



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA – PPGMET

KLEYMERSON PEREIRA LINS

**Estimativa da Evapotranspiração Real em Região Semiárida, utilizando o algoritmo
SAFER**

Maceió
2023

KLEYMERSON PEREIRA LINS

**Estimativa da Evapotranspiração Real em Região Semiárida, utilizando o algoritmo
SAFER**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Heliofábio Barros Gomes

Coorientadora: Prof^ª. Dra. Maria Luciene Dias de Melo

Maceió

2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

L759e Lins, Kleymerson Pereira.
Estimativa da evapotranspiração real em região semiárida, utilizando o algoritmo SAFER / Kleymerson Pereira Lins. – 2023.
56 f. : il.

Orientador: Heliofábio Barros Gomes.
Co-orientadora: Maria Luciene Dias de Melo.
Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Alagoas.
Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió, 2023.

Bibliografia: f. 53-56.

1. Sensoriamento remoto. 2. LANDSAT (Satélites). 3. QGIS (Software). I. Título.

CDU: 528.8



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

CERTIFICADO DE APRESENTAÇÃO

N.º de ordem: MET-UFAL-MS-199.

***“ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO REAL EM REGIÃO SEMIÁRIDA,
UTILIZANDO O ALGORITMO SAFER.”***

KLEYMERSON PEREIRA LINS

Dissertação submetida ao colegiado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas - UFAL, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia.

Aprovado pela Banca Examinadora composta por:

Documento assinado digitalmente
gov.br HELIOFABIO BARROS GOMES
Data: 28/02/2023 15:34:29-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Heliofabio Barros Gomes
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
gov.br MARIA LUCIENE DIAS DE MELO
Data: 28/02/2023 13:48:31-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof^ª. Dr^a. Maria Luciene Dias de Melo
(Coorientadora)

Documento assinado digitalmente
gov.br FABRICIO DANIEL DOS SANTOS SILVA
Data: 01/03/2023 13:21:33-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Fabrício Daniel dos Santos Silva
(Membro Interno)

Documento assinado digitalmente
gov.br JANNAYLTON EVERTON OLIVEIRA SANTOS
Data: 28/02/2023 19:03:56-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Jannaylton Éverson Oliveira Santos
(Membro Externo)

FEVEREIRO/2023

Dedico

As minhas Marias: Luíza e Cecília e a Marília,
que me impulsionam a continuar sempre e
nunca desistir.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo, sempre.

A minhas filhas, Maria Luiza e Maria Cecília.

À Marília, minha amada companheira, que caminhou comigo desde o início, e sua família.

À Genilda, minha mãe e maior incentivadora.

À Regina, minha avó, inspiração de coragem e disposição.

A Genilson, meu pai, pelo apoio de sempre.

A Kleydson, Maria Clara e Kleyferson, irmão e sobrinhos, por tudo.

A todos os familiares que formam minha rede de apoio, em especial aos primos: Marcos Kleyton e Fernando Kléber (*in memoriam*).

A Fabrício, Jairo, Matheus, André Alécio e todos os amigos por eles representados.

À Ufal, ao ICAT e a todos os seus colaboradores, sobretudo ao professor Ricardo Amorim e meus orientadores, professor Heliofábio e professora Maria Luciene, pela oportunidade e auxílio.

Aos professores Fabrício e Jannaylton, por suas contribuições e sugestões.

E um agradecimento especial aos professores Alejandro C. Frery, José Vieira e Marcelo, por me encorajarem e incentivarem a iniciar a jornada até aqui, por enquanto...

RESUMO

Os efeitos das mudanças climáticas globais são diversos, desde o aumento da poluição, desmatamento, até a escassez hídrica e de alimentos. Nesse sentido, torna-se indispensável o uso de técnicas para estimar a quantidade de água necessária ao desenvolvimento de culturas agrícolas. Diante disso, o objetivo principal deste trabalho é utilizar técnicas de sensoriamento remoto e o algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) na estimativa da evapotranspiração para a região centro-norte do estado de Pernambuco e sudoeste da Paraíba. Trata-se de uma área semiárida, excetuando-se o município de Triunfo (PE), caracterizado como brejo de altitude. Para estimativa, utilizou-se dados de superfície da estação meteorológica de Serra Talhada (PE), pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), bem como imagens do satélite Landsat8. Em posse dos dados observados calculou-se a Evapotranspiração de referência, por meio do método Penman-Monteith (PM), necessária para o cálculo da Evapotranspiração Real SAFER. Utilizando o Software QGIS, foram feitos mosaicos com as imagens dos quadrantes 216/065 e 216/066 e o recorte da região de interesse, com raio de 50 Km, partindo da estação meteorológica. Após processamento e análise das imagens, foram selecionadas quatro datas para o estudo, as quais são referenciadas no texto pela estação do ano, para melhor compreender suas diferenças: 02/01/2014 (verão), 26/05/2014 (outono), 18/07/2016 (inverno) e 05/11/2015 (primavera). Analisou-se as variáveis estimadas pelo SAFER: albedo, temperatura da superfície e índice de vegetação por diferença normalizada (do inglês *Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI). Os resultados obtidos para o albedo mostraram maiores valores para primavera, estação mais quente e seca analisada, e menores para o outono, período mais chuvoso. Esses resultados estão de acordo com os de NDVI, que têm relação inversa com o albedo. Valores maiores de NDVI foram estimados no período chuvoso, enquanto menores índices foram encontrados para a estação mais seca, para a qual a vegetação se encontra menos robusta. Também corroboram os resultados para temperatura à superfície (T_s), que sugerem temperaturas maiores durante a primavera, quando comparadas ao outono. Confrontando as estimativas da T_s média da área de estudo com os dados observados na estação de Serra Talhada, verificou-se que ocorreu uma superestimativa da variável, com maior diferença na primavera, enquanto para o outono a T_s foi subestimada. Quanto à estimativa da evapotranspiração real pelo SAFER, verificou-se que o valor médio foi maior no outono, período com maior índice de precipitação, e menor na primavera, período quente e com disponibilidade hídrica inferior. Posteriormente, fez-se uma análise para uma área menor, de 750 metros por 750 metros, com a estação meteorológica ao centro, e foram analisadas as variáveis para verificar se uma área mais homogênea apresentaria resultados adversos comparados aos anteriores. Os resultados mostraram estimativas um pouco diferentes, no entanto, dentro do desvio padrão. Comparando as estimativas da evapotranspiração do SAFER com os dados coletados na estação, realizou-se o cálculo do quociente da $ET_{R\text{ SAFER}}$ e do KC_{SAFER} (fração evapotranspirativa SAFER) para a área original do estudo; quociente da $ET_{R\text{ SAFER}}$ e KC_{SAFER} para a área menor; e $ET_{R\text{ SAFER}}$ do recorte e KC_{SAFER} da área total, verificando-se que os valores da $ET_{R\text{ SAFER}}$ são próximos da $ET_{0\text{ PM}}$, devido à dependência da $ET_{0\text{ PM}}$ para a estimativa pelo SAFER. Maiores diferenças ocorrem quando se utiliza o valor da $ET_{R\text{ SAFER}}$ da área recortada e o KC_{SAFER} da área total, com maiores variações no outono e primavera, devido a dependência da temperatura à superfície na estimativa da evapotranspiração. Concluiu-se que o SAFER, mesmo tendo sido desenvolvido para estimativa da ET para culturas, é eficiente para estimativa em áreas heterogêneas, podendo ser utilizado como ferramenta no auxílio do manejo da irrigação em diferentes áreas.

Palavras-Chave: Sensoriamento Remoto, Landsat, Semiárido, QGIS.

ABSTRACT

The effects of global climate change are diverse, such as increased pollution, deforestation, to water and food shortages. In this sense, it is essential to use techniques to estimate the amount of water needed for the development of agricultural crops. Therefore, the main objective of this work is using remote sensing techniques and the SAFER algorithm (Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving) to estimate evapotranspiration for the central-north region of the state of Pernambuco and southwest of Paraíba. It is a semi-arid area, except for the city of Triunfo (PE), characterized as an altitude swamp. For estimation, was used surface data from the meteorological station of Serra Talhada (PE), belonging to the National Institute of Meteorology (INMET), as well as images from the Landsat8 satellite. From the observed data, the reference evapotranspiration was calculated using the Penman-Monteith (PM) method, necessary for the calculation of the Real SAFER evapotranspiration. Using the QGIS Software, mosaics were made with the images of the quadrants 216/065 and 216/066 and the clipping of the region of interest, with a radius of 50 km, starting from the meteorological station. After processing and analyzing the images, four dates were selected for the study, which are referenced in the text by the season of the year, to better understand their differences: 01/02/2014 (summer), 05/26/2014 (autumn), 07/18/2016 (winter) and 11/05/2015 (spring). The variables estimated by SAFER were analyzed: albedo, surface temperature and Normalized Difference Vegetation Index - NDVI. The results obtained for the albedo showed higher values for spring, the hottest and driest season analyzed, and lower values for autumn, the wettest period. These results are in agreement with those of NDVI, which are inversely related to albedo. Higher NDVI values were estimated in the rainy season, while lower indices were found for the driest season, for which the vegetation is less robust. They also corroborate the results for surface temperature (T_S), which suggest higher temperatures during spring when compared to autumn. Comparing the estimates of the average T_S of the study area with the data observed at the Serra Talhada station, it was verified that there was an overestimation of the variable, with a greater difference in spring, while for autumn the T_S was underestimated. As for the estimation of real evapotranspiration by SAFER, it was verified that the average value was higher in autumn, period with higher precipitation index, and lower in spring, hot period and with lower water availability. Subsequently, an analysis was carried out for a smaller area, measuring 750 meters by 750 meters, with the meteorological station in the center, and the variables were analyzed to verify whether a more homogeneous area would present adverse results compared to the previous ones. The results showed slightly different estimates, however, within the standard deviation. Comparing the SAFER evapotranspiration estimates with the data collected at the station, the $ET_{R\text{ SAFER}}$ and KC_{SAFER} (SAFER evapotranspiration fraction) quotient was calculated for the original study area; quotient of $ET_{R\text{ SAFER}}$ and KC_{SAFER} for the smaller area; and $ET_{R\text{ SAFER}}$ from the clipping and KC_{SAFER} from the total area, verifying that the values of $ET_{R\text{ SAFER}}$ are close to $ET_{0\text{ PM}}$, due to dependence from $ET_{0\text{ PM}}$ to estimate by SAFER. Greater differences occur when using the $ET_{R\text{ SAFER}}$ value of the clipped area and the KC_{SAFER} of the total area, with greater variations in autumn and spring, due to the dependence of surface temperature on the evapotranspiration estimate. It was concluded that SAFER, even though it was developed to estimate ET for crops, is efficient for estimating in heterogeneous areas, and can be used as a tool to aid irrigation management in different areas.

Keywords: Remote Sensing, Landsat, Semiarid, QGIS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema típico de sensoriamento remoto.....	18
Figura 2 – Missões Landsat.....	19
Figura 3 – Localização da área de estudo.....	25
Figura 4 – Cobertura total da área de estudo, formada por duas cenas	27
Figura 5 – Fluxograma do modelo SAFER.....	31
Figura 6 – Composição RGB para os dias 02/01/2014 (a), 25/05/2014 (b), 18/07/2016 (c) e 05/11/2015 (d).	33
Figura 7 – Albedo estimado pelo algoritmo SAFER para os dias 02/01/2014 (a), 25/05/2014 (b), 18/07/2016 (c) e 05/11/2015 (d).	37
Figura 8 – NDVI obtidos para os dias 02/01/2014 (a), 25/05/2014 (b), 18/07/2016 (c) e 05/11/2015 (d).	38
Figura 9 – Temperatura de superfície obtidas para os dias 02/01/2014 (a), 25/05/2014 (b), 18/07/2016 (c) e 05/11/2015 (d).....	39
Figura 10 – Evapotranspiração Real obtida com o algoritmo SAFER, para os dias 02/01/2014 (a), 25/05/2014 (b), 18/07/2016 (c) e 05/11/2015 (d).....	40
Figura 11 – Recorte da área total de 750 x 750m (0,563 km ²), com a estação meteorológica (A350 - Serra Talhada - PE) ao centro	41
Figura 12 – Albedo da área de estudo de caso, para os dias 02/01/2014 (a), 25/05/2014 (b), 18/07/2016 (c) e 05/11/2015 (d).....	42
Figura 13 – NDVI da área de estudo de caso, para os dias 02/01/2014 (a), 25/05/2014 (b), 18/07/2016 (c) e 05/11/2015 (d).....	44
Figura 14 – Temperatura de superfície da área de estudo de caso, para os dias 02/01/2014 (a), 25/05/2014 (b), 18/07/2016 (c) e 05/11/2015 (d).....	46
Figura 15 – Evapotranspiração real da área de estudo de caso, obtida com o algoritmo SAFER, para os dias 02/01/2014 (a), 25/05/2014 (b), 18/07/2016 (c) e 05/11/2015 (d).	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais características do Landsat 8	19
Tabela 2 – Características dos sensores do Landsat 8	19
Tabela 3 – Municípios e a área coberta pela região de estudo, destacando Serra Talhada - PE, onde fica localizada a estação meteorológica, local da coleta de dados.....	26
Tabela 4 – Cenas selecionadas para a área de estudo.....	28
Tabela 5 – Cenas selecionadas para a área de estudo.....	28
Tabela 6 – Dados diários obtidos pela estação meteorológica.	34
Tabela 7 – Dados diários obtidos pelo algoritmo SAFER.....	35
Tabela 8 – Classificação do tipo de solo da área recortada 750 metros x 750 metros	41
Tabela 9 – Albedo da área de estudo de caso	43
Tabela 10 – NDVI da área de estudo de caso	43
Tabela 11 – Temperatura de superfície da área de estudo de caso	45
Tabela 12 – Evapotranspiração real da área de estudo de caso, obtida com o algoritmo SAFER	48
Tabela 13 – Valores da Evapotranspiração de referência da estação de Serra Talhada, quociente da evapotranspiração estimada pelo SAFER (<i>ETR SAFER</i>) para área total e do <i>KCSAFER</i> da área total; quociente da <i>ETR SAFER</i> do recorte e o <i>KCSAFER</i> do recorte; e <i>ETR SAFER</i> do recorte e o <i>KCSAFER</i> da área total; representativos das quatro estações do ano	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- SAFER – *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* ou Algoritmo simples para a recuperação da evapotranspiração
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
- QGIS – *QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project.*
- NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index*
- T_s – Temperatura de superfície
- LST – *Land Surface Temperature*
- $ET_{R\ SAFER}$ – Evapotranspiração Real calculada pelo SAFER
- KC_{SAFER} – Equivalente à fração evapotranspirativa calculada pelo SAFER
- $ET_{0\ PM}$ – Evapotranspiração de Referência calculada pelo método *Penman-Monteith* (PM)
- FAO – *Food and Agriculture Organization*
- ET_R – Evapotranspiração real
- NEB – Nordeste do Brasil
- ERTS-1 – *Earth Resources Technology Satellite*
- OLI – *Operational Land Imager*
- TIRS – *Thermal Infrared Sensor*
- REM – Radiação eletromagnética
- NASA – *National Aeronautics and Space Administration* – Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço
- MSS – *Multispectral Scanner System*, ou Sistemas de Varreduras Multiespectrais
- RBV – *Return Beam Vidicon*
- LWIR – *Long-Wavelength Infrared infravermelho*
- ET_0 – Evapotranspiração de Referência
- ET_p – Evapotranspiração Potencial
- ET_R – Evapotranspiração Atual ou Real (
- ET – Evapotranspiração
- HS – *Hargreaves-Samani*
- RUE – *Radiation Use Efficiency*
- MODIS – *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*
- BIO – Biomassa
- DOY – *Day of Year* – Dia do ano
- SCP – *Semi-Automatic Classification Plugin*

R_S – Radiação solar global

Prec – Precipitação

R_N – Saldo de radiação

RGB – *Red green blue* ou Vermelho Verde Azul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos Específicos	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 Sensoriamento Remoto.....	17
3.2 LANDSAT	18
3.3 Evapotranspiração	20
3.4 SAFER.....	22
4 METODOLOGIA.....	25
4.1 Área de Estudo	25
4.2 Dados	27
4.2.1 Dados Orbitais	27
4.2.2 Dados de Superfície.....	28
4.2.3 Seleção e Processamento dos Dados	28
4.3 Softwares	29
4.4 SAFER.....	29
4.5 Desenvolvimento da Pesquisa	31
5 RESULTADOS	33
5.1 Dados Médios Para Estação de Serra Talhada (PE).....	34
5.2 Albedo à Superfície	36
5.3 NDVI.....	37
5.4 Temperatura de Superfície.....	38
5.5 Evapotranspiração Real	39
5.6 Estudo de Caso	40
5.6.1 Área do Estudo de Caso	40

5.6.2 Albedo	42
5.6.3 NDVI	43
5.6.4 Temperatura de Superfície.....	44
5.6.5 Evapotranspiração Real	46
6 CONCLUSÕES	50
7 TRABALHOS FUTUROS	52
REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

As mudanças e variabilidades climáticas, assuntos mundialmente discutidos na atualidade, são de extrema importância para todo o globo. Em algumas regiões, esses efeitos se intensificam, como no caso da região semiárida do nordeste brasileiro. Diferentes áreas do conhecimento desenvolvem estudos e pesquisas para monitorar os impactos e minimizar os riscos dos problemas causados (GOMES; ZANELLA, 2022).

