

SENSORIAMENTO REMOTO E SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA NA OBTENÇÃO DE DIFERENTES CENÁRIOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

ANDRÉ LUIZ VIANNA DE PAULA¹, DIEGO AUGUSTO DE CAMPOS MORAES² E ALEXANDRE DAL PAI³

¹ Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Av. Universitária, 3780, Altos do Paraíso, CEP 18610-034, Botucatu, São Paulo, Brasil, <https://orcid.org/0000-0002-4327-3098>, alv.paula@unesp.br.

² Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Av. Universitária, 3780, Altos do Paraíso, CEP 18610-034, Botucatu, São Paulo, Brasil, <https://orcid.org/0000-0002-1283-901X>, diego.c.moraes@unesp.br.

³ Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrônomicas, Av. Universitária, 3780, Altos do Paraíso, CEP 18610-034, Botucatu, São Paulo, Brasil, <https://orcid.org/0000-0002-9194-6875>, dal.pai@unesp.br.

RESUMO: Para implementar efetivamente medidas de gestão de recursos hídricos, é fundamental monitorar a evapotranspiração. Consultores da FAO, concluíram que a fórmula de Penman-Monteith foi o método ideal e padrão para a estimativa da ET_0 . Um dos métodos indiretos de estimativa da evapotranspiração com sensoriamento remoto é o algoritmo Safer. O objetivo desse trabalho foi a obtenção de diferentes cenários de evapotranspiração na sub-Bacia do alto Rio Pardo-SP utilizando técnicas de sensoriamento remoto e geoestatística. Foram obtidos cenários mínimos, médios e máximos de evapotranspiração para os períodos de 2019, 2020 e 2021. Os maiores valores de evapotranspiração estiveram presentes nas estações da primavera e verão. Porém, no inverno de 2021, houve divergência dos valores comuns. Pesquisas com outros algoritmos como Sebal e Metric podem ser feitas para avaliar a correlação dos dados entre métodos como também a análise dos níveis de precipitação pode corroborar com os valores de evapotranspiração.

Palavras-chaves: evapotranspiração, Safer, geoestatística.

REMOTE SENSING AND STOCHASTIC SIMULATION IN OBTAINING DIFFERENT EVAPOTRANSPIRATION SCENARIOS

ABSTRACT: To effectively implement water resource management measures, monitoring evapotranspiration is essential. FAO consultants concluded that the Penman-Monteith formula was the ideal and standard method for estimating ET_0 . One of the indirect methods for estimating evapotranspiration with remote sensing is the Safer algorithm. The objective of this work was to obtain different evapotranspiration scenarios in the upper Rio Pardo-SP subbasin via remote sensing and geostatistical techniques. Minimum, average and maximum evapotranspiration scenarios were obtained for the periods of 2019, 2020 and 2021. The highest evapotranspiration values were present in the spring and summer. However, in the winter of 2021, there was a divergence of common values. Research with other algorithms, such as Sebal and Metric, can be carried out to evaluate the correlation of data between methods, and the analysis of precipitation levels can corroborate the evapotranspiration values.

Keywords: evapotranspiration, Safer, geostatistics.

1 INTRODUÇÃO

A gestão efetiva dos recursos hídricos assume uma importância significativa tanto do ponto de vista social quanto ambiental. A falta de atenção a essa gestão pode comprometer a sustentabilidade do uso dos recursos naturais em uma bacia hidrográfica. Isso é exemplificado pela Bacia do Rio Pardo, em São Paulo, que desempenha um papel fundamental no abastecimento de água para os municípios de Pardinho e Botucatu. O manejo responsável das bacias hidrográficas, especialmente através de ações de restauração florestal, tem sido reconhecido como uma estratégia altamente eficaz e economicamente viável para a conservação dos recursos hídricos. De fato, para implementar efetivamente medidas de gestão de recursos hídricos, é fundamental monitorar os principais elementos do ciclo hidrológico, com destaque para a evapotranspiração, que é considerada um indicador crítico das perdas de água da superfície terrestre através da interação entre solo, vegetação e atmosfera.

