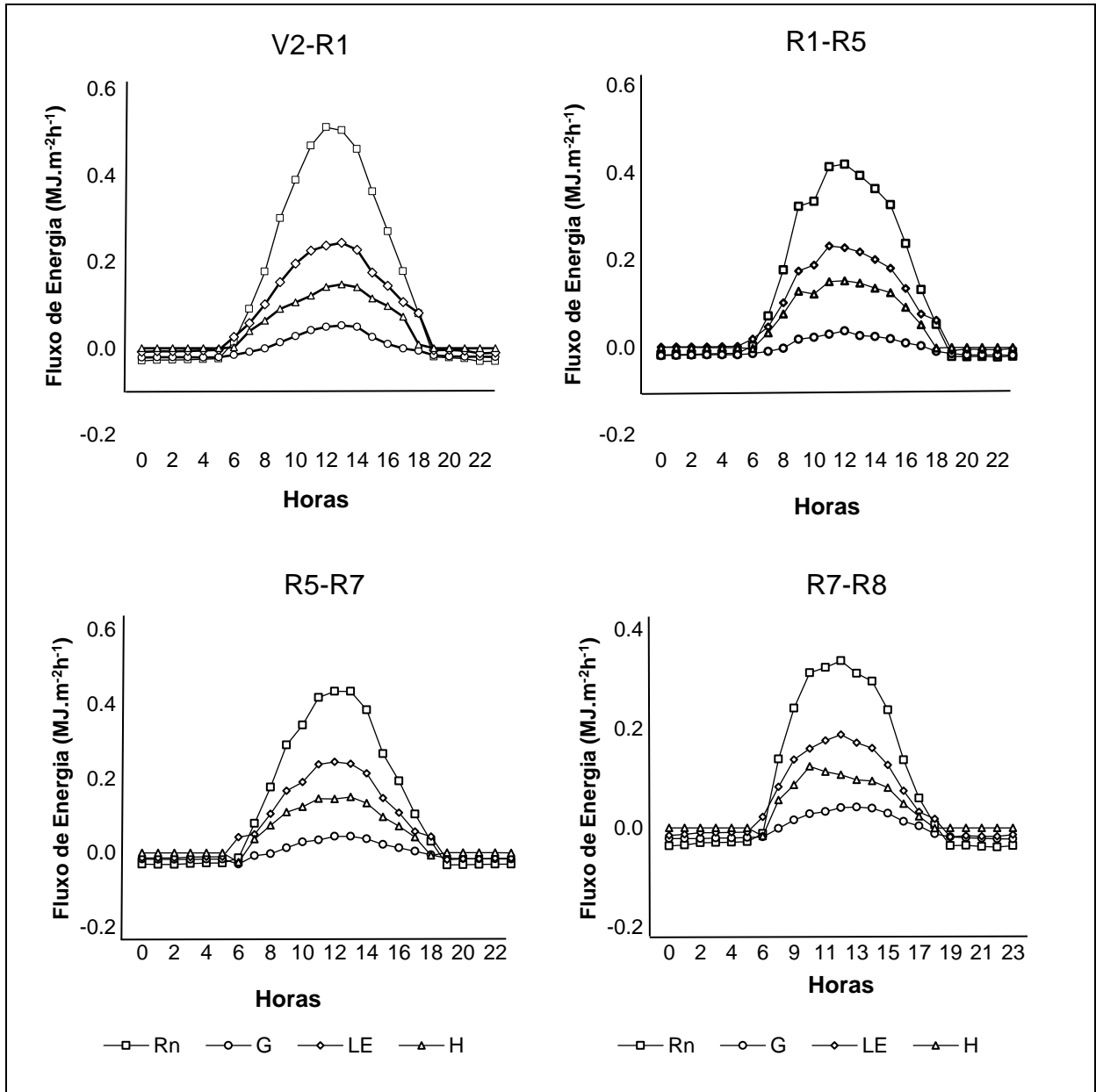
Figura 5. Variação média horária dos fluxos de energia para todo o ciclo da soja.

A partir das 19 h (Figura 5), o fluxo de calor latente e sensível tendem a se aproximar em seus valores. Esse processo é consequência do armazenamento durante o dia de energia do fluxo de calor latente e do solo, que é liberada a noite para atmosfera, a qual busca equilibrar o gradiente de temperatura, já que a temperatura do solo é mais elevada que a temperatura do ar (PEREIRA, 2018). Além do mais, há o efeito do orvalho, que libera energia para transformar o vapor de água próximo à superfície do dossel em água líquida, aquecendo o ar próximo ao dossel.

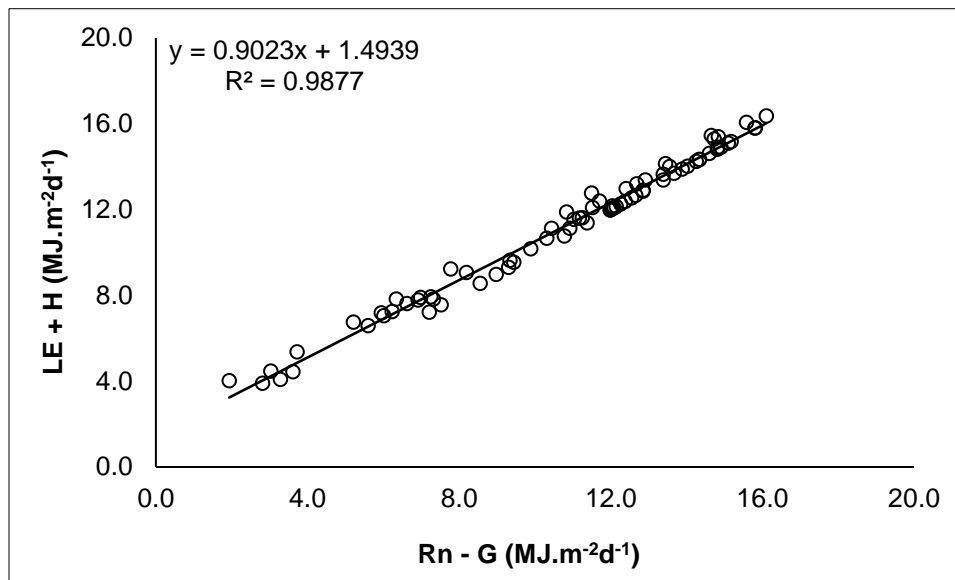
O saldo de radiação (Rn) atingiu valores máximos próximos a $0,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ao meio-dia (Figura 6), exceto durante a fase R7-R8. Em relação ao fluxo de calor no solo (G), notou-se que nas fases nas fases V2-R1 e R5-R7, este é superior a 0 após as 10h, principalmente influenciado pelo baixo valor de IAF, o que contribuiu para a incidência direta da radiação sobre o solo.

O fluxo de calor latente (LE) manteve-se acima de $0,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ por volta das 12hs durante maior parte do período estudado. Entretanto, em R7-R8, nesse horário o fluxo médio foi de $0,19 \text{ MJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, devido aos menores valores de Rn e diminuição do IAF no final do ciclo.

Figura 6. Variação média horária dos fluxos de energia nas fases de desenvolvimento



Na Figura 7 é apresentado o fechamento do balanço de energia para todo o ciclo da cultura da soja, onde foi obtido um $R^2 = 0,98$. De acordo com Aubinet et al. (2001), não se espera o fechamento completo do balanço de energia, uma vez que a energia armazenada nas plantas e biomassa, além da ocorrência de outros fluxos turbulentos não verticais, como a advecção, não são contabilizados.

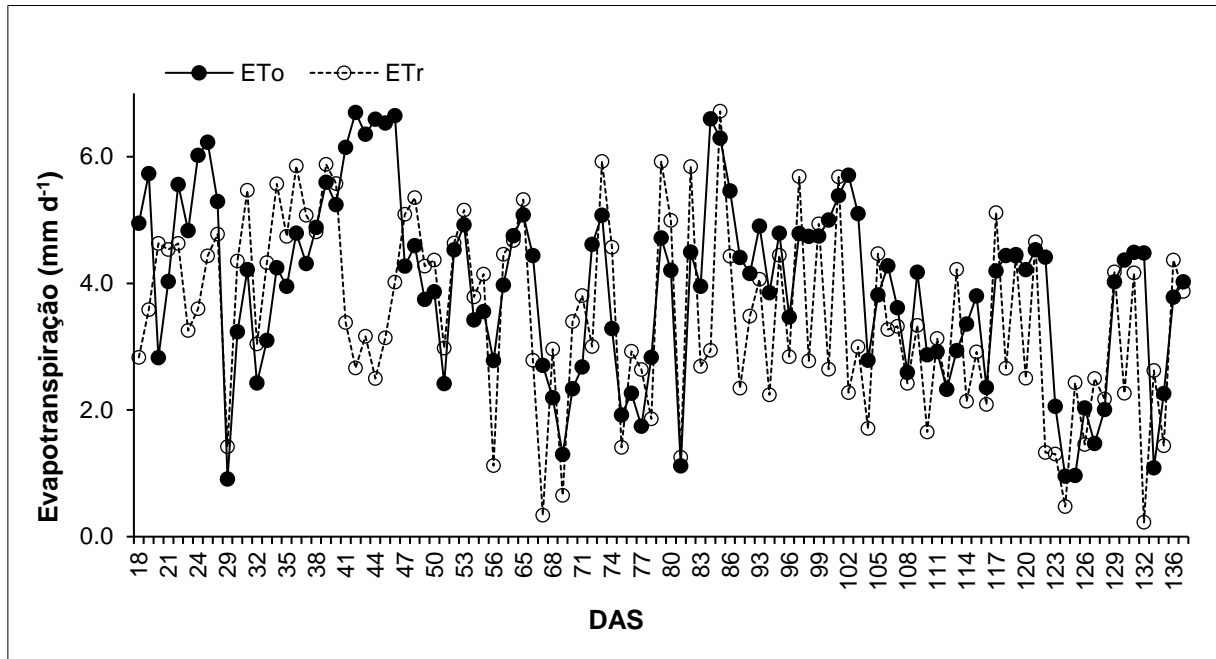
Figura 7. Fechamento do balanço de energia no ciclo da soja.

Observou-se que no subperíodo V2-R1 (Figura 8), a evapotranspiração real manteve valores diários oscilando entre 1,42 a 5,88 mm d⁻¹. Estes altos valores, porém, apresentam uma considerável contribuição da evaporação do solo, já que nesse período havia disponibilidade de água e a energia radiante era elevada (SOUZA et al., 2016). A alta demanda atmosférica, também afetou diretamente a evapotranspiração nesse período, fazendo com que a perda de água fosse alta mesmo com baixo IAF (SOUZA et al., 2016). Resultado semelhante, embora com diferentes magnitudes, estão de acordo com os observados por Rossatto et al. (2022) que encontraram valores de evapotranspiração média na fase vegetativa de 3,72 mm d⁻¹, e com os obtidos por Oliveira (2019) de 5,0 mm d⁻¹ em Piracicaba-SP.

A evapotranspiração real máxima foi observada no final da fase R1-R5 com valor de 6,72 mm d⁻¹. Oliveira (2011) registrou valor máximo de 6,58 mm d⁻¹, enquanto Suyker & Verma (2010) encontraram valores máximos de evapotranspiração da soja em condições de sequeiro e irrigado de 5,8 e 6,9 mm.d⁻¹, respectivamente. A necessidade de água na cultura da soja cresce à medida que a planta se desenvolve, atingindo o valor máximo durante o período entre o início do florescimento ao enchimento completo dos grãos (R1-R6), variando em torno de 7 a 8 mm.d⁻¹, e diminuindo após esse período (BERLATO et al., 1986; NETO, 2020).

No entanto, a partir da fase R7-R8, observou-se um rápido declínio nos valores de ETr chegando a atingir valores próximos abaixo de 1,0 mm.d⁻¹. Essa queda pode é influenciada pelo declínio fisiológico da cultura.

Figura 8. Variação diária da evapotranspiração real (ETr) e evapotranspiração de referência (ETo) na cultura da soja.



A evapotranspiração real acumulada totalizou 375,25 mm para o período analisado (Tabela 5). Isso representou uma ETr acumulada durante o crescimento vegetativo é o início do período reprodutivo de 169,72 mm (V2-R1), com valor médio de 4,04 mm d⁻¹. A ETr durante o florescimento e o início do enchimento de grãos foi de 170 mm (R1-R5) com valor médio de 3,53 mm d⁻¹. Durante as fases de início do enchimento e maturação das sementes (R5-R7), a ETr tota foi de 109,85 mm, com valor médio de 3,23 mm d⁻¹. Já no período de maturação plena foi observado o menor valor acumulado 32,17 mm, com média de 2,47 mm d⁻¹.

Tabela 5. Variação da ETo e ETr acumulada e média nos diferentes estádios fenológicos da soja.

Subperíodo	Dias	P (mm)	ETr (mm)	ETr (mm.d ⁻¹)	ETo (mm)
V2 – R1	48	143,00	169,72	4,04	190,41
R1 – R5	18	241,60	63,51	3,53	61,51
R5 – R7	38	132,00	109,85	3,23	136,65
R7 – R8	14	43,70	32,17	2,47	35,94
Total	118¹	560,30	375,25		424,63

¹Foram desconsiderados 18 dias do ciclo, da data de semeadura ao estágio V2.

2.4. Conclusões

O fluxo médio de calor latente (LE), sensível (H) e do solo (G) observado foi respectivamente, 56%, 36% e 8% do saldo de radiação (Rn).

