

ANDRÉ LUIZ VIANNA DE PAULA

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

Botucatu

2023

ANDRÉ LUIZ VIANNA DE PAULA

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

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Diego Augusto De
Campos Moraes

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Dal Pai

Coorientador: Prof. Dr. João Carlos Cury
Saad

Botucatu

2023

P324s	Paula, André Luiz Vianna Sensoriamento remoto e simulação estocástica na obtenção de diferentes cenários de evapotranspiração / André Luiz Vianna Paula. -- Botucatu, 2023 82 p. : il., tabs., fotos, mapas Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu Orientador: Diego Augusto De Campos Moraes Coorientador: Alexandre Dal Pai; João Carlos Cury Saad 1. Evapotranspiração. 2. Sensoriamento remoto. 3. Safer. 4. Geoestatística. I. Título.
-------	--

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Impacto potencial desta pesquisa

Em sincronia com as ODS 6, 11, 13, 14, 15 e 17, o estudo beneficiará a população adjacente a sub-Bacia do alto Rio Pardo-Sp e outras regiões do mundo a partir da geração do conhecimento sobre a importância do estudo da evapotranspiração de bacias hidrográficas oriundas aos níveis de água na superfície vindas da precipitação e temperatura da superfície. Ainda, a alocação de áreas verdes de qualidade está dependente dos níveis de água ao solo. As plantas são responsáveis pela qualidade do ar e manutenção da temperatura média terrestre, mantendo assim o planeta terra habitável. Durante seu processo de fotossíntese, as plantas absorvem o Gás Carbônico (CO₂) e liberam o Oxigênio (O). O CO₂ é um dos gases mais nocivos para o efeito estufa (60%).

Potential Impact of this research

In sync with SDGs 6, 11, 13, 14, 15 and 17, the study will benefit the population adjacent to the upper Rio Pardo-Sp sub-Basin and other regions of the world by generating knowledge about the importance of studying the evapotranspiration from watersheds originating from surface water levels from precipitation and surface temperature. Furthermore, the allocation of quality green areas is dependent on water levels in the soil. Plants are responsible for air quality and maintaining the Earth's average temperature, thus keeping planet Earth habitable. During their photosynthesis process, plants absorb Carbon Dioxide (CO₂) and release Oxygen (O). CO₂ is one of the most harmful gases for the greenhouse effect (60%). Therefore, keeping this process that affects the population economically and socially in balance is extremely important for the overall quality of life.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: SENSORIAMENTO REMOTO E SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA NA OBTENÇÃO DE DIFERENTES CENÁRIOS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

AUTOR: ANDRÉ LUIZ VIANNA DE PAULA

ORIENTADOR: DIEGO AUGUSTO DE CAMPOS MORAES

COORDENADOR: ALEXANDRE DAL PAI

COORDENADOR: JOÃO CARLOS CURY SAAD

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. DIEGO AUGUSTO DE CAMPOS MORAES (Participação Presencial) *Diego Moraes*
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrárias de Botucatu UNESP

Prof. Dr. ENZO DAL PAI (Participação Presencial) *Enzo Dal Pai*
Engenharia Rural / FCA / UNESP - Botucatu

Prof. Dr. DONIZETI APARECIDO PASTORI NICOLETE (Participação Virtual) *Diego Moraes*
Geoprocessamento / Unesp / FCTE / Ourinhos-SP

Botucatu, 11 de setembro de 2023

Aos meus amados pais,

Lúcia e Marcelino,

dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me proporcionar saúde física e mental para concluir as tarefas a quais me proponho.

Aos meus queridos pais pela estrutura oferecida para me dedicar aos estudos.

Aos meus avós, Carmelinda (em memória) e Francisco, Dirce (em memória) e Geraldo (em memória).

Ao Prof. Prof. Dr. Diego Augusto De Campos Moraes, meu orientador, o qual sempre esteve disposto a esclarecer as minhas dúvidas sendo inviável a produção deste estudo sem sua ajuda.

Ao Prof. Dr. Alexandre Dal Pai e Prof. Dr. João Carlos Cury Saad coorientadores, pelo suporte oferecido.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil – CAPES – Código de financiamento 001.

Ademais, gostaria de agradecer a todos os professores e funcionários da FCA envolvidos em minha dissertação nos mais diversos serviços prestados zelando assim pela qualidade dos mesmos na universidade.

“É um velho preceito meu que é de capital importância para um jovem autor publicar (se for com o nome dele) apenas o que for muito bom e novo; de forma que o público creia nele e leia o que ele escreve”.

MOORE, J.; DESMOND, A. **Darwin**: a vida de um evolucionista atormentado. Tradução de Cynthia Azevedo. 4. ed. rev. e ampl. São Paulo: Geração Editorial, 2001. p. 616.

RESUMO

A gestão efetiva dos recursos hídricos assume uma importância significativa tanto do ponto de vista social quanto ambiental. 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. 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_o . 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 em todas as estações. Os maiores valores de evapotranspiração estiveram presentes nas estações da primavera e verão. Entretanto, no período de 2021, na estação do inverno, houve divergência dos valores comuns em todos os períodos e estações expressando valor superior ao comum. Uma das possíveis causas foram a presença de solo exposto e alta precipitação visto que essa aumenta consideravelmente a taxa de evapotranspiração. A evapotranspiração está intrinsicamente ligada a disponibilidade de água no solo. 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. Valores altos de evapotranspiração também puderam ser explicados pela presença de áreas urbanas na imagem estudada. 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. Sendo assim, estudos futuros podem estimar a lâmina de irrigação para culturas agrícolas inseridas na área baseadas nos dados obtidos pelo método empregue.

Palavras-chave: evapotranspiração; sensoriamento remoto; Safer; geoestatística.

ABSTRACT

The effective management of water resources assumes significant importance from both a social and environmental perspective. Responsible management of watersheds, especially through forest restoration efforts, has been recognized as a highly effective and economically viable strategy for water resource conservation. To effectively implement water resource management measures, it is essential to monitor evapotranspiration. FAO consultants have concluded that the Penman-Monteith formula is the ideal and standard method for estimating ET_0 . One of the indirect methods for estimating evapotranspiration using remote sensing is the Safer algorithm. The objective of this work was to obtain different scenarios of evapotranspiration in the upper Pardo River sub-basin in São Paulo using remote sensing and geostatistical techniques. Minimum, average, and maximum evapotranspiration scenarios were obtained for the periods of 2019, 2020, and 2021 at all stations. The highest evapotranspiration values were observed during the spring and summer seasons. However, in the winter season of 2021, there was a divergence from common values in all periods and stations, with values exceeding the norm. Possible causes included exposed soil and high precipitation, which significantly increases the evapotranspiration rate. Evapotranspiration is intrinsically linked to soil water availability. The values presented in the SSG were estimates of pixel-by-pixel evapotranspiration values, which also evaluated points where there was no vegetation, such as paved urban areas. High evapotranspiration values could also be explained by the presence of urban areas in the studied image. Further research with other algorithms such as Sebal and Metric can be conducted to assess data correlations between methods, and an analysis of precipitation levels can support evapotranspiration values. Therefore, future studies may estimate irrigation depth for agricultural crops in the area based on the data obtained using the employed method.

Keywords: evapotranspiration; remote sensing; Safer; geostatistics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Espectro eletromagnético.....	33
Figura 2 - Componentes do variograma.....	42
Figura 3 - Área de estudo.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resoluções do sensor MSI.....	47
Tabela 2 - Data das imagens do período de 2019.....	48
Tabela 3 - Data das imagens do período de 2020.....	48
Tabela 4 - Data das imagens do período de 2021.....	49
Tabela 5 - Valores de ($\omega band$) e ($rband$) em Sentinel 2A.....	50
Tabela 6 - Estatística descritiva 2019.....	53
Tabela 7 - Estatística descritiva 2020.....	53
Tabela 8 - Estatística descritiva 2021.....	54
Tabela 9 - Análise geoestatística 2019.....	55
Tabela 10 - Análise geoestatística 2020.....	55
Tabela 11 - Análise geoestatística 2021.....	55
Tabela 12 - Validação cruzada 2019.....	56
Tabela 13 - Validação cruzada 2020.....	57
Tabela 14 - Validação cruzada 2021.....	57
Tabela 15 - Simulação de geoestatística gaussiana out. 2019.....	58
Tabela 16 - Simulação de geoestatística gaussiana inv. 2019.....	58
Tabela 17 - Simulação de geoestatística gaussiana prim. 2019.....	58
Tabela 18 - Simulação de geoestatística gaussiana ver. 2019.....	58
Tabela 19 - Simulação de geoestatística gaussiana out. 2020.....	59
Tabela 20 - Simulação de geoestatística gaussiana inv. 2020.....	59
Tabela 21 - Simulação de geoestatística gaussiana pri. 2020.....	59
Tabela 22 - Simulação de geoestatística gaussiana ver. 2020.....	59
Tabela 23 - Simulação de geoestatística gaussiana out. 2021.....	60
Tabela 24 - Simulação de geoestatística gaussiana inv. 2021.....	60
Tabela 25 - Simulação de geoestatística gaussiana pri. 2021.....	60
Tabela 26 - Simulação de geoestatística gaussiana ver. 2021.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	Agricultura de Precisão
AS	Albedo da Superfície
ENVISAT	Environmental Satellite
EM	Erro Médio
ERS	European Remote Sensing Satellite
ESA	European Space Agency
ET	Evapotranspiração
ET_C	Evapotranspiração da Cultura sob Condições Padrão
$ET_{C adj}$	Evapotranspiração da Cultura sob Condições não Padronizadas
ET_o	Evapotranspiração da cultura de referência
ESA.....	European Space Agency
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GDE	Grau de Dependência Espacial
GM	Grupo de Maturação
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IAF	Índice de Área Foliar
IFOV	Instantaneous Field of View
IVDN	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
Metric	Mapping Evapotranspiration at High Spatial Resolution with Internalized Calibration
MSI	MultiSpectral Instrument
ND	Número Digital
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Near Infrared
PIXEL	Picture Element
REM	Radiação Eletromagnética
Safer	Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving
Sebal	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SPOT	Système Pour L'observation de la Terre
SSG	Simulação Sequencial

TA	Temperatura da atmosfera
TI	Tecnologias de Informação
TS	Temperatura da superfície
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System

LISTA DE SÍMBOLOS

K_c	Coeficiente de Cultura
CO_2	Gás Carbônico
λ	Comprimento de onda
ν	Frequência
C_0	Efeito pepita
C_1	Patamar
$^{\circ}C$	Graus Celsius
K	Kelvin
(r)	Coeficiente de Correlação de Pearson

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	27
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	29
2.1	Evapotranspiração.....	29
2.2	Sensoriamento remoto.....	31
2.3	Agricultura de Precisão.....	34
2.4	Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o)...	35
2.4.1	Algoritmos para estimativa da (ET_o).....	36
2.5	Geoestatística.....	40
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
5	CONCLUSÕES.....	61
	REFERÊNCIAS.....	63
	APÊNDICE A.....	71

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. Portanto, a disponibilidade natural de água, em termos de quantidade e qualidade adequadas, está intrinsecamente ligada a um planejamento apropriado do uso e ocupação do solo.