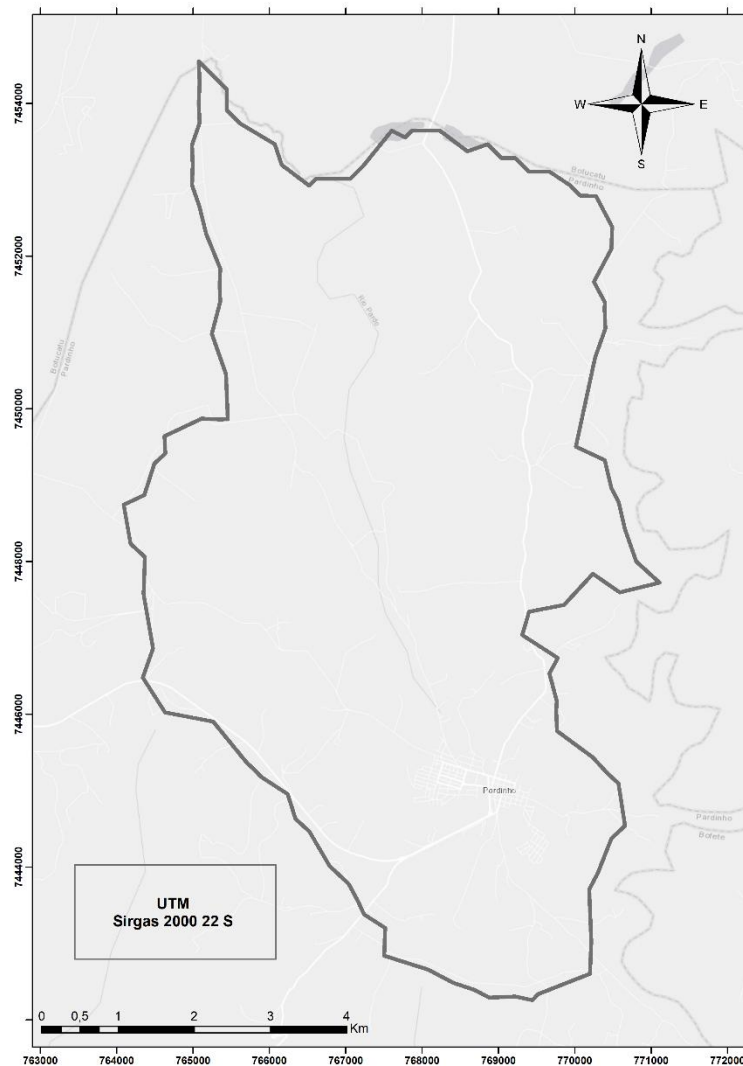
Para estimativa da evapotranspiração de culturas agrícolas e florestais o melhor conceito é a ET_C visto ser necessário o cálculo do Coeficiente de Cultura (K_c) específico para cada cultura sendo esse a relação entre ET_o e ET_C . A ET_o representa a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência que não sofre de escassez de água. Essa superfície de referência é modelada a partir de uma cultura hipotética de grama com características específicas. Já a ET_C representa a perda de água em culturas saudáveis, bem nutridas, cultivadas em grandes campos, sob níveis ideais de umidade no solo e alcançando a máxima produção dentro de certas condições climáticas. O K_c avalia o efeito da transpiração da cultura e da evaporação do solo em único um coeficiente. Os principais métodos para cálculo da ET_o são Thornthwaite, Camargo, Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor e Penman-Monteith. Mas, após análises, consultores da FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (Allen *et*

al., 1998), concluíram que a fórmula de Penman-Monteith foi o método ideal e padrão para a estimativa da ET_o por se fundamentar em processos físicos e incorporar parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos. A equação de Penman-Monteith concedeu aceitável estimativa diária da evapotranspiração para os locais analisados mesmo apresentando altos valores em dois pontos se comparadas a métodos diretos, como o lisímetro, o qual é aplicado para calibragem de métodos indiretos (Allen, 1986). Entretanto, métodos diretos não suprem a demanda exigida para áreas extensas. Dessa forma, a associação de métodos indiretos como Penman-Monteith e sensoriamento remoto são empregados no cálculo da evapotranspiração para ampliar a abrangência. Sendo assim, algoritmos foram desenvolvidos para possibilitar a aplicação em conjunto de dados meteorológicos e orbitais para a estimativa da ET_o .