Os resultados obtidos neste estudo mostraram que 45,22% da evapotranspiração real da soja no período estudado ocorreu durante o subperíodo V1-R1. Isso pode ser explicado pela oferta hídrica proveniente da precipitação e da radiação solar na região nessa fase.

A evapotranspiração real acumulada foi de 375,25 mm, com valor máximo de 6,72 mm.d⁻¹ sendo mensurado na fase V2-R1. Já o valor mínimo 0,23 mm.d⁻¹, foi medido na fase R7-R8.

Referências

- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop Evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 301 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALLEN, R., R. TREZZA, M. TASUMI, and J. KJAERGAARD. 2014. **Mapping evapotranspiration at high resolution using Internalized Calibration Application Manual for Landsat Satellite Imagery**. Univ. of Idaho, Kimberly, ID, 2014.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.
- ANAPALLI, S. S. KRUTZ, J. L.; PINNAMANENI, S. R.; REDDY, K. N. Eddy covariance quantification of soybean (*Glycine max L.*) crop coefficients in a farmer's field in a humid climate. **Irrigation Science**, Chile, v. 39, n. 55, p. 651-669, 2021.

- AUBINET, M.; CHERMANNE, B.; VANDENHAUTE, M.; LONGDOZ, B.; YERNAUX, M.; LAITAT, E.; Submitted long term measurements of water vapour and carbon dioxide fluxes above a mixed forest in the Belgian Ardenne's. **Agricultural and Forest** 108, n°4, p. 293-315, 2001.
- ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. New York, Academic Press, 420p, 2001.
- BALBINOT JUNIOR, A.A.; DEBIASI, H; FRANCHINI, J.C.; PRIETO, J.P.C.; MORAES, M.T.; WERNER, F.; FERREIRA, A.S. Crescimento e distribuição de raízes de soja em diferentes densidades de plantas. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v.17, n.1, p.12-22, 2018.
- BARCELOS, G. F. Efeito da utilização de prolina na tolerância ao estresse hídrico na cultura de soja. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2022. 86p.
- BATTISTI, R.; SENTELHAS, P. C. Improvement of soybean resilience to drought through deep root system in Brazil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 109, n. 4, p.1612–1622, 2017.
- BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R.; BERGAMASHI, H. Evapotranspiração máxima da soja e relações com a evapotranspiração calculada pela equação de Penman, evaporação de tanque “classe A” e radiação solar global. *Agronomia Sulriograndense*, Porto Alegre, v.22, n.2. 1986.
- BOARD, J. E.; HARVILLE, B.G. Explanations for greater light interception in narrow vs. Wide-row. **Crop Science** 32: 1992, 198-202.
- BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physics Review**, v. 27, p. 779-787, 1926.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Boletim de monitoramento agrícola**. Brasília, v. 12, 2023.

- DOORENBOS, J. KASSAM, A. H. Yield response to water. Rome: FAO, 1979. 306 p. (FAO – Irrigation and drainage paper, 33).
- ELY, A. Redução da qualidade de grãos de soja durante o armazenamento em diferentes condições de umidade e temperatura. **Revista Thema**, v. 15, n. 2, p. 506-520, 2018.
- FARIAS, J. R. B; NEPOMUCENO, A. L., NEUMAIER, N. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007. 9 p. (Circular técnica, 48).
- FEHR; W. R.; CAVINESS, C. E. **Stages of soybean development**. Ames: Cooperative Extension Service, 1977. (Special Bulletin, 80). Disponível em: <https://dr.lib.iastate.edu/entities/publication/58c89bfe-844d-42b6-8b6c-2c6082595ba3>. Acesso em: 02 jun. 2023.
- GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing of Environment**, Amsterdam, v.202, p. 18-27, 2017.
- MARIN, F. R.; ANGELOCCI, L. R.; L. R., COELHO FILHO, M.A.; VILLA NOVA, N.A. Construção e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar. *Scientia Agricola*, v.58, n.4, p.839-844, 2001.
- NETO, D. O. Índice de vegetação, rendimento de grãos e seus componentes em soja, em área com avaliação de agentes de controle biológico. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2020. 158 p.
- OLIVEIRA, R. K., Fluxos de CO₂, água e energia em área de renovação de canal com um cultivo de soja. Dissertação (Mestrado) – USP/ Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2019. 61p.
- PEREIRA, R. A. de A. **Balço de energia, consumo hídrico e coeficiente de cultivo do trigo no sudeste brasileiro**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2018.

- PEREZ, P.J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J.I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.97, p.141-150, 1999.
- PIERDONÁ, H. L., DE PAULA, A. C. P., DA SILVA, C. L., WARREN, M. S., RODRIGUES, L. N. Comparação entre dois modelos usados na estimativa da evapotranspiração real da cultura da soja. Embrapa Cerrados-Artigo em periódico indexado (ALICE). 2019.
- ROJAS, J. P. and SHEFFIELD, R. E. Evaluation of daily reference evapotranspiration methods as compared with the ASCE-EWRI Penman-Monteith equation using limited weather data in Northeast Louisiana. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 139, n. 4, p. 285–292, 2013.
- ROSSATO, A. A. P. . KIRCHNER, J. H. .; MARTINS, J. D.; SANDER, L.S.; AMARAL, W. N. B. do.; PETRY M. T. . Partição da evapotranspiração da cultura da soja em diferentes cultivares em cada estágio fenológico. **IRRIGA. [S. l.]**, v.27, n.3, p. 477-492. 2002.
- SALES, R. A.; OLIVEIRA, E. C.; LIMA, M. J. A.; GELCER, E. M.; SANTOS, R. A.; LIMA, C.F. Ajuste dos coeficientes das equações de estimativa da evapotranspiração de referência para São Mateus, ES. **Irriga**, Botucatu, v. 23, n.1, p. 154-167, 2018.
- SENTELHAS, P.C.; BATISTI, R.; CÂMARA, G.M.S.; FARIAS, J. R.B.; HAMPF, A.C.; NENDEL, C. The soybean yield gap in Brazil- magnitude, causes and possible solutions for sustainable production. **Journal of Agricultural Science**, v. 153, p. 1-18, 2015
- SILVA, A. O. Evapotranspiração de referência para dimensionamento de sistemas de irrigação em Petrolina, Pe. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, Tupã, v. 9, n. 1, p. 30-38, 2015.

- SILVA, C. A., NANNI, M.R., TEODORO, P.E, & SILVA, G. F. C. Vegetation índices for discrimination of soybean areas: A new approach. **Agronomy journal**, v. 109, n.4, p 1331-1343, 2017.
- SILVA, E. H. F. M.; GONÇALVES, A. O.; PEREIRA, R. A.; JÚNIOR, I. M. F.; SOBENKO, L. R.; MARIN, F. R. Soybean irrigation requirements and canopy-atmosphere coupling in Southern Brazil. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 218, n. 1, p. 1-7, 2019.
- SOUZA, J. L.; ESCOBEDO, J. F. Balanço de radiação em cultivos de feijão-vagem com e sem cobertura de polietileno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, n. 1, p. 1-15, 1997.
- SOUZA, P.J.O.P; RIBEIRO, A.; ROCHA, E.J.P.; BOTELHO, M.N.; SOUSA, A.M.L.; SOUZA, E.B.; FARIAS, J.R.B. Impacts of soyabean expansion on the Amazon energy balance: a case study. *Experimental Agriculture*, Cambridge, v.43, p.553-567, 2011.
- SOUZA, P.J. O. P.; ORTEGA-FARIAS, S.; ROCHA, E. J. P.; SOUSA, A.M.L.; SOUZA, E.B.S. Consumo hídrico da soja no nordeste Paraense. **Irriga**, Botucatu-SP, ad. Especial irrigação, p.218-231, 2016.
- SUYKER, A. E.; VERMA, S. B. Evapotranspiration of irrigated and rainfed maize-soybean cropping systems. **Agricultura and Forest Meteorology**, Amsterdam, v.149, p.443-452, 2009.
- STEFFLER, V. A. Efeito de reguladores de crescimento vegetal no crescimento e componentes de rendimento da cultivar de soja NEO 610 PRO. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, 2023. 43 p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954 p

- TASUMI, M., R.G. ALLEN, R. TREZZA, and J.L. WRIGHT. 2005. Satellite-based energy balance to assess within-population variance of crop coefficient curves. *J. Irrig. Drain. Eng.* 131:94–109. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(94)
- TEJO, D. P.; FERNANDES, C. H. dos S.; BURATTO, J. S. Soja: fenologia, morfologia e fatores que interferem na produtividade. **Revista Científica Eletrônica de XIXI da Faef**, Garça, v.35, n.1, p. 1-9, 2019.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**: publications in climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.
- TOUREIRO, C.; SERRALHEIRO, R.; SHAHIDIAN, S.; SOUSA, A. Irrigation management with remote sensing: Evaluating irrigation requirement for maize under Mediterranean climate condition. **Agricultural Water Management**, v. 184, p. 211–220, 2017.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). **Soybean**: world markets and trade.
- XYSTRAKIS, F.; MATZARAKIS, A. Evaluation of 13 empirical reference potential evapotranspiration equations on the island of Crete in Southern Greece. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 137, p. 211-222, 2011.
- WREGGE, M. S.; STEINMETZ, S.; REISSER JÚNIOR, C.; ALMEIDA, I. R. de. (Ed.). Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Pelotas: Embrapa Clima Temperado; Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 333 p.
- ZANON, Alencar Junior et al. Contribuição das ramificações e a evolução do índice de área foliar em cultivares modernas de soja. **Bragantia**, v. 74, p. 279-290, 2015.

3. EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTURA (Kc) ATRAVÉS DO SENSORIAMENTO REMOTO NA CULTURA DA BATATA

Resumo

O cultivo de batata tem aumentado nos últimos anos, entretanto sua expansão tem ocorrido em áreas menos favoráveis ao desenvolvimento da cultura, principalmente no que diz respeito à disponibilidade hídrica restritiva. Diante desse cenário, o monitoramento do uso da água nas áreas com cultivo de batata e a avaliação das interações que ocorrem entre a superfície e a atmosfera, pode ser realizado com maior cobertura espacial e de modo menos oneroso, por meio da aplicação de modelos que utilizam informações coletadas remotamente e que abrangem desde a escala regional à escala global. O estudo tem por objetivo estimar a evapotranspiração da cultura (ETc) e o coeficiente de cultura (Kc) em um cultivo de batata, por meio dos modelos SEBAL e SSEBop. Em comparação com o método da razão de Bowen, a ETc estimada pelo SEBAL apresentou R² 0,79, já o Kc 0,84, tendo seu desempenho classificado como satisfatório. O RMSE determinado foi de 1,54 mm d⁻¹ para ETc e 0,43 para o Kc. O modelo SSEBop expressou melhor desempenho, ETc apresentando R² 0,85 e Kc um R² 0,86, com RMSE de 1,27 mm d⁻¹ e 0,38. Os resultados apontaram que os algoritmos SEBAL e SSEBop apresentaram boa precisão e acurácia quando comparados ao método razão de Bowen, para estimar a ETc na cultura da batata.

Palavras-chave: balanço de energia, demanda hídrica, Razão de Bowen

Abstract

Evapotranspiration and Crop Coefficient (Kc) Estimation Using Remote Sensing in Potato Cultivation

The cultivation of potatoes has increased in recent years. However, its expansion has occurred in less favorable areas for the development of the crop, particularly concerning restrictive water availability. Given this scenario, monitoring water usage in potato cultivation areas and assessing the interactions between the surface and atmosphere can be achieved with greater spatial coverage and less cost, through the application of models that use remotely collected information, spanning from regional to global scales. This study aims to estimate crop evapotranspiration (ETc) and crop coefficient (Kc) in potato cultivation using the SEBAL and

SSEBop models. In comparison with the Bowen ratio method, the SEBAL-estimated ET_c showed an R² of 0.79 and K_c of 0.84, with its performance classified as satisfactory. The determined RMSE was 1.54 mm d⁻¹ for ET_c and 0.43 for K_c. The SSEBop model demonstrated better performance, with ET_c exhibiting an R² of 0.85 and K_c of 0.86, with RMSE values of 1.27 mm d⁻¹ and 0.38, respectively. The results indicate that both the SEBAL and SSEBop algorithms exhibited good precision and accuracy when compared to the Bowen ratio method for estimating ET_c in potato cultivation.

Keywords: energy balance, water demand, Bowen ratio

3.1. Introdução

A batata (*Solanum tuberosum* L.) é uma das principais espécies cultivadas é consumida no mundo, ocupando a terceira posição, atrás apenas do arroz e trigo (ZHOU et al., 2019), com produção de 359 milhões de toneladas em 2021 (FAOSTAT, 2022). De acordo com o IBGE (2022), a produção estimada de batata no Brasil em 2021 foi de aproximadamente 4,1 milhões de toneladas em 125 mil hectares, São Paulo destaca-se com produtividade média de 32,8 t ha⁻¹.

O cultivo de batata tem aumentado nos últimos anos, entretanto sua expansão tem ocorrido em áreas menos favoráveis ao desenvolvimento da cultura, principalmente no que diz respeito à disponibilidade hídrica restritiva, que causa redução da produtividade, situação que pode ser agravada devido às mudanças climáticas (BESHARAT et al., 2020).

Diante dessa prerrogativa, o monitoramento do uso da água nas áreas com cultivo de batata e a avaliação das interações que ocorrem entre a superfície e a atmosfera, pode ser realizado com maior cobertura espacial e de modo menos oneroso, por meio da aplicação de modelos que utilizam informações coletadas remotamente e que abrangem desde a escala regional à escala global (KALMA et al., 2008; BIGGS et al., 2016; MCSHANE et al., 2017).

