

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**

# **METEOROLOGIA**



## **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Bárbara Silva Souza**

**Aprimoramento do Balanço de Radiação Usando  
Computação em Nuvem e Correção Atmosférica,  
com Imagens Landsat 8**

**Campina Grande, Fevereiro de 2024**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS



UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

**BÁRBARA SILVA SOUZA**

**APRIMORAMENTO DO BALANÇO DE RADIAÇÃO USANDO  
COMPUTAÇÃO EM NUVEM E CORREÇÃO ATMOSFÉRICA, COM  
IMAGENS LANDSAT 8**

Campina Grande – PB

Fevereiro – 2024

BÁRBARA SILVA SOUZA

APRIMORAMENTO DO BALANÇO DE RADIAÇÃO USANDO COMPUTAÇÃO  
EM NUVEM E CORREÇÃO ATMOSFÉRICA, COM IMAGENS LANDSAT 8

Dissertação de Mestrado, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, para obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

**Área de concentração:** Meteorologia Agrícola e Micrometeorologia.

**Subárea:** Radiação e Sensoriamento Remoto

**Orientador:** Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva

Campina Grande – PB

Fevereiro – 2024

S729a

Souza, Bárbara Silva.

Aprimoramento do balanço de radiação usando computação em nuvem e correção atmosférica, com imagens landsat 8 / Bárbara Silva Souza – Campina Grande, 2024.

85 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva."

Referências.

1. Meteorologia Agrícola. 2. Landsat 8. 3. Balanço de Radiação. 4. LUCCs. 5. Sistema Solo-plantaatmosfera. I. Silva, Bernardo Barbosa da. II. Título.

CDU 551.5:631(043)

BÁRBARA SILVA SOUZA

APRIMORAMENTO DO BALANÇO DE RADIAÇÃO USANDO COMPUTAÇÃO  
EM NUVEM E CORREÇÃO ATMOSFÉRICA, COM IMAGENS LANDSAT 8

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 15/02/2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
 BERNARDO BARBOSA DA SILVA  
Data: 21/02/2024 07:47:15-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande



Profª. Dra. CÉLIA CAMPOS BRAGA  
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas  
Universidade Federal de Campina Grande

Documento assinado digitalmente  
 SAULO TASSO ARAÚJO DA SILVA  
Data: 20/02/2024 14:05:37-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. SAULO TASSO ARAÚJO DA SILVA  
Departamento de Engenharia e Ciências Ambientais  
Universidade Federal Rural do Semi-Árido

## DEDICATÓRIA

Ao meu filho, Lucca Hazard Souza da Paz;

A minha adorável mãe Lindalva Eva da Silva;

Aos meus irmãos Paloma Silva Souza e Gabriel  
Silva Félix e meu sobrinho Pierre Vieira Souza.

*Ofereço e Dedico.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, pelo dom da vida. Minha fé tem sido a luz que iluminou o meu caminho, dando-me força nos momentos de dúvida e esperança nos momentos desafiadores. Acreditar que há um propósito maior me sustentou no decorrer desta pesquisa.

Agradeço e dedico não só esse trabalho, mas toda a minha vida ao meu filho, Lucca. Que ingenuamente me traz forças para alcançar sempre o melhor de mim, é a minha fortaleza e a minha fonte de energia para vencer as batalhas diárias. É o meu maior presente, minha inspiração constante e a razão pela qual eu me empenho em criar um futuro brilhante. Com amor, gratidão e compromisso, este trabalho é dedicado a você, Lucca.

Aos meus familiares, que sempre apoiaram a minha formação acadêmica, que sempre acreditaram no meu potencial, me incentivando constantemente a continuar com dedicação e perseverança. São fundamentais ao longo desta jornada, agradeço por estarem ao meu lado em cada desafio, por todas as fases difíceis vencidas e por compartilharem comigo a alegria deste momento.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Bernardo Barbosa da Silva, por todo o apoio prestado, pelos ensinamentos e pela motivação. Agradeço de coração por toda contribuição na minha formação acadêmica. Obrigada pela troca de experiências e confiança.

Aos professores e colaboradores do PPGMET da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, onde iniciei a minha trajetória na Meteorologia. Meu muito obrigado por todo o ensinamento compartilhado, por proporcionarem um ambiente acadêmico rico em aprendizado e oportunidades. Suas contribuições foram valiosas para o meu desenvolvimento.

A CAPES pela concessão da bolsa de Mestrado, sem a qual não teria sido possível cursar a Pós-Graduação.

Aos membros da banca, Profa. Dra. Célia Campos Braga e Prof. Dr. Saulo Tasso Araújo da Silva, agradeço por disponibilizarem seu tempo e sua experiência na avaliação do meu trabalho.

Por fim, quero agradecer a todos os meus amigos que de alguma maneira contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste Mestrado.

“A tarefa não é tanto ver  
aquilo que ninguém viu,  
mas pensar o que ninguém ainda pensou  
sobre aquilo que todo mundo vê.”

(Arthur Schopenhauer)

## RESUMO

As mudanças no uso e cobertura do solo – LUCCs, têm o potencial de provocar significativas alterações nos balanços de radiação e energia no sistema solo-planta-atmosfera. Compreender as transformações e as consequências das LUCCs em componentes do balanço de radiação é fundamental para conceber estratégias que busquem mitigar os efeitos indesejados das alterações provocadas por essas mudanças. O presente estudo tem como objetivo estimar o saldo de radiação à superfície –  $R_n$ , avaliar os impactos da correção atmosférica sobre a temperatura da superfície –  $T_{sup}$ , radiação de onda longa emitida pela superfície –  $R_{emi}$  e saldo de radiação instantâneo –  $R_n$ , por diferentes métodos. Para isso utilizou-se dados desenvolvidos na plataforma Google Earth Engine (GEE) em área de Caatinga, localizada na região do submédio do rio São Francisco, cuja área é caracterizada por uma intensa expansão da agricultura irrigada. Analisou-se ainda analisar as alterações nos padrões das componentes do balanço de radiação  $T_{sup}$ ,  $R_{emi}$  e  $R_n$  com as LUCCs. Para isso utilizou-se imagens dos sensores OLI (Operational Land Image) e TIRS (Thermal Infrared Sensor) a bordo do satélite Landsat 8 para o período de janeiro de 2013 a dezembro de 2023. Dados meteorológicos do ERA5-Land do ECMWF foram introduzidos para caracterizar espacialmente as componentes de onda curta e onda longa incidentes sobre a área de estudo. Os resultados obtidos evidenciam que o uso da  $T_{sup}$  sem correção atmosférica resulta em subestimativas dessa importante componente, em mais de 5 °C, com impactos significativos na  $R_{emi}$  e  $R_n$ .

## ABSTRACT

Changes in land use and cover – LUCCs, have the potential to cause significant changes in the radiation and energy balances in the soil-plant-atmosphere system. Understanding the transformations and consequences of LUCCs in components of the radiation balance is essential to devise strategies that seek to mitigate the undesirable effects of the changes caused by these changes. The present study aims to estimate the surface radiation balance –  $R_n$ , evaluate the impacts of atmospheric correction on surface temperature –  $T_{sup}$ , longwave radiation emitted by the surface –  $R_{emi}$  and instantaneous radiation balance –  $R_n$ , by different methods. For this, data developed on the Google Earth Engine (GEE) platform was used in the Caatinga area, located in the sub-middle region of the São Francisco River, whose area is characterized by an intense expansion of irrigated agriculture. It was also analyzed to analyze the changes in the patterns of the  $T_{sup}$ ,  $R_{emi}$  and  $R_n$  radiation balance components with the LUCCs. For this purpose, images from the OLI (Operational Land Image) and TIRS (Thermal Infrared Sensor) sensors on board the Landsat 8 satellite were used for the period from January 2013 to December 2023. Meteorological data from ECMWF's ERA5-Land were introduced to spatially characterize the shortwave and longwave components incident on the study area. The results obtained show that the use of  $T_{sup}$  without atmospheric correction results in underestimates of this important component, by more than 5 °C, with significant impacts on  $R_{emi}$  and  $R_n$ .

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** – Ilustração das principais missões em órbita mapeando a superfície e a atmosfera terrestre. Fonte: NASA, 2023. 22
- Figura 2** – a) Mapa de localização da área de estudo, que compreende os estados de b) Pernambuco e Bahia. Fonte: Autor, 2024. 24
- Figura 3** – Distribuição temporal das imagens do Landsat 8 de 2013 a 2023, destacando a sazonalidade dos dados nas quatro estações: verão, outono, inverno e primavera. 27
- Figura 4** – Fluxograma das etapas do processamento do balanço de radiação à superfície para o OLI/TIRS do Landsat 8. Fonte: Autor, 2023. 32
- Figura 5** – Temperatura da superfície com e sem correção atmosférica para o dia 05 de outubro de 2013. 39
- Figura 6** – Temperatura da superfície com e sem correção atmosférica para o dia 09 de janeiro de 2014. 40
- Figura 7** – Temperatura da superfície com e sem correção atmosférica para o dia 24 de agosto de 2015. 41
- Figura 8** – Radiação de onda longa emitida pela superfície –  $R_{emi}$  com e sem correção atmosférica para o dia 05 de outubro de 2013. 42
- Figura 9** – Radiação de onda longa emitida pela superfície –  $R_{emi}$  com e sem correção atmosférica para o dia 09 de janeiro de 2014. 43
- Figura 10** – Radiação de onda longa emitida pela superfície –  $R_{emi}$  com e sem correção atmosférica para o dia 24 de agosto de 2015. 44
- Figura 11** – Saldo de radiação –  $R_n$  ( $W/m^2$ ) com e sem correção atmosférica para o dia 5 de outubro de 2013. 45
- Figura 12** – Saldo de radiação –  $R_n$  ( $W/m^2$ ) com e sem correção atmosférica para o dia 09 de janeiro de 2014. 46
- Figura 13** – Saldo de radiação –  $R_n$  ( $W/m^2$ ) com e sem correção atmosférica para o dia 24 de agosto de 2015. 47
- Figura 14** – Boxplots da temperatura da superfície terrestre –  $T_{sup}$  (oC), radiação

de onda longa emitida – Remi ( $W/m^2$ ) e saldo de radiação – Rn ( $W/m^2$ ) para o recorte das áreas de agricultura irrigada, caatinga e área urbana no dia 30 de março de 2013. 48

**Figura 15** – Uso e ocupação do solo no recorte da área de estudo para o ano de a) 1985 e b)2022. Fonte: MapBiomias (2023). 53