Outra área de estudo essencial é a da geoestatística que se concentra na consideração das distâncias entre amostras como um fator essencial para interpretar variações observadas. Sendo assim, a técnica visa também estimar valores em locais onde não houve coleta de dados. Para auxiliar na interpretação dos dados oriundos das execuções dos algoritmos, a simulação estocástica, um dos métodos geoestatísticos, é de grande ajuda, e assim, base para estimativa de cenários de evapotranspiração. Portanto, o objetivo desse trabalho foi a obtenção de diferentes cenários de evapotranspiração na sub-Bacia do alto Rio Pardo-SP utilizando técnicas de sensoriamento remoto e geoestatística.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na sub-bacia do alto Rio Pardo-SP (Figura 1) que compreende 5.301 hectares. A área é caracterizada pelo plantio de culturas agrícolas como milho, soja, mandioca e espécies florestais em sua grande parte, apresentando outras culturas agrícolas em menor escala em áreas menores.

Figura 1. Área de estudo

Fonte: Paula (2023)

O clima da região é mesotérmico apresentando estação mais seca no inverno e classificado como Cwa, segundo a classificação de Köppen com temperaturas medianas anuais em torno de 20 °C e precipitação entre 1.100 e 1.700 mm anuais (Carvalho; Jim, 1983).

A área é composta por solos dos tipos Latossolo Vermelho Distrófico, Latossolo Vermelho Distroférico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, Neossolo Lítico Distrófico e Gleissolo Distrófico (Zimback, 1997; Grossi, 2003; Embrapa, 2018). As imagens utilizadas para o estudo foram obtidas pelo sensor MSI acoplado ao satélite Sentinel-2A as quais estão disponíveis em USGS (2022). Dessa forma, foram coletadas imagens das estações climáticas outono, inverno, primavera e verão para os períodos de 2019, 2020 e 2021

sendo uma imagem para cada estação. As imagens apresentaram resolução espacial de 10m, resolução temporal de 5 dias e radiométrica de 12 bits.

As imagens foram selecionadas de forma que não apresentassem interferência de nuvens para maior qualidade de estudo da superfície. Sendo assim, ocorreu neste estudo que imagens livres de nuvens para estação do verão ocorreram de serem todas do ano subsequente ao analisado.

Com as imagens baixadas iniciou-se o processo de correção atmosférica pelo método de subtração de objetos escuros Dark Object Subtraction (DOS) detalhado por Congedo (2018) desenvolvedor do Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), disponível no software Qgis. A próxima etapa consistiu no

início da aplicação das equações via calculadora Raster do mesmo software citado acima. O Safer é um algoritmo simplificado e com bons resultados em território brasileiro. Foi desenvolvido e validado com dados de quatro experimentos de campo tanto de culturas irrigadas como de vegetação natural (Teixeira *et al.*, 2013a) sob condições semiáridas brasileiras, empiricamente calibrado para o Noroeste do estado de São Paulo e adaptado para outras regiões. Esse algoritmo necessita de parâmetros biofísicos adquiridos por sensoriamento remoto, aliado a dados meteorológicos, sendo aplicável para distintos ecossistemas (Teixeira *et al.*, 2013b; Franco *et al.*, 2022) como se faz em Sebal. O Safer permite a estimativa da ET_C com sensores que não possuem banda termal, sendo necessário o uso do método residual (Teixeira *et al.*, 2016). Esse método faz uso de dados orbitais juntamente com dados de estação meteorológica (Teixeira, 2010) sem necessidade de escolha de pixels frio e quente (Teixeira *et al.*, 2009). Um dos sensores que fazem uso desse método é o MSI presente nos satélites Sentinel-2A e 2B.

A sequência de equações abaixo foi passo a passo para aplicação de Safer. Inicialmente estima-se o albedo planetário e albedo da superfície, Equações 1 e 2, respectivamente, conforme proposto por (Teixeira, 2010; Teixeira *et al.*, 2013b; Teixeira *et al.*, 2014).

$$\alpha_p = \sum \omega_{band} \cdot r_{band} \quad (1)$$

Onde α_p é o albedo planetário; ω_{band} são os pesos de cada banda; r_{band} é a refletância de banda estreita.

$$\alpha_0 = a \cdot \alpha_p + b \quad (2)$$

Onde α_0 é o albedo da superfície; a e b são coeficientes de regressão para um período de 24 horas sendo 1,70 e 0,13 respectivamente.