O uso do sensoriamento remoto para realizar análise espaço-temporal da evapotranspiração vem se tornando uma ferramenta confiável, além de uma alternativa aos métodos tradicionais de determinação dessa variável, que possuem limitações para serem mensuradas em grandes áreas (ALLEN et al., 2011; FUENTE-SÁIZ et al., 2017).

A evapotranspiração não pode ser medida diretamente por técnicas de sensoriamento remoto, no entanto, sua estimativa é possível por meio de modelos semi-empíricos provenientes de algoritmos, somado a dados de radiação, medidas meteorológicas e o comportamento espectral da vegetação (FISHER et al., 2017).

Modelos que estimam a evapotranspiração via sensoriamento remoto possibilitam identificar áreas com déficit hídrico, o que auxilia no gerenciamento de e no planejamento agrícola, bem como na eficiência do manejo da irrigação em grandes áreas, a um baixo custo (SENAY et al., 2016; REYES-GONZÁLES et al., 2017).

O algoritmo SEBAL foi desenvolvido por Bastiaanssen (1995) e validado posteriormente em 1998 (BASTIAANSSEN et al., 1998a; BASTIAANSSEN et al., 1998b). O método utiliza imagens orbitais que apresentem medições de radiância na faixa do espectro do visível, infravermelho termal e infravermelho próximo. Também necessita de dados meteorológicos horários de velocidade do vento (m/s), temperatura do ar (°C) e umidade do ar (%) para o momento exato da passagem do satélite na área (SILVA, 2020; VALE, 2021).

O modelo estima, fundamentalmente, o balanço de energia da superfície pixel a pixel, para posteriormente a partir do fluxo de calor latente calculado estimar a evapotranspiração (BASTIAANSSEN et al., 1998; DE PAULA, 2018).

Desde a sua criação, o SEBAL foi testado em várias partes do mundo. De acordo com Liou e Kar (2014) o modelo foi aplicado em mais de 30 países, em diferentes climas e usos do solo (DU et al., 2013; ZHOU et al., 2014; BASTIAANSSEN & CHANDRAPALA, 2003; HENDRICKX et al. 2010; BASTIAANSSEN, 2000 e TASUMI et al., 2005), incluindo o Brasil (Teixeira et al., 2009; Lima et al., 2014; Ferreira et al., 2022).

O modelo SSEBop foi desenvolvido por Senay et al (2013) e se baseia em uma versão simplificada do balanço de energia para estimar a evapotranspiração, mantendo e expandido as principais premissas descritas nos modelos SEBAL (BASTIAANSSEN et al., 1998) e METRIC (ALLEN et al., 2007) (SENAY et al., 2013). No entanto, inova na tentativa de remover a subjetividade de escolher os “pixels âncora”, o que proporcionou uma maior operacionalização na estimativa da evapotranspiração (DE ANDRADE, 2018).

O SSEBop foi validado por meio de medidas *in situ* de lisímetros (SENAY et al., 2014), por estações micrometeorológicas (SINGH et al., 2013) e também pelo

método do balanço hídrico (SENAY et al., 2016). Em estudo realizado por Singh & Senay (2016), que compararam o desempenho do SSEBop com o METRIC, SEBAL e SEBS em áreas irrigadas por pivôs centrais de milho e soja, validaram os modelos utilizando dados de três torres de *Eddy Covariance* na área de estudo. Os resultados mostraram $R^2 \geq 0,81$, RMSE 0,93 mm.d⁻¹, indicando bom desempenho.

O presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho dos modelos SEBAL e SSEBop em estimar a evapotranspiração da cultura da batata irrigada por pivô central, no município de Vargem Grande do Sul - SP. Visou-se também calcular a evapotranspiração da cultura pelo método razão de Bowen, além de determinar o coeficiente de cultura (K_c).

3.2. Material e Métodos

3.2.1. Localização e caracterização das áreas de estudo

O experimento foi conduzido na Fazenda Grupo Terra Viva, localizada no município de Vargem Grande do Sul, SP, (21°51'19,48" S, 46°59'37,32" O). O clima da região de acordo com a classificação de Köppen e Cwa definido como tropical de altitude.

A precipitação total média é de 1451,2 mm, com o mês de janeiro registrando a maior média de chuvas, atingindo 260,5 mm. Em contraste, agosto é o mês com a menor quantidade de chuva, apresentando uma média de 21,5 mm. A média anual da temperatura mínima é de 14,8°C, enquanto a temperatura máxima alcança 27,7°C. A temperatura média anual é de 21,2°C. O mês mais frio é julho, com uma média de 10,4°C, e o mais quente é fevereiro, atingindo uma média de 29,2°C (CEPAGRI, 2016; FRUEHAUF et al., 2022).

O experimento foi plantado no dia 31 de maio de 2016 e colhido em 21 de setembro de 2016 uma área de 140 ha, com a cultivar a Agria, espaçamento entre linhas de 0,8 m, com 3 plantas por metro linear (25.000 plantas ha⁻¹). A área foi irrigada por aspersão com sistema de irrigação, através de um pivô central.

3.2.2. Monitoramento das variáveis ambientais

Na área do pivô foi instalada uma estação micrometeorológica posicionada à 130 m de distância da borda do pivô, na intenção de respeitar o critério de 100 vezes a altura do sensor mais elevado (MONTEITH & UNSWORTH,1990; HORST e WEIL,1992), como requisito de bordadura mínima para reduzir os efeitos da advecção de calor sensível (STANNARD,1997; LEE et al.,2004; GAVILAN e BERENGENA, 2007). Para determinação do fluxo de calor no solo (G), utilizou-se duas placas modelo HFP01 (*Hukseflux Thermal Sensors BV.*, Delft, The Netherlands), instalados a 0,02 m de profundidade, além de dois termopares modelo TCAV (*Campbell Scientific. Inc.*, Logan, Utah, USA) tipo *Chromel-Constantan*, que foram instalados 0,02 e 0,06 m de profundidade. A medição do saldo de radiação (Rn) foi realizada por um saldo radiômetro modelo CNR4 (Kipp & Zonen BV., Delft, The Netherlands), instalado a 1,3 m acima do dossel da cultura.

Na mensuração da umidade relativa e temperatura do ar, foram realizados a partir de dois termohigrometros, modelo HMP60 (*Campbell Scientific. Inc.*, Logan, Utah, USA) instalados nas alturas de 0,1 e 0,5 m da superfície do solo, correspondendo assim aos níveis 1 e 2, para estabelecer os gradientes de temperatura e pressão de vapor. Os dados coletados foram armazenados em um *datalogger* (CR 1000, *Campbell Scientific Inc.*, Logan, UT, USA), para aquisição automática dos dados de campo, contabilizados no intervalo de 15 min. Os parâmetros derivados do balanço de energia foram determinados para o período diurno, do nascer ao pôr do sol. Utilizou-se também dados da estação meteorológica pertencente a Fazenda Grupo Terra Viva, localizada próximo a área do pivô

3.2.3. Dados de sensoriamento remoto

Foram utilizadas imagens do satélite Landsat 7 pelo sensor ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) e satélite Landsat 8 pelos sensores OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*), ao longo do período de 18/06/2016 a 19/09/2016, durante o ciclo de cultivo da batata na área de estudo. A utilização de imagens de dois satélites permite maior frequência de revisita, de maneira que seja possível monitorar as mudanças fenológicas da cultura ao longo do ciclo.

Na seleção das imagens (Tabela 1), foram priorizadas aquelas sem nuvem e regularmente distribuídas ao longo do período de produção, de forma a permitir melhor avaliação da evapotranspiração de acordo com as distintas fases fenológicas da batata.

Tabela 1. Data de passagem dos satélites Landsat 7 e 8 utilizadas no estudo.

Data	
20/06/2016	31/07/2016
28/06/2016	07/08/2016
29/06/2016	08/08/2016
07/07/2016	15/08/2016
14/07/2016	23/08/2016
15/07/2016	24/08/2016
22/07/2016	09/09/2016
23/07/2016	16/09/2016
30/07/2016	17/09/2016

3.2.4. Método Razão de Bowen

A evapotranspiração da cultura (ET_c) foi calculada pelo método do balanço de energia, por intermédio da razão de Bowen (BOWEN, 1926), em função do fluxo de calor latente (LE) entre a superfície e a atmosfera conforme a Eq. 3. As pressões de vapor do ar foram calculadas pelas Eq. 1 e 2, e a razão de Bowen foi obtida a partir das diferenças de temperatura (ΔT) e de pressão real de vapor (Δe) entre os níveis 1 e 2 de instalação dos sensores.

$$e_s = 0,6108 \times \exp \left[\frac{17,27 \times T}{T + 237,3} \right] \quad (\text{Eq 1})$$

$$e_a = e_s \times \frac{UR}{100} \quad (\text{Eq 2})$$

$$\beta = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (\text{Eq 3})$$

em que: e_s é a pressão de saturação do vapor do ar em (kPa); T é a temperatura do ar nos níveis de medida ($^{\circ}\text{C}$); UR é a umidade relativa do ar em (%); e_a é a pressão real de vapor em (kPa); γ é o coeficiente psicométrico, considerado igual a $0,0060$ ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$) para altitude média da região.

Para evitar possíveis inconsistências nos valores da razão de Bowen, adotou-se critérios de rejeição de dados, conforme Perez et al. (1999). Foram eliminados gradientes menores que a resolução dos sensores e estabelecidas classes de erro para os valores de β que se aproximam de -1 , conforme as Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Condições necessárias para aceitação dos valores da razão de Bowen.

Energia Disponível	Diferença de Pressão de Vapor	Razão de Bowen	Fluxos de Calor Latente e Sensível
$R_n - G > 0$	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	$LE > 0$ e $H \leq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H > 0$ para $\beta > 0$
	$\Delta e < 0$	$\beta < -1$	$LE < 0$ e $H > 0$
$R_n - G < 0$	$\Delta e > 0$	$\beta < -1$	$LE > 0$ e $H < 0$
	$\Delta e > 0$	$\beta > -1$	$LE < 0$ e $H \geq 0$ para $-1 < \beta \leq 0$ ou $H < 0$ para $\beta > 0$

Fonte: Perez *et al.* (1999).

Tabela 3. Classes de erro e condições para rejeição dos valores da razão de Bowen.

Classe de erro	Condição
A	$(R_n - G) > 0$, $\Delta e > 0$ e $\beta < -1 + \epsilon $
B	$(R_n - G) > 0$, $\Delta e < 0$ e $\beta > -1 + \epsilon $
C	$(R_n - G) < 0$, $\Delta e > 0$ e $\beta > -1 + \epsilon $
D	$(R_n - G) < 0$, $\Delta e < 0$ e $\beta < -1 + \epsilon $
E	Mudanças Rápidas em T e e

Fonte: Perez *et al.* (1999).

A partir do fluxo de calor latente (Eq. 4) e do calor latente de vaporização da água (λ) (Eq. 5), a ET_c foi calculada para cada período de uma hora por meio da (Eq. 6). A evapotranspiração da cultura diária foi então obtida pela acumulação dos dados horários.

$$LE = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (\text{Eq 4})$$

$$\lambda = (2,501 - (0,00236 \times T)) \times 10^6 \quad (\text{Eq 5})$$

$$ET_c = \frac{LE \times 3600}{\lambda} \quad (\text{Eq 6})$$

em que; R_n é o saldo de radiação em ($W m^{-2}$); G é o fluxo de calor no solo em ($W m^{-2}$); LE é o fluxo de calor latente em ($W m^{-2}$); λ é o calor latente de vaporização ($J Kg^{-1}$); T é a temperatura do ar no nível 1 em ($^{\circ}C$); ET_c é a evapotranspiração da cultura em ($mm h^{-1}$); 3600 é o tempo em segundos correspondente ao intervalo de uma hora.

3.2.5. Aplicativo Google Earth Engine (GEE): geeSEBAL

Utilizou-se o aplicativo geeSEBAL (versão 0.1217), desenvolvido no GEE por Laipelt et al. (2021), nas linguagens JavaScript e Python. O geeSEBAL apresenta um banco de imagens do satélite Landsat e dados de reanálise em escala horária ERA5-Land, o que permite a sua aplicação em regiões onde os dados meteorológicos são limitados (GONÇALVES et al., 2022). Esse algoritmo estima a evapotranspiração (ET) com base em conjuntos de dados de sensoriamento remoto térmico e multiespectral, calculando o fluxo de calor latente (LE) como resíduo subtraindo o fluxo de calor do solo (G) e o fluxo de calor sensível (H) da radiação líquida (R_n) na equação do balanço de energia de superfície instantânea (Eq. 7). Os detalhes sobre a formulação, calibração do modelo e do aplicativo estão descritos em Bastiaanssen et al. (1998a), Bastiaanssen et al. (1998b) e Laipelt et al. (2021), respectivamente.

$$LE = R_n - G - H \quad (\text{Eq 7})$$

em que LE é o fluxo de calor latente ($W m^{-2}$); R_n é a radiação líquida ($W m^{-2}$); G é o fluxo de calor do solo ($W m^{-2}$) e H é o fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$).