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.

A evapotranspiração é composta por três principais conceitos sendo: Evapotranspiração da cultura de referência (ET_o), Evapotranspiração da cultura sob condições padrão (ET_C) e Evapotranspiração da cultura sob condições não padronizadas ($ET_{C_{adj}}$). 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 coeficiente

Existe uma variedade de métodos indiretos para cálculo de ET_o , visto ser referência para os cálculos. Os principais métodos 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.

O sensoriamento remoto se baseia na obtenção de informações de um objeto sem contato físico com o mesmo. Para coleta de dados do alvo, é necessário que haja interação das ondas eletromagnéticas com os sensores sendo que as ondas podem ser tanto refletidas quanto emitidas pelo alvo. Os sensores ficam acoplados aos satélites ou a RPAS (Remotely Piloted Aircraft System).

Sendo assim, algoritmos foram desenvolvidos para possibilitar a aplicação de dados meteorológicos e orbitais para a estimativa da ET_o . Os mais utilizados são o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (Sebal), *Mapping Evapotranspiration at High Spatial Resolution with Internalized Calibration* (Metric) e *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* (Safer).

A geoestatística concentra-se na consideração das distâncias entre amostras como um fator essencial para interpretar variações observadas. Seu conceito fundamental está sobre a análise da localização geográfica e da dependência espacial dos dados. 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 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evapotranspiração

Segundo Thornthwaite. *et al.* (1944), o processo de Evapotranspiração (ET) é caracterizado pela ligação dos mecanismos de evaporação da água e de transpiração dos vegetais. Dessa forma ocorre transferência de vapor de água da superfície para a atmosfera.

O fenômeno é estimulado pela mudança do estado da água de líquido para o gasoso, o qual é impulsionado pelo aumento da energia cinética das moléculas. O processo tem lugar em corpos d'água, solos e em vegetações úmidas (Andrade, 2018).

Detalhadamente, a evaporação é influenciada pela radiação solar e, em menor medida, pela temperatura do ar, que atuam como fontes de energia. É o primeiro processo a ocorrer dentro da evapotranspiração pensando-se em cultura recém-plantada e que conseqüentemente ainda não possui biomassa ou possui pouca. O processo envolve a remoção de água da superfície que ocorre devido à diferença de pressão de vapor entre a superfície e a pressão do ar atmosférico circundante. Conforme a água se converte em vapor, o ar fica saturado de umidade, reduzindo a diferença de pressão e levando o processo a diminuir até parar, a menos que o ar úmido seja transportado pela atmosfera. A presença de ventos desempenha um papel crucial ao substituir o ar saturado por ar menos úmido sobre a superfície, facilitando a continuação do processo evaporativo. A taxa de substituição entre o ar úmido e o ar mais seco está ligada à velocidade do vento. Portanto, ao medir a evaporação em uma área, é essencial considerar a velocidade do vento, a radiação solar, a temperatura e a umidade do ar (Allen *et al.*, 1998).

Além disso, a evaporação que ocorre sobre o solo é também influenciada pela disponibilidade de água presente. A quantidade de água disponível no solo está intimamente ligada à frequência e quantidade de precipitação, bem como à irrigação e a presença de aquíferos rasos. À medida que o solo vai se tornando mais seco, seja devido a períodos de seca, falta de irrigação ou diminuição do lençol freático, a disponibilidade de água diminui, levando conseqüentemente a uma redução na taxa de evaporação, que pode até mesmo cessar (Andrade, 2018).

Em complemento, a transpiração, é um processo biofísico que envolve o transporte da água proveniente do metabolismo das plantas para a atmosfera, principalmente através das folhas. Conforme indicado por Allen *et al.* (1998), a água presente no solo, junto com os nutrientes, é absorvida pelas plantas por meio das raízes, utilizando processos como interceptação radicular, fluxo de massa ou difusão. Posteriormente, essa água é transportada para as estruturas periféricas da planta através do xilema. Durante esse processo, ocorre a vaporização da água nos espaços intercelulares, e o movimento do vapor é controlado pela abertura dos estômatos. A maior parte da água absorvida pelas plantas (aproximadamente 99%) é liberada para a atmosfera por meio da transpiração, como destacado por Sinha (2004), Lazzara (2010) e Rana (2010).

Da mesma forma que ocorre com a evaporação, a estimativa da transpiração requer a consideração essencial da radiação solar, temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento. De acordo com Allen *et al.* (1998), também são fatores de grande importância para a transpiração as características como estágio de desenvolvimento da planta, fertilidade e capacidade de condução hídrica do solo, salinidade do solo, extremos de pH, condições patológicas e estresse hídrico no solo.

Os processos de evaporação e transpiração ocorrem concomitantemente dificultando sua separação (Rosenberg *et al.*, 1983; Allen *et al.*, 1998). À medida que a cultura se desenvolve, o Índice de Área Foliar (IAF) reduz a radiação solar incidente no solo devido ao aumento de biomassa reduzindo assim as taxas de evaporação. Em contrapartida, o mesmo aumento de biomassa, eleva a taxa da transpiração, sendo esses dois processos inversamente proporcionais (Doorenbos, 2000; Kassam, 2000).

O processo de transpiração se faz possível por meio dos estômatos, o qual é responsável pela troca de vapor de água da cultura com a atmosfera. O vapor é transferido por meio da abertura do estômato. A abertura ocorre para o processo de respiração das plantas as quais absorvem Gás Carbônico (CO_2) (Buckeridge, 2016) e liberam Oxigênio (O_2) (Lopez *et al.*, 2012).

A abertura e fechamento dos estômatos são controladas pelas células-guardas sendo condição para isso sua alternância de pressão. A abertura ocorre quando as células-guardas se tornam túrgidas e o fechamento, quando estão mais flácidas e murchas. O mecanismo de turgescência ocorre devido o movimento osmótico das células (Anjum *et al.*, 2011). O movimento osmótico é o processo que controla o fluxo

da solvente água através de uma membrana semipermeável. O fluxo advém do meio de menor concentração, para a região de maior concentração do soluto (Atkins, 2012; Jones, 2012).

2.2 Sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto é uma técnica idealizada para obtenção de imagens da superfície para estudo sem contato físico com a mesma. (Meneses, 2012). Uma descrição mais acadêmica para o termo é a “disciplina que se dedica à obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e mensuração quantitativa das interações da Radiação Eletromagnética (REM) com o solo”.

A técnica se tornou uma ferramenta essencial para a melhoria da agricultura de precisão. Isso se deve tanto à sua capacidade de realizar estimativas de biomassa e produtividade, bem como ao mapeamento do desenvolvimento fenológico das culturas e a identificação de padrões de plantio e falhas no plantio (Formaggio, 2017; Sanches, 2017), além de que, é possível avaliar o estresse das plantas através da técnica (Adams *et al.*, 1999). Esse fato é corroborado na premissa de que os fatores de estresse afetam a fotossíntese ou as estruturas fenológicas das plantas, prejudicando a absorção de energia solar e, por conseguinte, alterando o espectro de refletância das plantas (Moran *et al.*, 1997). Govender *et al.* (2009), concluíram que o sensoriamento remoto também é capaz de ser aplicado no estudo do estresse hídrico de culturas agrícolas e floresta. Plantas sob estresse exibem menor refletância em sua parte superior nas porções inferiores da banda *Near Infrared* (NIR) (750-1300nm) e menor absorção do RED na banda de clorofila ativa (680nm) (Carter, 1993; Malthus, 1993; Madeira, 1993; Fernandez *et al.*, 1994).

A REM é composta pelo quociente das oscilações atômicas e moleculares. Sendo assim, as ferramentas de sensoriamento remoto supõem que a integralidade da matéria exposta a uma temperatura acima de zero grau absoluto (0K ou -273°C) libere radiação eletromagnética (Slater, 1980).

A radiação eletromagnética é classificada com base no comprimento de onda (λ) e na frequência (ν). A faixa espectral predominante utilizada no sensoriamento remoto para a superfície terrestre situa-se entre os comprimentos de onda de 400 nm a 700 nm sendo a região do visível e 700 nm até 2500 nm sendo a região do NIR (infravermelho próximo). Os sensores que operam na faixa visível e infravermelho

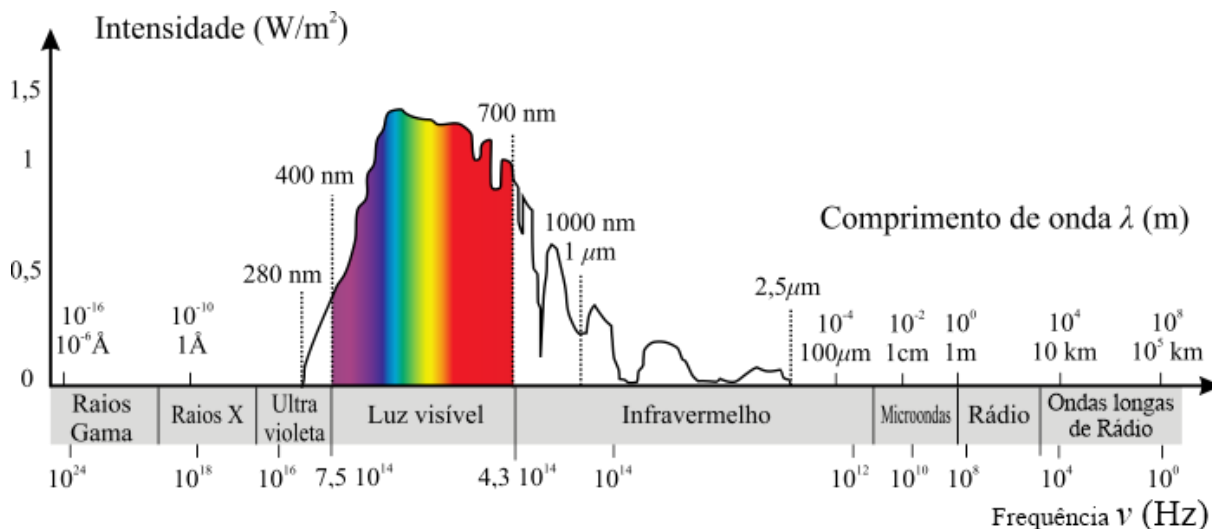
costumam ser de tipo passivo (Quartaroli, 2014; Vicente, 2014; Araújo, 2014). É importante notar que o comprimento de onda e a frequência são grandezas inversamente relacionadas, ou seja, à medida que a frequência aumenta, o comprimento de onda diminui.