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (3)$$

Onde: $NDVI$ é o *Normalized Difference Vegetation Index*; NIR e RED representam a refletância na faixa de comprimentos de onda nas regiões do infravermelho próximo e vermelho do espectro solar.

O índice $NDVI$ presente no algoritmo Safer é de grande importância para estimativa da umidade do solo e presença da vegetação visto a água absorver toda radiação infravermelha de ondas curtas ficando esse índice atrelado a umidade da superfície. A clorofila capta a radiação vermelha visível aos sensores remotos, enquanto o mesófilo esponjoso reflete a radiação infravermelha próxima. Portanto, áreas com maior atividade fotossintética se manifestaram em imagens de satélite com baixa reflexão em comprimentos de onda vermelhos e alta reflexão em comprimentos de onda infravermelhos (Teramoto *et al.*, 2018).

T_{sw} é a Transmissividade Atmosférica de Ondas Curtas, Equação 4. É definida como sendo a fração da radiação solar incidente no topo da atmosfera que chega à superfície da terra em dias claros, isto é, sem nebulosidade. Em alguns trabalhos é definida como 44% da radiação incidente no topo da atmosfera.

$$T_{sw} = \frac{R_{so}}{R_a} \quad (4)$$

Onde: R_{so} é a radiação solar medida na superfície da terra em dias claros; R_a é a radiação solar incidente no topo da atmosfera.

$$\epsilon_a = aA \cdot (-\ln T_{sw})^{bA} \quad (5)$$

$$\epsilon_s = aS \cdot (\ln NDVI) + b_s \quad (6)$$

Onde: ϵ_a e ϵ_s são as emissividades atmosférica e de superfície, nesta ordem. Os valores aA , bA , aS e b_s são coeficientes que a partir de Teixeira (2010), foram considerados 0,94, 0,10, 0,06 e 1,00 respectivamente.

Os dados meteorológicos foram obtidos através da estação meteorológica automática (EMA) do Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia da Faculdade de Ciências

Agronômicas (UNESP) de Botucatu - São Paulo – Brasil o qual fica na coordenada 22°54' S, 48°27' O e 786 m. O sensor para obtenção de T_{max} e T_{min} foi Termistor da fabricante Campbell Scientific onde apresenta sensibilidade de 0,1 °C.

$$T_A = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (7)$$

Onde: T_A é a temperatura média do ar; T_{max} e T_{min} (°C) são a temperatura máxima e mínima respectivamente.

A Equação 8, refere-se ao Coeficiente de Regressão do Saldo de Radiação de Ondas Longas (Silva; Teixeira; Manzione, 2019; Teixeira *et al.*, 2019).

$$aL = c.T_A - d \quad (8)$$

Onde: c e d são coeficientes de regressão iguais a 6,99 e 39,93 respectivamente.

Bastiaanssen *et al.* (1998) utilizou um valor padrão de $aL = 110$ não levando em conta as condições térmicas locais. Entretanto, neste estudo não se utilizou esse padrão. Dessa forma, para o cálculo de aL , o valor de T_A necessitou ser convertido para °C. Para estimativa da temperatura da superfície (T_s) foi utilizado o método residual (Teixeira *et al.*, 2015) visto que o sensor MSI (Sentinel-2A) não possui banda termal.

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{\epsilon_a \cdot \sigma \cdot T_A^4 + aL \cdot T_s \omega}{\epsilon_s \cdot \sigma}} \quad (9)$$

Onde: T_s é a temperatura da superfície; σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$).

$$Kc = \exp \left[e + f \left(\frac{T_s}{\alpha_0 \cdot NDVI} \right) \right] \quad (10)$$

Onde: Kc é o coeficiente de cultura; e e f são coeficientes de regressão sendo 1,8 e -0,008, nesta ordem.