O saldo de radiação (Rn) foi calculado conforme a (Eq 8):

$$Rn = (1 - \alpha) \times R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0) \times R_{L\downarrow} \quad (\text{Eq 8})$$

em que α é albedo de superfície(adimensional); $R_{s\downarrow}$ é a radiação solar incidente (W.m^{-2}); $R_{L\downarrow}$ é a radiação de onda longa recebida (W.m^{-2}); $R_{L\uparrow}$ é a radiação de onda emitida (W.m^{-2}) e ε_0 é a emissividade térmica da superfície (adimensional).

A fração evaporativa foi calculada de acordo com a Eq. 9:

$$\Lambda = \frac{LE}{Rn - G} \quad (\text{Eq 9})$$

em que Λ é a fração evaporativa.

O fluxo de calor no solo foi estimado pela Eq. 10:

$$\frac{G}{Rn} = T_s (0,015 \times \alpha) \times \left(1 - 0,8 \times \text{NDVI}^{\frac{1}{3}}\right) \quad (\text{Eq 10})$$

em que T_s é a temperatura de superfície ($^{\circ}\text{C}$); NDVI é o índice de vegetação normalizada.

O fluxo de calor sensível (H) foi estimado a partir do gradiente de temperatura próximo a superfície dado pela função aerodinâmica, conforme a Eq. 11.

$$H = \rho \times c_p \frac{(a + bT_s)}{rah} \quad (\text{Eq 11})$$

em que ρ é a densidade do ar (Kg m^{-3}); c_p é o calor específico do ar à pressão constante ($\approx 1004 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), rah é a resistência aerodinâmica para a transferência de calor (s m^{-1}); “a” e “b” são coeficientes empíricos determinados por meio de uma calibração interna para cada imagem de satélite.

O termo $(a + bT_s)$ é uma equação que representa o gradiente de temperatura próximo à superfície e a temperatura do ar, para uma altura próxima a superfície de 0,1 m e outra de 2 m acima da superfície. A determinação rah requer cálculo iterativo para correções de estabilidade da atmosfera aplicando o comprimento de Monin-Obukhov (L) (BASTIAANSEN, 2000; KOLOSKOV et al., 2007).

Para cada pixel da imagem a evapotranspiração pode ser estimada em escala horária, de acordo com a equação (Eq. 12):

$$ET_h = \frac{\Lambda}{\lambda} \times 3600 \quad (\text{Eq 12})$$

em que λ é o calor latente de vaporização ($2,45 \times 10^6 \text{ J. Kg}^{-1}$); ET_h é a evapotranspiração horária.

Posteriormente, calcula-se a fração evapotranspirativa de referência horária, que é aproximadamente constante ao longo do dia (TREZZA, 2002), obtida pela Eq. 13:

$$FET_{o_H} = \frac{ET_H}{ET_{o_H}} \quad (\text{Eq 13})$$

em que ET_H é a evapotranspiração horária; ET_{o_H} e a evapotranspiração de referência horária.

Considerando que a fração de evapotranspirativa de referência horária sendo igual à fração de evapotranspiração de referência de 24 horas, é possível obter a seguinte relação (Eq. 14):

$$FET_{o_H} = FET_{o_{24}} = \frac{ET_H}{ET_{o_H}} = \frac{ET_{24}}{ET_{o_{24}}} \quad (\text{Eq 14})$$

em que $FET_{o_{24}}$ é a fração evapotranspirativa de referência de 24 horas; ET_{24} a evapotranspiração real de 24 horas e $ET_{o_{24}}$ a evapotranspiração de referência em 24 horas.

Desse modo a evapotranspiração acumulada durante o dia pode ser obtida através da Eq. 15 (TREZZA, 2002):

$$ET_{\text{geeSEBAL}} = FET_{o_{24}} \times ET_{o_{24}} \quad (\text{Eq 15})$$

O algoritmo estatístico automatizado para selecionar os pixels quente e frio é baseado em uma versão simplificada do algoritmo CIMEC utilizado no METRIC (ALLEN et al., 2013), onde os percentis da temperatura de superfície ($^{\circ}\text{C}$) e de NDVI

são utilizados para selecionar esses pixels. Neste trabalho, adotou-se os percentis para pixels frios 5% (NDVI), 1% (Ts) e pixels quentes 1% (NDVI), 10% (Ts), conforme recomendado por Laipelt et al (2021).

3.2.6. Aplicativo Google Earth Engine (GEE): SSEBop^{BR}

Foi utilizado o aplicativo SSEBop^{BR}, desenvolvido no GEE (versão - 2.0), nas linguagens JavaScript e Python pela ANA (Agência Nacional de Águas) em parceria com a USGS (*United States Geological Survey*). O SSEBop^{BR} utiliza banco de imagens do satélite *Landsat* disponível no GEE, juntamente com bases meteorológicas composta por dados diários interpolados de estações meteorológicas brasileiras, desenvolvido por Xavier et al. (2016), para o período de 1985 a 2017. Além disso, são utilizadas bases de dados de reanálise *Climate Forecast System Version 2* (CFSv2) do NOAA, que abrange o período de 1979 até o presente, o *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS) desenvolvido pela NASA, com dados disponíveis a partir do ano de 2000 até o presente, e a mais recentemente adicionado o ERA5 – Land criada pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) de 1950 até o presente (ANA, 2020).

O SSEBop^{BR} utiliza dados orbitais multiespectrais associados a dados meteorológicos complementares para estimar a fração evapotranspirativa (*ETf*) (VALE et al.,2022). Essa fração é então multiplicada pela evapotranspiração de referência (*ETo*) e pelo fator de escala (*k*) para obter a evapotranspiração da cultura (*ET_C^{SSEBop}*), conforme a Eq. 16:

$$ET_{C_{SSEBop}} = ETf \times k \times ETo \quad (\text{Eq 16})$$

em que *ET_C^{SSEBop}* é a evapotranspiração da cultura estimada pelo método SSEBop (mm d⁻¹); *ETf* é a fração de evapotranspirativa; *k* é um fator de escala, na qual o valor entre 1,20 e 1,30 é sugerido por Senay et al. (2017), que equivale ao valor de *k_c* da alfafa, que corresponde a uma superfície aerodinamicamente mais rugosa que a grama.

A fração evapotranspirativa foi estimada com base na Eq. 17:

$$ET_f = \frac{T_h - T_s}{T_h - T_c} = \frac{T_h - T_s}{dT} = \frac{T_h}{dT} - \frac{T_s}{dT} = \frac{T_c + dT}{dT} - \frac{T_s}{dT} = 1 - \frac{1}{dT}(T_s - T_c) \quad (\text{Eq 17})$$

em que T_s é a temperatura do pixel (K), T_h é a temperatura do pixel quente; T_c é a temperatura do pixel frio (K) (Eq 18); dT é a diferença predefinida entre as temperaturas do pixel quente e do pixel frio (K).

É importante destacar que os valores de ET_f negativos são convertidos a zero, enquanto o valor máximo de ET_f é limitado a 1,05 (SENAY et al., 2017; DE ANDRADE, 2018).

$$T_c = c \times T_{\max} \quad (\text{Eq 18})$$

em T_{\max} é a temperatura máxima do ar no período analisado (K); c é um fator de correção que relaciona T_{\max} e T_s (T_{s_frio}) em uma superfície bem vegetada e com boa disponibilidade hídrica (SENAY et al., 2017).

$$T_{\text{corr}} = \frac{T_{s_frio}}{T_{\max}} \quad (\text{Eq 19})$$

$$c = \overline{T_{\text{corr}}} - 2 \times \text{std} \quad (\text{Eq 20})$$

em que T_{s_frio} é a temperatura da superfície em locais bem vegetados (K), onde o NDVI é $\geq 0,7$; T_{corr} (Eq. 19) é a razão entre T_{s_frio} e T_{\max} nos locais bem vegetados; std é o desvio padrão de T_{corr} da imagem.

O diferencial de temperatura dT é calculado como solução da equação do balanço de energia, com base na (Eq. 21), para um solo exposto e seco. Essa condição representa o pixel quente, no qual o fluxo de calor latente e o fluxo de calor no solo são assumidos como sendo iguais a zero. Portanto, o fluxo de calor sensível é equivalente ao saldo de radiação (ALLEN et al., 2007; BASTIAANSSEN et al., 1998).

$$R_n = LE + H + G \approx H = \frac{\rho_a \times C_p \times dT}{r_{ah}} \quad (\text{Eq 21})$$

em ρ_a é a densidade do ar; C_p é o calor específico do ar ($\sim 1013 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$); r_{ah} é a resistência aerodinâmica ao calor para solo exposto e seco, assumida como 100 s m^{-1} , conforme recomendação de Senay et al. (2013), embora seja dependente da altura do cultivo e da velocidade do vento. Entretanto para o cálculo de dT (Eq. 22), considera-se LE e G iguais a zero, portanto, R_n é equivalente a H e dT é dada pela (Eq. 23) (BASTIAANSSEN et al., 1998; ALLEN et al., 2007).

$$dT = \frac{R_n \times r_{ah}}{\rho_a \times C_p} \quad (\text{Eq 23})$$

3.2.7. Estimativa do índice de área foliar (LAI)

O LAI foi estimado indiretamente através do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), de acordo com a metodologia proposta por Allen et al., (2014) e Tasumi et al. (2005), conforme a Eq. 24:

$$\text{LAI} = 7 \times \text{NDVI}^3 \quad (\text{Eq 24})$$

3.2.8. Coeficiente de cultura (Kc)

Coeficiente de cultura (K_c) foi obtido a partir dos dados diários da evapotranspiração (ET_o) e da evapotranspiração de cultura (ET_c). De acordo com a metodologia do boletim da FAO 56 (ALLEN et al., 1998) (Eq. 25).

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (\text{Eq 25})$$

3.2.9. Método de Penman-Monteith (FAO 56)

Os modelos SEBAL e SSEBop utilizam valores de ET_o que foram obtidos pela a equação de Penman-Monteith FAO 56 (ALLEN et al., 1998) para determinar a ET_c , de acordo com a (Eq. 26):

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T_{med} + 273} \right) u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (\text{Eq 26})$$

em que: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); Δ é a inclinação da curva de pressão de vapor d'água ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n é o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo sendo igual a zero para estimativas diárias; γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); T_{med} é a temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$); u_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); e_a é a pressão parcial de vapor d'água (kPa); e_s é a pressão de saturação de vapor d'água (kPa).

3.2.10. Análise estatística

Para a validação dos modelos, utilizou-se os valores obtidos pelo SEBAL e SSEBop, referente ao pixel da estação micrometeorológica e comparados aos dados calculados pela razão de Bowen. A avaliar a precisão dos modelos, foram aplicados os indicadores estatísticos R-quadrado, raiz do erro médio quadrático (RMSE) (Eq. 27) e percentual (pRMSE) (Eq. 28), erro médio (BIAS) (Eq. 29) e percentual (pBIAS) (Eq. 30).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}{N}} \quad (\text{Eq 27})$$

$$pRMSE (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)^2}}{\frac{\sum_{i=1}^N O_i}{N}} \times 100 \quad (\text{Eq 28})$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{N} \quad (\text{Eq 29})$$

$$pBIAS (\%) = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - O_i)}{\sum_{i=1}^N O_i} \times 100 \quad (\text{Eq 30})$$

em que M_i é a evapotranspiração estimada; O_i é a evapotranspiração medida *in situ* pela razão de Bowen; \bar{O} é a média dos valores da evapotranspiração medida; N é o número de observações.

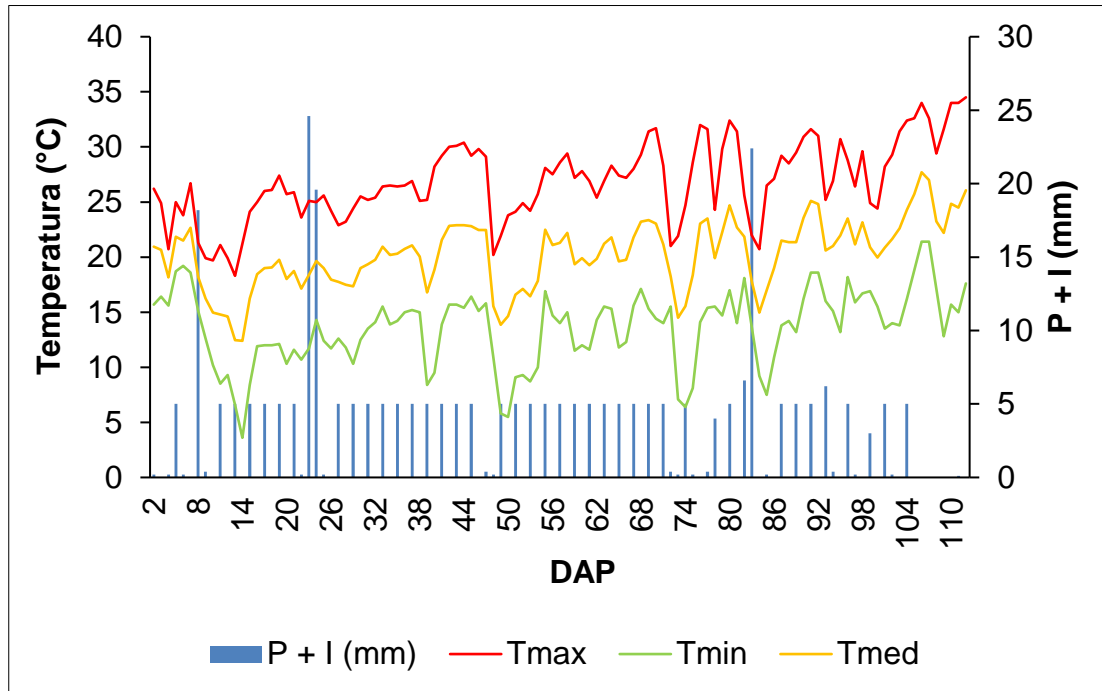
3.3. Resultados e Discussão

Na Figura 1, são apresentadas as variações meteorológicas registradas ao longo do experimento. A precipitação total mensurada foi de 108,9 mm, entretanto para que a cultura tenha sua demanda hídrica atendida, realizou-se a utilização do sistema de irrigação, já que a necessidade hídrica adequada para a batata, varia entre 250 a 500 mm, podendo chegar a 600 mm para cultivares de ciclo longo a fim de obter rendimento máximo de produção (EMBRAPA, 2016).