Para à análise, os dados são adquiridos por meio da captação da (REM), que é gerada tanto por fontes naturais (sensores passivos), como o sol, como por fontes artificiais (sensores ativos), como o radar. A (REM) é captada por sensores ópticos embarcados em satélites ou RPAs (IBGE, 2023).

Esses sensores apresentam quatro tipos distintos de resolução sendo resolução espacial, resolução espectral, resolução radiométrica e resolução temporal (Crosta, 1993). A resolução espacial está relacionada com a habilidade do sensor em discernir e medir os objetos. Essa resolução é fundamentada na projeção geométrica do detector na superfície terrestre. Esse parâmetro define a área do solo que é focalizada por um sensor em uma determinada altitude. O ângulo formado por essa projeção é conhecido como Campo de Visada Instantânea (IFOV) (Florenzano, 2002). A resolução espectral refere-se à capacidade de analisar a largura das faixas espectrais e à sensibilidade do sistema sensor para diferenciar entre diferentes níveis de intensidade do sinal de retorno. Esse tipo de resolução é específico para sensores multiespectrais (Novo, 1989). A resolução radiométrica, é caracterizada pela qualidade do sensor em reconhecer as alterações da radiância espectral enviada (níveis de cinza) A radiância de cada pixel é exposta a um código digital e obtêm um valor em bits classificado como Número Digital (ND). Esse número pode ser caracterizado como intervalo finito $(0, K-1)$, sendo K um número de valores possíveis (Schowengerdt, 1983). Os níveis de cinza atualmente variam de 2 a 16.384 sendo, 2^1 e 2^{14} , nesta ordem (Crosta, 1993). Por último, a resolução temporal abrange a frequência com que o sensor passa por um determinado local em um intervalo de tempo específico. Essa resolução está relacionada às características orbitais da plataforma (altitude, velocidade, inclinação) e ao ângulo total de visada do sensor.

A Figura 1, exibe as frequências da REM em diferentes partes do espectro eletromagnético (Crosta, 1997; Filho, 2017).

Figura 1 - Espectro eletromagnético



Fonte: Pereira (2019).

A REM sofre uma série de alterações ao transpor a atmosfera devido interações. As principais são a reflexão de radiação pelos fragmentos atmosféricos e absorção que ocorre por meio gases atmosféricos, como vapor de água, CO_2 e o ozônio. Independentemente do tipo de interação, uma parte de energia é extraviada e a parcela restante passa por mudanças antes de ser assimilada pelo sensor.

Uma das séries de satélites referência para estudo da superfície terrestre é a Sentinel. Essa teve origem em 2014 por meio de um projeto da Agência Espacial Europeia (ESA), em colaboração com o Programa Copernicus. Essa série tem como objetivo dar continuidade às missões anteriores gerenciadas pela ESA, como ERS, ENVISAT e SPOT, ao monitorar recursos naturais terrestres, uso e cobertura do solo, ambientes marinhos, clima e desastres naturais. Essa iniciativa foi inicialmente denominada Global Monitoring for Environment and Security (GMES) e, em 2012, seu nome foi alterado para Sentinel. A missão é composta por satélites específicos para cada um dos temas mencionados.

Dentro da série, o modelo Sentinel-1 (um par de satélites) é utilizado para estudos tanto terrestres quanto oceânicos, empregando sensores de radar. Já o par de satélites Sentinel-2 é empregado no monitoramento de vegetação, solos e áreas costeiras, utilizando sensores de alta resolução espacial. A ESA possui dois modelos de Sentinel-2, A e B.

O Sentinel-2A foi o primeiro satélite óptico da série a ser gerenciado pela ESA e foi lançado em 2015. Este é equipado com o sensor *Multispectral Imager* (MSI),

composto por 13 bandas espectrais, abrangendo uma faixa de comprimento de onda de 443 a 2190 nm. A resolução espacial é de 60m para as bandas usadas para correção atmosférica, 10m para as bandas no espectro visível e 20m para as bandas no infravermelho. O Sentinel-2A especificamente, é aplicado em estudos agrícolas, florestais, áreas costeiras, corpos d'água interiores, monitoramento de desastres naturais e análise de uso e ocupação do solo.

2.3 Agricultura de Precisão

O uso inicial da Agricultura de Precisão (AP) teve origem nos anos 1980, principalmente no contexto militar. No entanto, durante a década seguinte, houve início de aplicação dessa abordagem para fins agrícolas. Um marco nesse processo foi a instalação em colhedoras de grãos. Esse desenvolvimento possibilitou a leitura da variabilidade espacial da produção por meio dos sensores embutidos nos equipamentos.

A AP é uma metodologia que se baseia no uso de técnicas agrícolas apoiadas por Tecnologias de Informação (TI) e ferramentas de mecanização e automação. Sua finalidade é auxiliar os agricultores na tomada de decisões de manejo das culturas. Essa abordagem considera a análise da variabilidade espacial e temporal das lavouras, visando a obtenção de melhores retornos econômicos e a redução do impacto ambiental (Inamasu *et al.*, 2011).

Essencialmente, a AP opera como uma rede de conhecimento, onde máquinas, dispositivos, equipamentos e softwares são empregados para coletar dados, que são posteriormente organizados e interpretados para gerar informações que respaldem a gestão agrícola (Inamasu, 2014; Bernardi, 2014). O processo começa com a coleta de dados, segue com a análise e interpretação, resultando na formulação de recomendações. Essas recomendações são então aplicadas no campo, culminando na avaliação dos resultados obtidos (Geebers, 2010; Adamchuk, 2010).

Entre as tecnologias fundamentais na disseminação da AP e que, ao mesmo tempo, contribuíram para o êxito da automação, cabe o receptor Global Navigation Satellite System (GNSS). Esse é responsável por fornecer dados de latitude e longitude a cada segundo para todos os sistemas de posicionamento. O mais conhecido no Brasil é a constelação americana Sistema de Posicionamento Global (GPS) composta por no mínimo 24 satélites. Esses sistemas globais têm

desempenhado um papel crucial na capacidade de monitoramento e automação das operações agrícolas.

A automação, por sua vez, refere-se ao processo pelo qual as tarefas operacionais na produção agrícola, pecuária e/ou florestal são monitoradas, controladas e executadas por meio de máquinas e dispositivos mecânicos, eletrônicos ou computacionais. Esse processo tem como objetivo expandir a produção e produtividade de trabalho humano (Inamasu *et al.*, 2016).

O primeiro mapa de produtividade baseado na leitura de rendimento associada ao sistema de GPS foi apresentado na Alemanha em 1990, utilizando dados provenientes de uma lavoura de canola (Schnug *et al.*, 1991). Esse avanço marcou um passo importante na utilização da AP ao demonstrar como a monitorização da produção poderia ser visualizada e analisada de forma espacialmente diferenciada.

A implementação da AP em uma propriedade rural permite que o ciclo de produção seja gerenciado por meio de um conjunto de dados georreferenciados em várias etapas. Esses dados vão desde informações coletadas diretamente no campo até sua transformação em modelos inteligentes. Esses modelos são então utilizados para criar recomendações de insumos agrícolas, o que resulta em uma redução efetiva de gastos.

Com a AP, os agricultores podem tomar decisões mais informadas e direcionadas, aplicando insumos de maneira precisa em áreas específicas da propriedade, onde eles são realmente necessários. Isso evita o uso excessivo de recursos, como fertilizantes e pesticidas, em locais onde não são necessários, resultando em uma utilização mais eficiente dos recursos, reduzindo custos e minimizando impactos ambientais.

2.4 Métodos para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0)

Há uma variedade de métodos para obtenção da ET_0 . Esses podem ser diretos a partir de lisímetros e indiretos como Thornthwaite, Camargo, Hargreaves-Samani, Priestley-Taylor e Penman-Monteith. A lisímetria, em especial a de pesagem, é o método mais preciso para estimativa da evapotranspiração (Aboukhaled *et al.*, 1982; Mendonça *et al.*, 2003). Entretanto seu uso é limitado pelo alto custo da mão-de-obra especializada na construção e na operação, bem como pelo tamanho, pelos equipamentos especiais e materiais utilizados (Schneider *et al.*, 1998). Segundo Allen

et al. (1998), o uso desse equipamento é justificado apenas em condições experimentais, somente após devida calibração para que os dados obtidos sejam confiáveis. Além disso, a lisímetria tem sido aplicada para calibração regional de métodos diretos (Mendonça *et al.*, 2003).

Os métodos diretos enfrentam limitações ao serem aplicados em áreas de grande extensão (Santos *et al.*, 2010) pois as estimativas pontuais não conseguem representar adequadamente a variação espacial dos dados, o que prejudica a avaliação geral. Isso ocorre porque a variabilidade dos indicadores hídricos em escalas amplas é numerosa, considerando uma variedade de fatores como níveis diversos de precipitação, práticas de irrigação, estágio de desenvolvimento da vegetação, características hidráulicas dos solos, tipos de vegetação e densidades de plantio (Colaço *et al.*, 2017).