**Figura 16** – Mapas temáticos da Temperatura da Superfície Terrestre ( $T_{sup}$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 03-09-2013, 05-10-2013, 09-01-2014, 25-01-2014, 02-06-2014, 05-08-2014, 22-09-2014, 02-04-2015, 24-08-2015, 09-09-2015, 25-09-2015, 27-10-2015 55

**Figura 17** – Precipitação mensal (mm) normalizada para o período de 2013 a 2023 obtidos pela estação meteorológica do INMET de Petrolina-PE. 56

**Figura 18** – Mapas temáticos da Temperatura da Superfície Terrestre ( $T_{sup}$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 12-11-2015, 14-12-2015, 03-03-2016, 22-05-2016, 10-08-2016, 29-10-2016, 14-11-2016, 30-11-2016, 17-01-2017, 06-03-2017, 09-05-2017, 10-06-2017. 58

**Figura 19** – Mapas temáticos da Temperatura da Superfície Terrestre ( $T_{sup}$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 16-10-2017, 10-04-2018, 15-07-2018, 16-08-2018, 17-09-2018, 22-12-2018, 08-02-2019, 12-03-2019, 13-04-2019, 29-04-2019, 16-06-2019, 03-08-2019, 20-09-2019. 59

**Figura 20** – Mapas temáticos da Temperatura da Superfície Terrestre ( $T_{sup}$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 07-11-2019, 23-11-2019, 17-05-2020, 04-07-2020, 21-08-2020, 08-10-2020, 17-03-2021, 09-09-2021, 08-06-2022, 11-08-2022, 13-07-2023, 30-08-2023. 60

**Figura 21** – Evolução temporal do Saldo de Radiação – Rn de 2013 a 2023 nos diferentes tipos de uso do solo (AGR = agricultura irrigada, CAA = vegetação caatinga, PAS = pastagem, URB = área urbana, WAT = corpos d'água). 62

- Figura 22** – Evolução temporal da Radiação de Onda Longa Emitida –  $R_{emi}$  de 2013 a 2023 nos diferentes tipos de uso do solo (AGR = agricultura irrigada, CAA = vegetação caatinga, PAS = pastagem, URB = área urbana, WAT = corpos d'água). 63
- Figura 23** – Evolução temporal da Temperatura da Superfície Terrestre –  $T_{sup}$  de 2013 a 2023 nos diferentes tipos de uso do solo (AGR = agricultura irrigada, CAA = vegetação caatinga, PAS = pastagem, URB = área urbana, WAT = corpos d'água). 64
- Figura 24** – Médias sazonais a) outono, b) primavera, c) verão e d) inverno da Temperatura da Superfície Terrestre – LST no período de 2013 a 2023. 65
- Figura 25** – Mapas temáticos da Radiação de Onda Longa Emitida ( $R_{emi}$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 03-09-2013, 05-10-2013, 09-01-2014, 25-01-2014, 02-06-2014, 05-08-2014, 22-09-2014, 02-04-2015, 24-08-2015, 09-09-2015, 25-09-2015, 27-10-2015. 74
- Figura 26** – Mapas temáticos da Radiação de Onda Longa Emitida ( $R_{emi}$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 12-11-2015, 14-12-2015, 03-03-2016, 22-05-2016, 10-08-2016, 29-10-2016, 14-11-2016, 30-11-2016, 17-01-2017, 06-03-2017, 09-05-2017, 10-06-2017. 75
- Figura 27** – Mapas temáticos da Radiação de Onda Longa Emitida ( $R_{emi}$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 16-10-2017, 10-04-2018, 15-07-2018, 16-08-2018, 17-09-2018, 22-12-2018, 08-02-2019, 12-03-2019, 13-04-2019, 29-04-2019, 16-06-2019, 03-08-2019, 20-09-2019. 76
- Figura 28** – Mapas temáticos da Radiação de Onda Longa Emitida ( $R_{emi}$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 07-11-2019, 23-11-2019, 17-05-2020, 04-07-2020, 21-08-2020, 08-10-2020, 17-03-2021, 09-09-2021, 08-06-2022, 11-08-2022, 13-07-2023, 30-08-2023. 77

- Figura 29** – Mapas temáticos do Saldo de Radiação ( $R_n$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 03-09-2013, 05-10-2013, 09-01-2014, 25-01-2014, 02-06-2014, 05-08-2014, 22-09-2014, 02-04-2015, 24-08-2015, 09-09-2015, 25-09-2015, 27-10-2015. 78
- Figura 30** – Mapas temáticos do Saldo de Radiação ( $R_n$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 12-11-2015, 14-12-2015, 03-03-2016, 22-05-2016, 10-08-2016, 29-10-2016, 14-11-2016, 30-11-2016, 17-01-2017, 06-03-2017, 09-05-2017, 10-06-2017. 79
- Figura 31** – Mapas temáticos do Saldo de Radiação ( $R_n$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 16-10-2017, 10-04-2018, 15-07-2018, 16-08-2018, 17-09-2018, 22-12-2018, 08-02-2019, 12-03-2019, 13-04-2019, 29-04-2019, 16-06-2019, 03-08-2019, 20-09-2019. 80
- Figura 32** – Mapas temáticos do Saldo de Radiação ( $R_n$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 07-11-2019, 23-11-2019, 17-05-2020, 04-07-2020, 21-08-2020, 08-10-2020, 17-03-2021, 09-09-2021, 08-06-2022, 11-08-2022, 13-07-2023, 30-08-2023. 81

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** – Normais Climatológicas da estação convencional de Petrolina-PE no período de 1991-2020. Fonte: INMET, 2023. 25
- Tabela 2** – Médias da temperatura da superfície terrestre –  $T_{sup}$  (oC), radiação de onda longa emitida –  $R_{emi}$  ( $W/m^2$ ) e saldo de radiação –  $R_n$  ( $W/m^2$ ) para os três recortes: Urbana, Agricultura e Caatinga, Sem Correção (SC) e Com Correção (CC) pelos modelos propostos. 49
- Tabela 3** – Comparação entre os erros MAE (%), MRE (%) e RMSE (°C) da temperatura da superfície terrestre –  $T_{sup}$  (oC), radiação de onda longa emitida –  $R_{emi}$  ( $W/m^2$ ) e saldo de radiação –  $R_n$  ( $W/m^2$ ) para todas as datas utilizadas na pesquisa, nos três recortes: Urbana, Agricultura e Caatinga, Sem Correção (SC) e Com Correção (CC) pelos modelos propostos, comparados com dados da Torre Micrometeorológica instalada na área de estudo. 51
- Tabela 4** – Intensidade do El Niño e da La Niña durante o período de 2013 a 2023. Valores descritos azul sendo anos de ocorrência de La Niña, em vermelho El Niño e em preto, anos neutros. 57
- Tabela 5** – Lista de imagens utilizadas. Fonte: Autor, 2024. 73
- Tabela 6** – Valor médio do  $R_n$  por tipo de uso do solo. Fonte: Autor, 2024. 82
- Tabela 7** – Valor médio do  $R_{emi}$  por tipo de uso do solo. Fonte: Autor, 2024. 83
- Tabela 8** – Valor médio do  $T_{sup}$  por tipo de uso do solo. Fonte: Autor, 2024. 84

## LISTA DE SIGLAS/ABREVIATURAS

AGR	Agricultura Irrigada
API	Interfaces de programação de aplicações
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer
AWS	Estações Meteorológicas Autônomas
CAA	Vegetação Caatinga
CAST	Academia Chinesa de Tecnologia Espacial
CBERS	China-Brasil Earth Resources Satellite
CC	Com Correção
CNR4	Saldo Radiômetro
CNUC	Cadastro Nacional de Unidades de Conservação
DJ	Dia Juliano
ECMWF	European Center for Medium-Range Weather Forecast
EMA	Estações Meteorológicas Automáticas
ESA	Agência Espacial Europeia
GEE	Google Earth Engine
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IAF	Índice de Área Foliar
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LUCCs	Mudanças no uso e ocupação do solo
METRIC	Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration
MMA	Ministério do Meio Ambiente
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
OLI	Operational Land Imager
OSEB	One-Source Energy Balance
PAS	Pastagem
RTE	Equação de Transferência Radiativa
SAR	Synthetic Aperture Radar
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SC	Sem Correção
SEBAL	Surface Energy Balance Algorithm for Land
SR	Sensoriamento Remoto

SURFRAD	Surface Radiation Budget Network
TIRS	Thermal Infrared Sensor
URB	Área Urbana
WAT	Corpos D'água

## LISTA DE SÍMBOLOS

$a_{\gamma}$	Absortividade
$B_{\lambda}(T)$	Radiância do corpo negro para um comprimento de onda $\lambda$ a uma temperatura T ( $W/m^2sr\mu m$ )
$d_r$	Quadrado inverso da distância relativa Terra-Sol (adimensional)
E	Ângulo de elevação do Sol (graus)
$E_b(T)$	Emitância radiante total de um corpo negro
IAF	Índice de Área Foliar ( $m^2/m^2$ )
$IR_{atm}$	Irradiância de onda longa atmosférica ( $W/m^2$ )
$IR_{atm, ref}$	Irradiância de onda longa atmosférica refletida pela superfície ( $W/m^2$ )
$IR_{emi}$	Irradiância de onda longa emitida pela superfície ( $W/m^2$ )
$IR_{sup}$	Irradiância de onda longa da superfície ( $W/m^2$ )
$K_1$	Constante de radiação ( $W/m^2sr\mu m$ ) específica para o sensor TIRS
$K_2$	Constante de radiação (K) específica para o sensor TIRS
$k_t$	Coefficiente de turbidez da atmosfera
$K_{\lambda i}$	Irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ( $W/m^2\mu m$ )
$L_{10}$	Radiância da banda 10 do TIRS ( $W/m^2sr\mu m$ )
$L_{\lambda,6}$	Radiância espectral da banda termal
$L_{\lambda,b}$	Radiância espectral de cada banda ( $W/m^2sr\mu m$ )
$N_C$	Nível de cinza
P	Pressão atmosférica (kPa)
$R_{atm}$	Radiação de onda longa atmosférica incidente ( $W/m^2$ )
$R_{atm,ref}$	Radiação de onda longa atmosférica refletida pela superfície ( $W/m^2$ )
$r_b$	reflectância monocromática de cada banda
$R_{co}$	Radiância corrigida ( $W/m^2sr\mu m$ )
$R_{emi}$	Radiação de onda longe emitida pela superfície ( $W/m^2$ )
$R_g$	Radiação solar global incidente ( $W/m^2$ )
$R_n$	Saldo de radiação à superfície ( $W/m^2$ )
$R_{oc}$	Saldo de radiação de ondas curtas ( $W/m^2$ )
$R_{ol}$	Saldo de radiação de ondas longas ( $W/m^2$ )
$R_p$	Radiância de trajetória ( $W/m^2sr\mu m$ )
$R_{ref}$	Radiação solar refletida pela superfície ( $W/m^2$ )