A maior parte da precipitação ocorreu na fase vegetativa, que correspondeu entre 8 DAP e 25 DAP (63,8 mm). É importante destacar que durante os estádios iniciais, o excesso de água no solo pode provocar o apodrecimento ou um estresse metabólico na batata-semente ou dos tubérculos formados, podendo provocar o embonecamento, rachaduras, além de favorecer o desenvolvimento de patógenos (FILGUEIRAS, 2003; PAVLISTA, 2003).

A temperatura média do ar durante o período estudado foi de 20,2 °C (Figura 1), com as temperaturas máximas em grande parte do ciclo estando abaixo de 30°C, já as temperaturas mínimas apresentaram valores acima de 10°C. Ao longo do experimento, a cultura da batata esteve em grande parte do ciclo, dentro da faixa ótima de temperatura, que é de 15° a 22°C (EMBRAPA, 2016).

Figura 1. Precipitação + irrigação, temperatura máxima e mínima diária ao longo do ciclo a batata.



3.3.1. Evapotranspiração da cultura da batata

A duração dos estádios fenológicos e as necessidades hídricas da cultura da batata são muito variáveis, dependendo principalmente das condições climáticas do local e da duração do ciclo da batata (DOORENBOS & KASSAM, 2000; DUARTE, 1989). Com base nisso, adotou-se o modelo de fase fenológica da cultura, de acordo com Allen et al. (1998) e Marouelli & Guimarães (2006).

A evapotranspiração média da cultura (ET_c) foi de $3,44 \text{ mm.d}^{-1}$, com média de $3,64 \text{ mm.d}^{-1}$ no estágio de crescimento vegetativo; $2,16 \text{ mm.d}^{-1}$ na formação de tubérculos; $3,81 \text{ mm.d}^{-1}$ no estágio de enchimento dos tubérculos e $3,66 \text{ mm.d}^{-1}$ na maturação.

O estágio de crescimento vegetativo teve duração de 14 dias, a ET_c total mensurada foi de 51,00 mm (Tabela 4). Nessa fase a cultura apresenta a emergência das hastes principais, início da atividade fotossintética e o aumento da área foliar (HELDWEIN, STRECK, BISOGNIN; 2009).

No estágio de formação dos tubérculos teve duração de 10 dias, com a ET total de 17,31 mm (Tabela 4). Esse período é caracterizado como sendo o mais

importante do desenvolvimento da cultura, já que é o momento em que ocorre a partição de assimilados na planta (LOPES & BUSO, 1997). Este estágio é considerado o mais crítico à deficiência hídrica, já que a sua presença, causa redução do número de tubérculos por planta (MAROUELLI & GUIMARÃES, 2006).

A fase do enchimento de tubérculos prolongou-se por aproximadamente 45 dias, apresentando ETc total 159,90 mm (Tabela 4). O aumento da duração dessa fase tem correlação positiva com o rendimento final dos tubérculos (STRECK et al., 2007; BISOGNIN et al., 2008).

Já na fase de maturação, teve início o processo de senescência, com redução gradual da fotossíntese e amarelecimento de folhas e hastes, até a secagem completa da parte aérea, no qual todos os assimilados são direcionados para os tubérculos (STRECK et al., 2007). A ET contabilizada foi de 72,00 mm (Tabela 4), com 29 dia a duração dessa fase. A evapotranspiração total da cultura foi de 300,29 mm, esse valor medido está dentro intervalo relatado por outros estudos (Tabela 5).

Tabela 4. Variação da ETc (mm) nos diferentes estádios fenológicos da batata.

Duração da Fase (dias)	Estádio de Desenvolvimento	ETc (mm)	ETo (mm)
14¹	Crescimento Vegetativo	51,00	44,70
10	Formação de Tubérculos	17,31	26,50
45	Enchimento de Tubérculos	159,90	147,80
29	Maturação	72,00	82,60
Total		300,21	301,60

¹Foram desconsiderados 18 dias do ciclo, da data de plantio ao estágio de crescimento vegetativo.

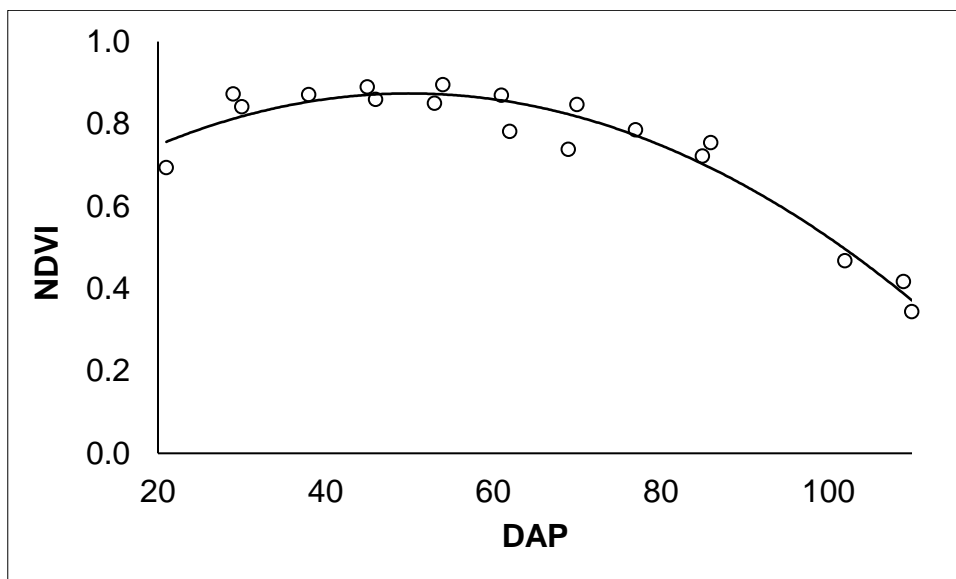
Tabela 5. Evapotranspiração total na cultura da batata presente na literatura

Autores	ETc Total (mm)	Local	Metodologia
Parent & Anctil (2012)	331,5	Canadá	<i>Eddy Covariance</i>
Machakaïke et al. (2021)	338,0	África do Sul	<i>Eddy Covariance</i>
Machakaïke et al. (2021)	466,0	África do Sul	<i>Eddy Covariance</i>
Kadam et al. (2020)	240,0	Índia	Penman-Monteith
Kadam et al. (2020)	245,0	Índia	Penman-Monteith

3.3.2. Avaliação do NDVI e LAI na cultura da batata

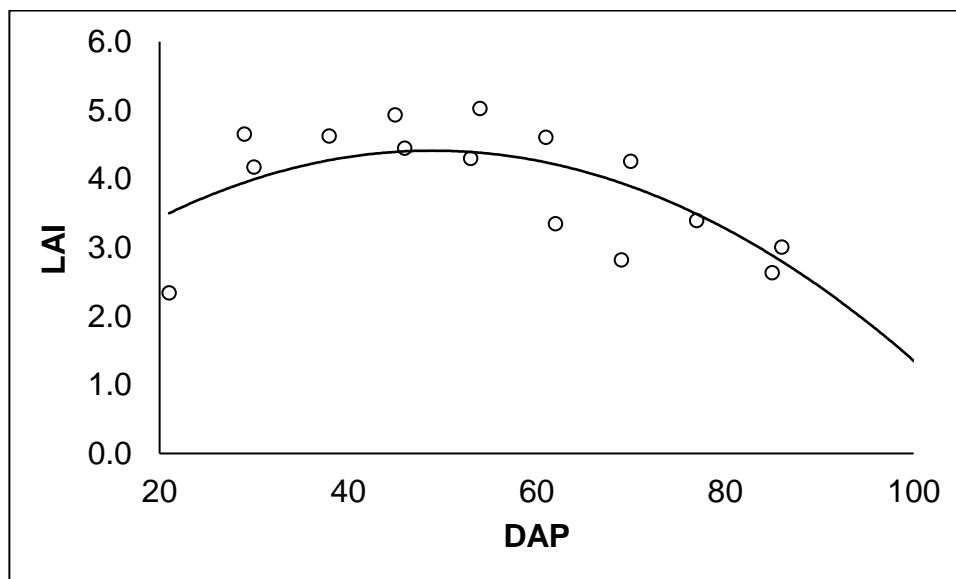
A Figura 2 indica a distribuição do NDVI durante o ciclo da batata. O estágio vegetativo, a partir do 20 DAP, os valores situaram-se entre 0,69 e 0,86 devido a cultura apresentar uma área foliar em pleno desenvolvimento é também pelo espaçamento entre linhas utilizado, fazendo com que fosse mínima a influência do solo nesses valores (TORMEN et al., 2023). Ao atingir os 54 DAP, foi observado o valor máximo do NDVI (0,90), resultado similar ao encontrado por Mukibi et al (2023) em um cultivo da batata, encontraram NDVI máximo de 0,84, por volta do 50 DAP na África do Sul. Entretanto, na fase de senescência (86 DAP), os valores do NDVI diminuíram rapidamente, atingindo o mínimo de 0,34, observado na série temporal, isso devido à degradação completa da clorofila e à secagem integral da parte aérea e das hastes.

Figura 2. Evolução temporal dos valores do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) ao longo do ciclo da batata



A partir da Figura 3 é possível observar a evolução do LAI ao longo do ciclo da cultura. Conforme a cultura foi se desenvolvendo, há um aumento nos valores do LAI a partir do 20 DAP, atingindo valor máximo (5,03) no 54 DAP. Entretanto, a partir do 86 DAP, ocorreu um declínio nos valores do LAI, atingindo seu menor valor (0,26) no final do ciclo.

Figura 3. Evolução temporal dos valores do *Leaf Area Index* (LAI) ao longo do ciclo da batata



3.3.3. Aplicação do Modelo SEBAL e SSEBop para estimativa da evapotranspiração da cultura da batata

De acordo com as Figuras 4 e 5, no estágio de crescimento vegetativo, os valores da evapotranspiração foram baixos, com ET_c SEBAL= 1,89 mm.d^{-1} e ET_c SSEBop=1,72 mm.d^{-1} no 29 DAP. Diversos autores observaram essa tendência ao estimarem a evapotranspiração por meio de imagens de satélite (FRENCH et al., 2015; SALES et al., 2016, 2017; ALTHOFF et al., 2019; SOUZA et al., 2020). Esses baixos valores têm como explicação, a influência da reflectância do solo no início do ciclo da cultura. Essa influência interfere negativamente na determinação dos índices de vegetação (NDVI, SAVI e IAF), os quais são componentes de entrada para os modelos de estimativa da evapotranspiração (GONZÁLEZ-GÓMEZ et al., 2018; FILGUEIRAS et al., 2019; VENANCIO et al., 2020, 2021).

Outro fator que pode explicar a presença dos baixos valores da evapotranspiração no início do ciclo da cultura, é o fato do K_c da cultura variar com a alta evaporação de água, devido ao solo descoberto e à utilização do sistema de irrigação. Além disso, resolução espacial das imagens do satélite também desempenha um papel crucial, já que o valor do pixel pode ser influenciado pela superfície descoberta do solo (WARREN et al., 2014; ALTHOFF et al., 2019).

Durante a fase de formação dos tubérculos, os valores da evapotranspiração permaneceram constante com a ET_c SEBAL= 2,48 mm.d⁻¹ e ET_c SSEBop= 2,29 mm.d⁻¹ no 45 DAP. No entanto, na fase de enchimento de tubérculos, ocorreu um aumento significativo nos valores da evapotranspiração, coincidindo com o período de alto vigor da cultura, com ET_c SEBAL = 3,63 mm.d⁻¹ e ET_c SSEBop= 4,30 mm.d⁻¹ aos 86 DAP (Figuras 4 e 5). Esses valores elevados persistiram de forma relativamente uniforme até o final deste estágio, consequência da boa disponibilidade hídrica e o aumento da exigência atmosférica também colaboraram para que as demandas se mantivessem altas no período (VALE et al., 2022).

Na fase de maturação, a ET_c apresentou um grande declínio com ET_c SEBAL= 2,53 mm.d⁻¹ e ET_c SSEBop= 2,10 mm.d⁻¹ no 109 DAP (Figuras 4 e 5), consequência do processo de senescência na cultura.

Figura 4. Distribuição espacial e temporal da evapotranspiração da batata estimada pelo modelo SEBAL.