2.4.1 Algoritmos para estimativa da (ET_o)

Para facilitar o estudo da evapotranspiração em grandes áreas com custo reduzido, foram desenvolvidos algoritmos para serem aplicados juntamente com a técnica de sensoriamento remoto. Alguns dos algoritmos mais aplicados são o *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (Sebal) desenvolvido por Bastiaanssen *et al.* (1998), *Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration* (Metric) desenvolvido por Allen *et al.* (2007) e *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* (Safer) desenvolvido por Teixeira *et al.* (2012) mas também pode ser encontrado na literatura como Teixeira (2010).

A ET_c por Sebal, é determinada pela mensuração do fluxo do calor latente, o qual é adquirido pelo resíduo da equação do balanço de energia. Esse algoritmo é capaz de ser posto com imagens digitais de uma diversidade de sensores orbitais que atuam na faixa do visível, infravermelho próximo e termal, tais como TM - Landsat 5 (Bezerra *et al.*, 2008; Menezes *et al.*, 2011, Anderson *et al.*, 2012), NOAA-AVHRR (Timmermans, 1999; Meijerink, 1999; Bastiaanssen, 2003; Ali, 2003; Paiva, 2005), MODIS/ Terra/Aqua (Di Long *et al.*, 2010; Santos, 2011; Oliveira, 2012) e ASTER/Terra (Hafeez *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2005). Ademais, Sebal necessita de poucas relações e suposições empíricas podendo ser aplicado com variados agrossistemas (Santos, 2009a; Santos, 2009b).

O funcionamento de Metric é similar ao de Sebal. O algoritmo tem a função de estimar o balanço da energia diferenciando de Sebal apenas no momento da escolha do pixel úmido e no cálculo da desigualdade de temperatura neste pixel. O Metric apresenta todos os passos do Sebal e tem como vantagem não requerer muitas variáveis meteorológicas em nível de superfície onde o pixel frio é selecionado dentro de uma área irrigada (Allen *et al.*, 2005; Lira, 2008; Tasumi *et al.*, 2005). Um ponto negativo de Metric é oferecer acurácia limitada para áreas montanhosas (Allen *et al.*, 2007; Gowda *et al.*, 2007; Liou, 2014; Kar, 2014; Santos *et al.*, 2008).

Por fim, o Safer, se apresenta como 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, 2012; Hernandez, 2012; Lopes, 2012) 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.*, 2013; Franco *et al.*, 2016) 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).

Pormenorizadamente, esse método faz uso de dados orbitas juntamente com dados de estação meteorológica (Teixeira, 2012; Teixeira, 2010) sem necessidade de escolha de pixels frio e quente (Teixeira *et al.*, 2009; Braz *et al.*, 2014). Um dos sensores que fazem uso desse método é o MSI presente nos satélites Sentinel-2A e 2B.

A sequência de equações abaixo é o 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.*, 2012). O albedo planetário é uma medida imprescindível na avaliação de alteração climáticas, desertificação, incêndios e impactos ambientais. É determinado como a razão entre a luz do sol espelhada e a incidente.

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

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

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

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.

A equação 3, refere-se ao cálculo do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) conforme Jensen (2016).

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

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 de Vegetação da Diferença Normalizada é imprescindível para a estimativa da evapotranspiração dentro de Safer sendo que analisa a presença de água na superfície. O índice varia entre valores de -1 a +1 sendo que para superfícies de água o NDVI geralmente é menor ou igual a zero e em superfícies vegetadas é maior que zero (Allen *et al.*, 2007; Tatsumi *et al.*, 2008; Bezerra *et al.*, 2011). Isso ocorre devido a água absorver toda radiação acima de 700 nm (NIR) sendo que para NDVI +1 ocorre boa reflexão de NIR (Padial, 2006; Nishimura, 2006) e apresentar baixa absorção em seu estado líquido livre de sólidos entre 380nm e 700nm (luz visível).

$T_{s\omega}$ é a Transmissividade Atmosférica de Ondas Curtas, Equação 8. 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.

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

Onde $T_{s\omega}$ é a transmissividade atmosférica de ondas curtas; 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.

A emissividade é a capacidade de uma superfície emitir energia absorvida onde uma superfície mais escura absorve mais radiação solar do que uma superfície mais

clara. Teixeira *et al.* (2010) realizou regressão de análises de Emissividade Atmosférica (ε_a) e Emissividade da Superfície (ε_s) por meio de valores de transmissividade e *NDVI*, conforme Equações 4 e 5, nesta ordem.

$$\varepsilon_a = aA.(-\ln.Ts\omega)^{bA} \quad (5)$$

$$\varepsilon_s = aS.(\ln NDVI) + b_s \quad (6)$$

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

A Equação 6, compete a Temperatura média do ar.

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

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

A Equação 7, refere-se ao Coeficiente de Regressão do Saldo de Radiação de Ondas Longas (Silva, 2019; Teixeira, 2019; Manzione, 2019).

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

Onde aL é o coeficiente de regressão do saldo de radiação de ondas longas; c e d são coeficientes de regressão iguais a 6,99 e 39,93 respectivamente.

A Equação 9, refere-se a Temperatura da Superfície (T_s) e a Equação 10, ao Coeficiente de Cultura (K_c).

$$T_s = \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_a.\sigma.T_A^4 + aL.T_s\omega}{\varepsilon_s.\sigma}} \quad (9)$$

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

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

Onde e e f são coeficientes de regressão sendo 1,8 e -0,008, nesta ordem.

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).

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

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 ($^{\circ}\text{C}$); 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 ($\text{kPa.}^{\circ}\text{C}^{-1}$).

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

Onde ET_c é a evapotranspiração de cultura sob condições padrão; Kc é o coeficiente da cultura; ET_o é a evapotranspiração da cultura de referência (mm/dia).

2.5 Geoestatística

A geoestatística é uma área de estudo que teve suas raízes na pesquisa conduzida por Krige (1951), com origem na África. Ao examinar conjuntos de dados relacionados à distribuição de ouro, Krige constatou que, para que as variações observadas tivessem significado, era essencial levar em conta as distâncias entre as amostras. Assim, o conceito fundamental da geoestatística surgiu, destacando a análise da localização geográfica e da dependência espacial dos dados. A técnica não tem como alvo apenas desenvolver modelos de dependência espacial, mas também de estimar valores para locais onde não houve coleta de dados. O propósito desse método é considerar os vizinhos mais próximos do local de interesse, assumindo ausência de tendência e impondo que a média da diferença entre os valores

estimados e observados seja próxima de zero, enquanto a variância seja reduzida. Esse método é utilizado para produzir estimativas pontuais com base nas relações de dependência espacial entre as amostras coletadas (Srivastava, 1996; Goovaerts, 1997).

A estatística clássica se diferencia da geoestatística no sentido de que a primeira não requer normalidade nem dependência espacial dos dados, enquanto a última analisa a autocorrelação espacial. A estatística clássica pressupõe que os pontos de observação são independentes entre si, o que difere da maioria dos estudos nas Ciências da Terra, onde a influência espacial é mais comum (Srivastava, 1996).

Para realizar a estimativa da dependência espacial, as etapas aplicadas devem ser variograma, validação cruzada, krigagem e simulação estocástica, nesta ordem.

O variograma é de grande peso para modelos geoestatísticos de estimativa e simulação estocástica, sendo este o qual oferece o modelo de correlação espacial.

As variáveis espaciais possuem direção preferencial (Caers, 2011) e o variograma deve espelhar as características espaciais de cada uma. A referência geológica regional ou local concede as orientações necessárias para o cálculo do variograma experimental (Yamamoto, 2013; Landim, 2013). O variograma é responsável por descrever o grau de dependência espacial dos dados em relação a uma distância específica. Para calcular o variograma, é necessário calcular as diferenças ao quadrado entre os valores dos dados em diferentes pontos, o que ajuda a confirmar se os dados exibem estacionaridade (Matheron, 1971). A estacionaridade está relacionada a uma variável que se comporta de forma aleatória ao longo de tempo ao redor de uma média constante. A Equação 15, apresenta uma estimativa do grau de dependência espacial das amostras, conforme proposto por Farias (2003).

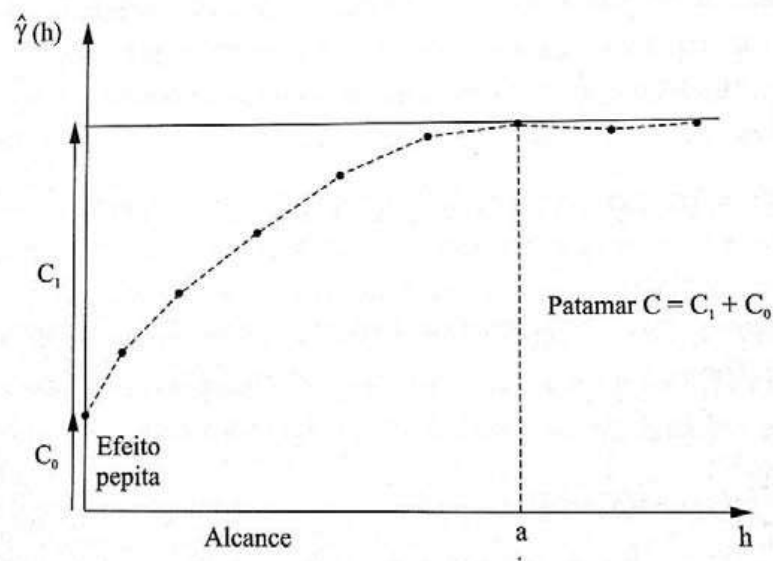
$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (15)$$

Onde: $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações; $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ são os pares de pontos separados por uma distância h .

Em atributos que exibem dependência espacial, presume-se que a média das diferenças entre valores $[Z(x_i) - Z(x_i + h)]$ aumente com a distância até atingir um valor máximo, estabilizando-se em patamar conhecido como (C) . Esse patamar (C) é próximo à variância dos dados. A distância em que essa estabilização ocorre é

chamada de alcance (a), que pode ser imaginado como o raio de um círculo no qual os valores são tão semelhantes entre si que se correlacionam. O valor da variância na origem do gráfico (eixo Y) é chamado de efeito pepita (C_0) e reflete a variabilidade dos dados em espaçamentos menores do que o tamanho da amostra (Farias, 2003). Miranda (2005) apresenta graficamente, na Figura 2, um variograma típico com seus principais componentes: C_0 , a e $C_0 + C_1$ (patamar).