$R_{sky}$	Radiância emitida pela atmosfera em condições de céu limpo ( $W/m^2sr\mu m$ )
$R_{tb}$	Radiância monocromática da banda termal registrada ao nível orbital ( $W/m^2 sr\mu m$ )
$r_\gamma$	Refletividade
$S$	Constante solar ( $W/m^2$ )
SAVI	Índice de Vegetação com Ajuste do Solo
$T$	Temperatura
$T_a$	Temperatura média da atmosfera ( $^{\circ}C$ )
$T_{a,2m}$	Temperatura do ar a 2 metros da superfície (K)
$T_b$	Temperatura de brilho ( $^{\circ}C$ )
$T_{sup}$	Temperatura da superfície terrestre
$T_{sup,sc}$	Temperatura da superfície sem correção
$T_{torre}$	Temperatura medida na torre micrometeorológica
$t_\gamma$	Transmissividade
$W$	Água precipitável ( $g/cm^2$ ou mm)
$Z$	Ângulo zenital solar (graus)
$\alpha_1$ e $\alpha_2$	Parâmetros
$\alpha_a$	Reflectância da atmosfera
$\alpha_{sup}$	Albedo da superfície ou albedo corrigidos os efeitos atmosféricos
$\alpha_{toa}$	Albedo da superfície sem correção atmosférica ou albedo planetário
$\epsilon_0$	Emissividade da superfície
$\epsilon_a$	Emissividade da atmosfera
$\epsilon_{nb}$	Emissividade no domínio da banda termal
$\epsilon_\gamma$	Emissividade
$\lambda$	Comprimento de onda ( $\mu m$ )
$\rho_{IV}$	Refletividade do infravermelho próximo (banda 5 do Landsat 8)
$\rho_V$	Refletividade do vermelho (banda 4 do Landsat 8)
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann ( $W/m^2K^4$ )
$\tau$	Transmitância atmosférica média na banda termal (0,866)
$\tau_{nb}$	Transmitância atmosférica na banda termal
$\tau_{oc}$	Transmissividade atmosférica que para condições de céu claro

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1.	Objetivos	14
1.1.1.	Objetivo geral	14
1.1.2.	Objetivos específicos	14
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>15</b>
2.1.	Radiação Solar e Terrestre	15
2.2.	Balanço de radiação	17
2.2.1.	Algoritmos de estimativa do saldo de radiação	18
2.3.	Correção atmosférica	19
2.4.	Sensoriamento remoto	20
2.5.	Plataforma Google Earth Engine - GEE	22
<b>3.</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>24</b>
3.1.	Área de estudo	24
3.2.	Imagens de satélite Landsat 8 OLI/TIRS	26
3.3.	Determinação do saldo de radiação (algoritmo SEBAL)	28
3.4.	Algoritmos de correção atmosférica	32
3.4.1.	Método 1 (Allen et al., 2007)	32
3.4.2.	Método 2 (Quin et al., 2001)	33
3.4.3.	Método 3 (Sekertekin & Bonafoni, 2020)	34
3.5.	Estimativa da $T_{sup}$ Sem Correção	34
3.6.	Torre micrometeorológica	35
3.7.	Métricas estatísticas de erros e teste estatístico	36
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>38</b>
4.1.	Temperatura da superfície	38
4.2.	Radiação de onda longa emitida pela superfície	41
4.3.	Saldo de radiação de onda longa emitida à superfície	44
4.4.	Avaliação dos componentes do balanço de radiação em diferentes tipos de uso do solo	47
4.5.	Análise estatística para detecção de mudanças significativas	49
4.6.	Mudanças no uso e ocupação do solo	52
4.7.	Variabilidade anual dos componentes do balanço de radiação	54
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>66</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>67</b>

7.	APÊNDICE A	73
8.	APÊNDICE B	74
9.	APÊNDICE C	82

## 1. INTRODUÇÃO

As mudanças no uso e ocupação do solo – LUCCs podem proporcionar grandes impactos nos balanços de radiação e energia no sistema solo-planta-atmosfera, em especial na temperatura da superfície terrestre –  $T_{sup}$  e prováveis alterações na temperatura do ar. O entendimento das consequências das LUCCs sobre variáveis meteorológicas é crucial para desenvolver estratégias que visem a mitigação dos impactos das mudanças climáticas (Cibin et al., 2010). De acordo com Peres (2011), o Brasil tem apresentado diversos problemas relacionados aos impactos ambientais gerados pelas LUCCs. Em um intervalo de apenas cinquenta anos, a nação transitou de uma predominância rural para uma realidade essencialmente urbana, cujo período mais marcante dessa inversão ocorreu entre os anos 1960 e 1980. Como consequência desse processo tem-se, sobretudo, os impactos ambientais causados por ações antrópicas.

De forma análoga, a calha fluvial do rio São Francisco expõe profundas transformações na cobertura do solo provocadas pelo homem ao longo dos anos, comprometendo a qualidade ambiental (Barreto, 2015). Essas transformações da paisagem têm acarretado impactos ambientais, principalmente na vegetação típica local caracterizada pelo bioma Caatinga em que apenas algumas paisagens ecologicamente importantes deste habitat natural permanecem, das quais apenas 1,3% são protegidas por lei (CNUC/MMA, 2018). Essas alterações nas variáveis biofísicas da superfície impactam o balanço de radiação a superfície.

A descrição completa do balanço de radiação no sistema solo-planta-atmosfera exige a obtenção de medições espaço temporais, assim como a análise da distribuição e direção dos fluxos radiativos. Para estimar os componentes do balanço de radiação usando imagens de satélite, é preciso mitigar os efeitos do vapor d'água com métodos eficientes (correção atmosférica) sobre as imagens de sensores orbitais. Essa correção permite que a influência da atmosfera seja reduzida, proporcionando uma imagem mais fiel, conseqüentemente, assinaturas espectrais sem interferência (Souza, 2008).

A radiação solar global incidente na Terra está em balanço com a radiação emergente da superfície terrestre e alterações nestas quantidades induzem ajustes no balanço radiativo do planeta, os quais se manifestam por meio de mudanças na

temperatura do ar. O mapeamento prévio da radiação solar e sua respectiva variabilidade desempenham um papel fundamental na progressão da eficiência energética e serve de suporte para a crescente necessidade de energia (Castro, 2015).

Os sensores a bordo de satélites meteorológicos e ambientais têm promovido grandes avanços científicos e, por conseguinte, inúmeras pesquisas têm utilizado dados fornecidos por imagens satelitárias para obtenção do saldo de radiação utilizando diferentes algoritmos, como SEBAL e METRIC. No Brasil, evidenciam-se os trabalhos realizados por Silva et al. (2005), Teixeira et al. (2008), Oliveira et al. (2015), Ferreira et al. (2020) e no exterior, por Bastiaanssen et al. (1998) e Bastiaanssen et al. (2000). Para o cômputo dos componentes do balanço de radiação, se faz necessário o *input* de variáveis meteorológicas, que em grande parte das pesquisas desenvolvidas nessa linha utilizam-se de dados das Estações Meteorológicas Automáticas (EMA) para gerar em apenas um ponto das áreas de estudo a radiação de onda curta e onda longa incidentes. Esse problema pode ser contornado ao se integrar dados provenientes de reanálise do *European Center for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF), o qual seria uma alternativa viável para a substituição dos dados meteorológicos de superfície, contudo poucas pesquisas determinaram sua utilização na modelagem do balanço de radiação. Este modelo atmosférico global é empregado em um sistema de assimilação de dados que coleta informações de diversas fontes meteorológicas no mundo (ECMWF, 2019; Couto et al., 2015). A utilização de dados provenientes de modelos globais é uma alternativa para dados meteorológicos de superfície faltantes e sem séries históricas homogêneas, subsidiando, assim, avaliações em áreas sem estações meteorológicas de superfície.

Diante do exposto, este trabalho visa contribuir para aprimorar a determinação do saldo de radiação com imagens de satélite e dados de reanálise para propiciar a espacialização da radiação de onda longa atmosférica incidente -  $R_{atm}$  e também da radiação solar global incidente -  $R_g$ .

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo geral**

Aprimorar a determinação do saldo de radiação por meio de imagens de satélite através de computação em nuvem (Google Earth Engine – GEE) com a introdução de dados meteorológicos do ERA5-Land e correção atmosférica da  $T_{\text{sup}}$ .

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Introduzir dados meteorológicos do ERA5-Land para caracterizar espacialmente as componentes do balanço de radiação sobre a área de estudo;
- Promover correção atmosférica nos dados de temperatura da superfície  $T_{\text{sup}}$  por três diferentes algoritmos;
- Avaliar os impactos da correção atmosférica sobre a  $T_{\text{sup}}$ ,  $R_{\text{emi}}$  e  $R_{\text{n}}$ .

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Radiação Solar e Terrestre

A radiação solar desempenha um papel fundamental nos processos de interação entre a atmosfera e a biosfera. É a principal fonte de energia para o Planeta seja na forma de luz ou calor, para processos tanto biológicos quanto meteorológicos. Essa energia é emitida na forma de radiação eletromagnética, com comprimento de onda que variam de  $10^{-10}$  cm (raios gama) até cerca de  $10^7$  cm (ondas de rádio), cujo conjunto denomina-se de espectro eletromagnético. A interação da radiação eletromagnética proveniente do Sol com os constituintes atmosféricos – sobretudo vapor d'água, oxigênio, ozônio e gás carbônico, também variam para cada comprimento de onda.

A quantidade total de energia recebida pela Terra é influenciada pela sua inclinação em relação à órbita elíptica e pela sua rotação em torno do próprio eixo. Isso resulta em uma distribuição desigual da energia solar ao longo do ano em sua superfície. Consequentemente, regiões próximas ao equador, com latitudes mais baixas, recebem uma quantidade maior de radiação solar que é distribuída de maneira quase homogênea durante todo o ano. Conforme se aproxima das latitudes médias, começam a surgir variações sazonais mais pronunciadas, resultando em estações do ano bem definidas. Nas latitudes mais altas, algumas áreas recebem uma quantidade significativa de radiação solar apenas durante o solstício de verão, enquanto durante o solstício de inverno a radiação é escassa. Em regiões polares, a quantidade de radiação solar pode ser nula durante o solstício de inverno e, durante o solstício de verão, os dias são predominantemente caracterizados por longos períodos de insolação, com ausência da noite (Mendonça et al., 2017; Silva, 2014). De maneira geral, aproximadamente 50% da energia solar que chega ao topo da atmosfera alcança a superfície terrestre, e grande parte desta energia que alcança a superfície é irradiada para a atmosfera em forma de radiação de ondas longas, com comprimentos de onda maiores que a radiação solar, estes situados no intervalo do infravermelho. O vapor d'água e dióxido de carbono são os principais absorvedores neste intervalo de comprimento de onda (Mendonça et al., 2017).