Nesse sentido, com o avanço tecnológico e a disponibilidade de imagens de satélites de forma gratuita, o sensoriamento remoto se tornou uma importante ferramenta no monitoramento do avanço do desmatamento, queimadas e também aplicável em diversas áreas, a exemplo de sua utilização na agricultura, através de desenvolvimento e pesquisa de produtos agrometeorológicos. Dessa maneira, pesquisas sobre a aplicação de algoritmos para o cálculo da disponibilidade de água no solo e necessidade de irrigação são cada vez mais relevantes. Estes fenômenos compõem a evapotranspiração, um componente importante do ciclo hidrológico, já que é responsável pelo retorno da água precipitada à atmosfera e, portanto, regula a disponibilidade hídrica, seja em ambientes naturais ou a partir de atividades antrópicas, tais como cultivos agrícolas (BERTONI, 2014). Não obstante, métodos tradicionais de medição pontual desta variável, que não são, necessariamente, representativos de uma grande área, são ineficientes em escalas regionais devido à grande variabilidade espaço-temporal, assim como alto custo operacional (SILVA; TEIXEIRA; MANZIONE, 2019).

Para o cálculo da Evapotranspiração, utiliza-se o método indicado pela *Food and Agriculture Organization* (FAO), das Nações Unidas, no boletim FAO56, que aplica o algoritmo de *Penman-Monteith* (PM) (ALLEN et al., 1998). Nesse método, faz-se necessário a coleta de diversas variáveis meteorológicas, tais como temperatura (°C), umidade relativa (%), velocidade do vento (m/s), pressão atmosférica (mB) e radiação global (kJ/m²) em estação meteorológica. Outra forma mais precisa para obtenção da evapotranspiração é através da utilização de equipamentos específicos, como os lisímetros, que precisam ser instalados em condições ideais, as quais nem sempre podem ser reproduzidas. Aliado a tudo isso, o alto custo e a complexidade de propagar o uso desses equipamentos de maneira rápida e escalável na região semiárida torna a determinação da evapotranspiração através de técnicas que utilizam sensoriamento remoto uma saída viável para a determinação desta medida.

Por conseguinte, o uso de imagens de satélite gratuitas permite estimar a Evapotranspiração Real (ET_R) – definida como a quantidade de água transferida para a

atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais ou existentes de fatores atmosféricos e umidade do solo (MATZENAUER, 1992) –, e conseqüentemente, o déficit hídrico de uma região ou cultura. Partindo dessa abordagem, verifica-se a necessidade de desenvolver pesquisas em regiões como as do semiárido no Nordeste do Brasil (NEB).

Outra vantagem do sensoriamento remoto, fato pelo qual hoje é tão explorado, é poder integrar informações pontuais ou de áreas com diferentes resoluções espaciais e temporais, possibilitando o monitoramento e acompanhamento de fenômenos diversos, como focos de queimadas, desmatamento, alterações no uso do solo e/ou recursos hídricos.

Um grande avanço do sensoriamento remoto ocorreu em 1972, com o lançamento do *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS-1), posteriormente renomeado Landsat, satélite pioneiro em estudos dos recursos terrestres (BAPTISTA, 2021). Em 2013 entrou em funcionamento o Landsat 8, fornecendo cobertura periódica de todo globo com resolução espacial de 30 m e novos sensores de imageamento (SILVA, 2018).

Nesse contexto, têm ganho relevância pesquisas que empregam imagens de satélites gratuitas e softwares livres, por ser uma metodologia eficiente e acessível. Deste modo, neste trabalho foi aplicado o *Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving* – SAFER – para o cálculo da evapotranspiração real, possibilitando a avaliação, de forma remota, dos impactos de mudança/variabilidade climática e escassez hídrica na região, além de utilizá-lo usado como forma de complementar as informações de áreas com deficiência nas medições de dados observados. Vale ressaltar que, em períodos secos, os sensores passivos (como os utilizados na pesquisa) oferecem maior qualidade nos dados comparados aos períodos chuvosos, em virtude da menor cobertura de nuvens. Os resultados seriam importantes para estabelecer métodos mais eficientes de utilização da água e facilitar a replicação de tais processos (Teixeira et al., 2021).

De posse desse ferramental e sabendo-se da necessidade de maior eficiência no uso da água para região semiárida, a estimativa da ET_R através de imagens de satélite Landsat 8 é uma boa alternativa, para melhor conhecimento climatológico, manejo do solo, na gestão de lavouras agrícolas e gerenciamento de potenciais riscos climáticos na sua produção. Todavia, dados coletados em superfície, por meio de estações meteorológicas, são necessários a fim de validar os dados de satélite.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Estimar a evapotranspiração real (ET_R), utilizando o algoritmo SAFER, para a região de Serra Talhada – PE, com imagens do satélite Landsat 8 OLI/TIRS.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar componentes derivados dos balanços de radiação e energia, que compõem o algoritmo SAFER;
- Identificar o comportamento da evapotranspiração real calculada em áreas com características diferentes no uso e cobertura do solo, como: Caatinga, agricultura, solo exposto e área urbana.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Sensoriamento Remoto

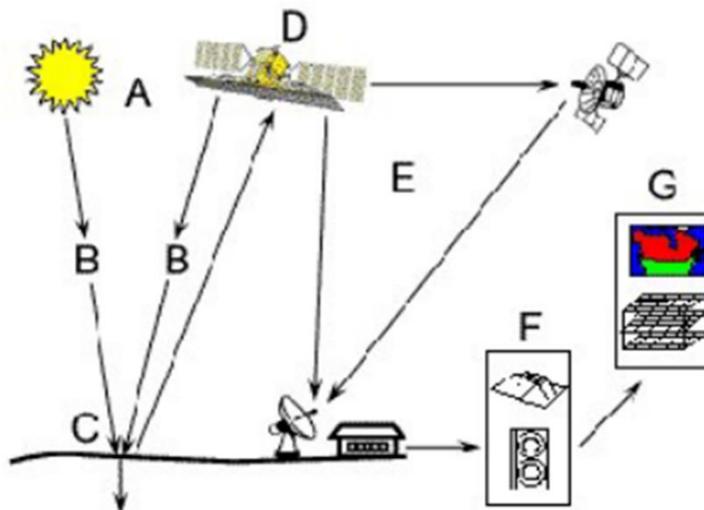
O Sensoriamento Remoto, de acordo com Almeida e Maia (2021), é uma técnica que, através da análise da radiação refletida pela superfície terrestre, permite obter informações a respeito de um objeto sem contato direto com ele. Este processo se define por três fenômenos distintos, um de absorção, outro de transmissão e um último de reflexo sobre o objeto. Por ser uma ciência abrangente, o sensoriamento remoto pode ser utilizado como ferramenta em diversas áreas, como monitoramento de uso e cobertura do solo, recursos naturais, precipitação, estudo das mudanças climáticas, entre outros.

Por ser capaz de fornecer dados de observação com frequência temporal elevada e alta resolução espacial, o sensoriamento remoto pode ser usado como forma de complementar as informações de áreas com deficiência nas medições de dados em campo. Além disso, a partir de imagens orbitais, possibilita o monitoramento eficiente de recursos naturais ao redor do mundo, tornando-se uma ferramenta de grande valia, inclusive no gerenciamento de desastres e planejamento urbano (ALMEIDA; MAIA, 2021; SILVA, 2018).

No Brasil, o uso do Sensoriamento Remoto teve início na década de 1940, empregando-o em estudos da vegetação, por meio de imagens, para a produção de mapas. Ainda na análise de vegetação, pode-se destacar o projeto Radambrasil, desenvolvido em meados dos anos 1970, cujo objetivo foi a representação espacial de classes de cobertura vegetal no território brasileiro (SILVA, 2018).

O lançamento do *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS-1), em 23 de julho de 1972, é considerado o evento mais significativo para o sensoriamento remoto, por se tratar de um satélite pioneiro para o estudo dos recursos terrestres. Posteriormente, o programa ERTS foi renomeado para Landsat (BAPTISTA, 2021). Na Figura 1 é apresentado um diagrama simplificado de um sistema de sensoriamento remoto.

Figura 1 – Sistema típico de sensoriamento remoto



O sistema possui sete componentes: fonte de radiação eletromagnética (REM) (A); a interação da REM com a atmosfera (B); a interação da REM com os alvos na superfície (C); o sistema sensor (D); a transmissão de dados (E); recepção e processamento dos dados (F); processamento de dados, análise e aplicação (G).

Fonte: Adaptado de Baptista (2021).

3.2 LANDSAT

Os departamentos do Interior e Agricultura, juntamente com a *National Aeronautics and Space Administration* – NASA, envidaram esforços para desenvolver e lançar o primeiro satélite civil de observação da terra. O objetivo traçado foi cumprido em 23 de julho de 1972, com o lançamento do satélite ERTS-1, posteriormente chamado de Landsat 1. Os satélites Landsat 1 a 3 eram portados com dois sistemas sensores: o MSS (*Multispectral Scanner System*, ou Sistemas de Varreduras Multiespectrais) e o RBV (*Return Beam Vidicon*) (BAPTISTA, 2021; BRASIL, 2021).

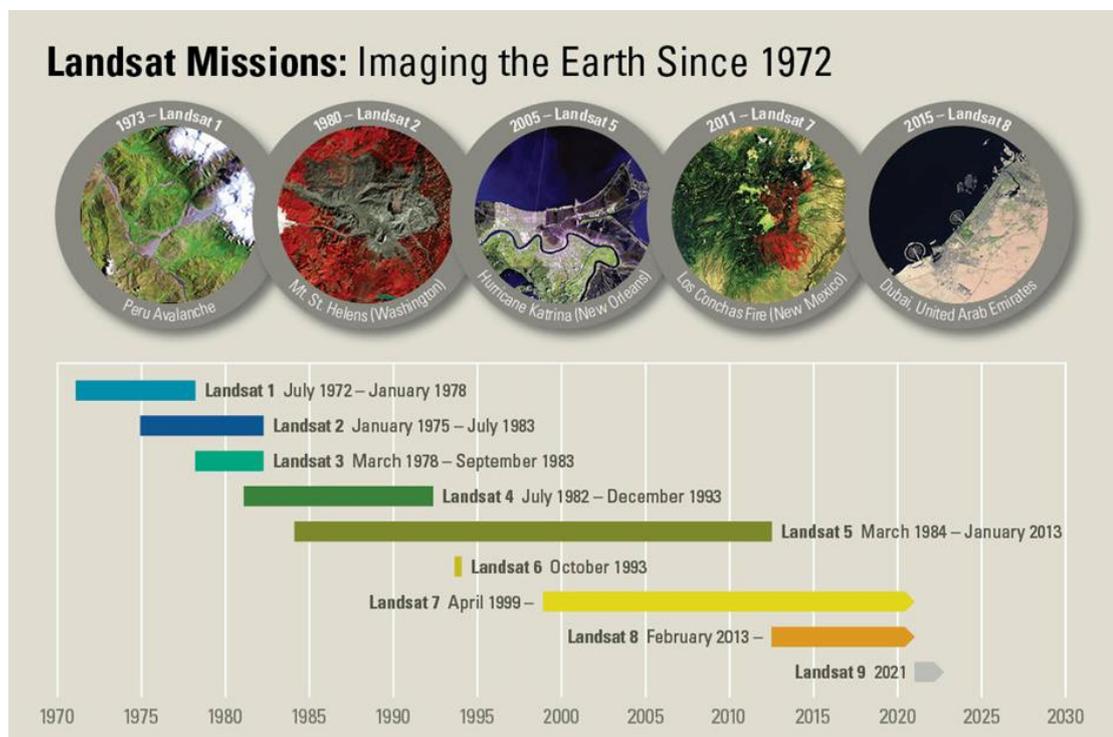
O oitavo satélite da constelação, Landsat 8, entrou em funcionamento em 2013, recebendo dois novos sensores: o *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Além disso, fornece cobertura periódica do globo terrestre, com resolução espacial de 30 metros no espectro do visível, 100 metros no térmico e 15 metros no pancromático, adquirindo, diariamente, 550 cenas com suas 11 bandas espectrais (SILVA, 2018). Esse satélite realiza varredura em praticamente todo o globo, excetuando-se algumas áreas das altas latitudes polares. Possui cenas de aproximadamente 170 quilômetros ao Norte – Sul e 183 quilômetros a Leste – Oeste, revisitando a cada 16 dias o setor imageado (MARTINS, 2019).

A Tabela 1 traz as principais características do satélite Landsat 8, enquanto a Figura 2 exhibe a linha do tempo do lançamento da constelação. A Tabela 2, por sua vez, apresenta maiores detalhes a respeito dos sensores instalados no Landsat 8.

Tabela 1 – Principais características do Landsat 8

Satélite	Landsat 8
Altitude	705 km
Período de Revisita	16 dias
Tempo de vida projetado	5 anos
Instrumentos Sensores	OLI e TIRS

Fonte: Adaptado de Brail (2021).

Figura 2 – Missões Landsat

Fonte: Estados Unidos da América (2021).

Tabela 2 – Características dos sensores do Landsat 8

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral (μm)	Resolução Espacial (m)	Resolução Temporal (dias)	Área Imageada (km)	Resolução Radiométrica (bits)
OLI	B1 - Costal	0.433 - 0.453	30 m	16 dias	185 km	12 bits
	B2 - Azul	0.450 - 0.515				
	B3 - Verde	0.525 - 0.600				
	B4 - Vermelho	0.630 - 0.680				

Sensor	Bandas Espectrais	Resolução Espectral (μm)	Resolução Espacial (m)	Resolução Temporal (dias)	Área Imageada (km)	Resolução Radiométrica (bits)	
	B5 - Infravermelho próximo	0.845 - 0.885					
	B6 - Infravermelho médio	1.560 - 1.660					
	B7 - Infravermelho médio	2.100 - 2.300					
	B8 - Pancromático	0.500 - 0.680					15 m
	B9 - Cirrus	1.360 - 1.390					30 m
TIRS	B10 - LWIR - 1	10.30 - 11.30	100 m				
	B11 - LWIR - 2	11.50 - 12.50					

Fonte: Adaptado de Brasil (2021).

3.3 Evapotranspiração

Agrometeorologia é a área que estuda a relação entre os parâmetros meteorológicos e climáticos com as culturas agrícolas e seus impactos no desenvolvimento das plantas e na produtividade (LEIVAS; TEIXEIRA; ANDRADE, 2014). A junção dos processos de transpiração e de evaporação numa superfície vegetada, por sua vez, denomina-se Evapotranspiração, que consiste no processo pelo qual o vapor d'água é transferido da superfície terrestre para a atmosfera, através da combinação de evaporação a partir do solo e da transpiração das plantas. É um importante componente do ciclo hidrológico e a estimativa precisa da *ET* é um fator crítico para entender o gerenciamento de recursos hídricos, agricultura e ecossistemas ecológicos. É expressa, na maioria dos casos, em milímetros (mm) por unidade de tempo, podendo ser hora, dia, mês ou ciclo da cultura.

Dentre os tipos de evapotranspiração elencados por Leivas, Teixeira e Andrade (2014) estão:

- A Evapotranspiração de Referência (ET_0) – é a taxa de transferência de vapor d'água para a atmosfera, utilizando uma situação hipotética e condições ideais, ou seja, recoberta por grama, sem limitação hídrica em toda a área do solo;
- A Evapotranspiração Potencial (ET_P) – é a taxa de transferência de vapor d'água, com condições hídricas e fitossanitárias ideais, representando o potencial produtivo e uma determinada condição climática;
- A Evapotranspiração Atual ou Real (ET_R) – é a taxa de transferência de vapor d'água em situação real, independente de quaisquer fatores.