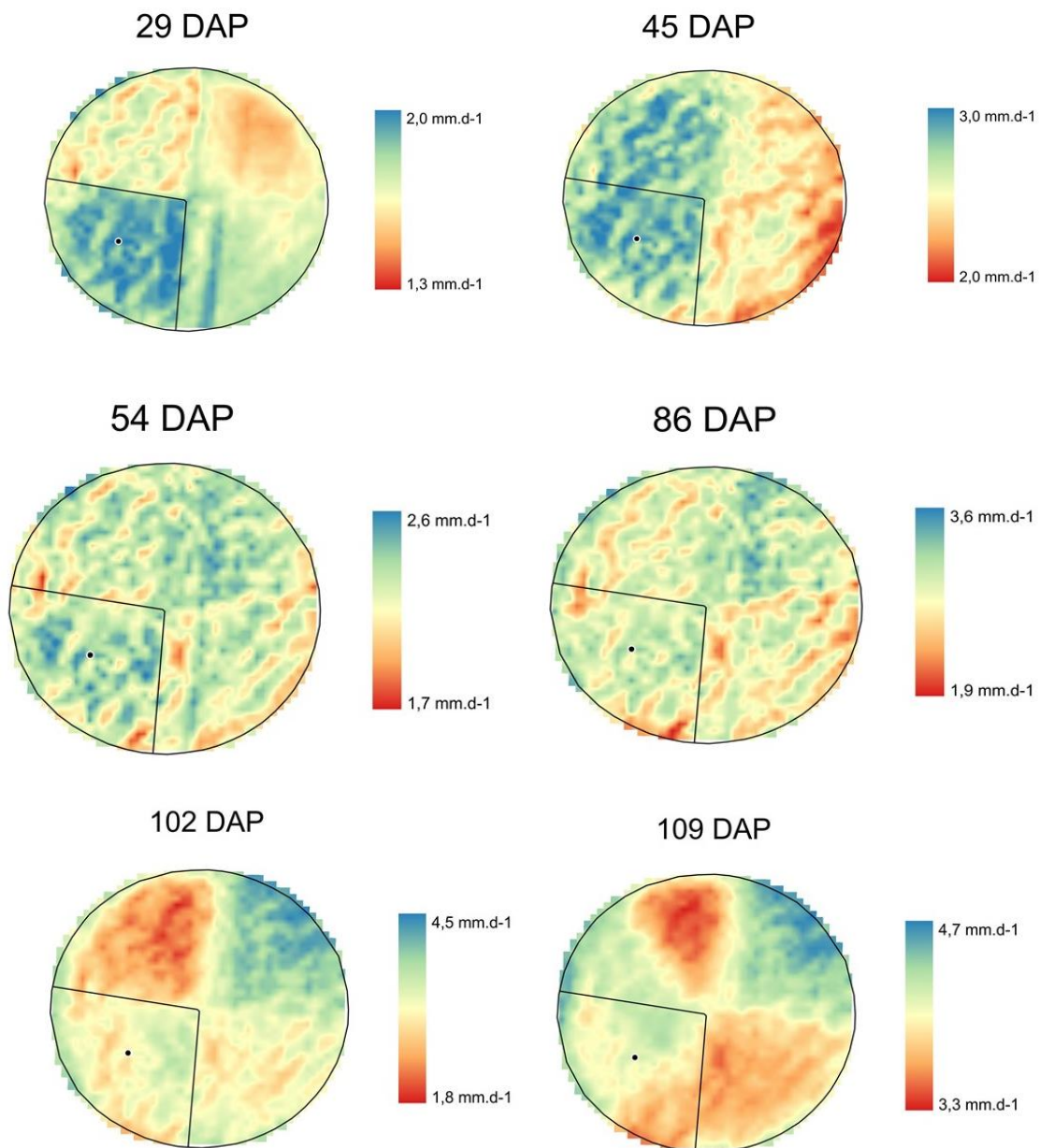
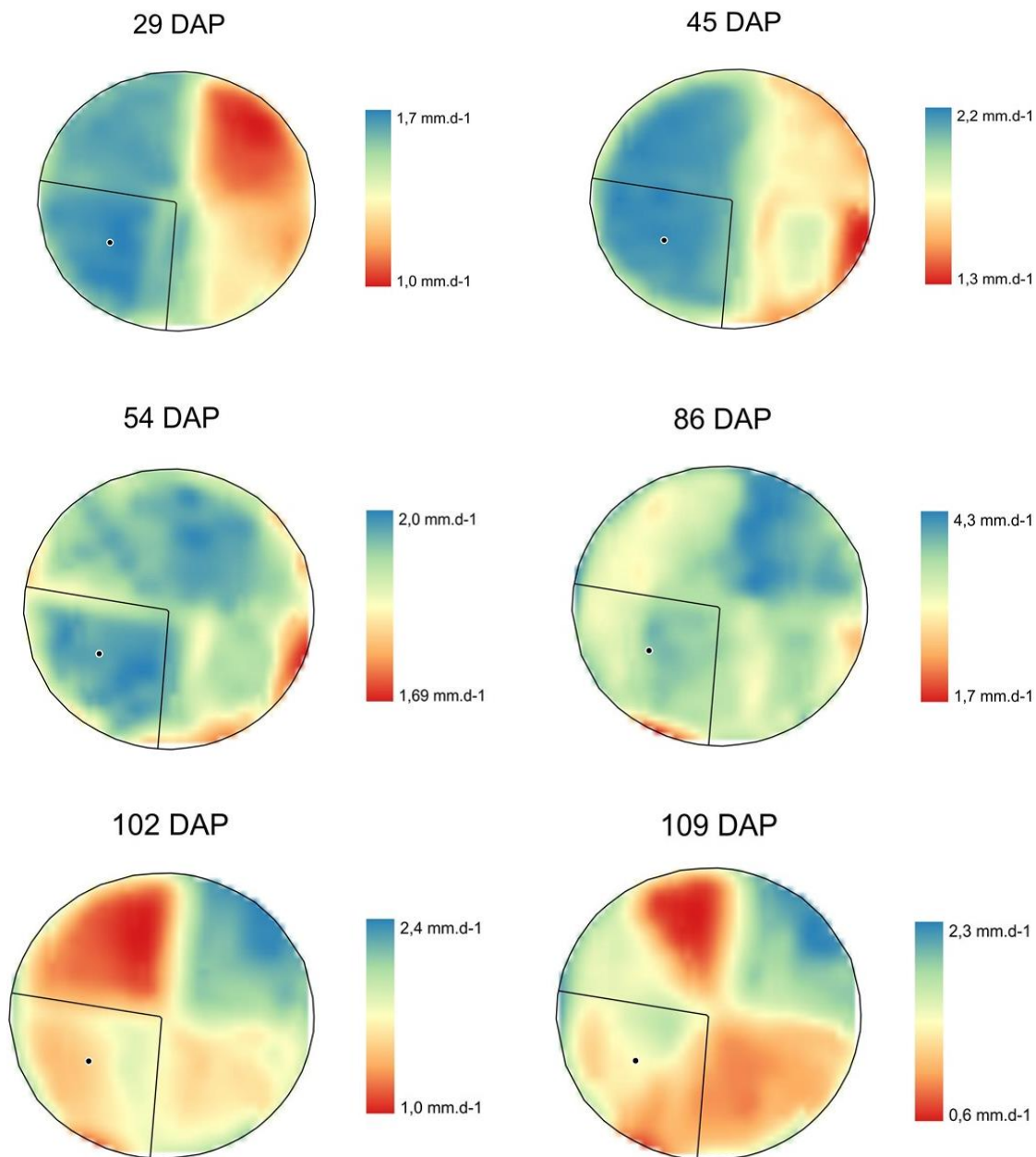


Figura 5. Distribuição espacial e temporal da evapotranspiração da batata estimada pelo modelo SSEBop



3.3.4. Análise de desempenho

Os resultados da avaliação de desempenho dos modelos SEBAL e SSEBop, estão presentes na Tabela 6, e suas respectivas correlações com a razão de Bowen nas Figuras 6 e 7.

Verificou-se que tanto o SEBAL quanto SSEBop apresentaram uma forte correlação (Tabela), com $R^2=0,79$ e $R^2=0,85$, respectivamente, ao comparar com os dados da estação micrometeorológica. Um resultado próximo ao $R^2=0,88$ encontrado por Yang et al. (2015) em estudo com o SEBAL realizado na China. Senay et al. (2016), encontraram $R^2=0,91$ e $R^2=0,82$ avaliando o SSEBop em áreas do rio Colorado-EUA. Já Sena et al. (2021) 0,86 para o SEBAL e 0,92 para o SSEBop, em estudo com a cultura do trigo, e validação pela razão de Bowen.

Ainda com base na Tabela 6, o SEBAL apresentou RMSE de $1,54 \text{ mm.d}^{-1}$ e um pRMSE de 43,62%. Esse valor de RMSE difere dos encontrados por Costa (2019) de $0,79 \text{ mm.d}^{-1}$ na cultura do café e Vale et al. (2021) de $0,50 \text{ mm.d}^{-1}$ na cultura do trigo. O modelo demonstrou uma subestimação da evapotranspiração de $0,72 \text{ mm.d}^{-1}$.

O SSEBop registrou um RMSE de $1,27 \text{ mm.d}^{-1}$ e um pRMSE de 35,96,16%, similar ao resultado do SEBAL. No entanto, Malta (2019) obteve valores distintos para a cultura do trigo, com RMSE de $0,28 \text{ mm.d}^{-1}$ e pRMSE 5,55% em 2018, e RMSE de $0,35 \text{ mm.d}^{-1}$ e pRMSE de 7,05% em 2019. Ademais, o modelo apresentou uma subestimação da evapotranspiração em $0,37 \text{ mm.d}^{-1}$.

Figura 6. Relação entre evapotranspiração de cultura (ETc RB) em função da evapotranspiração da cultura estimada pelo modelo SEBAL para a cultura da batata.

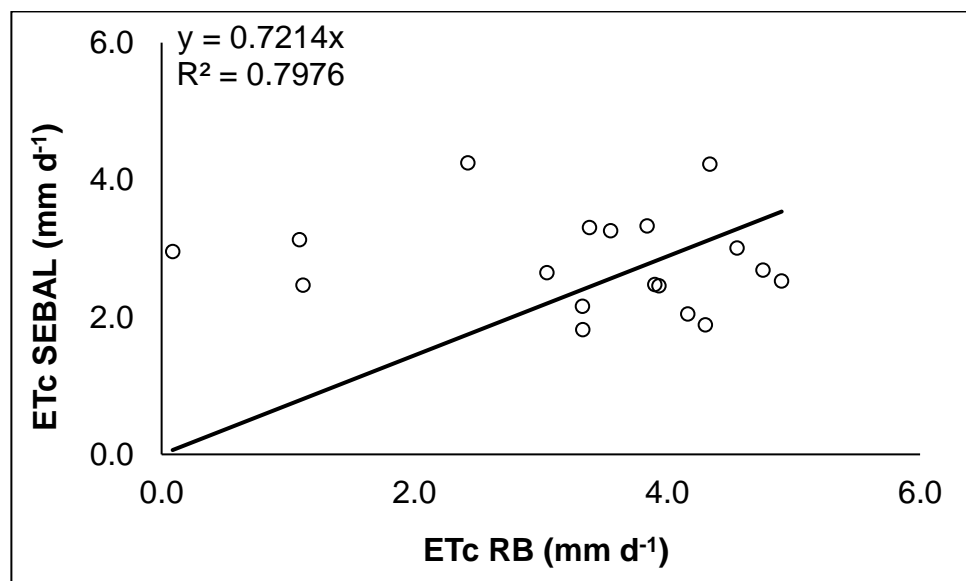


Figura 7. Relação entre evapotranspiração de cultura (ETc RB) em função da evapotranspiração da cultura estimada pelo modelo SSEBop para a cultura da batata.

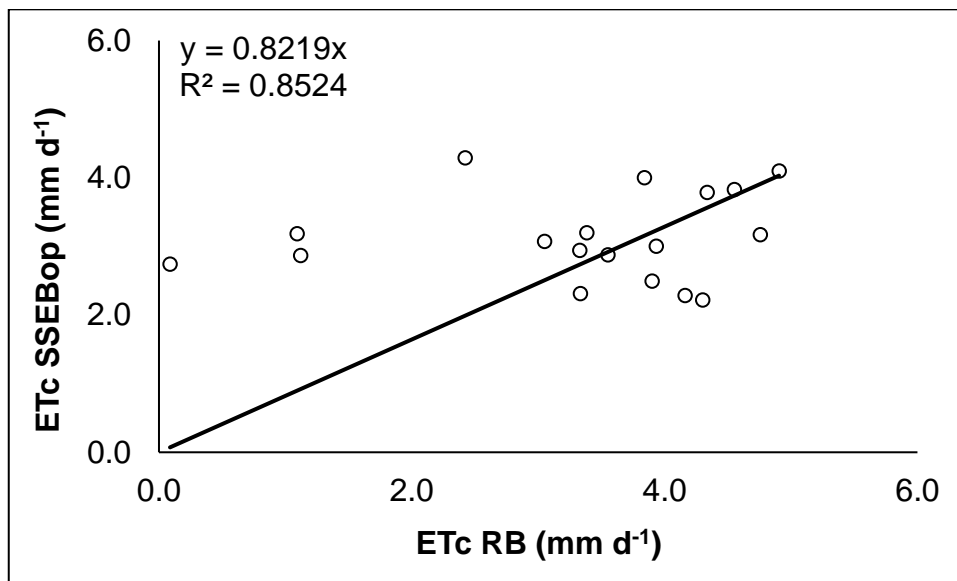


Tabela 6. Indicadores da análise estatística de desempenho dos modelos SEBAL e SSEBop nas datas de passagem dos satélites.