Antes de atingir a superfície terrestre, a radiação solar interage com a atmosfera e, nessa interação, sofre alterações de intensidade por emissão, absorção, reflexão e/ou transmissão. De modo que, de acordo com Vianello et al. (2012), definem:

- Emissividade monocromática ( $\epsilon_\lambda$ ) – a razão entre a emitância monocromática e a correspondente emitância monocromática de um corpo negro (correspondente a 1), à mesma temperatura.
- Absortividade monocromática ( $a_\lambda$ ) – a razão entre a quantidade de energia radiante absorvida por determinado material e o total incidente, para um dado comprimento de onda. A absortividade de um corpo negro corresponde a 1.
- Refletividade monocromática ( $r_\lambda$ ) – a razão entre a quantidade de energia radiante refletida por determinado material e o total incidente, para um dado comprimento de onda. Um corpo negro tem refletividade nula.
- Transmissividade monocromática ( $t_\lambda$ ) – a razão entre a quantidade de energia radiante transmitida e o total incidente, para um dado comprimento de onda. Um corpo negro tem transmissividade nula.

Pela lei da conservação da energia, tem-se que:

$$a_\lambda + r_\lambda + t_\lambda = 1 \quad (1)$$

Os processos de emissão, absorção, reflexão e transmissão ocorrem simultaneamente. A intensidade com que cada processo ocorre depende das propriedades físicas e químicas da matéria e ainda, varia conforme a região espectral. Essa variação espectral denomina-se “assinatura espectral” (Vianello et al., 2012).

Todo corpo com uma temperatura superior a  $-273^\circ\text{C}$  (ou 0 K) possui energia, e emite radiação. Desta forma, a quantidade de radiação emitida por um corpo dependerá de sua temperatura, de modo que a emitância radiante total será proporcional à quarta potência da sua temperatura (Lei de Stefan-Boltzmann):

$$E_b(T) = \epsilon_0 \sigma T^4 \quad (2)$$

onde  $E_b(T)$  é a emitância radiante total de um corpo negro,  $\varepsilon_0$  é a emissividade da superfície,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman ( $5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ) e  $T$  é a temperatura em graus Kelvin (Vianello et al., 2012).

Através da Lei de Planck, pode ser determinada a emitância espectral em função da temperatura e da frequência da radiação, podendo ser expressa matematicamente em função do comprimento de onda como:

$$B_\lambda(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (3)$$

em que  $B_\lambda(T)$  é a função de Planck,  $C_1 = 2hc^2 = 1,1910623 \cdot 10^{-16} \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$  e  $C_2 = hc_0/k = 1,4387865 \cdot 10^2 \text{ mK}$  são constantes de radiação,  $T$  é a temperatura (K) e  $\lambda$  é o comprimento de onda ( $\mu\text{m}$ ) (Vianello et al., 2012).

A Lei de Kirchhoff estabelece que a emissividade  $\varepsilon_\lambda$  de um corpo é igual à sua absorptividade  $a_\lambda$  para um dado comprimento de onda e uma dada temperatura.

Sabe-se também que existe uma relação inversamente proporcional entre a temperatura absoluta  $T$  e o comprimento de onda de máxima emissão energética de um corpo – a chamada Lei de Wien. Esta relação é expressa por:

$$\lambda^* = \frac{K}{T} \quad (4)$$

em que  $K = 2.897,8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$  é a constante de Wien.

## 2.2. Balanço de radiação

O balanço de radiação à superfície –  $R_n$  pode ser compreendido como um processo no qual são contabilizados os fluxos radiativos de onda curta e onda longa incidentes e emergentes no sistema solo-planta-atmosfera, sendo este, o balanço entre as cinco componentes:  $R_g^\downarrow$ ,  $R_{\text{ref}}^\uparrow$ ,  $R_{\text{atm}}^\downarrow$ ,  $R_{\text{atm,ref}}^\uparrow$ ,  $R_{\text{emi}}^\uparrow$ .

$$R_n = R_g^\downarrow - R_{\text{ref}}^\uparrow + R_{\text{atm}}^\downarrow - R_{\text{atm,ref}}^\uparrow - R_{\text{emi}}^\uparrow \quad (5)$$

onde  $R_g$  é a radiação solar global incidente,  $R_{ref}$  é a radiação solar refletida pela superfície,  $R_{atm}$  é a radiação de onda longa atmosférica incidente,  $R_{atm,ref}$  é a radiação de onda longa atmosférica refletida pela superfície e  $R_{emi}$  é a radiação de onda longa emitida pela superfície.

### **2.2.1. Algoritmos de estimativa do saldo de radiação**

Diversos modelos que utilizam dados de sensoriamento remoto para estimar os balanços de radiação e energia na superfície terrestre têm ganhado evidência, entre esses modelos, destacam-se o Surface Energy Balance Algorithm for Land – SEBAL, desenvolvido por Bastiaanssen et al. (1998), e o Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration – METRIC, desenvolvido por Allen et al. (2007). O modelo METRIC se baseia na formulação do SEBAL, ambos empregam o mesmo algoritmo para calcular o saldo de radiação. SEBAL e METRIC se destacam por terem sido validados em diferentes regiões do mundo. As principais diferenças entre os dois métodos, quanto da determinação do saldo de radiação, são: no METRIC se efetiva correção atmosférica de cada banda de onda curta a ser empregada no cálculo do albedo, enquanto no SEBAL se corrige os efeitos atmosféricos apenas sobre o albedo planetário; outra diferença importante é que no METRIC se considera a inclinação de cada pixel no cálculo dos índices de vegetação e albedo, diferentemente do SEBAL, que ignora tais efeitos.

O modelo SEBAL requer dados de radiação eletromagnética nas faixas do visível, do infravermelho próximo e do infravermelho termal, obtidos por sensoriamento remoto. Além disso, alguns parâmetros meteorológicos são necessários para o processamento e podem ser adquiridos de estações meteorológicas ou de dados de reanálise. Para a estimativa apenas do saldo de radiação, os dados de sensoriamento remoto requeridos subsidiam a obtenção do albedo e da temperatura da superfície, além de índices de vegetação (Allen et al., 2007; Bastiaanssen et al., 1998; Bastiaanssen et al., 2005). Em contrapartida, o modelo METRIC, derivado do SEBAL, difere principalmente na forma como as informações das imagens são selecionadas e usadas na calibração dos fluxos de energia. Tanto o SEBAL quanto o METRIC têm sido amplamente validados em várias regiões do mundo.

No Brasil, há uma série de estudos utilizando o SEBAL na determinação do balanço de energia, do saldo de radiação e da evapotranspiração da superfície terrestre em

várias regiões do país. Inclui-se a estimativa do balanço de radiação através de imagens Landsat 5 em áreas irrigadas na Bahia por Silva et al. (2005); determinação do saldo de radiação na Ilha do Bananal (Tocantins) também com imagens Landsat 5 por Gusmão et al. (2012); avaliação do saldo de radiação no Mato Grosso em áreas de Cerrado e de transição Amazônia-Cerrado por Fausto et al. (2014) e Marques et al. (2017); estimativa do balanço radiativo da bacia hidrográfica do Mogi-Guaçu, São Paulo por Silva et al. (2015). Já Schirmbeck et al. (2018) avaliaram os modelos OSEB (One-Source Energy Balance) e SEBAL na estimativa do balanço de energia de áreas agrícolas no Rio Grande do Sul; Oliveira et al. (2019) utilizaram imagens ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer) na investigação dos efeitos das mudanças de cobertura do solo no particionamento da energia da superfície, na Amazônia; Ferreira et al. (2020) avaliaram o saldo de radiação em uma região do semiárido brasileiro a partir de imagens Landsat 8; Miranda et al. (2022) estudaram os impactos da urbanização nos fluxos de energia de superfície na região metropolitana do Rio de Janeiro, utilizando imagens Landsat 5, 7 e 8; entre outros estudos que aplicaram imagens Landsat ou ASTER para investigar diversos aspectos dos balanços de radiação e energia na superfície terrestre.

### **2.3. Correção atmosférica**

A radiância emergente da superfície terrestre é detectada pelos sensores a bordo de diversos satélites, sofrendo modificações em diferentes intervalos espectrais, devido a interferência que a atmosfera produz (Souza & Silva, 2005). No entanto, em diversos algoritmos empregados na determinação do saldo de radiação e também no balanço de energia tem se negligenciado a correção atmosférica (Silva et al., 2005; Ferreira et al., 2020). Os métodos de correção atmosférica têm como base a equação de transferência radiativa, e nesse sentido, vários autores usam códigos de transferência radiativa para avaliar parâmetros atmosféricos.

Sekertekin (2019) avaliou o desempenho do método da equação de transferência radiativa na recuperação da temperatura da superfície usando imagens de satélite Landsat 8 e dados *in situ* das estações da Surface Radiation Budget Network (SURFRAD). Vanhellemont (2020) apresentou uma estimativa alternativa de emissividade a partir de imagens multiespectrais, usando uma abordagem de aprendizado de máquina (rede neural) e uma biblioteca espectral e medições de temperatura *in situ* de uma rede de 14

Estações Meteorológicas Autônomas na Bélgica. Srivastava et al. (2023) usaram um modelo de transferência radiativa para correção atmosférica de imagens de satélite multiespectral para recuperação da temperatura da superfície terrestre. Allen et al. (2007) propuseram uma simplificação no processo de correção atmosférica da radiância espectral da superfície detectada por sensores a bordo do Landsat 5 e 7.

#### **2.4. Sensoriamento remoto**

O Sensoriamento Remoto - SR, termo cunhado no início dos anos de 1960 é uma das mais bem sucedidas tecnologias de coleta automática de dados para o levantamento e monitoração dos recursos terrestres em escala global (Meneses, 2012). O termo “Sensoriamento Remoto”, foi criado para designar o processo para obter imagens da superfície terrestre, detectar alterações na cobertura da superfície e os diferentes tipos de uso do solo, visto que tais interações entre a radiação eletromagnética e os diferentes materiais resultam em valores distintos na radiância detectada remotamente (Singh, 1989). A grande revolução do SR aconteceu no início da década de 1970, com o lançamento dos satélites de recursos naturais terrestres. Um dos programas mais importantes desenvolvidos foi o “Landsat”, da Nasa (*National Aeronautics and Space Administration*), iniciado em 23 de julho de 1972 (Paranhos-Filho, 2008).