Diversos são os métodos para se calcular a ET_0 (estima-se a existência de cerca de 50 métodos), os quais exigem informações meteorológicas distintas gerando, normalmente, resultados inconsistentes. É extremamente importante saber a adequabilidade do método a ser utilizado para cada região estudada (LEIVAS; TEIXEIRA; ANDRADE, 2014; CABRAL JÚNIOR, 2015). Dentre os métodos disponíveis, pode-se citar alguns:

- Método *Penman-Monteith*: Este método é amplamente utilizado e tido como método padrão para a estimativa da ET . É baseado no princípio do balanço energético e considera radiação "difusa", fluxo de calor do solo e calor sensível, bem como o déficit de pressão e a velocidade do vento. Esse método requer dados de variáveis meteorológicas como temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar e fluxo de calor no solo. O *Penman-Monteith* surgiu em 1990 como uma proposta nova e revolucionária nos estudos relacionados a evapotranspiração, sendo o método estabelecido para estimar a Evapotranspiração de Referência (ET_0), pela FAO, no boletim FAO56 (ALLEN et al., 1998; CABRAL JÚNIOR, 2015).
- Método *Hargreaves-Samani*: Este método usa apenas dados de temperatura para estimar ET . É baseado em assumir que a taxa da ET em relação à evapotranspiração de referência (ET_0) é a mesma para uma dada localidade, e usa uma equação de regressão para estimar ET_0 baseando-se na temperatura (LIMA JUNIOR; ARRAES; OLIVEIRA; NASCIMENTO; MACÊDO, 2016).
- Método *Shuttleworth-Wallace*: Este método é baseado na medida da temperatura superficial para estimar ET . Utiliza uma combinação das equações de balanço energético e sensoriamento remoto por satélite para estimar o fluxo superficial de energia e ET (LAFLEUR; ROUSE, 1990; YAN et al., 2022).

Em geral, os algoritmos de estimativa da ET usam dados meteorológicos e de sensoriamento remoto, assim como relações empíricas ou fisicamente baseadas, para estimar

os componentes do balanço energético ao nível da superfície terrestre. A precisão das estimativas pode depender da qualidade dos dados de entrada, a complexidade do algoritmo e de condições específicas da área estudada. Entre os algoritmos existentes para se estimar e calcular a evapotranspiração, está o SAFER – *Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving* –, que é utilizado neste trabalho.

Ao utilizar o Sensoriamento Remoto, é possível obter os valores de evapotranspiração a partir de imagens de satélite, efetuando os cálculos das radiações espectrais refletidas e emitidas em conjunto com dados de estações meteorológicas. Assim, basicamente, é possível se chegar aos valores de albedo e temperatura da superfície e do Índice de Vegetação Normalizada (NDVI, do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*) (LEIVAS; TEIXEIRA; ANDRADE, 2014; CABRAL JÚNIOR, 2015).

O NDVI é utilizado para monitorar mudanças sazonais do desenvolvimento da vegetação e está relacionado à cobertura vegetal – valor de biomassa, área foliar, cobertura do solo e rendimento agrícola (ANTUNES; ASSAD; BATISTA, 1993). Trata-se de uma variável sensível à variação das condições hídricas, como a ocorrência de chuva próximo à passagem do satélite. Apresenta valores que variam entre -1 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, mais densa é a vegetação; e abaixo de zero indica superfície não vegetada (SILVA, 2018).

3.4 SAFER

O *Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving* – SAFER – é um algoritmo desenvolvido de forma a simplificar a estimativa de evapotranspiração, utilizando parâmetros derivados de sensoriamento remoto (TEIXEIRA et al., 2015). O SAFER se baseia na equação de Penman-Monteith para obter a evapotranspiração real (ET_R), sendo um algoritmo de simples aplicação, que necessita apenas dos dados de evapotranspiração de referência (ET_0), radiação global (R_g) e temperatura média do ar (T_a), obtidos através de estações meteorológicas (TEIXEIRA et al., 2016). Juntamente com os parâmetros obtidos por sensoriamento remoto e do balanço de energia, chega-se à evapotranspiração real (ET_R), que pode ser utilizada como ferramenta no auxílio do manejo da irrigação em diferentes culturas, ao se definir a relação ET_R/ET_0 , ou coeficiente de cultura atual (FEITOSA, 2014; ALMEIDA; MAIA, 2021).

Santos (2019) validou o desempenho do SAFER na estimativa da evapotranspiração da superfície ($ET_{R\text{ SAFER}}$). Os resultados para respostas da $ET_{R\text{ SAFER}}$, a partir dos cálculos de ET_0 estimadas pelos métodos de *Hargreaves-Samani* (HS) e *Penman-Monteith* (PM), mostraram

que a R_S foi o parâmetro que mais afetou a ET_0 e consequentemente a $ET_{R\text{ SAFER}}$. Santos (2019) também não recomendou o uso da ET_0 obtida pelo método de HS, para cálculo da $ET_{R\text{ SAFER}}$ em regiões semiáridas. Mostrou também que o SAFER sem a banda termal subestimou os valores de $ET_{R\text{ SAFER}}$, biomassa e produtividade de água, entretanto, esses valores apresentaram boa correlação com os valores padrões.

Furquim et al. (2020) utilizaram o modelo SAFER para estimativa da evapotranspiração real e outras variáveis para região do Cerrado. Os resultados sugerem valores de ET_R maiores que a média no tratamento integração pecuária-floresta e menor que a média no tratamento pastagem degradada. Porém, o tratamento pastagem degradada teve a menor variabilidade ($0,96 \pm 0,78 \text{ mm dia}^{-1}$) e o tratamento integração lavoura pecuária-floresta para silagem apresentou a maior variabilidade ($1,26 \pm 1,40 \text{ mm dia}^{-1}$). Os sistemas integrados se adequaram à sazonalidade da região, sofrendo estresse hídrico na época seca e com heterogeneidade espaço-temporal na época úmida.

Santos et al. (2020) avaliaram o impacto da ET_0 , calculada a partir do método de Penman-Monteith (PM), na estimativa da Evapotranspiração Real estimada pelo SAFER ($ET_{R\text{ SAFER}}$) no semiárido brasileiro. O estudo foi realizado em áreas de pivôs centrais cultivados com cana-de-açúcar localizadas no perímetro irrigado público de Jaíba, MG, Brasil. A ET_0 e seu impacto no $ET_{R\text{ SAFER}}$ foram analisados usando dados meteorológicos e imagens de satélite. Os autores avaliaram a variabilidade temporal e espacial do $ET_{R\text{ SAFER}}$ para cana-de-açúcar e verificaram que a R_S foi o parâmetro que mais afetou a ET_0 e, consequentemente, a $ET_{R\text{ SAFER}}$, sendo esta subestimada, e concluíram também que não é aconselhável usar a ET_0 obtida pelo método *Hargreaves-Samani* (HS) para cálculo da $ET_{R\text{ SAFER}}$ em regiões semiáridas.

Alves et al. (2020) estimaram o coeficiente de estresse hídrico (K_S) - relação entre a evapotranspiração da cultura e a ET_R -, calculada pelo SAFER, por meio de informações obtidas via sensoriamento remoto (satélite Landsat-8), combinadas com informações de campo, para o município de São Desidério, no Oeste da Bahia. Os resultados sugerem que o K_S estimado por sensoriamento remoto apresentou, para os estágios em desenvolvimento e médio, erros médios da ordem de 5,50%. No estágio final de desenvolvimento do milho os erros obtidos foram de 23,2%.

Venancio et al. (2021) avaliaram o desempenho do SAFER para estimar a ET do milho irrigado no semiárido brasileiro. O estudo foi conduzido em São Desidério, Bahia, Brasil, em áreas de cultivo de milho em sistema de plantio direto e irrigação por pivôs centrais. O algoritmo SAFER com coeficientes de regressão originais ($a = 1,8$ e $b = -0,008$) foi inicialmente

testado durante as safras de 2014, 2015 e 2016, não apresentando resultados satisfatórios da estimativa de ET do milho. Com o intuito de melhorar as estimativas, Venancio et al. (2021) usaram dados de 2014 e 2015 para calibrar os coeficientes. O SAFER teve um bom desempenho para estimativa de ET_R após a calibração. Os autores concluíram que os resultados suportam o uso do algoritmo SAFER calibrado como uma ferramenta para estimar o consumo de água em campos de milho irrigados em condições semiáridas.

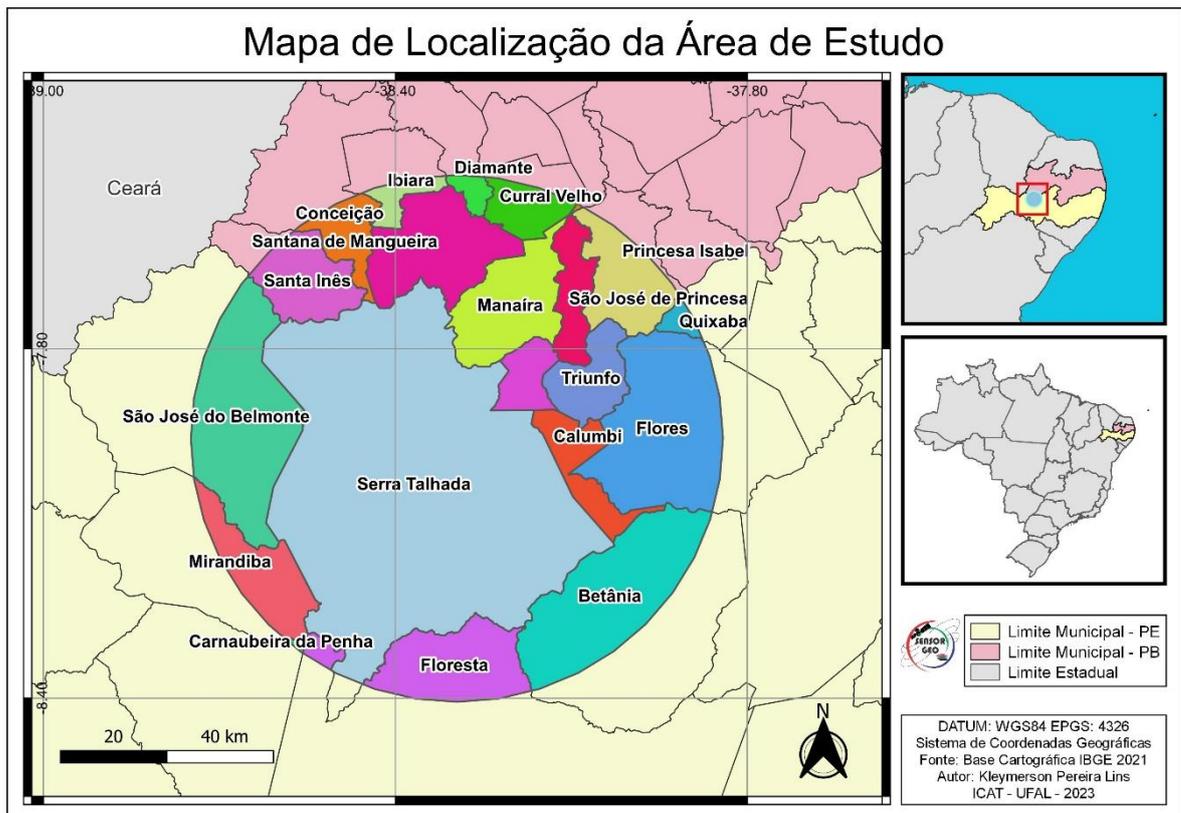
Texeira et al. (2020) utilizaram o algoritmo SAFER (*Simple Algorithm for Evapotranspiration Retrieving*) juntamente com o modelo RUE (*Radiation Use Efficiency*) de *Monteith*, para avaliações de produtividade de água em larga escala, em diferentes condições socioambientais das sub-bacias do rio São Francisco, Brasil, usando imagens MODIS e uma rede de estações agrometeorológicas, durante o ano de 2016. Variações na evapotranspiração real (ET_R) e produção de biomassa (BIO) entre ecossistemas e sub-bacias foram detectadas e os resultados concluem que a modelagem, usando o produto de refletância MODIS juntamente com dados meteorológicos, apresentou aplicabilidade operacional para monitorar a dinâmica da água e da vegetação em um período de 16 dias, resolução espacial de 250 m e sob condições de disponibilidade hídrica distintas.

4 METODOLOGIA

4.1 Área de Estudo

A área de referência para o desenvolvimento deste trabalho está localizada no centro-norte do estado de Pernambuco e em parte do sudoeste do estado da Paraíba e é apresentada na Figura 3. O estudo abrange os 21 (vinte e um) municípios da região (conforme apresentado na Tabela 3), com destaque para Serra Talhada - PE. A região compreende uma área aproximada de 7827 quilômetros quadrados. Trata-se de uma região semiárida na maioria da sua extensão, com exceção do município de Triunfo, que se caracteriza como área de brejo de altitude, sendo o ponto mais alto do estado de Pernambuco, a 1270 metros de altitude (VERSYPLE; MACHADO; ANDRADE; WANDERLEY, 2015).

Figura 3 – Localização da área de estudo



Fonte: Autor (2023).

Tabela 3 – Municípios e a área coberta pela região de estudo, destacando Serra Talhada - PE, onde fica localizada a estação meteorológica, local da coleta de dados

ID	Nome do município	UF	Área (km²)	Área de estudo (km²)
1	Betânia	PE	1244,07	610,63
2	Calumbi	PE	179,31	179,31
3	Carnaubeira da Penha	PE	1004,67	6,11
4	Conceição	PB	0,58	137,26
5	Curral Velho	PB	217,62	129,97
6	Diamante	PB	271,79	40,92
7	Flores	PE	995,56	669,26
8	Floresta	PE	3644,17	377,13
9	Ibiara	PB	240,36	65,44
10	Manaíra	PB	352,03	352,03
11	Mirandiba	PE	821,68	255,00
12	Pedra Branca	PB	116,87	1,71
13	Princesa Isabel	PB	368,57	260,12
14	Quixaba	PE	210,71	33,97
15	Santa Cruz da Baixa Verde	PE	114,93	114,93
16	Santa Inês	PB	327,64	244,59
17	Santana de Mangueira	PB	405,16	405,16
18	São José de Princesa	PB	158,05	158,05
19	São José do Belmonte	PE	1474,09	648,32
20	Serra Talhada	PE	2980,01	2945,27
21	Triunfo	PE	191,52	191,52
Área de Estudo Total (km²)				7.826,70

Fonte: Autor, 2023.

O município de Serra Talhada, PE (altitude: 429 metros) possui área territorial de 2.980 km² e representa 3% do estado de Pernambuco (FERRAZ JARDIM et al., 2019). O clima da região é do tipo BSw^h (incidência de chuva na maioria dos meses mais quentes, e seco nos meses frios do ano) (ALVARES et al., 2013; COSTA et al., 2015), com temperatura média anual em torno de 24,8 °C, precipitação média de 642,1 mm/ano, umidade relativa do ar

próxima de 62,5%, resultando em uma demanda atmosférica de 1.800 mm/ano e ocorrendo déficit de 1.143 mm por ano (SILVA et al., 2015).

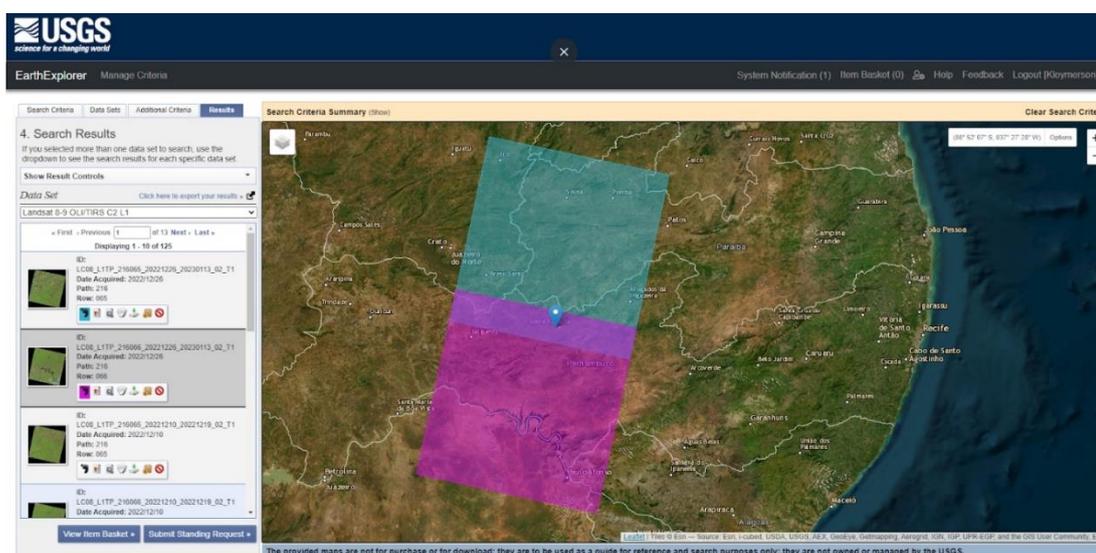
O regime pluvial de uma região é aspecto limitante para a exploração agrícola, tornando-se assim fator de risco em perdas parciais ou totais de safra agrícola. (FERRAZ JARDIM et al., 2019). Impactando negativamente o mercado de trabalho e comprometendo a segurança alimentar (ELY et al., 2003; ROSSATO et al., 2017) e, conseqüentemente, o bem-estar da população (SENA et al., 2014).