O valor de T_s foi aplicado em °C nesse caso também. A Equação 11 e 12 exibem a

Evapotranspiração da Cultura de Referência (ET_o) e a Evapotranspiração da Cultura Sob Condições Padrão (ET_C), respectivamente. Essas equações estão na partição diária (mm.dia^{-1}) (Allen *et al.*, 1998).

$$ET_o = \frac{0.408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \left[y \frac{900}{T + 273} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a) \right]}{\Delta + y \cdot (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (11)$$

Onde: Rn é a radiação líquida ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}$); G é o fluxo de calor sensível conduzida para o solo ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}$); T é a temperatura média diária do ar (°C); u_2 é a velocidade do vento a 2m (m.s^{-1}); e_s é a pressão de vapor do ar saturado (kPa); e_a é a pressão de vapor real do ar (kPa); Δ é o gradiente da curva de pressão de vapor do ar na atmosfera ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); y é a constante psicométrica ($\text{kPa.}^\circ\text{C}^{-1}$).

Para obtenção de u_2 foi utilizada a mesma estação e o elemento/sensor foi o Conjunto de 3 Canecas (Campbell Scientific) com sensibilidade de $0,12 \text{ m s}^{-1}$.

$$ET_C = Kc \cdot ET_o \quad (12)$$

Onde: ET_C é a evapotranspiração de cultura sob condições padrão; ET_o é a evapotranspiração da cultura de referência (mm.dia^{-1}).

Com os valores de ET_C obtidos em toda a bacia para todas as estações foi possível aplicar as técnicas de geoestatística para obtenção de diferentes cenários de evapotranspiração (mínimo, médio e máximo) conforme objetivo do estudo. Para realizar a estimativa da dependência espacial, as etapas aplicadas devem ser variograma, validação cruzada, krigagem e simulação estocástica, nesta ordem. As etapas foram aplicadas através da ferramenta *Geostatistical Analyst* disponível no software ArcGIS 10.3. Primeiramente foi realizada a estatística descritiva para a obtenção do mínimo, média, máximo, desvio padrão e assimetria dos valores. Logo após, com o mesmo software, foi utilizado o assistente de geoestatística para aplicação da krigagem. Foi empregue a krigagem simples com a finalidade de atender ao requisito para execução da simulação sequencial gaussiana, a qual utiliza

dados com distribuição normal como dado de entrada. Posteriormente, para correção da suavização dos dados decorrente do processo de krigagem, aplicou-se a simulação estocástica SSG. Sendo assim, foi aplicado o variograma exponencial e a validação cruzada necessária para sua validação. Os parâmetros observados na validação cruzada foram o Coeficiente de Correlação de Pearson (r) e EM (Mukaka, 2012; Cochran, 1977). Deste modo, obteve-se os valores de efeito pepita, patamar, alcance e GDE com maior precisão. A simulação sequencial gaussiana foi aplicada estimando 100 realizações dentro de cada pixel das

imagens obtidas através do sensor MSI acoplado ao satélite Sentinel-2A para obter os intervalos de valores mínimos, máximos e médios de evapotranspiração para a sub-Bacia do alto Rio Pardo-SP.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para estatística descritiva pôde-se notar que os maiores valores de evapotranspiração para os anos de 2019, 2020 e 2021 foram encontrados na estação da primavera sendo os valores de 17,09 (Tabela 6), 15,88 (Tabela 7) e 14,92 (Tabela 8) (mm.dia^{-1}) nesta ordem.

Tabela 6. Estatística descritiva 2019

Estações do ano	Mín. Etc/ mm.dia^{-1}	Média Etc/ mm.dia^{-1}	Máx. Etc/ mm.dia^{-1}	Desv. Pad	Assimetria
Outono	0	5,10	9,97	2,19	-0,80
Inverno	0	4,43	9,30	2,33	-0,25
Primavera	0	4,67	17,09	4,18	0,40
Verão	0	7,71	15,88	3,95	-0,60

Mín: Mínimo; Máx: Máximo; Desv.Pad: Desvio Padrão.

Fonte: Paula (2023)

Tabela 7. Estatística descritiva 2020

Estações do ano	Mín. Etc/ mm.dia^{-1}	Média Etc/ mm.dia^{-1}	Máx. Etc/ mm.dia^{-1}	Desv. Pad	Assimetria
Outono	0	5,67	10,11	2,39	-0,70
Inverno	0	4,12	8,41	1,92	-0,33
Primavera	0	6,01	18,93	5,16	0,42
Verão	0	9,11	13,99	3,04	-1,26

Mín: Mínimo; Máx: Máximo; Desv.Pad: Desvio Padrão.