Diante da aplicabilidade dos produtos de SR para diversas finalidades, algumas características são importantes como as resoluções temporal, espacial, espectral e radiométrica, pois as mesmas definem o nível de detalhe que se pode observar os objetos da superfície terrestre. A detecção da energia refletida e emitida em várias faixas e frequências do espectro eletromagnético tem se expandido significativamente devido ao crescente número de satélites em órbita. São obtidas informações sobre a superfície terrestre, como a reflectância da superfície, temperatura da superfície, albedo, etc. Esses avanços estão contribuindo para a expansão das bases de dados disponíveis para estudos relacionados a mudanças na cobertura e uso do solo, bem como para diversas outras aplicações (Santos, 2020).

Cientes da importância ambiental deste tipo de satélite e levando em conta os aspectos comerciais do SR, os governos do Brasil e da China assinaram, em 06 de julho de 1988, um acordo de parceria envolvendo o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas

Espaciais) e a CAST (Academia Chinesa de Tecnologia Espacial) e com essa parceria, desenvolveram satélites para monitoramento terrestre, denominado programa CBERS (China-Brasil Earth Resources Satellite) (Guedes et al., 2018)

Com isso, a evolução do SR é fruto de um esforço multidisciplinar que envolveu e envolve avanços na física, na físico-química, na química, nas biociências e geociências, na computação, na mecânica, dentre outras ciências (Figueiredo, 2005). Durante muito tempo, as imagens de satélite eram obtidas pelo site da NASA e não eram gratuitas, e com o avanço tecnológico passou a ser gratuitas e hoje em dia podem ser obtidas e processadas pelos supercomputadores do Google.

- A coleção Landsat inclui sete satélites multiespectrais: Landsat 1–3 (1972 – 1983), Landsat 4 (1982 – 1993), Landsat 5 (1984 – 2012), Landsat 7 (1999 – presente) e Landsat 8 (2013 – presente).
- A coleção Sentinel, desenvolvidos pela Agência Espacial Europeia (ESA), inclui Sentinel 1 – Synthetic Aperture Radar (SAR) (2014 – presente), Sentinel 2 – multiespectral (2015 – presente), Sentinel 3 – Ocean and Land Color (2016 – presente) e Sentinel 5P – Tropospheric Monitoring (2018 – presente)
- A coleção MODIS estão disponíveis no Catálogo de Dados GEE de 2000 até o presente. Entre outros satélites.



**Figura 1** – Ilustração das principais missões em órbita mapeando a superfície e a atmosfera terrestre. Fonte: NASA, 2023.

## 2.5. Plataforma Google Earth Engine - GEE

O uso de produtos de Sensoriamento Remoto – SR vem crescendo nos últimos tempos impulsionado pelo avanço e desenvolvimento de novas tecnologias como computação em nuvem, deep learning e processamento de alta performance. Neste sentido, o Google lançou em 2010 uma plataforma de computação em nuvem, chamada Google Earth Engine – GEE, como uma importante ferramenta para a realização de pesquisas na área das ciências da Terra para enfrentar eficazmente os desafios da análise de big data (Amani et al., 2020). A plataforma do GEE se tornou a principal ferramenta de processamento de imagens de satélite devido a otimização de processamento e análises espaciais através da virtualização de supercomputadores do Google para o usuário. Esses sistemas fornecem infraestrutura, plataforma, serviços de armazenamento e pacotes de software de diversas maneiras. Diversas operações podem ser realizadas dentro da plataforma GEE, que vão desde operações matemáticas simples até processamento avançado de imagens e algoritmos de aprendizado de máquina pelo grande poder computacional da plataforma GEE.

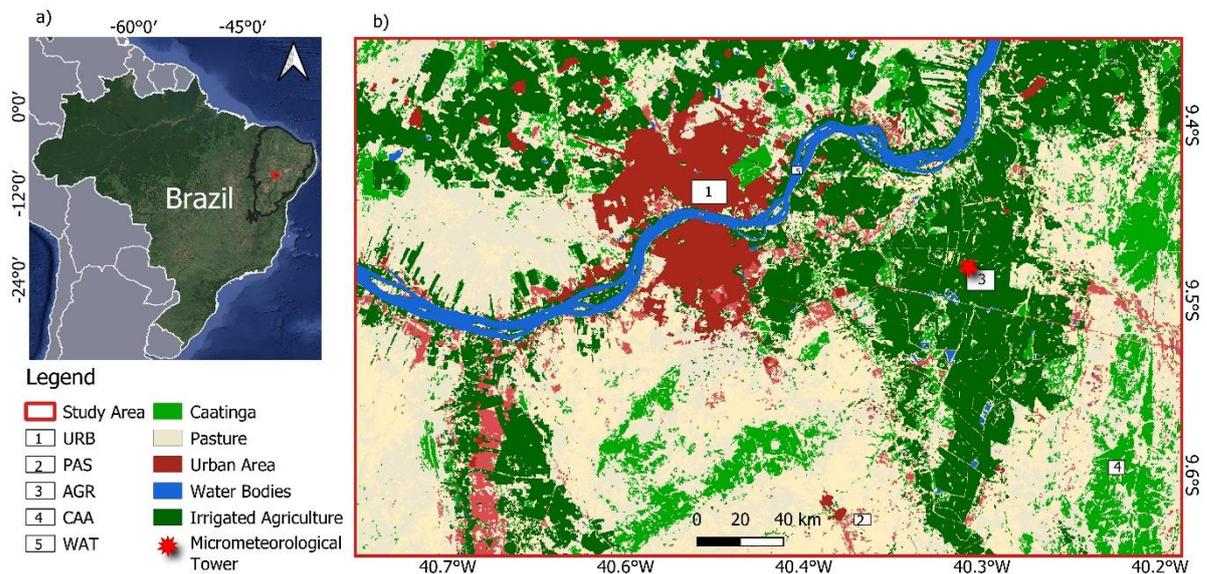
O GEE contém um grande catálogo de mais de 40 anos de conjuntos de dados do SR geofísicos e meteorológicos, contém a maioria dos conjuntos de dados temporais e importantes do SR, incluindo Landsat, MODIS e Sentinel. Além disso, os usuários do GEE não precisam realizar qualquer download para operá-lo, visto que o mesmo foi desenvolvido para ser manuseado via internet através de Interfaces de programação de aplicações (API), contendo um ambiente de desenvolvimento integrado (<https://code.earthengine.google.com/>) em linguagem Javascript, além de uma versão API em Python (Santos, 2020).

Apesar de todos os benefícios, apresentam algumas limitações embora relativamente pequenas. A análise de imagens baseada em GEE é restrita às ferramentas existentes na API GEE. Algoritmos complexos de machine learning que exigem grandes conjuntos de dados de treinamento ou tempos de treinamento mais longos não são executados no GEE devido a restrições computacionais. Assim, os usuários precisam implementar esses algoritmos fora deste ambiente. Métodos padrão de pré-processamento de imagens (por exemplo, técnicas de correção atmosférica) não estão atualmente implementados no GEE. Além disso, o desenvolvimento de novas ferramentas não é trivial e requer conhecimento sobre todos os algoritmos GEE e suas funcionalidades, juntamente com considerações de desempenho sobre a computação baseada em nuvem nos servidores do Google. Dados processados para análise posterior em um ambiente de software de terceiros, os usuários enfrentam um processo demorado devido ao enorme tamanho dos mapas e às limitações de velocidade da Internet, além de problemas para download (Amani et al., 2020).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Área de estudo

Localizada na Bacia Hidrográfica do Submédio do Rio São Francisco, a área de estudo do presente trabalho compreende uma região de 2.041,3 km<sup>2</sup> no domínio do bioma Caatinga entre os estados de Pernambuco e Bahia. A área selecionada inclui parte do rio São Francisco, polos de irrigação de Petrolina-PE/Juazeiro-BA, áreas da Caatinga, vegetação de pastagem e lavouras irrigadas. O retângulo da área de estudo selecionado possui as seguintes coordenadas: canto superior direito (longitude 40,21° Oeste e latitude 09,29° Sul) e canto inferior esquerdo (longitude 40,72° Oeste e latitude 09,62° Sul). Na Figura 2 está representada a área estudada, resultante da coleção 7 do Projeto MapBiomas (2023). Embora a agricultura irrigada não seja o tipo de agricultura mais comum encontrado no Semiárido brasileiro, é predominante na área de estudo devido ao fácil acesso ao rio São Francisco, que abastece a água de irrigação (Ferreira et al., 2020).



**Figura 2** – a) Mapa de localização da área de estudo, que compreende os estados de Pernambuco e Bahia. Fonte: Autor, 2024.

Segundo a Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF, 2010), na área agrícola de Petrolina-PE/Juazeiro-BA diversos cultivos agrícolas são praticados, como uva, cana-de-açúcar, manga, goiaba, coco verde,

mamão, melão e melancia. Alguns dos maiores perímetros irrigados são os de Curaçá, Maniçoba, Tourão, Mandacaru, Senador Nilo Coelho e Bebedouro.

O clima da região que compreende o centro de desenvolvimento Petrolina-PE/Juazeiro-BA é do tipo BSw<sup>h</sup>, segundo a classificação de Koppen-Geiger, correspondendo a uma região de clima árido com a estação chuvosa representando cerca de 80% do total anual entre os meses de dezembro e abril. As normais climatológicas do período 1991-2020 para a estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de Petrolina-PE (código 82983) registra-se temperatura do ar média anual de 27,2 °C, com máxima igual a 34,3 °C em novembro e mínima de 20,2 °C em julho. O total acumulado médio anual de precipitação é de 419,0 mm com máxima de 83,6 mm no mês de março e mínima de 1,7 mm no mês de agosto (distribuição irregular). A Tabela 1 apresenta os valores mensais e anuais de precipitação, temperatura, insolação e nebulosidade.