4.2 Dados

4.2.1 Dados Orbitais

As imagens de satélite foram obtidas gratuitamente no portal da USGS. Para a cobertura total da área, foram necessárias 2 (duas) cenas, conforme Figura 4. Foram selecionadas as cenas com uma cobertura máxima de nuvens de 10% para o período de fevereiro de 2013 a setembro de 2022, da coleção Landsat 2 Nível 1, Caminho/Linha (Path/Row) 216/065 e 216/066. Como resultados, para os critérios adotados, foram obtidas 70 (setenta) cenas para o quadrante 216/065 e 38 (trinta e oito) cenas para o quadrante 216/066. Num primeiro filtro de dados, restaram 29 (vinte e nove) cenas em comum para os quadrantes nas mesmas datas, para serem analisadas na etapa de seleção e processamento dos dados.

Figura 4 – Cobertura total da área de estudo, formada por duas cenas



Fonte: Adaptado de USGS (2021).

4.2.2 Dados de Superfície

Os dados meteorológicos utilizados, foram solicitados através do site do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, para a estação automática A350, localizada no município de Serra Talhada - PE. Foram utilizados os dados diários e horários do período entre janeiro de 2013 e setembro de 2022, destacando: Temperatura (°C), Precipitação (mm), R_s , Umidade relativa (%), Velocidade do vento (m/s), Pressão Atmosférica (mB), Radiação Global (kJ/m²).

4.2.3 Seleção e Processamento dos Dados

Após a análise e tratamento dos dados, foram identificados os dados de superfícies com as mesmas datas dos dados orbitais. Tendo em vista as características climáticas da região, optou-se por analisar imagens de diferentes datas, que no decorrer do texto serão referenciadas pela estação do ano, para avaliação de uma amostra representativa da sazonalidade da área de estudo, sendo elas verão, outono, inverno e primavera (Tabelas 4 e 5). Apesar de na zona equatorial praticamente não se notar diferenças no comportamento da atmosfera entre as estações, em geral, apenas uma pequena queda na temperatura do ar é observada. No NEB, por exemplo, a estação de inverno é conhecida por apresentar um período de chuvas em certas áreas, entre maio e julho, como se observa no litoral dos estados da Paraíba e Pernambuco (VAREJÃO-SILVA, 2006) Do resultado, foram selecionadas as imagens a utilizadas, conforme as Tabelas 4 e 5 a seguir, representando uma data para cada estação do ano:

Tabela 4 – Cenas selecionadas para a área de estudo

Estação do Ano	Data	DOY	Landsat Scene ID 216/065	Horário Local
Verão	02/01/2014	2	LC82160652014002LGN01	09h42
Outono	26/05/2014	146	LC82160652014146LGN01	09h40
Inverno	18/07/2016	200	LC82160652015309LGN01	09h41
Primavera	05/11/2015	309	LC82160652016200LGN01	09h41

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 5 – Cenas selecionadas para a área de estudo

Estação do Ano	Data	DOY	Landsat Scene ID 216/066	Horário Local
Verão	02/01/2014	2	LC82160662014002LGN01	09h43

Estação do Ano	Data	DOY	Landsat Scene ID 216/066	Horário Local
Outono	26/05/2014	146	LC82160662014146LGN01	09h41
Inverno	18/07/2016	200	LC82160662015309LGN01	09h41
Primavera	05/11/2015	309	LC82160662016200LGN01	09h41

Fonte: Autor, 2023.

4.3 Softwares

Os seguintes *softwares* foram utilizados durante a pesquisa:

- Microsoft Excel 365 – software proprietário com licença válida, para tratamento dos dados meteorológicos e análises estatísticas;
- QGIS – Versão 3.22 (https://qgis.org/pt_BR/site/) – para geoprocessamento e geração de mapas, cálculos, processamento de imagens, classificação e uso do solo. Plugin utilizado nas pesquisas para o desenvolvimento do projeto: *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP) (CONGEDO, 2021);
- Liguagem R – linguagem e ambiente de desenvolvimento integrado, para cálculos estatísticos e gráficos. (<https://www.r-project.org/>);
- R-Studio – *software* livre de ambiente de desenvolvimento integrado para R (<https://posit.co/download/rstudio-desktop/>);
- Pacote Agriwater – estruturado e planejado para agregar as melhores práticas descritas pelos pesquisadores que desenvolveram estudos usando o modelo SAFER (SILVA; MAGNONI, 2020).

4.4 SAFER

O cálculo da ET_R foi realizado utilizando o *Simple Algorithm For Evapotranspiration Retrieving* – SAFER, de acordo com o procedimento descrito por Teixeira (2010) e Santos (2019). Para obtenção da evapotranspiração SAFER (ET_{SAFER}) são necessárias informações de refletância monocromática para as bandas respectivas ao comprimento de onda do azul (B2), verde (B3), vermelho (B4), infravermelho próximo (B5), infravermelho médio (B6 e B7) e das radiâncias respectivas as bandas termais (B10 e B11), as quais serão obtidas na etapa de pré-processamento dos dados. Essas informações são necessárias para o cálculo do albedo planetário ($\alpha_{B2} = 0.3$, $\alpha_{B3} = 0.277$, $\alpha_{B4} = 0.233$, $\alpha_{B5} = 0.143$, $\alpha_{B6} = 0.036$ e $\alpha_{B7} = 0.012$),

albedo de superfície, temperatura de brilho, temperatura da superfície e índice de vegetação da diferença normalizada (NDVI). Em seguida, estimou-se a fração evapotranspirativa (ET_R/ET_0).

O albedo da superfície (α_0) é calculado utilizando a Equação 1:

$$\alpha_0 = \rho_a \times \alpha_p + \rho_b \quad (1)$$

sendo ρ_a e ρ_b constantes e iguais a 0.7 e 0.06, respectivamente (TEIXEIRA, 2010).

O NDVI corresponde ao índice de vegetação ativa utilizado pelo SAFER e é obtido por meio da Equação 2:

$$NDVI = \frac{\alpha_{B5} - \alpha_{B4}}{\alpha_{B5} + \alpha_{B4}} \quad (2)$$

Onde α_{B4} e α_{B5} são as reflectâncias da superfície nos comprimentos de onda do vermelho e infravermelho próximo.

O mapeamento da temperatura de superfície pode ser calculado a partir das bandas termais 10 e 11 e pela conversão em temperatura de brilho (T_b), de acordo com a Equação 3:

$$T_b = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_b + 1}\right)} \quad (3)$$

Na qual L_b diz respeito às radiações espectrais das bandas 10 e 11 do Landsat 8 e K_1 e K_2 são constantes, sendo K_1 e K_2 relativos à banda 10 dados por $K_1 = 774.89 W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ e $K_2 = 1321.08 K$ e os relativos à banda 11 são $K_1 = 480.89 W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ e $K_2 = 1201.14 K$.

Para a obtenção da temperatura de superfície (T_0), utiliza-se a Equação 4, em que d e f são constantes cujos valores correspondem a 0.0694 e -20.173, calculados por Teixeira et al. (2015) por meio de regressão de dados de medições de satélite e de campo. Na Equação 4, a unidade utilizada para T_b é graus Celsius ($^{\circ}C$):

$$T_0 = dT_b + f \quad (4)$$

A fração evapotranspirativa (ET_R/ET_0) é calculada por meio da Equação 5, em que a e b assumem os valores de 1.8 e -0.008, ajustados para a região semiárida. Estudos de Teixeira et al (2012) e Teixeira et al (2014), ajustaram valores diferentes para outras regiões, como por exemplo Noroeste de SP e área de Cerrado, com “a”, 1 e 1,9 respectivamente e “b” mantendo-se -0,008; T_0 é a temperatura de superfície, em $^{\circ}C$; α_0 corresponde ao albedo da superfície e NDVI.

$$\frac{ET_R}{ET_0} = \exp\left[a + b\left(\frac{T_0}{\alpha_0 NDVI}\right)\right] \quad (5)$$

A ET_0 é obtida utilizando o modelo de *Penman-Monteith* (PM), conforme Equação 6:

$$ET_0 = \frac{0.408s(R_n - G) + \gamma \frac{900}{t + 273} u_2 (e_s - e_a)}{s + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (6)$$

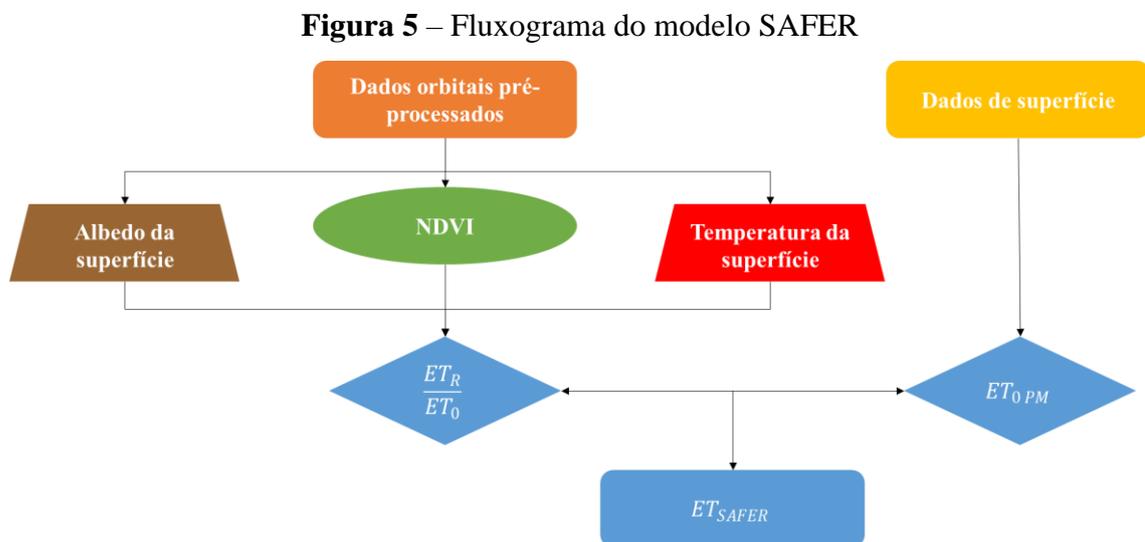
Para a qual ET_0 é a evapotranspiração de referência, em $mm d^{-1}$; R_n é o saldo de radiação na superfície, em unidades de $MJ m^{-2} d^{-1}$; G se trata do fluxo de calor no solo, em $MJ m^{-2} d^{-1}$ e definido como zero; t é a temperatura média do ar, em graus Celsius; u_2 corresponde à velocidade do vento a 2 metros de altura, em m/s ; e_s é a pressão de saturação de vapor, em kPa ; e_a é a pressão de vapor atual do ar, em kPa ; s é a declividade da curva de pressão de vapor de saturação, em $kPa/^\circ C$ e, finalmente, γ corresponde ao coeficiente psicrométrico, $kPa/^\circ C$.

A ET_{SAFER} é obtida por meio da Equação 7:

$$ET_{SAFER} = \frac{ET_R}{ET_0} ET_{0PM} \quad (7)$$

Em que ET_R/ET_0 é a fração evapotranspirativa calculada através da Equação 5; ET_{0PM} é a evapotranspiração de referência (ET_0), calculada pela Equação 6, de *Penman-Monteith* (PM).

A Figura 5 sintetiza as etapas necessárias à obtenção da evapotranspiração por meio do algoritmo SAFER.



Fonte: Autor (2021).

4.5 Desenvolvimento da Pesquisa

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado de acordo com as seguintes etapas:

1. A partir dos dados de temperatura ($^\circ C$), umidade relativa (%), velocidade do vento (m/s), pressão atmosférica (mB), radiação global (kJ/m^2), coletados através da estação

meteorológica, calculou-se a evapotranspiração de referência (ET_0), em mm/dia, a partir do método *Penman-Monteith* (PM), necessária a obtenção da evapotranspiração real utilizando o algoritmo SAFER;

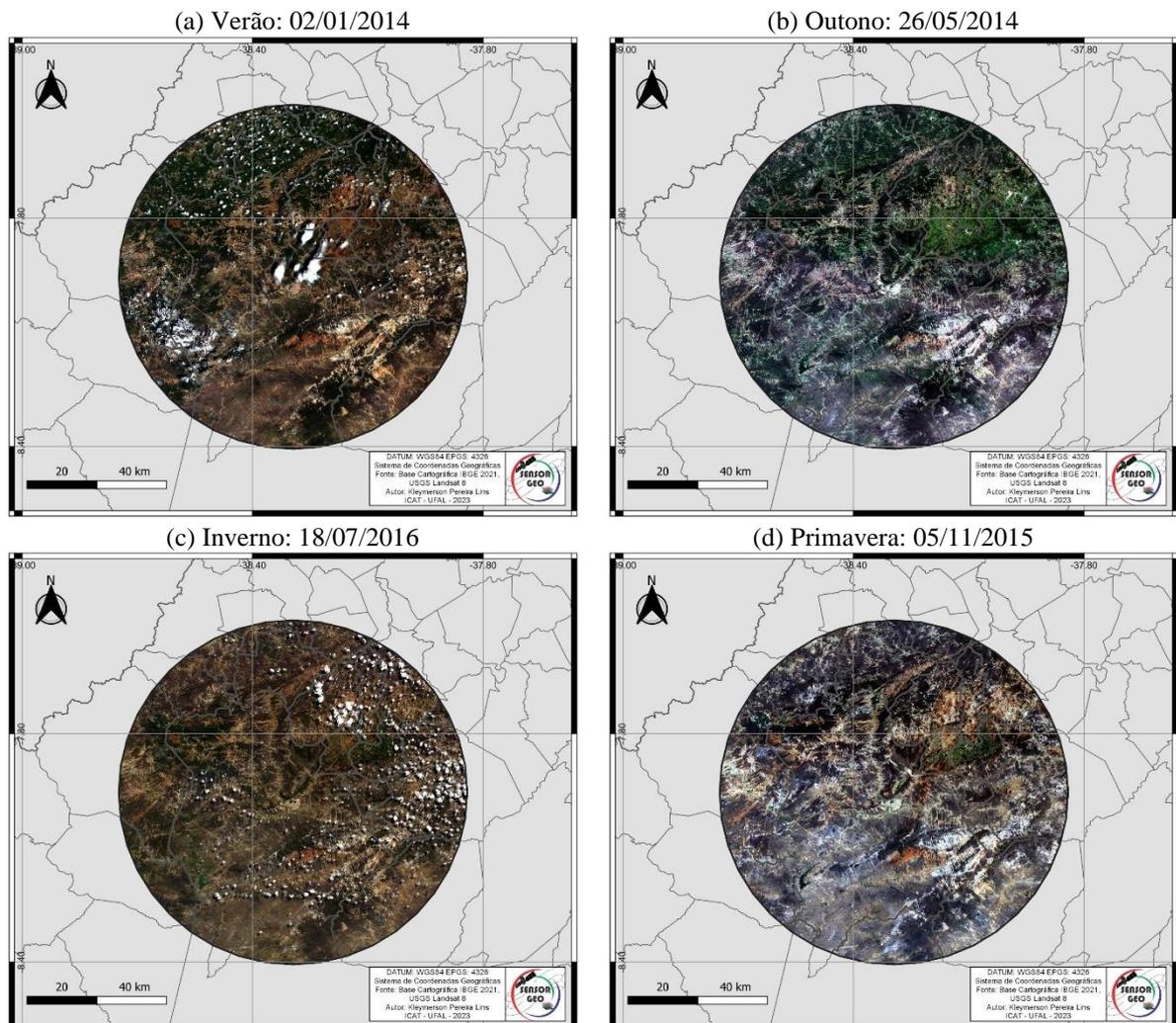
2. Por meio do *software* QGIS, foram feitos os mosaicos com as imagens dos quadrantes 216/065 e 216/066, em suas respectivas datas. Em seguida, foi feito o recorte da região de interesse, cujo raio de cobertura atinge 50 km partindo da localização da estação meteorológica;
3. Preparados os arquivos das bandas espectrais e os resultados do processamento dos dados de superfície, por meio do pacote Agriwater, no ambiente RStudio, foram utilizados os dados processados na etapa anterior, para a obtenção dos dados matriciais: albedo, NDVI, KC_{SAFER} (fração evapotranspirativa), temperatura de superfície e saldo de radiação, e calculadas as respectivas métricas estatísticas, com a utilização do algoritmo sem as bandas termais¹.
4. No QGIS, foram extraídos os resultados das métricas estatísticas das imagens matriciais, a elaboração dos mapas e, em seguida, feita a organização dos resultados.