Fonte: Paula (2023)

Tabela 8. Estatística descritiva 2021

Estações do ano	Mín. Etc/ mm.dia^{-1}	Média Etc/ mm.dia^{-1}	Máx. Etc/ mm.dia^{-1}	Desv. Pad	Assimetria
Outono	0	6,48	12,82	3,15	-0,59
Inverno	0	5,31	14,66	3,41	0,29
Primavera	0	4,22	14,92	3,95	0,43
Verão	0	6,45	11,71	2,92	-0,66

Mín: Mínimo; Máx: Máximo; Desv.Pad: Desvio Padrão.

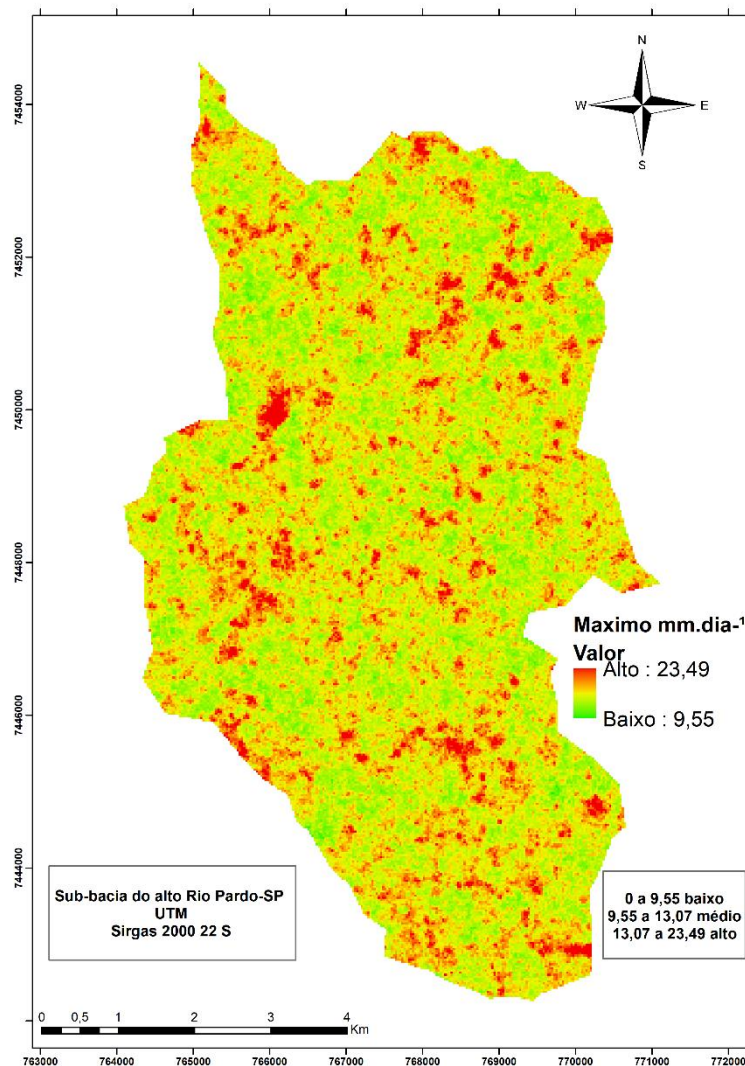
Fonte: Paula (2023)

Em análise do variograma, as estações e períodos com menor efeito pepita e consequentemente menor e melhor GDE foram verão de 2019 (efeito pepita 0,06 e GDE 0,07), primavera de 2020 (efeito pepita 0,06 e GDE 0,06) e verão de 2021 (efeito pepita 0,01 e GDE 0,01). Por fim, afirmou-se que os variogramas nos períodos estudados apresentaram dependência espacial entre moderada e forte. O período do verão de 2021 apresentou menores valores de efeito pepita, caracterizando a dependência espacial mais acentuada entre as amostras. O efeito pepita é derivado

da variabilidade de pequena escala não obtida ou ocasionadas por falhas nas medidas ou em outras palavras valor positivo que apresenta a falta de continuidade do semivariograma em distâncias inferiores a menor distância relatada nas amostras.