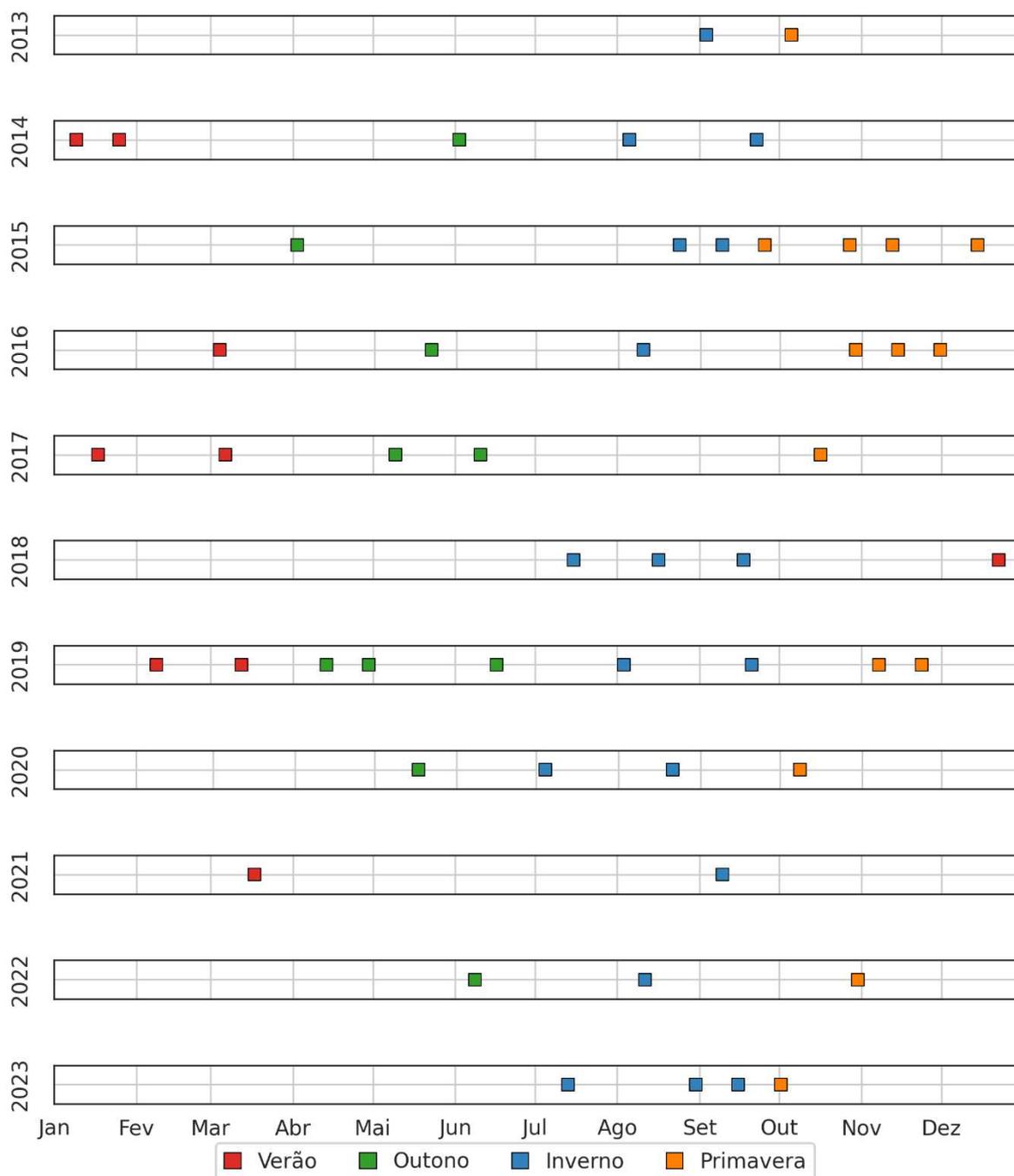
**Tabela 1** – Normais Climatológicas da estação convencional de Petrolina-PE no período de 1991-2020. Fonte: INMET, 2023.

Mês	Precipitação acumulada (mm)	Temperatura do ar máxima diária (°C)	Temperatura do ar mínima diária (°C)	Temperatura do ar média diária (°C)	Insolação (horas)	Nebulosidade (décimos)
Janeiro	83,5	33,5	23,6	28,2	252,7	0,6
Fevereiro	78,1	33,2	23,6	28,1	226,8	0,6
Março	83,6	33,1	23,8	28,0	245,5	0,7
Abril	45,8	32,6	23,4	27,6	243,5	0,6
Mai	11,0	31,6	22,5	26,6	234,6	0,6
Junho	5,7	30,3	21,1	25,2	226,0	0,5
Julho	4,5	29,8	20,2	24,6	248,8	0,5
Agosto	1,7	30,8	20,3	25,2	273,0	0,4
Setembro	2,3	32,8	21,3	26,9	279,6	0,4
Outubro	9,2	34,2	22,7	28,5	290,6	0,4
Novembro	46,5	34,3	23,4	28,8	263,7	0,5
Dezembro	47,1	34,0	23,7	28,6	264,0	0,6
Anual	419,0	32,5	22,5	27,2	3048,8	0,5

### 3.2. Imagens de satélite Landsat 8 OLI/TIRS

Utilizaram-se imagens dos sensores Operational Land Imager (OLI) bandas 2 (0,450-0,51  $\mu\text{m}$ ), 3 (0,53-0,59  $\mu\text{m}$ ) e 4 (0,64-0,67  $\mu\text{m}$ ) no espectro visível, 5 (0,85-0,88  $\mu\text{m}$ ) no infravermelho próximo, 6 (1,57-1,65  $\mu\text{m}$ ) e 7 (2,11-2,29  $\mu\text{m}$ ) no infravermelho de ondas curtas, todos com resolução espacial de 30 m, assim como a banda 10 do Thermal Infrared Sensor (TIRS) com resolução espacial de 100 m. Foram selecionadas 51 imagens OLI/TIRS Landsat 8, caminho 217 e órbita 67, pertencentes a Coleção 2, *Tier 1* de Refletância do Topo da Atmosfera (TOA), para o período de 2013-2023 (Figura 3), com no máximo 3% de pixels com presença de nuvens e/ou sombra de nuvens. Assim, foram consideradas apropriadas apenas as imagens que apresentavam qualidade máxima. Foi realizada a identificação de cobertura de nuvens pela máscara “QA\_PIXEL”, a qual traz a identificação dos pixels que representam nuvens ou nuvens dilatadas. Após a seleção, os pixels representando nuvens foram removidos das cenas. Os dados de sensoriamento remoto utilizados foram obtidos e processados por meio da plataforma Google Earth Engine (GEE), que permite o processamento em alta performance de grandes conjuntos de dados geoespaciais (Gorelick et al., 2017). Os códigos foram escritos em linguagem Python (versão 3.8.12) e executados no ambiente de desenvolvimento do Google Colab.

Na Figura 3 é representado o conjunto de dados utilizados, destacando as imagens disponíveis de acordo com a sazonalidade: 7 imagens na estação do verão, 10 imagens no outono, 18 imagens no inverno e 14 na primavera. A justificativa para a distribuição temporal irregular das imagens se deve à indisponibilidade causada pela cobertura de nuvens excedendo o limite estabelecido de 3%. A lista completa das imagens selecionadas, suas respectivas datas de aquisição, cobertura de nuvens na área de estudo e outras informações de interesse é apresentada no Apêndice A.



**Figura 3** – Distribuição temporal das imagens do Landsat 8 de 2013 a 2023, destacando a sazonalidade dos dados nas quatro estações: verão, outono, inverno e primavera.

### 3.3. Determinação do saldo de radiação (algoritmo SEBAL)

Para imagens do Landsat 8 se faz necessário aplicar o fator de escala, ou seja, efetivar a calibração radiométrica para obter-se a radiância. A calibração é efetivada de acordo com a equação (Chander et al., 2003):

$$L_{\lambda,b} = L_{\min,b} + \left( \frac{L_{\max,b} - L_{\min,b}}{65535} \right) N_C \quad (6)$$

$$L_{\lambda,b} = \text{Add}_b + (\text{Mult}_b)N_C \quad (7)$$

onde  $L_{\lambda,b}$  é a radiância espectral de cada banda ( $\text{W}/\text{m}^2\text{sr}\mu\text{m}$ ) e  $N_C$  é o nível de cinza de cada banda. Para as bandas ópticas os valores constantes  $\text{Add}_b$  e  $\text{Mult}_b$  correspondem a -0,2 e 0,0000275, respectivamente. Para as bandas termais,  $\text{Add}_b$  e  $\text{Mult}_b$  correspondem a 149 e 0,00341802, respectivamente. Quando a área de estudo tem pequena ou declividade nula, o cosseno do ângulo de incidência da radiação solar é simplesmente obtido a partir do ângulo de elevação do Sol – E, ou seja:

$$\cos(Z) = \cos(\pi/2 - E) = \text{sen}(E) \quad (8)$$

O albedo da superfície sem correção atmosférica ou albedo planetário ( $\alpha_{\text{toa}}$ ) das imagens do Landsat 8, foi obtido pela combinação linear das reflectâncias monocromáticas das bandas 2, 3, 4, 5, 6, e 7 do OLI, que de acordo com Silva et al. (2016) é dado pela expressão:

$$\alpha_{\text{toa}} = 0,300 r_2 + 0,277 r_3 + 0,233 r_4 + 0,143 r_5 + 0,036 r_6 + 0,012 r_7 \quad (9)$$

Obtém-se o albedo da superfície, ou albedo corrigidos os efeitos atmosféricos  $\alpha_{\text{sup}}$ , mediante a equação:

$$\alpha_{\text{sup}} = \frac{\alpha_{\text{toa}} - \alpha_a}{\tau_{\text{oc}}^2} \quad (10)$$

onde  $\alpha_{\text{toa}}$  é o albedo planetário,  $\alpha_a$  é a reflectância da atmosfera, que varia entre 0,025 e 0,04, mas que em várias aplicações tem sido recomendado o valor de 0,03;  $\tau_{\text{oc}}$  é a

transmissividade atmosférica que para condições de céu claro, em que pode-se utilizar um procedimento mais consistente de obtenção da transmissividade atmosférica, conforme proposto por Allen et al. (2007):

$$\tau_{oc} = 0,35 + 0,627 \exp \left[ \frac{-0,00146P}{K_t \cos(Z)} - 0,075 \left( \frac{W}{\cos(Z)} \right)^{0,4} \right] \quad (11)$$

onde  $Z$  é o ângulo zenital solar,  $P$  é a pressão atmosférica média em kPa, obtida através dos dados do ERA5-Land;  $k_t$  é o coeficiente de turbidez da atmosfera, sendo  $k_t = 1$  para céu claro e  $k_t = 0,5$  para turbidez extrema (Allen, 1996);  $W$  é a água precipitável em mm, calculada de acordo com a equação proposta por Garrison e Adler (1990):

$$W = 0,14e_a P + 2,1 \quad (12)$$

$$e_a = 6,1121 \times 10^{\left( \frac{17,502t_d}{240,97 + t_d} \right)} \quad (13)$$

em que  $t_d$  é a temperatura do ponto de orvalho obtido pelo ERA5-Land.