¹ De acordo com Santos (2019) e Teixeira et al (2021), com o SAFER é possível estimar as variáveis do balanço energético e hídrico utilizando as bandas do visível e do infravermelho próximo, comumente encontradas e com maior resolução espacial, sem a necessidade de empregar as bandas termais, possibilitando o uso de vários outros sensores a bordo de satélites.

5 RESULTADOS

Os resultados desta pesquisa são descritos a partir de imagens do Landsat8, as quais são referenciadas a partir de quatro datas, pela estação do ano, para melhor entender as diferenças entre elas, sendo: 02 de janeiro de 2014 (verão), 26 de maio de 2014 (outono), 18 de julho de 2016 (inverno) e 05 de novembro de 2015 (primavera). A Figura 6 mostra a composição RGB – bandas espectrais 4 (red), 3 (green) e 2 (blue) respectivamente – para as quatro datas selecionadas para a análise. Nota-se que, mesmo com os processos de filtragem de dados, as imagens selecionadas possuem nuvens.

Figura 6 – Composição RGB para os dias 02/01/2014 (a), 25/05/2014 (b), 18/07/2016 (c) e 05/11/2015 (d).



5.1 Dados Médios Para Estação de Serra Talhada (PE)

A região de estudo é heterogênea, tendo como ponto central a estação meteorológica de Serra Talhada e um raio de 50km a partir desta, composta por vegetação tipo caatinga no seu entorno, região agrícola, solo exposto, corpos de água e região com vegetação mais frondosa. Essa característica influencia nos valores médios das variáveis estimadas pelo SAFER, comparadas ao dado observado na estação. Por esse motivo, um estudo de caso para uma área limitada a 750 metros por 750 metros (0,56 km²), com a estação meteorológica ao centro, também foi realizado e será mostrado neste trabalho.

As Tabelas 6 e 7 ilustram os valores de temperatura média, radiação solar, precipitação, saldo de radiação, evapotranspiração (dados coletados na estação meteorológica de Serra Talhada) e albedo, NDVI, T_S e $ET_{R\text{ SAFER}}$ (estimado para área de estudo a partir do SAFER). Verifica-se que nos dias escolhidos não houve precipitação na estação e a temperatura média foi maior na primavera e menor no outono (28,58 °C e 24,84 °C, respectivamente). A radiação solar (R_S) varia entre 21,89 MJ/m²/dia (inverno) e 25,91 MJ/m²/dia (primavera), o saldo de radiação (R_N) com valores médios variando entre 11,91 MJ/m²/dia (verão) e 13,11 MJ/m²/dia (outono) e a evapotranspiração de referência medida na estação com valores médios entre 6,40 mm/dia (verão) e 7,09 mm/dia (primavera).

Tabela 6 – Dados diários obtidos pela estação meteorológica.

Data	DOY	Temperatura Média (°C)	R_S (MJ/m²/dia)	Prec (mm/dia)	R_N (MJ/m²/dia)	$ET_{0\text{ PM}}$ (mm/dia)
02/01/2014 (verão)	2	26,99	23,42	0,00	11,91	6,40
26/05/2014 (outono)	146	24,85	22,77	0,00	13,11	6,46
18/07/2016 (inverno)	200	26,62	21,89	0,00	12,55	7,05
05/11/2015 (primavera)	309	28,59	25,92	0,00	11,99	7,09

Fonte: Autor (2023).

Tabela 7 – Dados diários obtidos pelo algoritmo SAFER

Data	DOY	Albedo	NDVI	T_s (°C)	$ET_{R\text{ SAFER}}$ (mm/dia)
02/01/2014 (verão)	2	$0,18 \pm 0,03$	$0,48 \pm 0,15$	$28,96 \pm 1,64$	$2,91 \pm 1,93$
26/05/2014 (outono)	146	$0,17 \pm 0,01$	$0,60 \pm 0,15$	$25,53 \pm 1,23$	$5,08 \pm 2,25$
18/07/2016 (inverno)	200	$0,18 \pm 0,03$	$0,30 \pm 0,09$	$25,61 \pm 1,82$	$1,18 \pm 1,24$
05/11/2015 (primavera)	309	$0,19 \pm 0,02$	$0,26 \pm 0,06$	$35,53 \pm 1,01$	$0,20 \pm 0,35$

Fonte: Autor (2023).

Para o albedo médio, estimado a partir do SAFER, o comportamento acompanha a temperatura, com máximo na primavera (19%) e mínimo no outono (16%). O albedo depende das condições climáticas e de superfície, sendo menor para regiões úmidas e rugosas (vegetação densa), ou seja, menor albedo implica que mais energia está sendo absorvida pelo ambiente. E será maior para regiões secas e superfícies com baixa cobertura vegetal ou solo exposto, por refletirem grande parte da radiação incidente. Outra questão é o horário da passagem do satélite, devido ao ângulo de incidência dos raios solares, que pode causar maior ou menor penetração e retenção no interior da área estudada, o que não se aplica a esse estudo, devido a passagem ser praticamente no mesmo horário para as datas escolhidas.

O saldo de radiação (R_N) é inversamente proporcional ao albedo, pois representa a quantidade de energia disponível para os processos de superfície. Nesse caso, o SAFER estimou valores médios maiores no verão e na primavera (14,64 e 14,07 MJ/m²/dia) e menores no outono (12,46 MJ/m²/dia). Esses valores estimados diferem dos dados da estação, com mínimo e máximo no verão e outono.

A análise das quatro imagens sugere valores médios de NDVI maiores no período de outono (0,60), época chuvosa na região, e menores na primavera (0,26) período mais seco na área de estudo. Estes valores estão de acordo com as demais variáveis analisadas, principalmente com o albedo, que possui uma relação inversa (máximo na primavera e mínimo no outono).

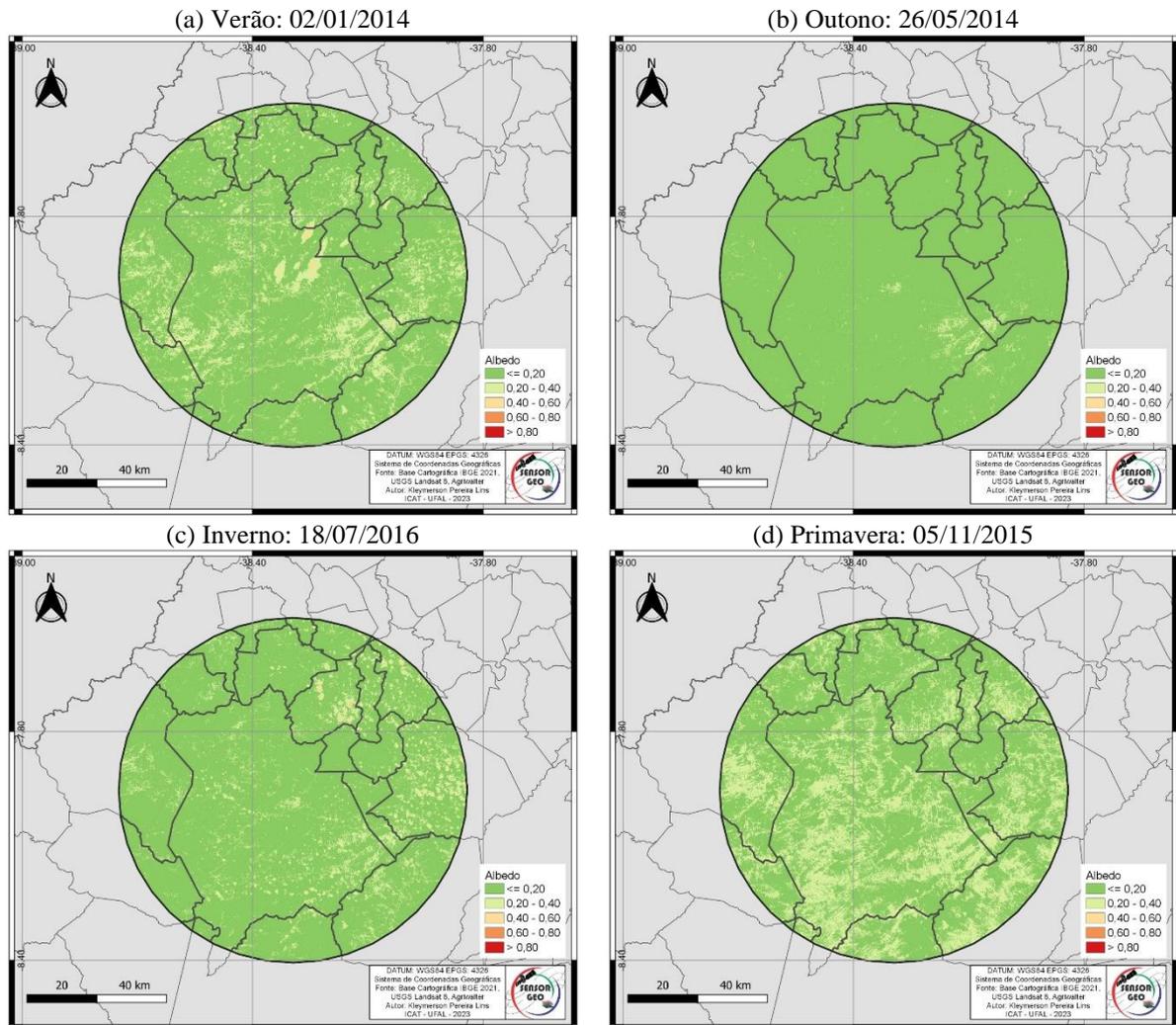
A temperatura da superfície estimada pelo SAFER apresentou valores médios superiores aos observados na estação meteorológica, exceto no outono. A maior média ocorreu na primavera (35,53°C) e a menor no outono (25,53°C).

A evapotranspiração real média da área, estimada pelo SAFER, mostra valores bem diferentes do observado. No entanto, vale ressaltar que os valores estimados são representativos da área de 50 km de raio, para a qual o centro é a estação meteorológica de Serra Talhada, e que esta área é bastante heterogênea em se tratando de cobertura superficial. O SAFER estimou menores valores de evapotranspiração para a primavera, mês mais quente e com mínimo de NDVI; e maiores valores de ET_R para o outono, mês com menores temperaturas e máximo de NDVI, esses resultados corroboram Furquim et al. (2020), que sugerem valores de ET_R maiores que a média no tratamento integração pecuária-floresta e menor que a média no tratamento pastagem degradada.

5.2 Albedo à Superfície

A Figura 7 apresenta o albedo médio, estimado pelo SAFER para as quatro estações, sendo a primavera a estação que apresenta maior heterogeneidade da variável e os maiores valores médios (>80%), podendo também estar relacionado a grande quantidade de nuvens no período de verão e inverno, como ilustra a Figura (RGB). Menor variação de valores são verificados no outono, sendo também os menores valores médios (<20%), que pode ser devido a essa ser a época chuvosa na região e o albedo é influenciado pelas condições hídricas, ou seja, mais chuva maior albedo.

Figura 7 – Albedo estimado pelo algoritmo SAFER para os dias 02/01/2014 (a), 25/05/2014 (b), 18/07/2016 (c) e 05/11/2015 (d).

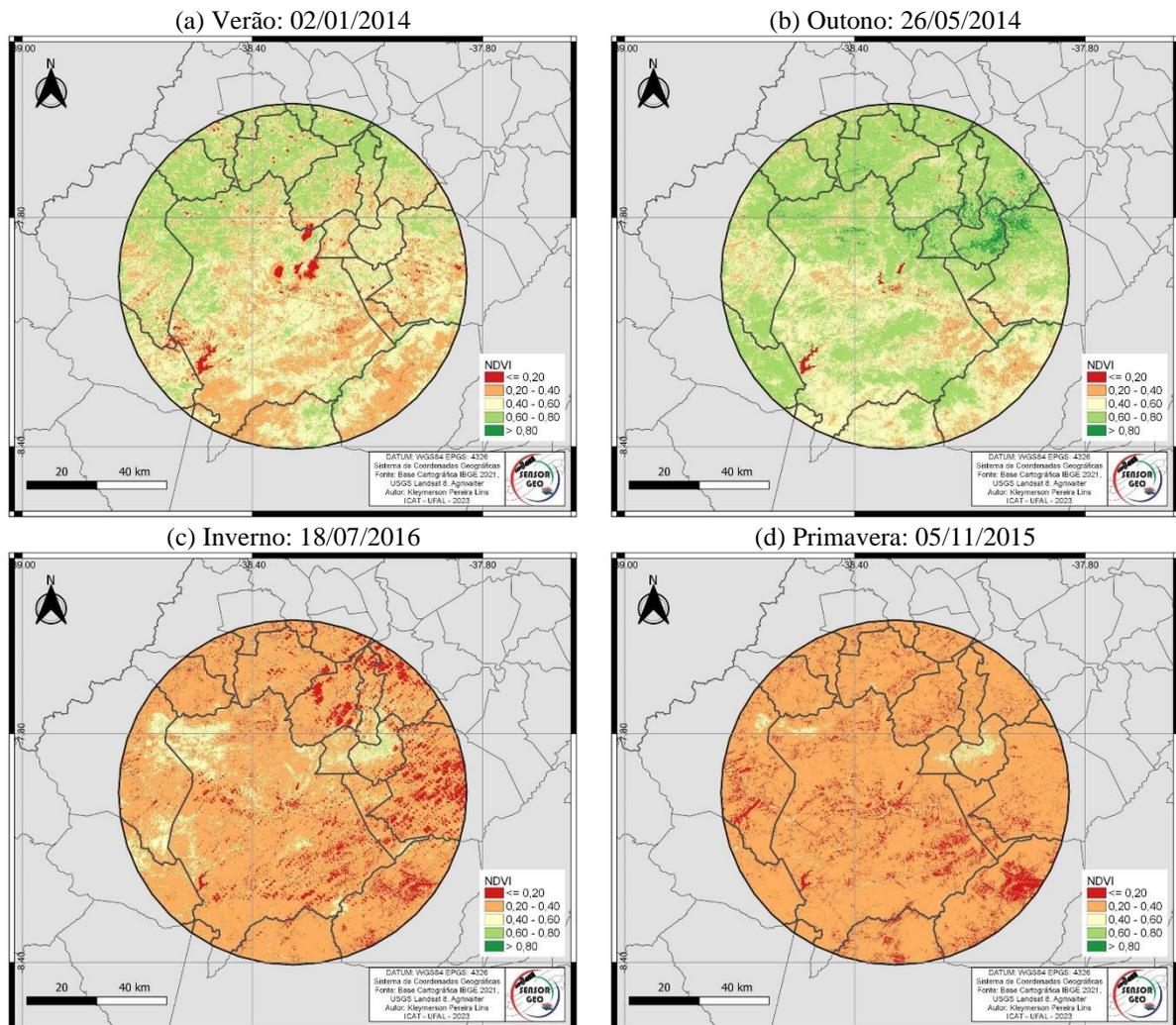


Fonte: Autor (2023).

5.3 NDVI

Os maiores valores de NDVI foram encontrados nas imagens representativas do verão e outono, ao passo que os menores valores corresponderam às imagens do inverno e primavera, conforme apresentado na Figura 8. Como o NDVI está relacionado a biomassa, as imagens sugerem que a época de outono é mais chuvosa e a primavera menos, influenciando no crescimento da vegetação na área de estudo. As imagens também sugerem que a região sudeste de Serra Talhada e a cidade de Betânia são as áreas mais secas e durante todo ano, principalmente na primavera.

Figura 8 – NDVI obtidos para os dias 02/01/2014 (a), 25/05/2014 (b), 18/07/2016 (c) e 05/11/2015 (d).