Figura 2 - Componentes do variograma



Fonte: Moraes (2015).

O modelo teórico ideal do variograma deve ser aplicado ao estudo para haver o ajuste. Segundo Guimarães (2004), os cálculos geoestatísticos originam do variograma ajustado e, portanto, se não houver ajuste ideal, os erros dos próximos cálculos poderão afetar as conclusões. Os modelos teóricos de variograma mais aplicados são linear, esférico, exponencial e gaussiano. Assim, a modelagem do variograma torna-se irrealizável com valores incompatíveis, como em distribuições assimétricas (Sollitto, 2010).

Para validar o ajuste do variograma é utilizada a validação cruzada proposta por Krige (1951), que tem por finalidade analisar se este é aplicável. A validação cruzada, em seu processo, esconde um ponto conhecido e estima o valor desse mesmo ponto com o modelo estimador da krigagem. Como forma de mensurar o erro obtido pelo estimador, é aplicado o Erro Médio (EM) exibido na Equação 16.

$$EM = \frac{1}{N} \sum (z(x_i) - z^*(x_i)) \quad (16)$$

Onde N é o número de amostras; $z(x_i)$ é o ponto observado e $z^*(x_i)$ é o ponto estimado.

Em sucessão, com o ajuste do variograma realizado, os dados de dependência espacial gerados posteriormente são validados. Dessa forma, Cambardella *et al.* (1994), na Equação 17, propuseram o uso da variância estrutural como uma métrica para caracterizar a dependência espacial, assumindo valores entre 0 e 1. Nessa abordagem, quando o valor do Grau de Dependência Espacial (GDE) é inferior a 0,25, indica uma forte dependência espacial. Valores entre 0,25 e 0,75 indicam uma dependência espacial moderada, e valores acima de 0,75 apontam para uma dependência espacial fraca.

$$GDE = \frac{C_0}{C_0 + C_1} \quad (17)$$

Onde GDE é o grau de dependência espacial; C_0 é o efeito pepita; e C_1 é o patamar.

Seguindo com os procedimentos de estimativas, o método de interpolação por Krigagem é frequentemente empregado, nome que presta homenagem a Daniel G. Krige.

A krigagem é um avaliador geoestatístico. A metodologia mais utilizada dentro dela é a krigagem ordinária. Nessa, não é essencial conhecer o valor da média pois é constante, entretanto não é exposta. (Soares, 2006). Já na krigagem simples, é necessário conhecer o valor da média. Outros métodos de krigagem existentes são: krigagem universal, krigagem indicativa e co-krigagem. A finalidade da krigagem é interpolar dados para diversos pontos (sem viés e com variância mínima) e a hipótese é uma concordância linear de valores obtidos. A interpolação se refere a ação de construir um novo conjunto de dados a partir de um conjunto discreto de dados pontuais previamente conhecidos.

Na krigagem, os pesos atribuídos aos dados vizinhos são determinados por meio da análise espacial, baseada no semivariograma experimental. Dessa forma, a krigagem permite a estimativa de um valor em uma determinada localização, para cada centro de célula em uma malha tridimensional. Os valores estimados dependem dos dados fornecidos e de uma função de correlação espacial entre esses dados. As

fórmulas da krigagem são apresentadas nas Equações 13 e 14, conforme definido por Mello *et al.* (2003).

$$[A]^{-1} \cdot [b] = [\lambda] \quad (13)$$

Onde $[A]^{-1}$ representa a matriz inversa da variância entre as localidades da vizinhança de um determinado ponto, determinada pelo modelo de variograma com base nas variâncias entre essas localidades. A matriz $[b]$ consiste nas variâncias entre as localidades vizinhas (incluindo a variável a ser estimada) e o ponto no qual a variável será interpolada. Da mesma forma, essa matriz é determinada pelo modelo de variograma, baseando-se nas distâncias entre as localidades vizinhas e o ponto a ser interpolado. A matriz $[\lambda]$ representa os pesos atribuídos na krigagem.

$$X_p = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot x_i \quad (14)$$

Onde X_p é a variável que é interpolada; λ_i é o peso da i -ésima localidade vizinha; x_i é o valor da variável para a i -ésima localidade; n é o número de localidades próximas usadas para interpolação do ponto.

Um problema usual na aplicação da interpolação por krigagem é a ocorrência de suavização dos dados, causando má reprodução dos atributos da amostra aplicada nas estimativas de pontos não amostrados. Isso se deve a krigagem cortar a cauda da distribuição minimizando a variância do erro. Essa suavização pode ser analisada pelo mapa criado, sendo que este apresenta maior homogeneidade nos dados.

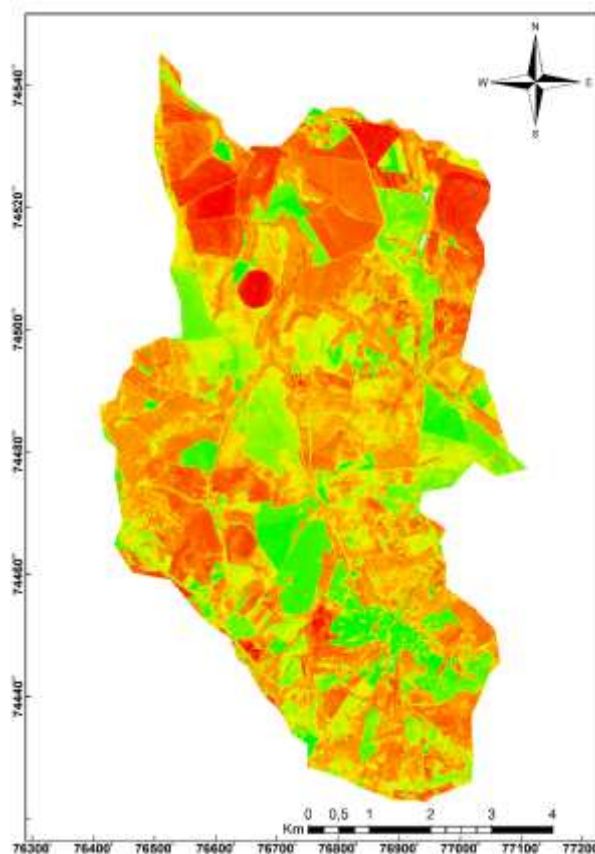
Para corrigir a suavização, faz-se uso da simulação estocástica (Yamamoto, 2013; Landim, 2013). Um dos métodos mais aplicados de simulação estocástica é a Simulação Sequencial Gaussiana (SSG). Essa utiliza como dados de entrada, dados com distribuição normal (não interpolados) onde estes possuem média centrada em 0 e variância igual a 1. A simulação estocástica atua gerando múltiplas realizações de campos estocásticos com base em modelos de variograma a fim de explorar a incerteza espacial em dados georreferenciados e não corta a cauda da distribuição apresentando mapa mais heterogêneo. Webster (2007) e Oliver (2007) delinearam os elementos necessários para a aplicação da simulação sequencial gaussiana:

- a) verificar se a distribuição dos dados se aproxima da normalidade. Se não, é recomendável realizar correções apropriadas;
- b) identificar a disposição espacial dos pontos na malha amostral (fundamental para a simulação);
- c) definir a sequência de pontos onde a simulação será realizada, de modo aleatório;
- d) para cada ponto, seguir as etapas a seguir:
 - realizar uma krigagem simples, modelando o variograma para obter estimativas de valores e variâncias;
 - selecionar aleatoriamente um valor da distribuição normal;
 - inserir esse valor na malha de pontos e no conjunto de dados simulados;
 - proceder para o próximo ponto na sequência;
 - repetir os passos (a) a (d) até que todos os pontos sejam simulados.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na sub-Bacia do alto Rio Pardo-SP, Figura 3. 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. A área compreende um total de 5.301 hectares e está localizada entre as coordenadas longitude 23° 3'37.66"S e longitude 48°23'23.07"O.

Figura 3 - Área de estudo



Fonte: Próprio autor.

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

A área é composta por solos dos tipos Latossolo Vermelho Distrófico, Latossolo Vermelho Distroférrico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, Neossolo Lítico Distrófico e Gleissolo Distrófico (Zimback, 1997; Grossi, 2003; Embrapa, 2021).

As imagens utilizadas para o estudo foram obtidas pelo sensor MSI acoplado ao satélite Sentinel-2A as quais estão disponíveis no site <https://earthexplorer.usgs.gov/>. A Tabela 1, exibe as respectivas bandas do sensor utilizadas e suas resoluções sendo características intrínsecas ao Sentinel-2A para bandas com resolução de 10 m.

Tabela 1 - Resoluções do sensor MSI

Bandas	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Resolução Radiométrica	Comprimento de Onda
B2 (Blue)	10m	5 dias	12 bits	492.7 nm
B3 (Green)	10m	5 dias	12 bits	559.8 nm
B4 (Red)	10m	5 dias	12 bits	664.6 nm
B8 (NIR)	10m	5 dias	12 bits	832.8 nm

Fonte: ESA (2015).

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 ano. As imagens foram selecionadas de forma que não apresentassem interferência de nuvens para maior qualidade de estudo da superfície. A estação do verão tem a peculiaridade de iniciar em um ano e finalizar no ano subsequente. Dessa forma, ocorreu neste estudo que imagens livres de nuvens para estação do verão ocorreram de serem todas do ano subsequente ao analisado. As datas em que as respectivas imagens foram geradas são apresentadas nas Tabela 2,3 e 4.

Tabela 2 - Data das imagens do período de 2019

Estação climática	Data de geração da imagem
Outono	05/05/2019
Inverno	24/07/2019
Primavera	01/11/2019
Verão	10/03/2020

Fonte: USGS (2021).

Tabela 3 - Data das imagens do período de 2020

Estação climática	Data de geração da imagem
Outono	09/05/2020
Inverno	18/07/2020
Primavera	11/10/2020
Verão	23/02/2021

Fonte: USGS (2021).

Tabela 4 - Data das imagens do período de 2021

Estação climática	Data de geração da imagem
Outono	09/05/2021
Inverno	01/09/2021
Primavera	05/11/2021
Verão	05/03/2022

Fonte: USGS (2021).