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) é obtido através da razão entre a diferença das refletividades do infravermelho próximo ( $\rho_{IV}$ ) e do vermelho ( $\rho_V$ ):

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (14)$$

onde  $\rho_{IV}$  e  $\rho_V$  correspondem, respectivamente, as bandas 5 e 4 do Landsat 8.

O NDVI é um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde. Seus valores variam de  $-1$  a  $+1$ . Para superfícies com alguma vegetação, o NDVI varia de 0 e 1, já para corpos d'água e nuvens o NDVI é menor que zero (Allen et al., 2007a).

Para o cálculo do Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo (Soil Adjusted Vegetation Index – SAVI) e o Índice de Área Foliar – IAF, utiliza-se as seguintes expressões, de acordo com Tasumi et al. (2008):

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (15)$$

$$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (16)$$

onde L é um de fator de ajuste do índice que depende do tipo de solo.

Para a obtenção da temperatura da superfície, é utilizada a equação de Planck (Eq. 2) invertida, válida para um corpo negro. Como cada pixel não emite radiação eletromagnética como um corpo negro, há a necessidade de introduzir a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal  $\varepsilon_{nb}$ , qual seja: 10,4 – 12,5  $\mu\text{m}$ . Por sua vez, computada a radiação de onda longa emitida, há de ser considerada a emissividade no domínio da banda larga  $\varepsilon_0$  (5 – 100  $\mu\text{m}$ ). Segundo Allen et al. (2002), as emissividades  $\varepsilon_{nb}$  e  $\varepsilon_0$  podem ser obtidas, para NDVI > 0 e IAF < 3, segundo:

$$\varepsilon_{nb} = 0,97 + 0,0033 IAF \quad (17)$$

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01 IAF \quad (18)$$

Para pixels com IAF  $\geq 3$ ,  $\varepsilon_{nb} = \varepsilon_0 = 0,98$  e para corpos de água IAF = 0,  $\varepsilon_{nb} = 0,99$  e  $\varepsilon_0 = 0,985$ , conforme recomendações de Allen et al. (2002).

Para a obtenção da temperatura da superfície  $T_{sup}$  são utilizadas a radiância espectral da banda termal  $L_{\lambda,6}$  e a emissividade  $\varepsilon_{nb}$  obtida na etapa anterior. Dessa forma, obtém-se a temperatura da superfície (K) pela seguinte expressão:

$$T_{sup} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{nb} K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)} \quad (19)$$

onde  $K_1 = 774,89 \text{ W/m}^2\text{sr}^1\mu\text{m}^1$  e  $K_2 = 1321,08 \text{ K}$  são constantes de calibração da banda 10 do TIRS;  $L$  ( $\text{W/m}^2\text{sr}^1\mu\text{m}^1$ ) é a radiância da banda termal.

A radiação de onda longa emitida pela superfície –  $R_{emi}^{\uparrow}$  ( $\text{W/m}^2$ ) é obtida através da equação de Stefan-Boltzmann:

$$R_{emi}^{\uparrow} = \varepsilon_0 \sigma T_{sup}^4 \quad (20)$$

onde  $\varepsilon_0$  é a emissividade de cada pixel,  $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^{-4}$  é a constante de Stefan-Boltzmann e  $T_{sup}$  é a temperatura da superfície (K).

A radiação global de onda curta incidente  $R_g$  ( $W/m^2$ ) é o fluxo de radiação solar direta e difusa que atinge a superfície terrestre, que para condição de céu claro é dada pela seguinte expressão (Allen et al., 2002):

$$R_g^\downarrow = S \cos(Z) d_r \tau_{oc} \quad (21)$$

onde  $S$  é a constante solar ( $1367 W/m^2$ ) e  $d_r$  é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol e a distância Terra-Sol no dia do ano em que foi gerada a imagem DJ (Dia Juliano), em que foi obtido através dos metadados das imagens Landsat 8. O valor médio anual de  $d_r$  é igual a 1 e o mesmo varia de 0,97 a 1,03, aproximadamente.

A radiação de onda longa incidente emitida pela atmosfera na direção da superfície  $R_{atm}^\downarrow$  ( $W/m^2$ ), pode ser computada pela equação de Stefan-Boltzmann (Eq. 1):

$$R_{atm}^\downarrow = \varepsilon_a \sigma T_a^4 \quad (22)$$

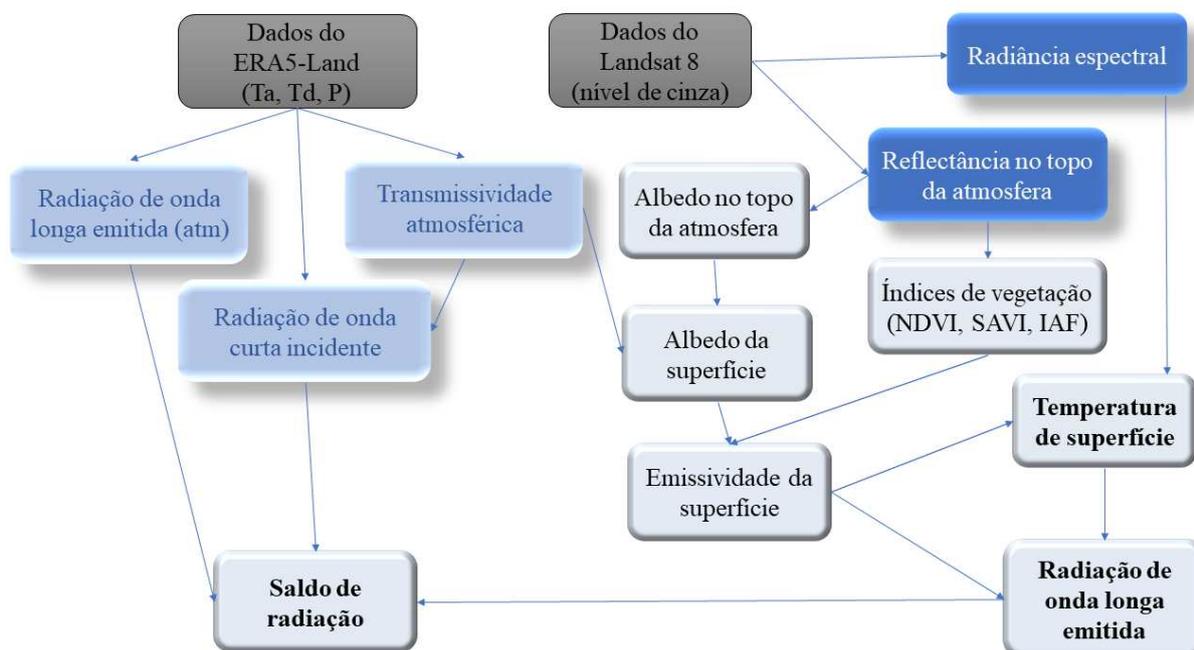
onde  $T_a$  é a temperatura do ar, obtida através do produto do ERA5-Land e  $\varepsilon_a$  é a emissividade atmosférica, obtida por Allen et al. (2002):

$$\varepsilon_a = 0,85(-\ln \tau_{oc})^{0,09} \quad (23)$$

O saldo de radiação à superfície  $R_n$  ( $W/m^2$ ) é computado utilizando-se a seguinte equação do balanço de radiação à superfície:

$$R_n = R_g^\downarrow (1 - \alpha_{sup}) - R_{emi}^\uparrow + R_{atm}^\downarrow - (1 - \varepsilon_o) R_{atm}^\downarrow \quad (24)$$

onde  $R_g$  é a radiação global de onda curta incidente,  $\alpha_{sup}$  é o albedo da superfície corrigido de cada pixel,  $R_{atm}$  é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção de cada pixel,  $R_{emi}$  é a radiação de onda longa emitida e  $\varepsilon_o$  é a emissividade de cada pixel. A Figuras 3 ilustra o fluxograma com os procedimentos ordenados e adotados para se obter a temperatura da superfície terrestre –  $T_{sup}$ , radiação de onda longa –  $R_{emi}$  e o saldo de radiação à superfície –  $R_n$ , utilizando as imagens selecionadas do Landsat 8 OLI/TIRS.



**Figura 4** – Fluxograma das etapas do processamento do balanço de radiação à superfície para o OLI/TIRS do Landsat 8. Fonte: Autor, 2023.

### 3.4. Algoritmos de correção atmosférica

Para avaliar os impactos da correção atmosférica na temperatura da superfície terrestre –  $T_{sup}$ , na radiação de onda longa emitida pela superfície –  $R_{emi}$  e no saldo de radiação instantâneo –  $R_n$ , foram empregados os métodos propostos por Allen et al. (2007), Quin et al. (2001) e Sekertekin & Bonafoni (2020), bem como o cômputo da  $T_{sup}$  sem correção.

#### 3.4.1. Método 1 (Allen et al., 2007)

Diante das dificuldades de uso de códigos de transferência radiativa, Allen et al. (2007) recomendam computar a  $T_{sup}$  (°C) com base na radiação corrigida –  $R_{co}$  ( $W/m^2sr^1\mu m^1$ ) e emissividade específica da banda termal –  $\epsilon_{nb}$ , por meio da equação de Markham e Barker (1986) modificada, qual seja:

$$T_{sup,1} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{nb} K_1}{R_{co}} + 1\right)} \quad (25)$$

em que a radiação corrigida emitida pela superfície -  $R_{co}$  ( $W/m^2sr^1\mu m^1$ ) pode ser obtida segundo a expressão (Allen et al., 2007):

$$R_{co} = \frac{R_{tb} - R_p}{\tau} - (1 - \varepsilon_{tb})R_{sky} \quad (26)$$

em que  $R_{tb}$  ( $\text{W}/\text{m}^2 \text{sr}\mu\text{m}$ ) é a radiância monocromática da banda termal registrada ao nível orbital,  $R_p = 0,91 \text{ W}/\text{m}^2 \text{sr}\mu\text{m}$  é a radiância de trajetória,  $R_{sky} = 1,32 \text{ W}/\text{m}^2 \text{sr}^1\mu\text{m}^1$  é a radiância emitida pela atmosfera em condições de céu limpo,  $\tau = 0,866$  é a transmitância atmosférica média na banda termal. A emissividade específica da banda termal foi obtida pela Eq. (19).