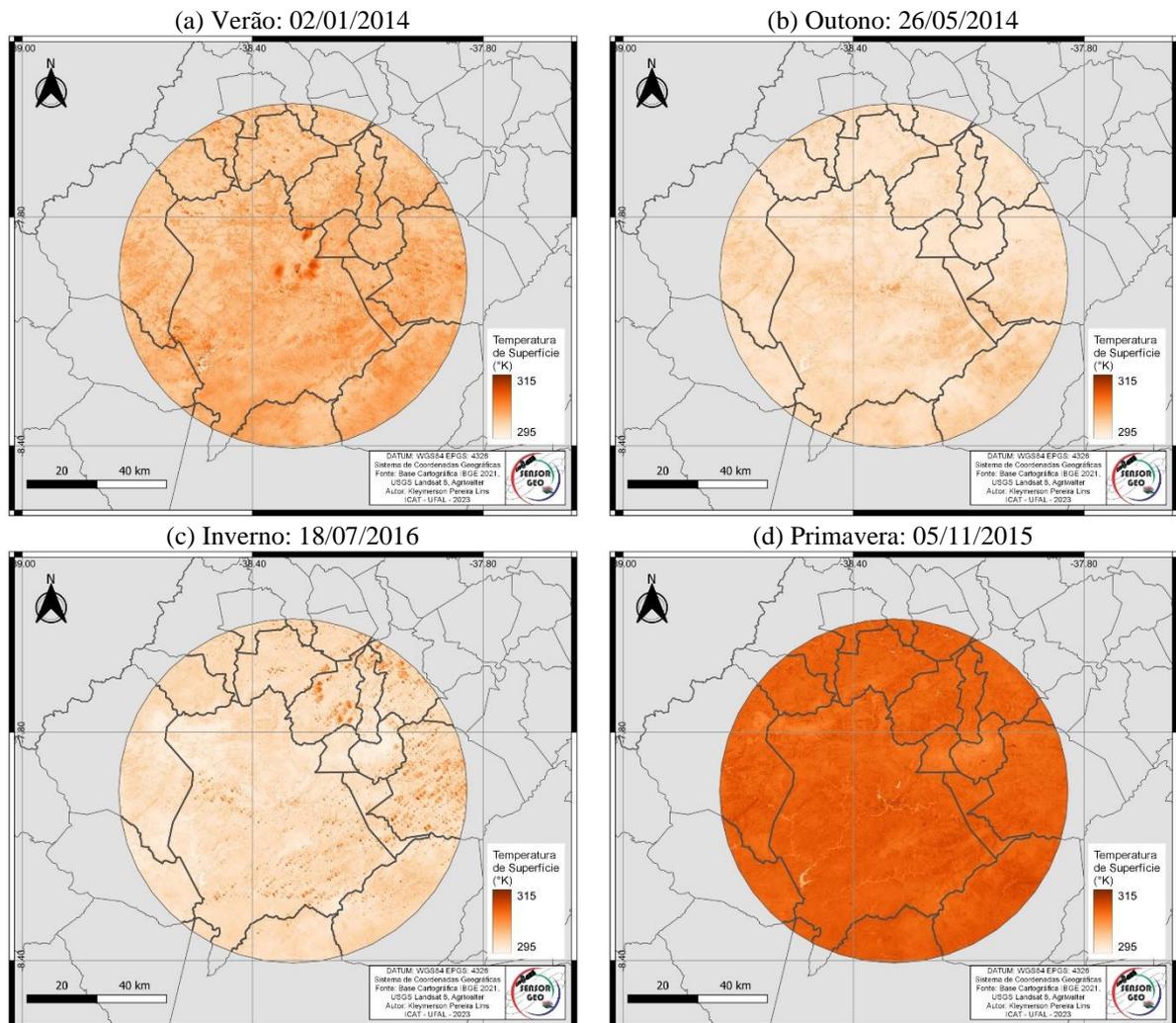


Fonte: Autor (2023).

5.4 Temperatura de Superfície

Os resultados do SAFER ilustrados na Figura 9 sugerem a sazonalidade da temperatura, com máximos na primavera e mínimos no outono. A sazonalidade se dá pela quantidade de radiação recebida à superfície e que varia ao longo do ano, mas as condições hídricas também podem influenciá-la. Verificam-se temperaturas médias, para região de estudo, mais elevadas para todas as estações, exceto no inverno, comparados aos dados da estação de Serra Talhada. As temperaturas do SAFER foram menores no outono ($25,53^{\circ}\text{C}$) e maiores na primavera ($35,53^{\circ}\text{C}$), comparadas as temperaturas observadas de $24,84^{\circ}\text{C}$ e $28,58^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Essa diferença também se deve ao fato de o dado da estação ser pontual e os do SAFER serem representativos da área de 50 km de raio com centro na estação meteorológica.

Figura 9 – Temperatura de superfície obtidas para os dias 02/01/2014 (a), 25/05/2014 (b), 18/07/2016 (c) e 05/11/2015 (d).

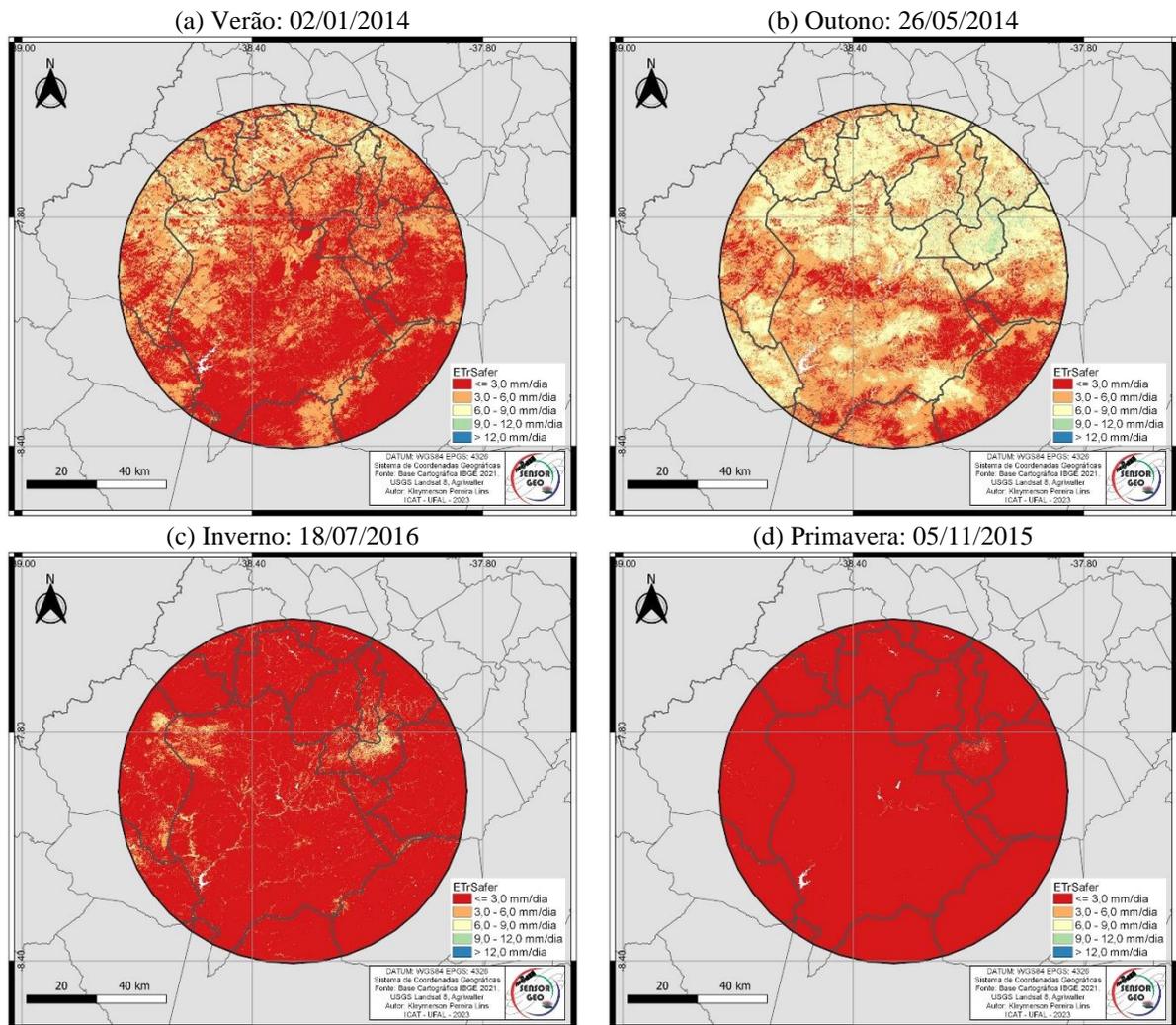


Fonte: Autor (2023).

5.5 Evapotranspiração Real

Tanto a disponibilidade de água, quanto o índice de área foliar influenciam a evapotranspiração, pois contabiliza o saldo de água na dinâmica solo-planta-atmosfera. Observando as imagens da Figura 10, para as quatro estações, verifica-se menor evapotranspiração na primavera, quando a temperatura está mais elevada e tem valores de NDVI menores, indicando vegetação menos densa ou solo exposto. E maior evapotranspiração é observada no outono, com maiores valores sobre a cidade de Triunfo - PE, região de temperatura mais amena e índices de vegetação elevados ($>0,6$), indicando vegetação mais robusta.

Figura 10 – Evapotranspiração Real obtida com o algoritmo SAFER, para os dias 02/01/2014 (a), 25/05/2014 (b), 18/07/2016 (c) e 05/11/2015 (d).



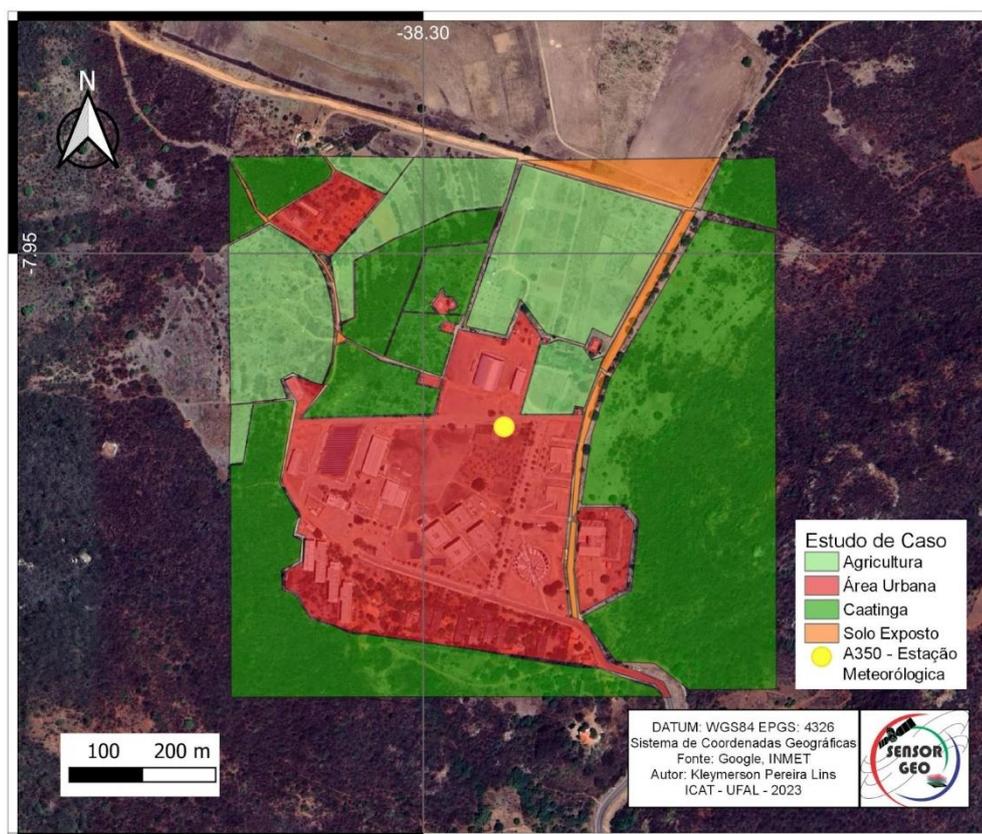
Fonte: Autor (2023).

5.6 Estudo de Caso

5.6.1 Área do Estudo de Caso

Devido a heterogeneidade da área de estudo, cuja área possui 50 km de raio, partindo da estação meteorológica de Serra Talhada, fez-se um recorte de 750 metros por 750 metros, com a estação ao centro, para realização da análise da evapotranspiração real estimada pelo SAFER. A área do estudo de caso é apresentada na Figura 11.

Figura 11 – Recorte da área total de 750 x 750m (0,563 km²), com a estação meteorológica (A350 - Serra Talhada - PE) ao centro



Fonte: Autor, 2023.

Na Figura 11 verifica-se o recorte da área com a estação de Serra Talhada ao meio, marcada pelo ponto amarelo. Observa-se que a maior parte da área possui vegetação tipo caatinga (0,251 km²), as bordas da área de estudo; seguido de área urbana (0,157 km²), concentrada mais ao centro; área de agricultura (0,105 km²), mais ao norte e noroeste da estação; e solo exposto (0,017 km²), demarcada por uma estrada a leste da estação e uma pequena porção mais ao norte. A classificação do solo está disposta na Tabela 8.

Tabela 8 – Classificação do tipo de solo da área recortada 750 metros x 750 metros

Classificação do solo	Área (m ²)
Agricultura	104.976,13
Caatinga	250.700,90
Solo Exposto	16.779,13
Área Urbana	156.865,72

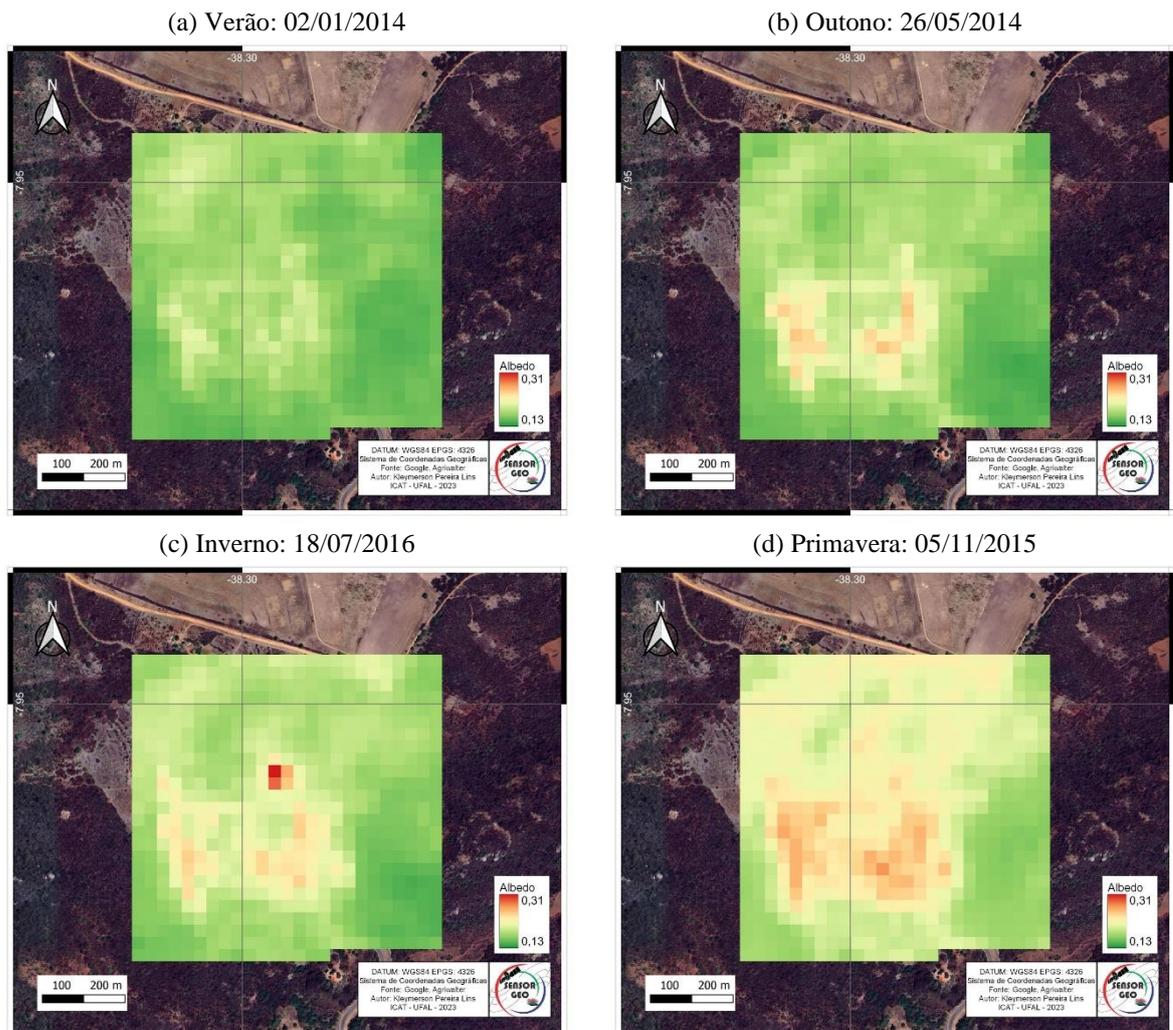
Fonte: Autor, 2023.

5.6.2 Albedo

Analisando o albedo para região recortada, nota-se que o valor médio da área não apresentou grandes variações, dentro do desvio padrão, conforme apresentado na Figura 12 recorte e na Tabela 9. No entanto, o albedo mínimo obtido para a área do estudo de caso ocorre no verão, enquanto na área de estudo original o menor valor para albedo ocorre no outono.

O mais interessante do recorte é observar a diferença do albedo quanto a cobertura vegetal, evidenciado na Figura 12, pois verifica-se que na área urbana o albedo é maior em todas as estações e na primavera a imagem sugere maior albedo em quase toda área, o que está de acordo, pois é a estação mais seca e quente na região.