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 (2016) desenvolvedor do Semi-Automatic Classification Plugin (SCP), disponível no software Qgis. Esse processo atenua os efeitos intrínsecos do contanto dos componentes atmosféricos com a radiação eletromagnética sendo a absorção oriunda dos gases e o espalhamento produzido por partículas de aerossóis.

A próxima etapa consistiu no início da aplicação das equações via calculadora Raster do mesmo software citado acima. A primeira equação aplicada foi de α_p , Equação 1. O α_p é composto pela somatória dos diferentes valores de ω_{band} com r_{band} . Os pesos ω_{band} para as diferentes bandas foram calculados como a razão entre a quantidade de radiação de ondas curtas recebida do sol em uma determinada banda e a soma da radiação de ondas curtas recebidas para todas as bandas no topo da atmosfera. Esse processo também se fez por meio da correção atmosférica. A Tabela 5 exhibe os valores de ω_{band} e r_{band} para as respectivas bandas utilizadas.

Tabela 5 - Valores de (ω_{band}) e (r_{band}) em Sentinel-2A

Bandas	ω_{band} (μm)	r_{band} (μm)
B2	0.32	0.49
B3	0.26	0.56
B4	0.25	0.66
B8	0.17	0.83

Fonte: ESA (2015).

A equação seguinte foi a do albedo planetário, Equação 2. Os coeficientes de regressão a e b , foram considerados para um período de 24 horas e adquiridos por meio de medições de campo e satélite (Teixeira *et al.*, 2008; Teixeira *et al.*, 2014a; Teixeira *et al.*, 2014b) e sua calibração foi com um $R^2 = 0,96$ (Teixeira, 2010). O próximo cálculo foi de NDVI, Equação 3. Seus valores variam de -1 a 1 sendo que para superfícies com água ou nuvens os valores encontrados são sempre inferiores a zero (Boratto, 2013). Em seguida, calculou-se as emissividades atmosférica e da superfície, Equação 4 e 5.

Na sequência foi obtida a temperatura média do ar (T_A), Equação 6, conforme o manual da FAO. Os dados meteorológicos foram obtidos através da estação meteorológica automática (EMA) do departamento de Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia da Faculdade de Ciências Agrônômicas (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.

Devido à não linearidade dos dados de umidade exigidos na equação Penman-Monteith FAO a pressão de vapor para os períodos foi calculada como a média entre pressão de vapor nas temperaturas do ar máximas e mínimas diárias desse período. Nesta etapa, a temperatura obtida pela estação meteorológica foi dada em Graus Celsius (°C). Posteriormente, foi convertida em Kelvin (K) para aplicação no cálculo de T_s . Para conversão fez-se a adição de 273,16 a temperatura em Celsius ($K = ^\circ\text{C} + 273,16$).

A próxima equação foi a de (aL) conforme Teixeira *et al.* (2014). 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, conforme

Equação 7. Dessa forma, para o cálculo de aL , o valor de T_A necessitou ser convertido para °C.

O cálculo de $T_s\omega$, foi dado pela estimativa da razão entre R_{so} e R_a , Equação 8. Para estimativa da temperatura da superfície (T_s) foi utilizado o método residual (Teixeira, 2015) visto que o sensor MSI (Sentinel-2A) não possui banda termal.

A variável K_c , Equação 10, foi calculada a partir do método utilizado pelo algoritmo Safer, que utiliza tanto dados orbitais como de estação meteorológica. O valor de T_s foi aplicado em °C nesse caso também.

Em seguida, para determinação da ET_o , foi utilizado o método de Penman-Montheith, de acordo com o boletim 56 da FAO (Allen *et al.*, 1998), Equação 11. 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 $0,12 \text{ m s}^{-1}$.

Para calcular a pressão atmosférica (P), variável do método de Penman-Montheith, Equação 18, é necessário um dado de altitude, e a altitude utilizada foi a média do município de Pardinho-SP sendo de 734m.

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065 z}{293} \right)^{5.26} \quad (18)$$

Onde P é a pressão atmosférica (kPa); e z é altitude acima do nível do mar (m).

A última etapa do estudo foi aplicação da equação para estimativa da ET_c pelo método padrão, Equação 12. Com os valores de ET_c obtidos foi possível aplicar as técnicas de geoestatística para obtenção de diferentes cenários de evapotranspiração conforme objetivo do estudo.

Sendo assim, os valores de ET_c foram submetidos a ferramenta *Geostatistical Analyst* pelo software ArcGIS 10.3. Primeiramente, foi realizada a estatística descritiva para a obtenção da média, mínimo, 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 sequencial gaussiana. 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 (Pearson, 1900; 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.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi estimada a ET_c ao longo da sub-Bacia do alto Rio Pardo-SP a qual apresentou tanto culturas agrícolas como espécies florestais.

Os resultados da estatística descritiva da ET_c obtido pelo algoritmo Safer para as estações climáticas no período de 2019 a 2021 foram apresentados nas Tabelas 6,7 e 8.

Pôde-se notar que os maiores valores de evapotranspiração para os anos de 2019 e 2020, Tabela 6 e 7, estiveram presentes nas estações da primavera e verão. O período de 2021, Tabela 8, apresentou resultados diferentes sendo os maiores valores para as estações de inverno e primavera.

Tabela 6 - Estatística descritiva 2019

Estações do ano	Mín. ET_c / mm.dia ⁻¹	Média ET_c / mm.dia ⁻¹	Máx. ET_c / 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: Próprio autor.

Tabela 7 - Estatística descritiva 2020

Estações do ano	Mín. ET_c / mm.dia ⁻¹	Média ET_c / mm.dia ⁻¹	Máx. ET_c / 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: Próprio autor.

Tabela 8 - Estatística descritiva 2021

Estações do ano	Mín. ET_c/ mm.dia⁻¹	Média ET_c/ mm.dia⁻¹	Máx. ET_c/ 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: Próprio autor.

Posteriormente, foram apresentados os resultados da análise do variograma com os dados da ET_c obtidos pelo algoritmo Safer nas Tabelas 9,10 e 11.

As estações e períodos com menor efeito pepita e consequentemente menor e melhor GDE foram verão de 2019, primavera de 2020 e verão de 2021. Segundo o índice de Cambardella *et al.* (1994), GDE assume valores no intervalo de 0 e 1. Sendo o valor do índice GDE menor que 0,25 a dependência espacial será forte, índices entre 0,25 e 0,75 assinala-se dependência espacial moderada e valores superiores a 0,75 apontam dependência espacial fraca. 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.

Tabela 9 - Análise geoestatística 2019

Estações do ano	Efeito pepita	Patamar	Alcance	GDE
Outono	0,16	0,89	86,67	0,18
Inverno	0,17	0,79	218,79	0,21
Primavera	0,12	0,90	269,65	0,13
Verão	0,06	0,80	108,91	0,07

GDE: Grau de dependência espacial.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 10 - Análise geoestatística 2020

Estações do ano	Efeito pepita	Patamar	Alcance	GDE
Outono	0,32	0,68	185,94	0,47
Inverno	0,42	0,58	274,86	0,72
Primavera	0,06	0,90	167,90	0,06
Verão	0,07	0,91	207,22	0,07

GDE: Grau de dependência espacial.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 11 - Análise Geoestatística 2021

Estações do ano	Efeito pepita	Patamar	Alcance	GDE
Outono	0,17	0,68	156,20	0,25
Inverno	0,09	0,86	183,75	0,10
Primavera	0,17	0,72	283,20	0,23
Verão	0,01	0,83	249,62	0,01

GDE: Grau de dependência espacial.

Fonte: Próprio autor.

Os resultados da validação cruzada dos dados da ET_c obtidos pelo algoritmo Safer foram apresentados nas Tabelas 12,13 e 14.

Foi aplicada a correlação pelo método de Pearson devido haver distribuição normal das variáveis estudadas. 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. O 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.

Tabela 12 - Validação cruzada 2019

Estações do ano	Correlação	Erro Médio
Outono	0,97	-0,01
Inverno	0,97	-0,01
Primavera	0,98	-0,01
Verão	0,98	0,00

Fonte: Próprio autor.

Tabela 13 - Validação cruzada 2020

Estações do ano	Correlação	Erro Médio
Outono	0,96	-0,07
Inverno	0,96	-0,03
Primavera	0,98	-0,02
Verão	0,97	-0,00

Fonte: Próprio autor.

Tabela 14 - Validação cruzada 2021

Estações do ano	Correlação	Erro Médio
Outono	0,97	-0,01
Inverno	0,98	0,01
Primavera	0,98	0,00
Verão	0,99	0,00

Fonte: Próprio autor.

Os resultados da SSG dos dados da ET_c obtidos pelo algoritmo Safer foram apresentados nas Tabelas 15 a 26.

As maiores evapotranspirações ocorreram nas estações de maior incidência de radiação (primavera e verão) em todos os processos. Entretanto, na estação do inverno de 2021, Apêndice A, essa métrica divergiu 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 intrinsicamente ligada a disponibilidade de água no solo.

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.