Em relação a validação cruzada, foi aplicada a correlação pelo método de Pearson devido haver distribuição normal das variáveis estudadas sendo validado 1/3 da amostragem real. O método da correlação é uma forma de estimar uma possível associação entre um par de variáveis. Está é uma metodologia estatística que pode alternar entre -1 (negativo absoluto), 0 (nenhuma correlação) e 1 (correlação positiva absoluta). Se os resultados forem números positivos, as variáveis são consideradas diretamente proporcionais (uma aumenta a outra também). Contudo, se os resultados forem negativos as variáveis terão características inversamente proporcionais (uma aumenta e a outra diminui). Nesse estudo, observou-se em todos os períodos valores próximos de 1 para validação cruzada. O menor valor ocorreu em outono de 2020 (0,96) e o maior no verão de 2021 (0,99). Em relação a EM, apresentou valores mínimos entre -0,07 e -0,03 nas estações do outono e inverno de 2020, nesta ordem. Valores negativos de EM expressam superestimação dos resultados e valores positivos subestimação. Este estudo apresentou superestimação dos resultados, mas de grau leve. Tanto o EM como a correlação pelo método de Pearson são metodologias responsáveis por expressarem a validação dos resultados, e se houve bom ajuste do variograma, sendo esta condição basal para a qualidade dos dados apurados. Contudo, neste estudo os dois critérios foram ofertados.

Por fim, para as 100 realizações de SSG as maiores evapotranspirações ocorreram nas estações de maior incidência de radiação (primavera e verão) nos três anos de estudo. Entretanto, na estação do inverno de 2021, Figura 2, essa métrica divergiu apresentando valores superiores ao comum para estação sendo umas das possíveis causas a presença de solo exposto e alta precipitação, visto que a última aumenta consideravelmente a taxa de evapotranspiração devido estar intrinsecamente ligada a disponibilidade de água no solo. Os valores máximos de evapotranspiração para estação do inverno nos períodos de 2019 e 2020 foram 11,69 mm.dia⁻¹ e 11,02 mm.dia⁻¹ respectivamente. Contudo, os valores apresentados na SSG foram uma estimativa dos valores de evapotranspiração pixel a pixel onde avaliaram também pontos onde não havia cultura como área urbana pavimentada devido o shape da imagem cobrir a área da bacia homogeneamente. Dessa forma, valores altos de evapotranspiração também puderam ser explicados pela presença de áreas urbanas na imagem estudada sendo classificados apenas como evaporação.

Figura 2. Mapa de evapotranspiração inverno 2021 (ET_C)

Fonte: Paula (2023)

4 CONCLUSÕES

O algoritmo Safer juntamente com as técnicas de geoestatística proporcionam resultados satisfatórios de evapotranspiração.

Foi possível estimar a evapotranspiração da sub-Bacia do alto Rio Pardo-SP e contribuir consequentemente com a agricultura local e preservação de recursos naturais. Posteriormente, estudos futuros podem estimar a lâmina de irrigação para culturas agrícolas inseridas na área baseados nos dados obtidos.

Pelo fato do sensoriamento remoto ser uma técnica de análise sem contato físico com o objeto, para um parecer exato das causas dos valores de evapotranspiração, faz-se necessário

a análise *in loco*. Além disso, para acurácia do método empregue, pesquisas com outros algoritmos como Sebal e Metric podem ser feitas para avaliar a correlação dos dados entre métodos como também a análise dos níveis de precipitação nos períodos estudados pode corroborar com os valores de evapotranspiração obtidos.

5 REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. A Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 112, n. 4, p. 348-368, 1986.