Figura 12 – Albedo da área de estudo de caso, para os dias 02/01/2014 (a), 25/05/2014 (b), 18/07/2016 (c) e 05/11/2015 (d).



Fonte: Autor (2023).

Tabela 9 – Albedo da área de estudo de caso

Data	DOY	Albedo (Área original)	Albedo (Estudo de caso)
02/01/2014 (verão)	2	0,18 ± 0,03	0,17 ± 0,01
26/05/2014 (outono)	146	0,17 ± 0,01	0,18 ± 0,02
18/07/2016 (inverno)	200	0,18 ± 0,03	0,19 ± 0,02
05/11/2015 (primavera)	309	0,19 ± 0,02	0,21 ± 0,02

Fonte: Autor (2023).

5.6.3 NDVI

O NDVI para a área selecionada para o estudo de caso, conforme apresentado na Tabela 10, mostra valores menores comparados aos obtidos para a área original do estudo. Tal resultado é coerente, visto que mais de 30% da área corresponde à área urbana e solo exposto, além de verificar-se que, em analogia com os dados do albedo, maiores valores de NDVI estão atrelados a menores valores de albedo.

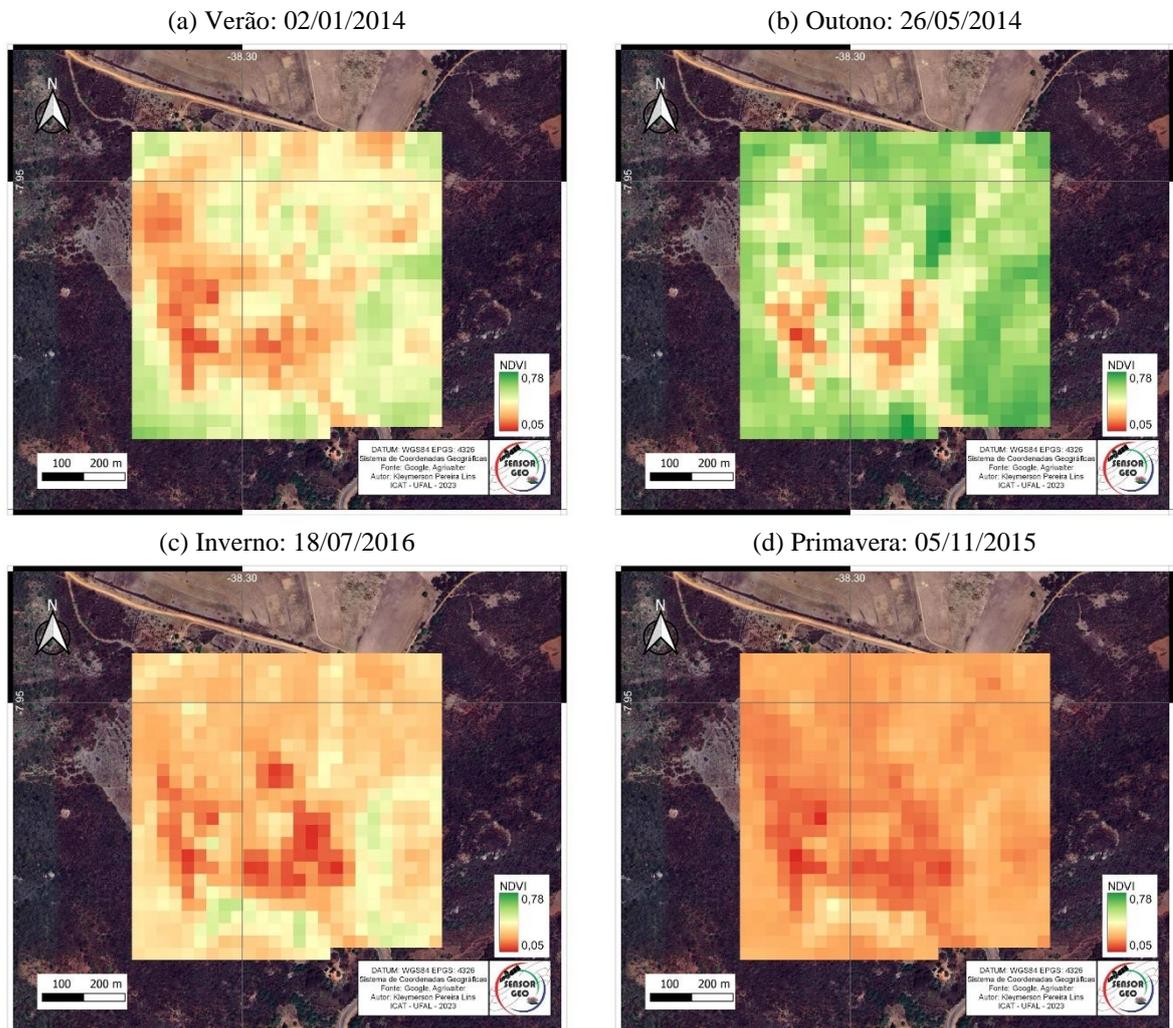
Tabela 10 – NDVI da área de estudo de caso

Data	DOY	NDVI (Área original)	NDVI (Estudo de caso)
02/01/2014 (verão)	2	0,48 ± 0,15	0,38 ± 0,10
26/05/2014 (outono)	146	0,60 ± 0,15	0,54 ± 0,13
18/07/2016 (inverno)	200	0,30 ± 0,09	0,30 ± 0,08
05/11/2015 (primavera)	309	0,26 ± 0,06	0,22 ± 0,04

Fonte: Autor (2023).

A Figura 13 sugere maiores valores do índice no outono, período chuvoso na região, e menores índices na primavera, onde ocorre menor precipitação na área de estudo e, por conseguinte, a vegetação se encontra menos robusta. O SAFER consegue diferenciar as regiões de solo exposto e urbana das regiões com vegetação. Também, observa-se a sazonalidade da caatinga, menos robusta no verão, mais robusta no outono e menos densa na primavera.

Figura 13 – NDVI da área de estudo de caso, para os dias 02/01/2014 (a), 25/05/2014 (b), 18/07/2016 (c) e 05/11/2015 (d).



Fonte: Autor (2023).

5.6.4 Temperatura de Superfície

Na análise da temperatura de superfície, comparando os valores médios nas duas áreas (original e estudo de caso) com o dado de superfície, conforme apresentado na Tabela 11, verifica-se que os resultados do SAFER para área do estudo de caso também superestimaram os valores observados, exceto na estação de inverno, em que em ambos os casos a média foi subestimada. As diferenças entre os valores médios de cada área estão dentro do desvio padrão.

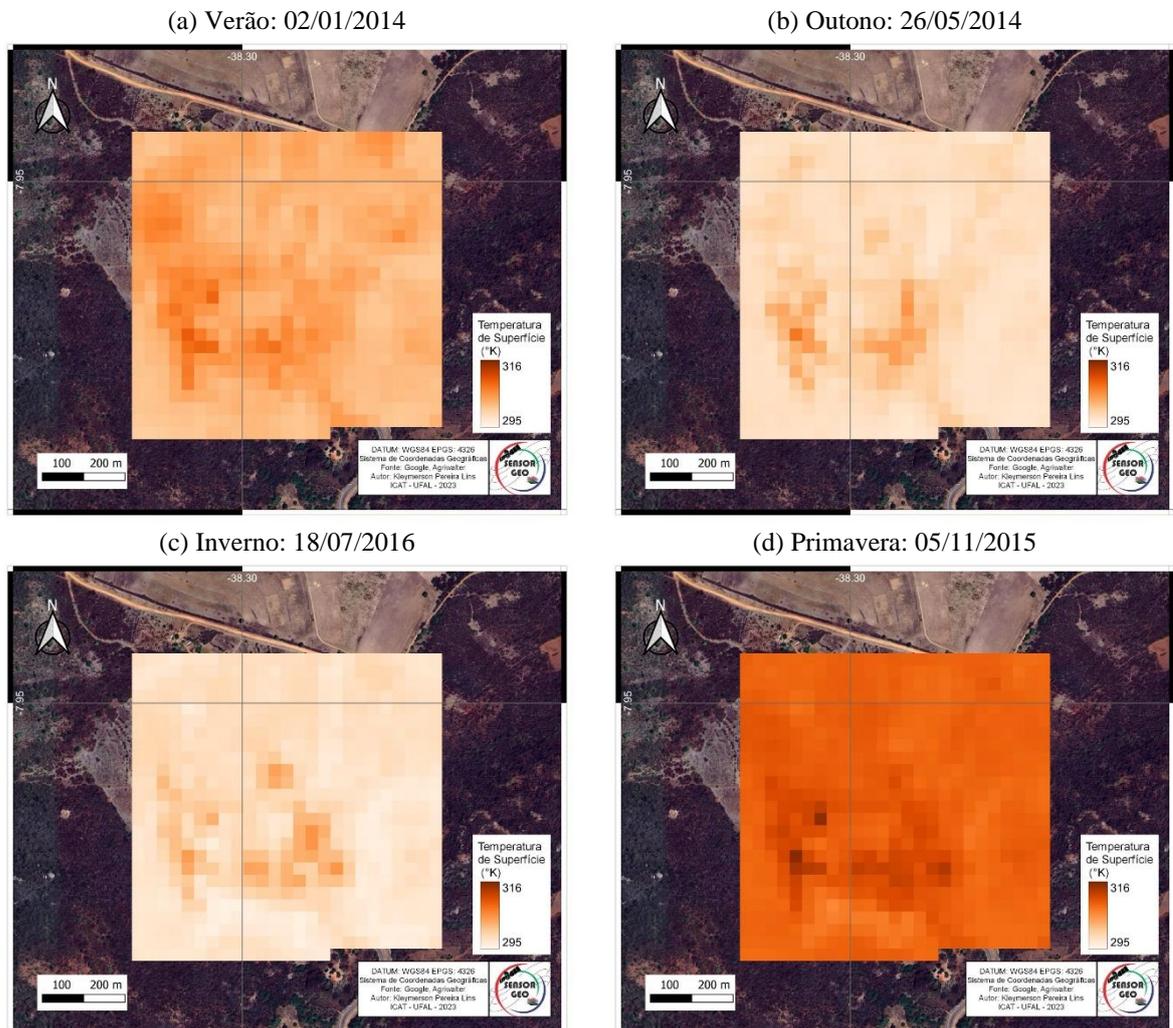
Tabela 11 – Temperatura de superfície da área de estudo de caso

Data	DOY	Tmed Estação(°C)	T_S (°C) (Área Original)	T_S (°C) (estudo de caso)
02/01/2014 (verão)	2	26,99	28,96 ± 1,64	30,09 ± 1,51
26/05/2014 (outono)	146	24,85	25,53 ± 1,23	26,07 ± 1,39
18/07/2016 (inverno)	200	26,62	25,61 ± 1,82	25,53 ± 1,52
05/11/2015 (primavera)	309	28,59	35,53 ± 1,01	36,36 ± 1,04

Fonte: Autor (2023).

Na Figura 14 verifica-se a sazonalidade da temperatura, com máximos na primavera e mínimos no outono, destaque para região de área urbana, para a qual a temperatura, dos quatro dias, mostra-se mais elevada comparada ao restante da região. Isso se dá devido a quantidade de radiação absorvida à superfície e que não varia muito ao longo do ano. Observam-se temperaturas médias, para região em destaque, mais elevadas para todas as estações do ano, comparadas às temperaturas observadas na estação de Serra Talhada, exceto no inverno. As temperaturas do SAFER foram menores no inverno (25,53°C) e maiores na primavera (36,36°C), comparadas as temperaturas observadas de 24,84°C e 28,58°C, respectivamente. Essa diferença também se deve ao fato de o dado da estação ser pontual e os do SAFER serem representativos da área recortada e que essa área possui mais de 30% da região de solo exposto e área urbana.

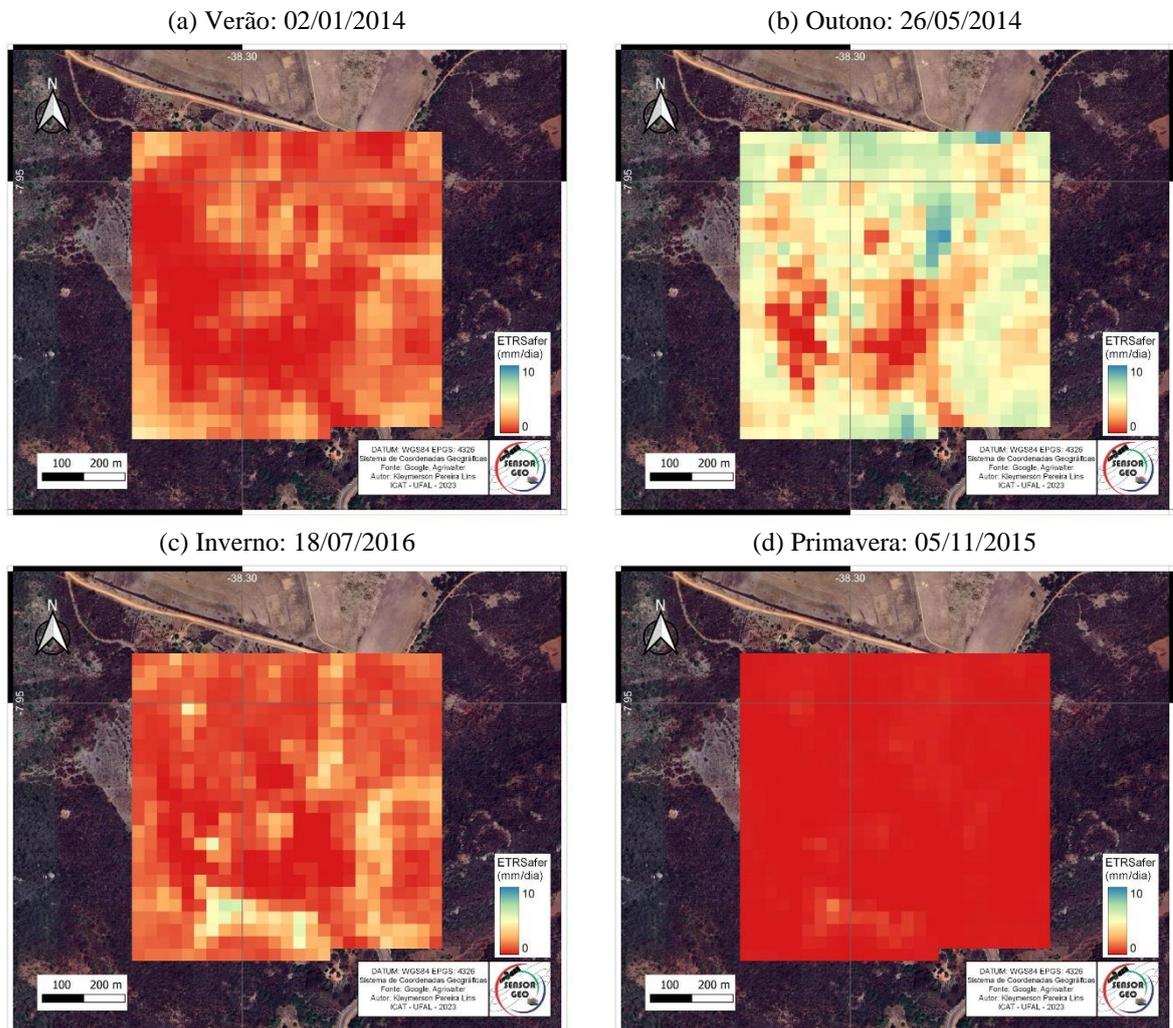
Figura 14 – Temperatura de superfície da área de estudo de caso, para os dias 02/01/2014 (a), 25/05/2014 (b), 18/07/2016 (c) e 05/11/2015 (d).



5.6.5 Evapotranspiração Real

A evapotranspiração estimada pelo SAFER depende diretamente da temperatura à superfície, como também da disponibilidade de água e índice de área foliar, representados na equação pelo NDVI. A análise das imagens para as quatro estações, apresentadas na Figura 15, sugere menor evapotranspiração na primavera, quando a temperatura está mais elevada, é um período de menores índices de precipitação e, conseqüentemente, menores valores de NDVI, indicando vegetação menos densa ou solo exposto. E maior evapotranspiração é observada no outono, com maiores valores sobre áreas agrícolas e de caatinga, região de temperatura mais amena e índices de vegetação elevados ($>0,6$), indicando vegetação mais robusta.

Figura 15 – Evapotranspiração real da área de estudo de caso, obtida com o algoritmo SAFER, para os dias 02/01/2014 (a), 25/05/2014 (b), 18/07/2016 (c) e 05/11/2015 (d).