Tabela 15 - Simulação de Geoestatística Gaussiana outono 2019

SOG out. 2019	Et_c/ mm.dia⁻¹
Mín	0 - 1,91
Máx	7,31 - 12,12
Média	4,39 - 5,89

SOG: Simulação Sequencial Gaussiana; ET_c = Evapotranspiração da cultura sob condições padrão.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 16 - Simulação de Geoestatística Gaussiana inverno 2019

SOG inv. 2019	Et_c/ mm.dia⁻¹
Mín	0 - 1,37
Máx	7,03 - 11,69
Média	3,49 - 5,40

SOG: Simulação Sequencial Gaussiana; ET_c = Evapotranspiração da cultura sob condições padrão.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 17 - Simulação de Geoestatística Gaussiana primavera 2019

SOG prim. 2019	Et_c/ mm.dia⁻¹
Mín	0 - 0,24
Máx	9,79 – 22,02
Média	3,02 - 6,35

SOG: Simulação Sequencial Gaussiana; ET_c = Evapotranspiração da cultura sob condições padrão.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 18 - Simulação de Geoestatística Gaussiana verão 2019

SOG ver. 2019	Et_c/ mm.dia⁻¹
Mín	0 - 1,92
Máx	11,72 – 20,06
Média	6,26 – 9,02

SOG: Simulação Sequencial Gaussiana; ET_c = Evapotranspiração da cultura sob condições padrão.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 19 - Simulação de Geoestatística Gaussiana outono 2020

SSG out. 2020	ET_c/ mm.dia⁻¹
Mín	0 - 2,75
Máx	7,95 – 11,02
Média	5,06 - 6,62

SSG: Simulação Sequencial Gaussiana; ET_c = Evapotranspiração da cultura sob condições padrão.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 20- Simulação de Geoestatística Gaussiana inverno 2020

SSG inv. 2020	ET_c/ mm.dia⁻¹
Mín	0 - 1,97
Máx	6,20 – 9,27
Média	3,69 - 4,59

SSG: Simulação Sequencial Gaussiana; ET_c = Evapotranspiração da cultura sob condições padrão.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 21 - Simulação de Geoestatística Gaussiana primavera 2020

SSG prim. 2020	ET_c/ mm.dia⁻¹
Mín	0 - 0,85
Máx	13,24 – 32,09
Média	4,43 – 8,05

SSG: Simulação Sequencial Gaussiana; ET_c = Evapotranspiração da cultura sob condições padrão.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 22 - Simulação de Geoestatística Gaussiana verão 2020

SSG ver. 2020	ET_c/ mm.dia⁻¹
Mín	0 – 5,71
Máx	12,04 - 17,51
Média	7,87 - 10,30

SSG: Simulação Sequencial Gaussiana; ET_c = Evapotranspiração da cultura sob condições padrão.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 23 - Simulação de Geoestatística Gaussiana outono 2021

SOG out. 2021	Et_c/ mm.dia⁻¹
Mín	0 – 2,33
Máx	9,28 – 15,38
Média	5,42 - 7,65

SOG: Simulação Sequencial Gaussiana; ET_c = Evapotranspiração da cultura sob condições padrão.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 24 - Simulação de Geoestatística Gaussiana inverno 2021

SOG inv. 2021	Et_c/ mm.dia⁻¹
Mín	0 – 1,31
Máx	9,55 – 23,49
Média	3,95 - 6,40

SOG: Simulação Sequencial Gaussiana; ET_c = Evapotranspiração da cultura sob condições padrão.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 25 - Simulação de Geoestatística Gaussiana primavera 2021

SOG prim. 2021	Et_c/ mm.dia⁻¹
Mín	0 - 0,33
Máx	9,14 - 22,57
Média	2,79 - 5,61

SOG: Simulação Sequencial Gaussiana; ET_c = Evapotranspiração da cultura sob condições padrão.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 26 - Simulação de Geoestatística Gaussiana verão 2021

SOG ver. 2021	Et_c/ mm.dia⁻¹
Mín	0 – 2,74
Máx	9,50 - 17,12
Média	5,46 - 7,49

SOG: Simulação Sequencial Gaussiana; ET_c = Evapotranspiração da cultura sob condições padrão.

Fonte: Próprio autor.

5 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.

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 dos sensores remotos, enquanto o mesofilo esponjoso reflete a radiação infravermelha próxima. Portanto, áreas com maior atividade fotossintética se manifestam em imagens de satélite com baixa reflexão em comprimentos de onda vermelhos e alta reflexão em comprimentos de onda infravermelhos.

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.

REFERÊNCIAS

- ALVES, E. DA S. **Evapotranspiração atual da cultura de Soja: Modelagem e avaliação da evaporação direta da água do solo**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.
- ANDRADE, B, C. C. **Estimativa da evapotranspiração real via sensoriamento remoto**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia/ Modelagem de processos hidrológicos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- ANDRADE, F.C.M. Estimativa da Transmissividade Atmosférica para o Estado do Ceará. Conference: **XV Congresso Brasileiro de Meteorologia**, São Paulo, Brazil.
- ARRIGO, V. *et al.* Uma proposta experimental para investigar o processo de osmose em aulas de química. **Imagens da Educação**, Londrina, PR v. 7, n. 3, p. 51-62, dez. 2017.
- AVILA, V. S. **Balanço hídrico do solo e partição da evapotranspiração de soja, milho e feijão submetidos à irrigação deeficitaria no sul do Brasil**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- BASSOI, L.H. *et al.* Agricultura de precisão e agricultura digital. In: TECCOGS - **Revista Digital de Tecnologias Cognitivas**, n. 20, jul./dez. 2019, p. 17-36.
- BATISTON, E. L. Simulação sequencial gaussiana usando **latin hypercube sampling: estudo de caso minério de ferro carajás**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia / Metalurgia Extrativa e Tecnologia Mineral) - Universidade Federal Do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- BEZERRA, J.R.C. *et al.* Consumo hídrico do algodoeiro BRS 200 Marrom. **Circular técnica 129**, Campina Grande, PB, dez. 2009.
- BORATTO, I.M.P.; GOMIDE, R.L. Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE.
- BUCKERIDGE, M.S. **Comparação entre os sistemas fotossintéticos C3 e C4**. Disponível em: <https://saulcarvalho.com.br/wp-content/uploads/2016/10/sistemas-c3-c4.pdf>. Acesso em: 5 mai. 2023.
- BRITO, S. **O Espectro Eletromagnético na Natureza**. 2013. Disponível em: O Espectro Eletromagnético na Natureza. Acesso em: 12 set. 2021.
- CAMARGO, L.M. *et al.* Teor relativo de água em cultivares de soja sob três níveis de disponibilidade hídrica no solo. V Jornada Acadêmica da Embrapa Soja. Embrapa Soja. **Documentos, 323**. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/71799/1/ID-30972.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2023.

CAMBARDELLA, C. A. *et al.* Fieldscale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal Abstract**, v.58, p.1501- 1511, 1994.

CATANI, R. **Monitoramento temporal da cultura da soja através do sensoriamento remoto com a utilização de um Rpa**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Agrônômica) - Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, Pato Branco, 2018.

CAVALCANTE, E. G. S. *et al.* Variabilidade Espacial de Atributos Químicos do Solo Sob Diferentes Usos e Manejos. **R. Bras. Ci. Solo**, 31:1329-1339, 2007.

COAGUILA, D. N. *et al.* Water productivity using SAFER - Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving in watershed. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 8, p. 524–529, jun. 2017.

COLAÇO, G.O. *et al.* Conflitos de uso e ocupação do solo em áreas de preservação permanente na Sub-Bacia do Rio Pardo, SP. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**. 28 a 31 de maio de 2017, INPE, Santos - SP, Brasil.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos**, Brasília, DF, v. 9, safra 2021/22, n. 2 segundo levantamento, novembro. 2021. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: 03 dez. 2021.

COSTA. F.M; SCALON, J.D. Análise da Estrutura de Dependência Espacial em Dados de Áreas. **Rev. Bras. Biom.**, São Paulo, v.33, n.2, p.197-215, 2015.

DINIZ, R. R. S. *et al.* Evapotranspiração real da banana-nanica determinada pelo algoritmo Metric no semiárido do Ceará. **Irriga**, Botucatu, v. 26, n. 3, p. 701-716, jul./set. 2021.

EBERHARDT, I. D. R. **Estimativa em tempo quase real de área de milho e de soja no Rio Grande Do Sul, por Sensoriamento remoto e amostragem**. 2015. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 2015.

ENGESAT (Paraná) (ed.). SENTINEL-2. 2015. Disponível em: <http://www.engesat.com.br/sentinel-2/>. Acesso em: 01 set. 2021.

ESA. **Sentinel-2 User Handbook**, issue 1, rev 2015. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>. Acesso em: 5 mai. 2023

FAO. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data>. Acesso em: 15 set. 2022.

FARIAS, J.R.B. *et al.* Tipo de Crescimento. **Portal Embrapa**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/soja/pre-producao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/estadios-de-desenvolvimento/tipo-de-crescimento#:~:text=As%20cultivares%20de%20soja%20podem>. Acesso em: 3 mai. 2023.

FAUSTO, M.F. *et al.* Impacto da alteração do uso do solo no saldo de radiação no Cerrado do sul de Mato Grosso. **Rev. Ambient.** Água vol. 11 n. 2 Taubaté – abr./jun. 2016.

FERNANDES, E. DE SOUZA. **Sinergia de dados dos satélites sentinel-2 e landsat-8 para estimar evapotranspiração de áreas agrícolas na região do cerrado**. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Agrônômica) - Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Brasília, 2017.

FERNANDES, E. J.; TURCO, J. E. P. Evapotranspiração de referência para manejo da irrigação em cultura de soja. **Irriga**, Botucatu, v. 8, n. 2, p. 132-141, mai-ago, 2003.

FILHO, F.H.I. **Sensoriamento remoto para monitoramento de mosca branca, *Bemisia tabaci* biótipo B (Hemiptera: Aleyrodidae) em soja**. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências / Entomologia) - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2019.

FINAZZI, F.B. **Comparação da eficácia da adição de pontos intermediários à grade regular amostral na elaboração de mapas para agricultura de precisão**. 2011. Estágio Supervisionado (Engenharia de Biosistemas I) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

FUZZO, D. F. S. **Estimativa de evapotranspiração e produtividade da soja utilizando o método do triângulo simplificado**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola / Planejamento e Desenvolvimento Rural Sustentável) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

FRANCO, J.R. *et al.* Análise Comparativa Entre Medidas Meteorológicas da Estação Convencional e Automática da Fazenda Lageado no Município de Botucatu, São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, n. 2, 223-232, 2022.

GREGO, C.R. *et al.* Geoestatística aplicada a Agricultura de Precisão. **Agricultura de precisão: Resultados de um novo olhar**, Brasília p. 74-83, 2014.

HERNANDEZ, F. B.T. *et al.* Determining large scale actual evapotranspiration using agro-meteorological and remote sensing data in the Northwest of Sao Paulo state, Brazil. **Acta Horticulturae**, v. 1038, p. 263-270. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/167649>. Acesso em: 28 mai. 2023.

IBGE. **Sensoriamento remoto**. Disponível em: <https://atlas escolar.ibge.gov.br/conceitos-gerais/o-que-e-cartografia/sensoriamento-remoto.html#:~:text=As%20informa%C3%A7%C3%B5es%20podem%20ser%20obtidas>. Acesso em: 28 mai. 2023.