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements**. Rome: FAO, 1998. (Irrigation and Drainage Paper, n. 56).
- BASTIAANSEN, W. G. M.; MENENTI, M.; FEDDES, R. A.; HOLTSLAG, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) - 1. Formulation. **Journal of Hydrology**, Glendale, v. 212/213, p. 198-212, 1998.
- CARVALHO, W. A.; JIM, J. **Áreas de proteção ambiental: Região da “Serra de Botucatu” e Região da “Serra de Fartura”**. Botucatu: Instituto Básico de Biologia, 1983.
- COCHRAN, W. G. **Sampling Techniques**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1977.
- CONGEDO, L. **Semi-automatic classification plugin documentation**. Release 5.3.6.1. Luca Congedo, 2018. Disponível em: <https://readthedocs.org/projects/semiautomaticclassificationmanual-v5/downloads/pdf/latest/>. Acesso em: 14 jul. 2022.
- FRANCO, J. R.; RANIEIRO, M. R.; CALÇA, M. V. C.; RODRIGUES, S. A.; DAL PAI, A.; DAL PAI, E. Análise Comparativa Entre Medidas Meteorológicas da Estação Convencional e Automática da Fazenda Lageado no Município de Botucatu, São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Rio de Janeiro, v. 37, n. 2, p. 223-232, 2022.
- GROSSI, C. H. **Sistema e informação geográfica- Basins 3.0 na modelagem hidrológica da bacia experimental do Rio Pardo, SP**. 2003. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2003.
- MUKAKA, M. M. Statistics Corner: A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal**, Blantyre, v. 24, n. 3, p. 69-71, 2012.
- PAULA, A. L. V. **Sensoriamento remoto e simulação estocástica na obtenção de diferentes cenários de evapotranspiração**. 2023. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2023.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.
- SILVA, C. O. F.; TEIXEIRA, A. H. C.; MANZIONE, R. L. Agriwater: An R package for spatial modelling of energy balance and actual evapotranspiration using satellite images and agrometeorological data. **Environmental Modelling and Software**, São Paulo, v. 120, p. 1-19, 2019.
- TERAMOTO, E. H.; BENJUMEA, M. T.; GONÇALVES, R. D.; KIANG, C. H. **Revista Brasileira de Cartografia**, Cidade, v. 70, n. 3, p. 1135-1157, 2018.
- TEIXEIRA, A. H. C.; MIRANDA, F. R.; LEIVAS, J. F.; PACHECO, E. P.; GARÇON, E. A. M. Water productivity assessments for dwarf coconut by using Landsat 8 images and agrometeorological data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, Waltham, v. 155, p. 150-158, 2019.
- TEIXEIRA, A. H. C. Determining regional actual evapotranspiration of irrigated crops and natural vegetation in the São Francisco river basin (Brazil) using remote sensing and Penman-Monteith equation. **Remote Sensing**, Basel, v. 2, n. 5, p. 1287-1319, 2010.
- TEIXEIRA, A. H. C.; BASTIAANSEN, W. G. M.; AHMAD, M. D.; BOS, M. G. Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil Part B: Application to the regional scale. **Agricultural**

and Forest Meteorology, São Paulo, v. 149, n. 3/4, p. 477-490, 2009.

TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; RONQUIM, C. C.; VICTORIA, D. C. Sugarcane Water Productivity Assessments in the São Paulo state, Brazil. **International Journal of Remote Sensing Applications**, Philadelphia, v. 6, p. 84-95, 2016.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; BOLFE, E. L. Energy balance with Landsat images in irrigated central pivots with corn crop in the São Paulo State, Brazil. **Proceedings of SPIE**, Bellingham, v. 9239, p. 92390O-1-92390O-10, 2014.

TEIXEIRA, A. H. C.; HERNANDEZ, F. B. T.; LOPES, H. L.; SCHERER-WARREN, M. S.; BASSOI, L. H. Modelagem espaçotemporal dos componentes dos balanços de energia e de água no Semiárido brasileiro. **Embrapa Monitoramento por Satélite**, Campinas, Documentos 99, p. 1-32, 2013a.

TEIXEIRA, A. H. C.; PADOVANI, C. R.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F.; VICTORIA, D. C.; GALDINO, S. Use of MODIS images to quantify the radiation and energy balances in the Brazilian pantanal. **Remote Sensing**, Basel, v. 7, n. 11, p. 14597-14619, 2015.

TEIXEIRA, A. H. C.; SCHERER-WARREN, M.; HERNANDEZ, F. B. T.; ANDRADE, R. G.; LEIVAS, J. F. Large-Scale Water Productivity Assessments with MODIS Images in a Changing Semi-Arid Environment: A Brazilian Case Study. **Remote Sensing**, Basel, v. 5, n. 11, p. 5783-5804, 2013b.

USGS. **EarthExplorer**. Washington, DC: USGS, 2022. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso em: 8 jul. 2022.

ZIMBACK, C. R. L. **Levantamento semidetalhado dos solos da bacia do Rio Pardo nos municípios de Pardinho e Botucatu**. Botucatu: FEPAF, 1997.