	SEBAL	SSEBop
R²	0,79	0,85
RMSE	1,54 mm d ⁻¹	1,27 mm d ⁻¹
pRMSE	43,62%	35,96%
BIAS	-0,72 mm d ⁻¹	-0,37 mm d ⁻¹
pBIAS	-20,44%	-10,61%

Uma das desvantagens de se utilizar metodologias que empregam imagens de satélite em culturas agrícolas de ciclo curto e a baixa frequência de revisada dentro da mesma área e a interferência de nuvens. Esse número limitado de imagens impacta diretamente a precisão e exatidão dos modelos de estimativa de evapotranspiração que se baseiam no sensoriamento remoto (SENA, 2021).

3.3.5. Coeficiente de cultura

A análise dos valores médios de Kc presentes na Tabela 7 revela que, durante a fase de crescimento vegetativo, o Kc RB registrou valor de 1,16, muito acima em comparação aos demais estádios fenológicos. Machakaire et al. (2021)

encontraram um resultado semelhante ($K_c=1,00$) em estudo realizado em Limpopo, África do Sul. Isso pode ser resultado da evaporação do solo, o principal contribuinte para altos valores de ET_c , uma vez que, nessa fase o dossel da cultura ainda está em desenvolvimento e não cobriu o solo totalmente (MACHAKAIRE et al., 2021; PEREIRA et al., 2021). Além disso, observou-se que, durante a fase de formação dos tubérculos o K_c SEBAL e K_c SSEBop apresentaram valores muito próximos.

Durante a fase enchimento dos tubérculos, quando a batata atingiu seu desenvolvimento máximo, onde foram observados valores de 1,11, 0,89, 0,96 para K_c RB, K_c SEBAL e K_c SSEBop (Tabela 7), respectivamente. Em um estudo com a batata irrigada utilizando lisímetro, Kashyap & Panda (2001) encontraram $K_c= 1,27$. Já Bos et al. (2009) e Siebert & Döll (2010) registraram $K_c=1,15$ para essa mesma fase.

Houve uma ligeira diminuição nos valores de K_c nos três métodos durante a fase de maturação. O decréscimo nos valores de K_c em média é de 5% ao dia, contudo, a partir do sexto dia após o início do processo de senescência, observa-se uma diminuição diária é da ordem de 7 a 12%, dependendo do estágio fitossanitário do dossel (HELDWEIN, STRECK, BISOGNIN; 2009).

A comparação dos valores de K_c encontrados nesse estudo com os recomendados pela FAO (ALLE et al., 1998) revelaram divergências, exceto no estágio de maturação para o K_c SEBAL. Essa discrepância, pode ser atribuída a diversos fatores, como os parâmetros na determinação das fases fenológicas (CARVALHO et al., 2013), clima da região, época e densidade de plantio (ALLEN et al., 1998), índice de área foliar (MEDEIROS et al., 2001) e o tipo de modelo para se calcular a evapotranspiração da cultura.

Tabela 7. Valores do coeficiente de cultura (K_c) obtidos pelo método razão de Bowen, SEBAL, SSEBop e proposto pela FAO para a cultura da batata.

Estádio de Desenvolvimento	K_c RB	K_c SEBAL	K_c SSEBop	K_c FAO
Crescimento Vegetativo	1,16	0,60	0,71	0,98
Formação dos Tubérculos	0,64	0,88	0,85	-
Enchimento dos Tubérculos	1,11	0,89	0,96	1,15
Maturação	0,90	0,75	0,91	0,75

As Figuras 8 e 9 mostram a variação dos coeficientes de cultura estimados pelos métodos SEBAL e SSEBop, respectivamente, pode-se observar que os valores de K_c apresentaram pequenas variações até os 30 DAP. O K_c SEBAL atingiu valor máximo de 1,17 no 85 DAP, já o K_c SSEBop teve valor máximo 1,21 no 61 DAP. Os valores de K_c de ambos os métodos diminuiriam ligeiramente a partir do 102 DAP até o final do ciclo, por influência da redução da atividade fotossintética e da transpiração da planta.

Figura 8. Curva do coeficiente de cultivo (K_c) da cultura da batata calculada pelo método SEBAL.

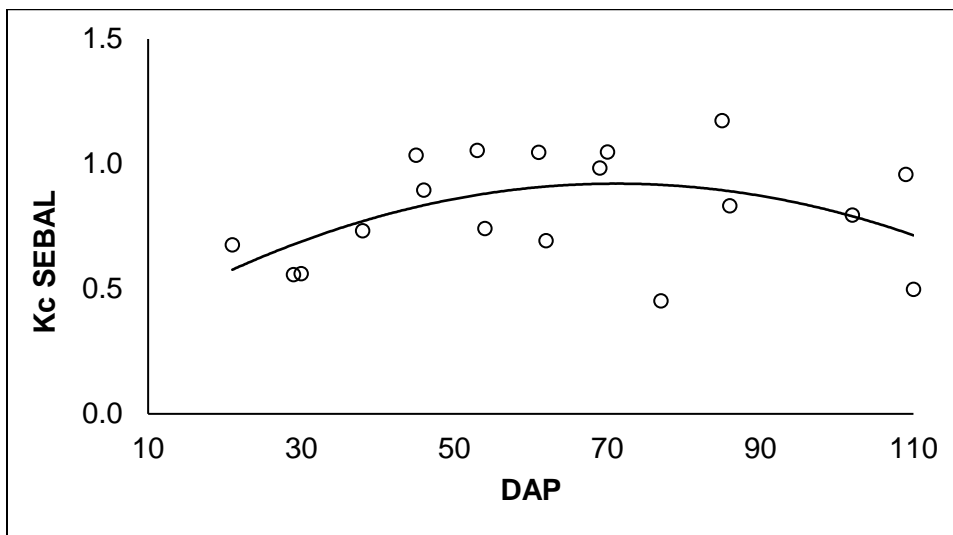
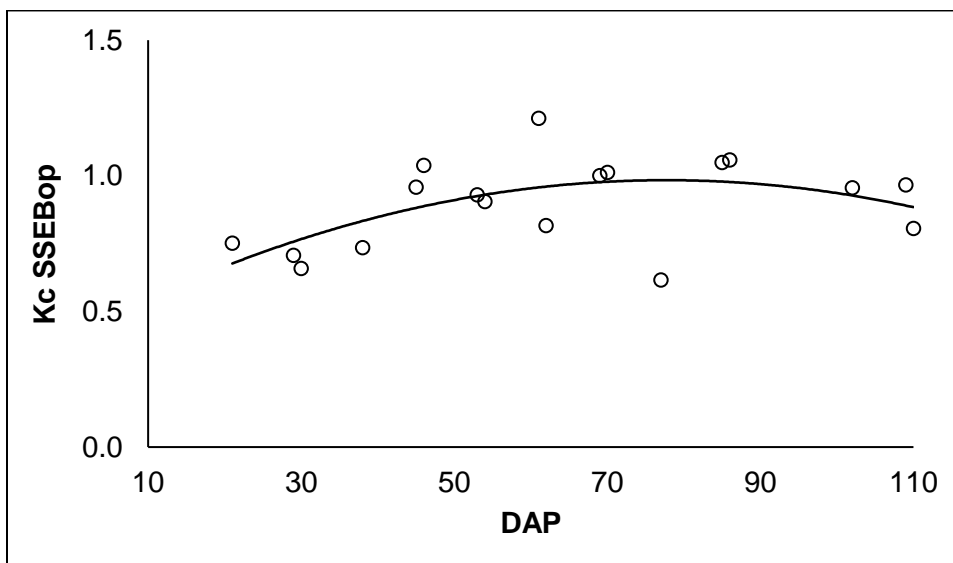


Figura 9. Curva do coeficiente de cultivo (K_c) da cultura da batata calculada pelo método SSEBop.



A comparação entre o Kc medido pela razão de Bowen e o Kc estimado pelos modelos SEBAL e SSEBop está apresentada na Tabela 8. O Kc SEBAL apresentou RMSE de 0,43 e um pRMSE de 43,35%, indicando uma boa precisão. Entretanto, apresentou uma subestimação de -0,19 ou aproximadamente -19,43%. Por outro lado, o Kc SSEBop registrou um RMSE de 0,38 e um pRMSE de 37,86%, indicando uma boa precisão, no entanto subestimou em estimar o Kc em -0,10 ou -10,45%.

Tabela 8. Indicadores da análise estatística de desempenho dos coeficientes de cultura estimados pelos modelos SEBAL e SSEBop.

	Kc SEBAL	Kc SSEBop
R²	0,84	0,86
RMSE	0,43	0,38
pRMSE	43,35%	37,86%
BIAS	-0,19	-0,10
pBIAS	-19,43%	-10,45%

3.4. Conclusões

Os resultados apontaram que os algoritmos SEBAL e SSEBop apresentaram desempenho satisfatório quando comparados ao método razão de Bowen, para estimar a ETc na cultura da batata.

As menores de taxas de evapotranspiração diária foram registradas nas fases de crescimento vegetativo e maturação. Já os maiores valores foram mensurados na fase de enchimento dos tubérculos, expressando a sensibilidade dos algoritmos SEBAL E SSEBop.

O SSEBop apresentou melhor desempenho estatístico do que o SEBAL, porém ambos subestimaram a evapotranspiração na cultura da batata.

Os valores de Kc encontrados nesse estudo quando comparados aos recomendados pela FAO, apresentaram divergências, exceto no estágio de maturação para o Kc SEBAL.

O Kc SEBAL apresentou RMSE de 0,43 e um pRMSE de 43,35%, já o Kc SSEBop registrou um RMSE de 0,38 e um pRMSE de 37,86%

Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Estimativas de evapotranspiração real por sensoriamento remoto no Brasil**. Brasília: ANA, 2020. Acessível em www.snirh.gov.br > Usos da Água.
- Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola/ organizador José Eduardo B. A Monteiro. – Brasília, DF: INMET, 2009. 530 p.: il.
- ALVES, Y. D. A. **Algoritmo S-SEBI modificado para estimar a evapotranspiração usando dados de sensoriamento remoto no Semiárido Brasileiro**. 2022. 86p. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Campina Grande.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage**, 56. Rome: FAO, 1998.
- ALLEN, R.G., TASUMI, M., TREZZA, R., 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—model. **J. Irrig. Drain. Eng.** 133, 380–394.
- ALLEN, R.G., BURNETT, B., KRAMBER, W., HUNTINGTON, J., KJAERGAARD, J., KILIC, A., KELLY, C., TREZZA, R., 2013. Automated calibration of the METRIC-landsat evapotranspiration process. **JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.** 49, 563–576, 10.1111/jawr.12056.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; HOWELL, T. A.; JENSEN, M. E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. **Agricultural Water Management**, v. 98, p. 899-920, 2011.
- ALTHOFF, F.; ALVINO, F. C. G.; FILGUEIRAS, R.; ALEMAN, C. C.; CUNHA, F. F. Evapotranspiration for irrigated agriculture using orbital satellites. **Bioscience Journal**, Uberlandia, v. 35, n. 3, p. 670-678, 2019.

- BASTIAANSSEN, 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**, v. 212, p. 198-212, 1998.
- BASTIAANSSEN, W.G.; CHANDRAPALA, L. Water balance variability across Sri Lanka for assessing agricultural and environmental water use. **Agricultural Water Management**, v. 58, n. 2, p. 171-192, 2003.
- BASTIAANSSEN, W. G. M. (2000). SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **J. Hydrol.**, 229, 87-100.
- BESHARAT, S.; BARÃO, L.; CRUZ, C. New strategies to overcome water limitation in cultivated maize: Results from sub-surface irrigation and silicon fertilization. **Journal of Environmental Management**, v. 263, p.1-9, 2020.
- BIGGS, T.W.; MARSHALL, M.; MESSINA, A. Mapping daily and seasonal evapotranspiration from irrigated crops using global climate grids and satellite imagery: Automation and methods comparison. **Water Resources Research**, v. 52, n. 9, p. 7311-7326, 2016.
- BISOGNIN, D. A. et al. Desenvolvimento e rendimento de clones de batata na primavera e no outono. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n.6, p. 699-705, 2008.
- BOWEN, I. S. The Ratio of Heat Losses by Conduction and by Evaporation from any Water Surface. **Physical Review**, v. 27, n6, p. 779-787, 1926.
- COMINI, B. C. A **Estimativa da evapotranspiração real via sensoriamento remoto**. 2018. 168p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
- CEPAGRI (2016) Centro de Pesquisa Meteorológica e Climática Aplicada a Agricultura. **Clima dos municípios paulistas: Vargem Grande do Sul**, São Paulo.

- DE LA FUENTE-SÁIZ, D.; ORTEGA-FARIÁS, S.; FONSECA, D.; ORTEGASALAZAR, SAMUEL; KILIC, A.; ALLEN, R. Calibration of METRIC model to estimate energy balance over a drip-irrigated apple orchard. **Remote Sensing**, v. 9, n. 7, p. 670, 29 jun. 2017.
- DE ANDRADE, B. C. C. **Estimativa da evapotranspiração real via sensoriamento remoto**. 2018. 168p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais.
- DE PAULA, A. C. P. **Estimativa da evapotranspiração real da cultura da soja e do feijoeiro pelo método da razão de Bowen e pelo modelo SSEBop**. 2018. 88p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeitos da água no rendimento das culturas**. Estudos FAO Irrigação e Drenagem 33. FAO, 1979. Versão em português – 2º Edição – Dep. de Eng. Agrícola, UFPB – 2000.
- DU J.; SONG K.; WANG Z.; ZHANG B.; LIU D. Evapotranspiration estimation based on MODIS products and surface energy balance algorithms for land (SEBAL) model in Sanjiang Plain, Northeast China. **Chinese Geographical Science**, 23, 1, 73–91, 2013.
- FERREIRA, T. R. **Avaliação da irrigação por fusão de imagens de satélite usando computação em nuvem: um estudo na região semiárida do Brasil**. 2002. 109p. Tese (Doutorado) - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande.
- FRENCH, A. N.; HUNSAKER, D. J.; THORP, K. R. Remote sensing of evapotranspiration over cotton using the TSEB and METRIC energy balance models. **Remote Sensing of Environment**, New York, v. 158, p. 281-294, 2015.