JABOINSKI, F. R. **Avaliação de produtos do sensor MODIS para aplicações na estimativa de parâmetros biofísicos da cultura da soja, no Estado do Rio Grande do Sul**. 2011. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto / Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2011.

JENSEN, J. R. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. **Pearson Education**, Glenview, Il, 4. ed., Inc, 2016.

JORGE, M.N. **Aprofundamento Radicular para a Manutenção da Abertura Estomática no Tomateiro**. 2019. Dissertação (Mestrado em Agronomia/ Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

JUNIOR, A.F.C. *et al.* Séries temporais modis aplicadas em sucessão de culturas de soja (*glycine max* (L.) Merrill) e milho (*zeamays* L.) em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Cartografia**, Nº 64/3, p. 405-418, 2012.

JUNIOR, J, A. *et.al.* Viabilidade econômica da irrigação por pivô central nas culturas de soja, milho e tomate. **Pesq. agropec. pernamb.**, Recife, 22, e201703, 2018.

JUNIOR, P. P. F. *et al.* Estimativa da evapotranspiração da soja via sensoriamento remoto no leste do Pará: uma avaliação quantitativa. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.1997.

LEIVAS, J.F. *et al.* Imagens Sentinel para obtenção de parâmetros agrometeorológicos espectrais, em área de cultivo de coqueiro anão. **Simpósio Brasileiro de geografia física aplicada**, Fortaleza – CE, 11 a 15 de junho, 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/202487/1/5107.pdf>. Acesso em: 07 ago. 2021.

LEIVAS, J.F. *et. al.* Indicadores biofísicos no Pantanal usando imagem Sentinel-2^a. **Anais 7º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal**, Jardim, MS, 20 a 24 de outubro 2018 Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 1078-1084.

LOPEZ, A.M. *et al.* **Botânica no Inverno 2013**. Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, 2012.

MACHADO, C.C. *et al.* Estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM – landsat 5 e o algoritmo Sebal no litoral sul de Pernambuco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.1, 55 - 67, 2014.

MAEHLER, A.R. *et al.* Potencial de rendimento da soja durante a ontogenia em razão da irrigação e arranjo de plantas. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 38, n. 2, p. 225-231, fev. 2003.

MAGNONI, P.H.J. *et al.* Sensoriamento Remoto Aplicado ao Manejo da Irrigação em Áreas com Escassez de Dados: Estudo de Caso em Pivô Central em Itatinga-SP. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial –Sudeste, v. 1, n. 3, p. 585-598, dezembro, 2021.

MARCHI, J.C.; PIROLI, E. L.; ZIMBACK, C.R. L. Análise temporal do uso do solo e comparação entre os índices de vegetação NDVI e SAVI no município de Santa Cruz do Rio Pardo - SP usando imagens landsat-5. **RA´E GA 21** (2011), p. 234-271, Curitiba, Departamento de Geografia – UFPR.

MENDES, R.S. **Determinação da evapotranspiração por métodos direto e indireto e dos coeficientes de cultura da soja para o Distrito Federal.** 2006. 71 f. Dissertação (Mestrado em agronomia/ Ciências agrárias) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

MENDONÇA, J.C. *et al.* Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.275-279, 2003.

MENESES, P.R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto.** Brasília, DF: UnB, CNPq, 2012.

MORAES, D.A C. **Simulação sequencial na interpolação dos dados de entrada ou saída do modelo de lixiviação do software Araquá.** 2015. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

MOTTA, J.L.G. **Subsídios à previsão de safra da soja no rio grande do Sul usando técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto.** 2002. Dissertação (Mestrado em sensoriamento remoto) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2002.

OLIVEIRA, L. M.M. *et al.* Evapotranspiração real em bacia hidrográfica do Nordeste brasileiro por meio do SEBAL e produtos MODIS. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.18, n.10, p.1039–1046, 2014.

PADIAL, P.R; NISHIMURA, P.Y. Análise do comportamento espectral da água no reservatório Guarapiranga, Rio Grande e Braço Taquacetuba do complexo Billings. **Relatório apresentado à disciplina Sistemas de Análise Geográfica para Ecologia**, São Paulo, jun. 2006.

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. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Brasília, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, 2018.

PEREIRA, V.S. **Entenda o que é Sensoriamento Remoto**. Dez. 2019. Disponível em: <https://www.austertecnologia.com/single-post/sensoriamento-remoto>. Acesso em: 15 out. 2023.

POLETO, C.A. **Modelagem geológica orientada a objetos e simulação estocástica da geometria de reservatórios fluviais**. 1996. Dissertação (Mestrado em Geoengenharia de Reservatórios) - Universidade Estadual De Campinas - Campinas, 1996.

QUARTAROLI, C. F.; BATISTELLA, M. Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto: Tutorial Básico. **Embrapa Territorial**, Campinas, n. 44, 2005. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/17526/processamento-de-imagens-de-sensoriamento-remoto-tutorial-basico>. Acesso em: 6 jun. 2023.

QUARTAROLI, C.F. *et al.* Sensoriamento remoto. **Embrapa Territorial**, 2014. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/988056/sensoriamento-remoto>. Acesso em: 5 set. 2022.

REZENDE, M.K.A. **Evapotranspiração, coeficientes de cultivo simples e dual do milho safrinha para a região de Dourados-MS**. 2016. Dissertação. (Mestrado em Agronomia) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2016.

REZENDE, P.S.; MARQUE, D.V.; ROSA, R. Uso de dados do Sentinel-2 para cálculo de NDVI com base nos valores da refletância aparente e de superfície. **Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto –SBSR**, 28 a 31 de Maio de 2017 INPE Santos - SP, Brasil.

RUHOFF, A, L. **Sensoriamento remoto aplicado à estimativa da evapotranspiração em biomas tropicais**. 2011. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SAMANEZ, C. P.*et al.* Avaliação da opção de troca de combustível no carro brasileiro flex: um estudo por região geográfica usando teoria de opções reais e simulação estocástica. **Production**, v. 24, n. 3, p. 628-643, July/Sept. 2014.

SANTOS, F.X. *et al.* Desempenho de lisímetro de pesagem hidráulica de baixo custo no semi-árido nordestino. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.28, n.1, p.115-124, jan./mar. 2008.

SÃO PAULO. **Lei n. 9.034, de 27 de dezembro de 1994**. Dispõe sobre o Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH, a ser implantado no período 1994 e 1995, em conformidade com a Lei n. 7663, de 30 de dezembro de 1991, que instituiu normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/norma/11964>. Acesso em: 18 set. 2021.

SARTORI, A.A.C. **Análise multicritérios na definição de áreas prioritárias à conectividade entre fragmentos florestais. 2010. Dissertação (Mestrado em agronomia/ Energia na Agricultura)** – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

SCHOWENGERDT, R.A. **Techniques for Image Processing in Remote Sensing.** Academic Press, New York. 1 ed. New York, EUA. Academic Press, 1983.

SENTELHAS, C.P. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática.** 1998. Dissertação (Doutorado em Agronomia / Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

SENTINEL. Portal Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/satelites-de-monitoramento/missoes/sentinel>. Acesso em: 6 jun. 2023.

SILVA, C. DE O. F. Sensoriamento Remoto Orbital para Modelagem da Evapotranspiração: Síntese Teórica e Aplicações em Computação na Nuvem. **BIOENG**, v. 15, n. 3, p. 425-468, 2021.

SILVA, C. DE O.F. *et al.* Large-Scale Spatial Modeling of Crop Coefficient and Biomass Production in Agroecosystems in Southeast Brazil. **Horticulturae**, v. 4, n. 4, p. 44, 22 nov. 2018.

SILVA, G. B. *et al.* Protocolo de campo para investigação, calibração e validação de métodos para estimativa de massa de forragem baseados em sensoriamento remoto orbital e proximal. **Comunicado técnico 133**, Embrapa, Campinas – SP, Dezembro, 2019.

SILVA, Y. F. **Uso do algoritmo SAFER para evapotranspiração real na cultura da soja.** 2018. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Ciência do solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP, Câmpus de Jaboticabal, Jaboticabal, 2018.

SOJA. **Calendário de Plantio e Colheita De Grãos no Brasil 2022.** Disponível em: <https://www.conab.gov.br/>. Acesso em: 22 jun. 2023.

SILVA, D. *et al.* **Evapotranspiração de Cultura e Real nas culturas de Soja e Trigo no Sul do Brasil.** Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/211787/1/EVAPOTRANSPIRACAO-DE-CULTURA-E-REAL-NAS-CULTURAS-DE-SOJA-E-TRIGO-NO-SUL-DO-BRASIL.pdf>. Acesso em: 3 jun. 2023.

TEIXEIRA, A. H. DE 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**, v. 2, n. 5, p. 1287–1319, mai. 2010.

TEIXEIRA, A. *et al.* Use of MODIS Images to Quantify the Radiation and Energy Balances in the Brazilian Pantanal. **Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 14597–14619, 4 nov. 2015.

TEIXEIRA, A.H. DE C. *et al.* Energy balance with Landsat images in irrigated central pivots with corn crop in the São Paulo State, Brazil. **Proc. of SPIE**, vol. 9239 92390O-2.

TEIXEIRA, A. H. DE C. *et al.* Reviewing SEBAL input parameters for assessing evapotranspiration and water productivity for the Low-Middle São Francisco River basin, Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 3-4, p. 477–490, mar. 2009.

TERAMOTO, E.D. *et al.* Séries temporais do índice NDVI na avaliação do comportamento sazonal do Aquífero Rio Claro. **Rev. Bras. de Cartografia**, vol. 70, n. 3, julho/setembro, 2018. pp. 1135-1157.

USGS. Disponível em: www.usgs.gov. Acesso em: 3 mai. 2021.

VENANCIO, L. P. *et al.* Evapotranspiration mapping of commercial corn fields in Brazil using SAFER algorithm. **Scientia Agricola**, v. 78, n. 4, 2021.

WARREN, M, S. Desmembramento de estimativas de evapotranspiração obtidas por sensoriamento remoto nas componentes de evaporação e transpiração vegetal. **Revista Brasileira de Geografia Física**, 02 (2012) 361-373.

WARREN, M, S. **Metodologia para a construção de séries temporais de evapotranspiração por técnicas de sensoriamento remoto**. 2011. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

APÊNDICE A – Mapas de evapotranspiração