Os valores de evapotranspiração para área total e o recorte são próximos e as diferenças encontram-se dentro do desvio padrão, conforme apresentado na Tabela 12, sendo os valores encontrados para área do estudo de caso menores quando comparados aos resultados da área original, no entanto, respeitando a mesma sazonalidade. Isso se deve ao fato de a área do estudo de caso ser representativa do todo, pois possui solo exposto, área urbana, vegetação tipo caatinga e área agrícola. Talvez, um recorte numa área mais homogênea fornecesse resultados mais contrastantes.

Tabela 12 – Evapotranspiração real da área de estudo de caso, obtida com o algoritmo SAFER

Data	DOY	$ET_{R\text{ SAFER}}$ (mm/dia) (Área Total)	$ET_{R\text{ SAFER}}$ (mm/dia) (Recorte)
02/01/2014 (verão)	2	2,91 ± 1,93	1,11 ± 0,87
26/05/2014 (outono)	146	5,08 ± 2,25	4,44 ± 1,79
18/07/2016 (inverno)	200	1,18 ± 1,24	1,31 ± 1,05
05/11/2015 (primavera)	309	0,20 ± 0,35	0,10 ± 0,13

Fonte: Autor (2023).

Com o intuito de comparar as estimativas da evapotranspiração do SAFER com os dados coletados na estação, criou-se a Tabela 13, a partir do cálculo do quociente da evapotranspiração estimada pelo SAFER ($ET_{R\text{ SAFER}}$) para área total e do KC_{SAFER} da área total; quociente da $ET_{R\text{ SAFER}}$ do recorte e o KC_{SAFER} do recorte; e $ET_{R\text{ SAFER}}$ do recorte e o KC_{SAFER} da área total, para os quatro dias, representativos das estações do ano. Analisando os valores verifica-se que os valores da $ET_{R\text{ SAFER}}$ são próximos da $ET_{0\text{ PM}}$, isso devido a dependência da $ET_{0\text{ PM}}$ para a estimativa pelo SAFER. Maiores diferenças ocorrem quando se utiliza o valor da $ET_{R\text{ SAFER}}$ da área recortada e o KC_{SAFER} da área total, com maiores variações no verão e primavera. Isso pode ser devido a dependência da temperatura à superfície na estimativa da evapotranspiração, pois as maiores diferenças (superestimativas) entre as temperaturas estimadas pelo SAFER e as observadas, ocorrem nessas estações e a heterogeneidade da área.

Tabela 13 – Valores da Evapotranspiração de referência da estação de Serra Talhada, quociente da evapotranspiração estimada pelo SAFER ($ET_{R\text{ SAFER}}$) para área total e do KC_{SAFER} da área total; quociente da $ET_{R\text{ SAFER}}$ do recorte e o KC_{SAFER} do recorte; e $ET_{R\text{ SAFER}}$ do recorte e o KC_{SAFER} da área total; representativos das quatro estações do ano

Data	DOY	$ET_{0\text{ PM}}$ Estação (mm/dia)	$ET_{0\text{ SAFER}}$ (mm/dia) (Área Original)	$ET_{0\text{ SAFER}}$ (mm/dia) (Estudo de caso)	$ET_{0\text{ SAFER}}$ (mm/dia) $ET_{R\text{ Estudo de caso}} /$ $KC_{\text{SAFER}} \text{ área original}$
02/01/2014 (verão)	2	6,40	6,40	6,40	2,44
26/05/2014 (outono)	146	6,46	6,46	6,46	5,65

Data	DOY	$ET_{0 PM}$ Estação (mm/dia)	$ET_{0 SAFER}$ (mm/dia) (Área Original)	$ET_{0 SAFER}$ (mm/dia) (Estudo de caso)	$ET_{0 SAFER}$ (mm/dia) ET_R Estudo de caso / KC_{SAFER} área original
18/07/2016 (inverno)	200	7,05	7,05	7,05	7,79
05/11/2015 (primavera)	309	7,09	7,09	7,09	3,49

Fonte: Autor (2023).

Os valores de $ET_{0 PM}$ da estação (mm/dia) e $ET_{0 SAFER}$ (mm/dia) da área de estudo original foram calculados através da Equação 7. Pode-se verificar que a média de evapotranspiração de referência ($ET_{0 SAFER}$), calculada pelo SAFER, quando utilizada com a respectiva fração evapotranspirativa (KC_{SAFER}), apresentou valor idêntico ao calculado por Penman-Monteith ($ET_{0 PM}$). Porém, para a $ET_{0 SAFER}$ (mm/dia) do estudo de caso, ao utilizar a média da evapotranspiração real ($ET_{R SAFER}$), calculada pelo SAFER na área estudo recortada, pelo quociente da fração evapotranspirativa (KC_{SAFER}) da área total de estudos, os valores variaram em relação ao calculado em superfície ($ET_{0 PM}$).

6 CONCLUSÕES

O estudo objetivou utilizar dados de superfície e imagens do Landsat-8 para estimar a evapotranspiração real para uma região heterogênea, utilizando o algoritmo SAFER. Foi possível verificar os seguintes comportamentos na área de origem do estudo:

- O comportamento dos resultados obtidos para o albedo médio, estimado a partir do SAFER, acompanha a temperatura, com máximo na primavera e mínimo no outono;
- A análise de imagens sugere valores médios de NDVI maiores no período de outono e menores na primavera. Esses valores estão de acordo com as demais variáveis analisadas, principalmente com o albedo, que possui uma relação inversa;
- A temperatura da superfície estimada pelo SAFER apresentou valores médios superiores aos observados na estação meteorológica, exceto no inverno.

Devido a heterogeneidade da área de estudo, foi feita uma nova análise, utilizando a mesma metodologia num recorte de área de 750 metros por 750 metros, com a estação ao centro. Para a realização da análise, pôde ser feita uma classificação visual do uso e ocupação do solo, através de imagens de alta resolução espacial do Google Earth. Na área do caso de estudo, resultaram os seguintes comportamentos:

- Analisando o albedo para região recortada, nota-se que o valor médio da área não apresentou grandes variações; no entanto, o valor mínimo obtido para o albedo ocorre no verão, na área do estudo de caso, enquanto na área maior, o albedo mínimo se dá no outono. Uma observação importante foi que, na primavera, o albedo se mostra maior em toda a área, estando em conformidade com o fato de ser a estação do ano mais seca e quente na região;
- O NDVI apresentou valores menores em relação à área original, resultando maiores valores no outono, período chuvoso na região, e menor índice na primavera;
- As temperaturas do SAFER foram menores no inverno e maiores na primavera. Verifica-se que os resultados para área menor também superestimaram os valores observados, exceto no inverno, em que em ambos os casos a média foi subestimada.

O SAFER apresentou os melhores resultados durante as estações de outono e inverno, considerando o fato de as temperaturas, durante essas estações do ano, estarem com valores próximos aos mensurados em superfície. Além disso, a análise comparativa da evapotranspiração de referência da estação meteorológica, da área original e da área do estudo

de caso apresentaram comportamento coerente com os valores das temperaturas nessas estações.

Nos períodos em que a T_s , calculada com os dados orbitais, foram superestimadas em relação a temperatura na estação meteorológica, o valor da evapotranspiração real apresentou resultados subestimados nos mesmos períodos.

O SAFER conseguiu diferenciar as regiões de solo exposto e urbana das regiões com vegetação. Também, observa-se a sazonalidade da caatinga, menos robusta no verão, mais robusta no outono e menos densa na primavera.

Concluiu-se que o SAFER, mesmo tendo sido desenvolvido para estimativa da ET para culturas, é eficiente para estimativa em áreas heterogêneas, podendo ser utilizado como ferramenta no auxílio do manejo da irrigação em diferentes áreas.

7 TRABALHOS FUTUROS

- Aprofundar os estudos para comparação e correlação de variáveis;
- Aplicar a metodologia com o uso das bandas termais e comparar o resultado;
- Aplicar em áreas mais homogêneas, com valores de K_c conhecidos, para tentar estimar ET Real, sem a utilização de dados de superfície;
- Avaliar a utilização de outros sistemas sensores: multiespectrais, hiperespectrais ou por radar.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.
- ALMEIDA, F. A.; MAIA, G. S. **Estimativa de evapotranspiração e coeficiente de cultura do açaí (*Euterpe oleracea Mart.*) utilizando o algoritmo SAFER**. 2021. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural da Amazônia, Tomé-Açu, 2021.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; MORAES, G.; LEONARDO, J.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v.22, n.6, p.711-728, 2013.
- ALVES, E. S. et al. Water stress coefficient determined by orbital remote sensing techniques. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, n. 12, p. 847–853, dez. 2020.
- ANTUNES, M.A.H.; ASSAD, E.D.; BATISTA, G.T. Variação das medidas espectrais tomadas com espectrorradiômetro ao longo do ciclo de crescimento da soja (*Glycine max (L.) Merrill*). Em: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 7. Curitiba: INPE, 1993. p.1-9.
- BAPTISTA, G. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**. Brasília: Laboratório de Propulsão Digital, 2021. 68 p.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. São Paulo: Ícone, 6a Ed. 2014.
- BRASIL. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **LANDSAT - Land Remote Sensing Satellite**. Disponível em: <https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/landsat>. Acesso em: 28 out. 2021.
- CABRAL JÚNIOR, J. B. **Estimativas, Variabilidade e Análise de Tendência da Evapotranspiração de Referência em Perímetros Irrigados, no Semiárido do Nordeste Brasileiro**. 2015. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Climáticas, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.
- CONGEDO, L. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. **Journal of Open Source Software**, 6(64), 3172, 2021. <https://doi.org/10.21105/joss.03172>.
- COSTA, W.M.; VIDAL, J.M.A.; SANTOS, J.F.; GUERRA, C.A.M. O açude saco em Serra Talhada-PE como uma unidade produtiva. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, Paraná, v.9, n.4, p.282-296, 2015.
- ELY, D.F.; ALMEIDA, I.R.; SANT'ANNA NETO, J.L. Implicações políticas e econômicas, variabilidade climática e o rendimento da cultura do milho no estado do Paraná. **Revista do Departamento de Geociências**, Londrina, v.12, n.1, p.495-508, 2003.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. UNITED SERVICE GEOLOGICAL SURVEY. **Toward a space-based perspective of our planet in the 1960s**. 2016. Disponível em: <https://www.usgs.gov/news/featured-story/vision-observe-earth>. Acesso em: 28 out. 2021.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. UNITED SERVICE GEOLOGICAL SURVEY. **In a September 21, 1966 press release, Secretary of the Interior Stewart Udall announced that the DOI was launching "Project EROS (Earth Resources Observation Satellites)." Udall's vision was to observe the Earth for the benefit of all**. Disponível em: https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions?qt-science_support_page_related_con=1#qt-science_support_page_related_con. Acesso em: 28 out. 2021.

FEITOSA, D. G. **Avaliação temporal e espacial do balanço de radiação, de energia e da evapotranspiração no noroeste paulista, face a mudança no uso do solo**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Agronomia. Faculdade de Engenharia. UNESP. Ilha. Solteira, 2014.

FERRAZ JARDIM, A. M. R. et al. Estudos Climáticos do Número de Dias de Precipitação Pluvial para o Município de Serra Talhada-PE. **Revista engenharia na agricultura - REVENG**, v. 27, n. 4, p. 330–337, 25 jul. 2019.

FURQUIM, L. C. et al. Estimativa da Evapotranspiração em Sistemas Integrados no Cerrado, Utilizando o Algoritmo SAFER. **Irriga**, v. 25, n. 3, p. 617–628, 28 set. 2020.

GOMES, F. I. B. P.; ZANELLA, M. E. Reflexões acerca dos impactos naturais e sociais esperados em decorrência das mudanças climáticas no semiárido brasileiro. **Journal Of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 11, n. 6, p. 328, 3 jan. 2022. Universidade Federal de Pernambuco. <http://dx.doi.org/10.29150/2237-2202.2021.252162>.

LAFLEUR, P. M.; ROUSE, W. R. Application of an energy combination model for evaporation from sparse canopies. **Agricultural And Forest Meteorology**, v. 49, n. 2, p. 135-153, jan. 1990. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923\(90\)90047-a](http://dx.doi.org/10.1016/0168-1923(90)90047-a).

LEIVAS, J. F.; TEIXEIRA, A. H. C.; ANDRADE, R. G. **Geotecnologias e geoinformação: agrometeorologia**. Em: Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas. Brasília: Embrapa, 2014.

LIMA JUNIOR, J. C.; ARRAES, F. D. D.; OLIVEIRA, J. B.; NASCIMENTO, F. A. L.; MACÊDO, K. G. Defining parameters for the Hargreaves-Samani equation for estimating reference evapotranspiration in the State of Ceará, Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 3, p. 447-454, 2016. GN1 Genesis Network. <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20160054>.

MARTINS, C. M. R. **Evapotranspiração de canaviais em diferentes fases fenológicas por sensoriamento remoto no vale do submédio do São Francisco**. 2019. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2019.

MATZENAUER, R. Evapotranspiração de plantas cultivadas e coeficientes de cultura. Em: **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, 1992.

ROSSATO, L.; ALVALÁ, R.; MARENGO, J.; ZERI, M.; CUNHA, A.; PIRES, L.; BARBOSA, H. Impact of soil moisture on crop yields over Brazilian semiarid. **Frontiers in Environmental Science**, v.5, n.73, p.1-16, 2017.

SANTOS, J. E. O. et al. Performance of SAFER evapotranspiration using missing meteorological data. **Agricultural Water Management**, v. 233, abr. 2020.

SANTOS, J. E. O. **Desempenho do Safer e Predição da Radiação Solar para a Gestão da Irrigação Via Satélite em Região Semiárida**. 2019. 97 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019.

SENA, A.; BARCELLOS, C.; FREITAS, C.; CORVALAN, C. Managing the health impacts of drought in Brazil. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v.11, n.10, p.10737-10751, 2014.

SILVA, C. O. F.; MAGNONI, P. H. J. Modelagem Espacializada da Evapotranspiração Real em Área de Reflorestamento por Meio do Pacote Agriwater Em Ambiente R. Em: **Aplicações da Linguagem R em Análises de Vegetação**. Atena Editora, 2020. p. 82–95. <https://doi.org/10.22533/at.ed.3552009038>.

SILVA, C. O. F.; TEIXEIRA, A H. C.; MANZIONE, R. L. Agriwater: An R package for spatial modelling of energy balance and actual evapotranspiration using satellite images and agrometeorological data. **Environmental Modelling & Software**, 2019.

SILVA, R. A. **Modelagem da umidade do solo utilizando imagem de satélite para análise da variação do solo/vegetação em Floresta – PE**. 2018. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Meteorologia, Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2018.

SILVA, T.G.F.; ARAÚJO PRIMO, J.T.; MOURA, M.S.B.; SILVA, S.M.S.; MORAIS, J.E.F.; PEREIRA, P.C.; SOUZA, C.A.A. Soil water dynamics and evapotranspiration of forage cactus clones under rainfed conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.50, n.7, p.515-525, 2015.

SILVA, Y. F. **Uso do algoritmo SAFER para evapotranspiração real na cultura da soja**. Jaboticabal: Universidade Estadual Paulista, 2018.

TEIXEIRA, A. et al. Energy balance and irrigation performance assessments in lemon orchards by applying the SAFER algorithm to Landsat 8 images. **Agricultural Water Management**, v. 247, mar. 2021.

TEIXEIRA, A. H. C. Determining Regional Actual Evapotranspiration of Irrigated Crops and Natural Vegetation in the São Francisco River Basin (Brazil) Using Remote Sensing and Penman-Monteith Equation. **Remote Sensing**, v. 2, n. 5, p. 1287-1319, 6 maio 2010. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/rs0251287>.

TEIXEIRA, A. H. C. et al. Water productivity monitoring by using geotechnological tools in contrasting social and environmental conditions: Applications in the São Francisco River basin, Brazil. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 18, abr. 2020.

TEIXEIRA, A. H. C.; LEIVAS, J. F.; ANDRADE, R. G.; HERNANDEZ, F. B. T. Water productivity assessments with Landsat 8 images in the Nilo Coelho irrigation scheme. **Irriga**, v. 1, n. 2, p. 1-10, 2015.

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

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. 2. ed. Recife, 2006. Disponível em: https://icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf. Acesso em: 22 dez. 2022.

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

VERSYPLE, N. I.; MACHADO, J.; ANDRADE, J. S. C. O.; WANDERLEY, R. A. Microrregião Pajeú: economia, clima e desenvolvimento da agricultura através de modelo digital do terreno. **Revista Geama**, Recife, v. 1, n. 1, p. 16-30, mar. 2015.

YAN, H.; HUANG, S.; ZHANG, J.; ZHANG, C.; WANG, G.; LI, L.; ZHAO, S.; LI, M.; ZHAO, B. Comparison of Shuttleworth–Wallace and Dual Crop Coefficient Method for Estimating Evapotranspiration of a Tea Field in Southeast China. **Agriculture**, v. 12, n. 9, p. 1392, 5 set. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture12091392>.