- FRUEHAUF, A. L.; SAIS, A.C.; LOMBARDO, M.A.; O uso das geotecnologias na análise das áreas irrigadas na bacia hidrográfica do córrego da conserva em Vargem Grande do Sul, SP- Um enfoque agroecológico. **Research, Society and Development**. v.11, n.6, p. e55111629260-e55111629260, 2022.
- GARCIA, C. J.B. **Irrigação por gotejamento superficial e subsuperficial na cultura de batata (*Solanum tuberosum* L.) com dois sistemas de plantio**. 2003 67 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Estadual Paulista “ Julio de Mesquita Filho” UNESP, Botucatu, SP.
- GONZÁLEZ-GÓMEZ, L.; CAMPOS, I.; CALERA, A. Use of different temporal scales to monitor phenology and its relationship with temporal evolution of normalized difference vegetation index in wheat. **Journal of Applied Remote Sensing**, Bellingham, v. 12, n. 2, 026010, 2018.
- GAVILAN, P.; BERENGENA, J. Accuracy of the Bowen ratio energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. **Irrigation Science**, v. 25, p. 127-140, 2007.
- HORST, T. W.; WEIL, J.C. Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface layer. **Bound Layer Meteorol.** v.59, p. 279-296, 1992.
- EMBRAPA. **Sistema de produção da batata**. Sistemas de produção Embrapa, Brasília, v. 2, 2016. Disponível em: <https://www.embrapa.br/cultivos-criacoes-e-sistemas-de-producao>. Acesso 03 de novembro de 2023.
- FAOSTAT - Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Crops, 2019. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 10 de setembro de 2023.
- FILGUEIRAS, R.; MANTOVANI, E. C.; ALTHOFF, D.; DIAS, S. H. B.; CUNHA, F. F. Sensitivity of evapotranspiration estimated by orbital images under influence of surface temperature. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 39, n. 1, p. 23-32, 2019.

FILGUEIRA, F. A. R. **Solanáceas**: Agrotecnologia moderna na produção de tomate, batata, pimentão, pimenta, berinjela e jiló. Lavras – MG: Editora UFLA, 2003. 331 p.

FISHER, J.B., MELTON, F., MIDDLETON, E., HAIN, C., ANDERSON, M., ALLEN, R., MCCABE, M.F., HOOK, S., BALDOCCHI, D., TOWNSEND, P.A., KILIC, A., TU, K., MIRALLES, D.D., PERRET, J., LAGOUARDE, J.-P., WALISER, D., PURDY, A.J., FRENCH, A., SCHIMEL, D., FAMIGLIETTI, J.S., STEPHENS, G., WOOD, E.F., 2017. The future of evapotranspiration: Global requirements for ecosystem functioning, carbon and climate feedbacks, agricultural management, and water resources. **Water Resour. Res.** 53, 2618–2626.

GONÇALVES, I. Z., RUHOFF, A., LAIPELT, L., BISPO, R. C., HERNANDEZ, F. B. T., NEALE, C. M. U., ... & MARIN, F. R. (2022). Remote sensing-based evapotranspiration modeling using geeSEBAL for sugarcane irrigation management in Brazil. **Agricultural Water Management**, 274, 107965.

HENDRICKX, J. M. H.; HONG, S.-H.; FRIESEN, J.; COMPAORE, H.; GIESEN, N. C. van de; RODGERS, C.; VLEK, P. L. G. Mapping energy balance fluxes and root zone soil moisture in the White Volta Basin using optical imagery. Targets and Backgrounds XII: Characterization and Representation, 6239, 2010.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Levantamento sistemático da produção agrícola: pesquisa mensal de previsão e acompanhamento de safras agrícolas no ano civil. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematicodaproducaoagricola.html?edicao=23542&t=resultados>. Acesso em: 04 de abril 2023.

KALMA, J.D.; MCVICAR, T.R.; MCCABE, M.F. Estimating land surface evaporation: A review of methods using remotely sensed surface temperature data. **Surveys in Geophysics**, v. 29, p. 421-469, 2008.

- LAIPELT, Leonardo et al. Long-term monitoring of evapotranspiration using the SEBAL algorithm and Google Earth Engine cloud computing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 178, p. 81-96, 2021.
- LEE, X.; YU, Q.; SUN, X.; LIU, J.; MIN, Q.; LIU, Y.; ZHANG, X. Micrometeorological fluxes under influence of regional and local advection: a revisit. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 122, p. 111-124, 2004
- LIMA, E. de P.; SEDIYAMA, G. C.; ANDRADE, R. G.; LOPES, V. D.; SILVA, B. B. Evapotranspiração real diária em sub-bacias do Paracatu, utilizando produtos do sensor Modis. **Revista Ceres**, 61, 1, 17–27, 2014.
- LIOU, Y. A.; KAR, S. K. Evapotranspiration estimation with remote sensing and various surface energy balance algorithms-a review. **Energies**, v. 7, n. 5, p. 2821–2849, 2014.
- LOPES, C. A.; BUSO, J.A; **cultivo da batata (*Solanum tuberosum* L.)**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 1997. 36p. (instruções técnicas da Embrapa Hortaliças, n.8).
- MCSHANE, R.R.; DRISCOLL, P.K.; SANDO, R. **A Review of Surface Energy Balance Models for Estimating Actual Evapotranspiration with Remote Sensing at High Spatiotemporal Resolution over Large Extents. Scientific Investigations Report 2017-5087**. Reston: U.S. Geological Survey, 19 p., 2017.
- MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. **Principles of Environmental Physics**, 2^a ed. London: Edward Arnold, 291 p., 1990.
- MUKIIBI, A.; FRANKE, A.C.; STEYN, J.M. Determination of crop coefficients and evapotranspiration of potato in a semi-arid climate using canopy state variables and satellite-based NDVI. **Remote Sens.** **2023**, *15*, 4579. <https://doi.org/10.3390/rs15184579>

- PAVLISTA, A. D. Principles of irrigation scheduling. **Potato Eyes**, Scottsbluff, v. 15, n.2, p. 1-4, 2003.
- PEREZ, P.J.; CASTELLVI, F.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J.I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorological**, v. 97, n. 3, p. 141-150, 1999.
- REYES-GONZÁLEZ, A.; KJAERGAARD, J.; TROOIJEN, T.; HAY, C.; AHIABLAME, L. Comparative Analysis of METRIC Model and Atmometer Methods for Estimating Actual Evapotranspiration. **International Journal of Agronomy**, London, 3632501, 2017.
- RILHO, P.S. **Identificação de taxas de evapotranspiração por sensoriamento remoto em diferentes cultivos agrícolas no Estado do Rio Grande do Sul**. 2018. 64p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SALES, D. L. A.; ALVES JÚNIOR, J.; SOUZA, J. M. F.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; PEREIRA, R. M. Common bean evapotranspiration estimated by orbital images. **African Journal of Agricultural Research**, Ago-Iwoye, v. 11, n. 10, p. 867-872, 2016.
- SENAY, G.B.; BUDDE, M.; VERDIN, J.P.; MELESSE, A.M. A coupled remote sensing and simplified surface energy balance approach to estimate actual evapotranspiration from irrigated fields. **Sensors**, v. 7, p. 979-1000, 2007.
- 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, p. 577-591, 2013.
- SENAY, G.B. et al. Satellite-based water use dynamics using historical Landsat data (1984–2014) in the southwestern United States. **Remote Sensing of Environment**, 2017, p. 1-15.

- SENAY, G. B. et al. Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. **Remote Sensing of Environment**, v. 185, p. 171–185, 2016.
- SINGH, R. K.; SENAY, G. B. Comparison of four different energy balance models for estimating evapotranspiration in the Midwestern United States. **Water**, v. 8, n. 9, p. 1-19, 2016.
- SINGH, R. K.; SENAY, G. B.; VELPURI, N. M.; BOHMS, S.; SCOTT, R. L.; VERDIN, J. P. Actual evapotranspiration (water use) assessment of the Colorado river basin at the Landsat resolution using the Operational Simplified Surface Energy Balance model. **Remote Sensing**, v. 6, p. 233-256, 2014.
- SILVA, E.R. R. **Estimativa da evapotranspiração do açaí (*Euterpe oleracea*) irrigado, por meio do surface energy balance algorithm for land–SEBAL, no leste da Amazônia**. 2020. Tese de Doutorado. UFRA/Campus Belém.
- SOUZA, J. M. F.; ALVES JÚNIOR, J.; CASAROLI, D.; EVANGELISTA, A. W. P.; MESQUITA, M. Validação do modelo SAFER na estimativa da evapotranspiração da cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 25, n. 2, p. 247-262, 2020.
- STANNARD, D. I. A theoretically based determination of bowen ratio fetch requirements. **Boundary Layer Meteorology**, v 83, p. 375-406, 1997
- STRECK, N. A. et al. Simulating the development of field grown potato (*Solanum tuberosum* L.). **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 142, n. 1, p. 1-11, 2007.
- VALE, B. S. do. 2021. **Comparação entre os modelos SEBAL e SSEBop na estimativa da evapotranspiração do trigo no Cerrado**. 135 p. Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília – Distrito Federal.

- VIANA, J. D. S. (2023). **Produtividade, qualidade pós-colheita e nutricional da batata em função de supressão da irrigação e fertirrigação em clima tropical**. 72p. Tese de Doutorado – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal – São Paulo
- VALE, B. S. Desempenho dos modelos SEBAL e SSEBop na estimativa da evapotranspiração do trigo no cerrado. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, p. 329-345, 2022.
- VAN LIEW, M. W.; VEITH, T. L.; BOSCH, D. D.; ARNOLD, J. G. Suitability of SWAT for the Conservation effects assessment project: A comparison on USDA-ARS watersheds. **Journal of Hydrologic Engineering**, Lincoln, v. 12, n. 2, p. 173-189, 2007.
- VENANCIO, L.P.; EUGENIO, F.C.; FILGUEIRAS, R.; CUNHA, F.F.; SANTOS, R.A.; RIBEIRO, W.R.; MANTOVANI, R.C. Mapping within-field variability of soybean evapotranspiration and crop coefficient using the Earth Engine Evaporation Flux (EEFlux) application, **Plos One**, San Francisco, v. 15, n. 7, e0235620, 2020.
- VENANCIO, L.P.; MANTOVANI, E.C.; AMARAL, C.H.; NEALE, C.M.U.; FILGUEIRAS, R.; GONÇALVES, I.Z.; CUNHA, F.F. Evapotranspiration mapping of commercial corn fields in Brazil using SAFER algorithm. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 78, n.4, e20190261, 2021.
- TASUMI, M.; TREZZA, R.; ALLEN, R.G.; WRIGHT, J.L. Operational aspects of satellite-based energy balance models for irrigated crops in the semi-arid U.S. **Irrigation and Drainage Systems**, 19, 3, 355–376, 2005.
- TEIXEIRA, A. H. de C.; BASTIAANSSEN, 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**, 149, 462–476, 2009.

- TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SHERER-WARREN, M.; BASSOI, L. H. **Modelagem espaço temporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro**. Campinas: EMBRAPA Monitoramento por Satélite. 32p. 2013. (Documentos, 99).
- TORMEN, G. P., DE ANDRADE, A. M., EVARISTO, A. B., CAMPOS, D. S., & VIEIRA, L. M. (2023). Perfil temporal ndvi para monitoramento da cultura do feijoeiro por meio de imagens PLANETSCOPE. In: ANAIS DO XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2023, Florianópolis. Anais eletrônicos... São José dos Campos, INPE, 2023.
- TREZZA, R.; Evapotranspiration using a satellite-based surface energy balance with standardized ground control. Thesis. Utah State University Logan, UT, USA. 396 pp., 2002.
- TREZZA, R.; ALLEN, R. G.; TASUMI, M. Estimation of actual evapotranspiration along the Middle Rio Grande of New Mexico using MODIS and Landsat imagery with the METRIC model. **Remote Sensing**, v. 5, n. 10, p. 5397–5423, 2013.
- XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v.36, n.6, p. 2644-2659, 2016.
- WARREEN, M. S.; TEIXEIRA, A. H. C.; RODRIGUES, L. N.; HERNANDEZ, F. B. T. Utilização do sensoriamento remoto termal na gestão de recursos hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 7, n. 1, p. 65-82, 2014.
- YANG, J.Y.; MEI, X.R.; HUO, Z.G.; YAN, C.R.; HUI, J.U.; ZHAO, F.H.; QIN, L.I.U. Water consumption in summer maize and winter wheat cropping system based on SEBAL model in Huang-Huai-Hai Plain, China. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 14, n. 10, p. 2065-2076, 2015.

ZHOU, X.; Bi, S.; YANG, Y.; TIAN, F.; REN, D. Comparison of ET estimations by the three temperature model, SEBAL model and eddy covariance observations. **Journal of Hydrology**, 519, 769–776, 2014.

ZHOU, L.; MU, T.; MA, M.; ZHANG, R.; SUN, Q.; XU, Y. Nutritional evaluation of different cultivars of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) from China by grey relational analysis (GRA) and its application in potato steamed bread making. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 18, p. 231-245, 2019.