### 3.4.2. Método 2 (Quin et al., 2001)

No modelo desenvolvido por Qin et al. (2001), a  $T_{sup}$  pode ser obtida com correção dos efeitos atmosféricos e considerando a emissividade da superfície, com base na seguinte expressão:

$$T_{sup,2} = \{a(1 - \alpha_1 - \alpha_2) + [b(1 - \alpha_1 - \alpha_2) + \alpha_1 + \alpha_2]T_b - \alpha_2 T_a\} / \alpha_1 \quad (27)$$

em que  $a = -67,355351$  e  $b = 0,458606$  são constantes usadas para linearizar a função de Planck,  $T_b$  (K) é a temperatura de brilho (banda 10 do TIRS – Landsat 8),  $T_a$  (K) é a temperatura média da atmosfera, e os parâmetros  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  dependem da emissividade da superfície ( $\varepsilon_{nb}$ ) e transmitância atmosférica no domínio espectral da banda termal ( $\tau_{nb}$ ), ou seja:

$$\alpha_1 = \varepsilon_{nb} \tau_{nb} \quad (28)$$

$$\alpha_2 = (1 - \tau_{nb})[1 + \tau_{nb}(1 - \varepsilon_{nb})] \quad (29)$$

A emissividade da superfície no domínio da banda termal foi obtida com base em parametrização proposta por Tasumi et al. (2008), em função do Índice de Área Foliar – IAF (Eq. 19). A transmitância atmosférica da banda termal foi calculada com base em formulação obtida por Quin et al. (2001) para temperaturas atmosféricas elevadas e conteúdo de água precipitável -  $W$  entre 1,6 e 3,0  $\text{g}/\text{cm}^2$ , qual seja:

$$\tau_{nb} = 1,031412 - 0,11536 W \quad (30)$$

em que  $W$  ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) é a água precipitável. A temperatura de brilho -  $T_b$  (K) pode ser obtida por meio da função de Planck invertida, com constantes de radiação específicas das bandas termal do TIRS (banda 10), qual seja:

$$T_b = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{k_1}{L_{b10}} + 1\right)} \quad (31)$$

em que para a banda 10 do TIRS  $K_1 = 774,89 \text{ (W/m}^2\text{sr}^1\mu\text{m}^1)$  e  $K_2 = 1321,08 \text{ K}$ ; e  $L_{b10}$  ( $\text{W/m}^2\text{sr}^1\mu\text{m}^1$ ) é a radiância da banda 10 do TIRS. Já a estimativa da temperatura média da atmosfera –  $T_a$  (K) obtém-se por meio da expressão (Qin et al., 2001):

$$T_a = 17,9769 + 0,91715 T_{a,2m} \quad (32)$$

em que  $T_{a,2m}$  (K) é a temperatura do ar obtida a 2 metros da superfície.

### 3.4.3. Método 3 (Sekertekin & Bonafoni, 2020)

Um importante método para determinar a  $T_{sup}$  com correção, baseado em uma única banda do TIRS, é através da inversão da Equação de Transferência Radiativa – RTE que de acordo com Sekertekin & Bonafoni (2020) é dada por:

$$R_{tb} = [\varepsilon_{tb} \times B_\lambda(T_{sup}) + (1 - \varepsilon_{tb}) \times R_{atm,ref}^\uparrow] \tau_{tb} + R_{atm,ref}^\uparrow \quad (33)$$

onde  $R_{tb}$  ( $\text{W/m}^2\text{sr}^1\mu\text{m}^1$ ) é a radiância detectada no sensor da banda termal,  $B_\lambda$  ( $\text{W/m}^2\text{sr}^1\mu\text{m}^1$ ) refere-se à radiância do corpo negro para um comprimento de onda  $\lambda$  (centro da banda 10 do TIRS) a uma temperatura  $T_{sup}$ ,  $\tau_{tb}$  é a transmitância atmosférica na banda termal e  $R_{atm,ref}^\uparrow$  ( $\text{W/m}^2\text{sr}^1\mu\text{m}^1$ ) é a radiância termal atmosférica refletida. Resolvendo a Eq. (38) para a radiância do corpo negro, tem-se:

$$B_\lambda(LST) = \frac{R_{tb} - R_{atm,ref}^\uparrow - (1 - \varepsilon_{tb}) R_{atm}^\downarrow \tau_{tb}}{\tau_{tb} \varepsilon_{tb}} \quad (34)$$

Invertendo a lei de Planck pode-se obter a  $T_{sup}$  corrigida:

$$T_{sup,3} = \frac{K_2}{\ln\left[\frac{K_1}{\frac{R_{tb} - R_{atm,ref}^\uparrow - (1 - \varepsilon_{tb}) R_{atm}^\downarrow \tau_{tb}}{\tau_{tb} \varepsilon_{tb}}} + 1\right]} \quad (35)$$

onde  $K_1 = 774.89 \text{ W/m}^2\text{sr}^1\mu\text{m}^1$  e  $K_2 = 1321.08 \text{ W/m}^2\text{sr}^1\mu\text{m}^1$  são as constantes de calibração da banda 10 do TIRS – Landsat 8.

### 3.5. Estimativa da $T_{sup}$ Sem Correção

Com os dados do ERA5-Land e de posse dos mapas de radiância monocromática da banda 10 -  $L_{b10}$  ( $\text{W/m}^2\text{sr}^1\mu\text{m}^1$ ) e reflectância do OLI (bandas 4 e 5) no topo da

atmosfera, procedeu-se a determinação da temperatura da superfície –  $T_{sup,sc}$  (°C), usando-se a equação (22):

$$T_{sup,sc} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{nb} K_1}{L_{b10}} + 1\right)} \quad (36)$$

em que  $K_1 = 774,89$  ( $W/m^2 sr^1 \mu m^1$ ) e  $K_2 = 1321,08$  (K) são as constantes de radiação específicas da banda 10 do TIRS;  $L_{b10}$  ( $W/m^2 sr^1 \mu m^1$ ) é a radiância da banda 10;  $\varepsilon_{nb}$  é a emissividade de cada pixel no domínio da banda termal (Tasumi et al., 2008).

Para valores do IAF  $> 3,0$  considerou-se  $\varepsilon_{nb} = 0,98$ , enquanto que para as águas do rio São Francisco, fixou-se o seu valor em 0,99, segundo recomendação de Allen et al. (2007). Já a emissividade radiativa de cada pixel,  $\varepsilon_o$ , foi obtida pela Eq. (20). O saldo de radiação à superfície ( $R_n$ ) foi computado através da seguinte equação (Silva et al, 2015; Ferreira et al., 2020):

$$R_n = R_g^\downarrow (1 - \alpha_{sup}) + \varepsilon_o R_{atm}^\downarrow - \varepsilon_o \sigma T_{sup}^4 \quad (37)$$

em que  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$   $W/m^2 K^4$  é a constante de Stefan-Boltzmann,  $\varepsilon_o$  é a emissividade da superfície (adimensional),  $\alpha_{sup}$  é o albedo da superfície,  $R_g$  ( $W/m^2$ ) é a radiação de onda curta incidente,  $R_{atm}^\downarrow$  ( $W/m^2$ ) é a radiação de onda longa emitida pela atmosfera na direção da superfície. A radiação de onda longa emitida pela superfície –  $R_{emi}^\uparrow$  é dada por:

$$R_{emi}^\uparrow = \varepsilon_o \sigma T_{sup}^4 \quad (38)$$

Foram calculados  $T_{sup}$  (°C),  $R_n$  ( $W/m^2$ ) e  $R_{emi}$  ( $W/m^2$ ) com correção atmosférica e sem correção, e avaliou-se os impactos de tal correção sobre essas variáveis.

### 3.6. Torre micrometeorológica

Para identificar-se o modelo que apresentou maior acurácia, considerou-se medições da irradiância de onda longa atmosférica –  $IR_{atm}$  ( $W/m^2$ ) dirigida para a superfície e também a irradiância de onda longa da superfície –  $IR_{sup}$  ( $W/m^2$ ) obtidas experimentalmente. Tais medições foram realizadas em Torre Micrometeorológica instalada em talhão de cana-de-açúcar, com um saldo radiômetro CNR4 (Kiip & Zonen, Delf, The Netherlands). A radiação de onda longa emergente –  $IR_{emerg}$  ( $W/m^2$ ) corresponde à soma da irradiância de onda longa emitida pela superfície –  $IR_{emi}$  ( $W/m^2$ ) mais a irradiância de onda longa atmosférica refletida pela superfície –  $IR_{atm,ref}$  ( $W/m^2$ ),

$$IR_{emerg} = IR_{emi} + IR_{atm,ref} \quad (39)$$

$$IR_{emi} = IR_{emerg} - IR_{atm,ref} \quad (40)$$

de modo que a  $T_{torre}$  medida foi obtida pela expressão:

$$T_{torre} = \left( \frac{IR_{emi}}{\varepsilon_o \sigma} \right)^{1/4} \quad (41)$$

### 3.7. Métricas estatísticas de erros e teste estatístico

O desempenho dos resultados foi determinado pelos Erros Médios (Erro Médio Absoluto - MAE e Erro Médio Relativo - MRE) e a Raiz Quadrada do Erro Médio – RMSE.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (42)$$

$$MRE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{\hat{y}_i} \right| \quad (43)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (44)$$

em que  $n$  é o número de amostras,  $y_i$  é o valor estimado para cada amostra,  $\hat{y}_i$  é o valor observado para cada amostra das variáveis parametrizadas ( $T_{sup}$ ,  $R_{emi}$  e  $R_n$ ).

Para avaliar se há diferença significativa entre diferentes tipos de uso e ocupação numa mesma data, ou temporalmente numa mesma área, foram selecionados 5 pequenos recortes (plots):

- AGR: agricultura irrigada;
- CAA: vegetação caatinga;

- PAS: pastagem;
- URB: área urbana;
- WAT: corpos d'água.

Foi extraído o valor médio de cada recorte, assim como o desvio padrão de cada amostra. Foi usado o teste estatístico de diferença entre médias para grandes amostras, em que a Hipótese Nula –  $H_0$ , é de que as amostras provêm de uma mesma população, isto é, que não há diferença significativa entre as médias de duas amostras de tamanhos  $n_1$  e  $n_2$ . Nesse sentido, a estatística do teste é dada por (WILKS, 1995):

$$Z_{\text{cal}} = \frac{\bar{M}_1 - \bar{M}_2}{\sigma_{M_1-M_2}} \quad (45)$$

em que  $M_1$  e  $M_2$  representam as médias das duas amostras, e  $\sigma_{M_1}$  e  $\sigma_{M_2}$  os seus desvios padrão. Já o desvio padrão da diferença entre as médias, isto é,  $\sigma_{M_1-M_2}$ , é dado por:

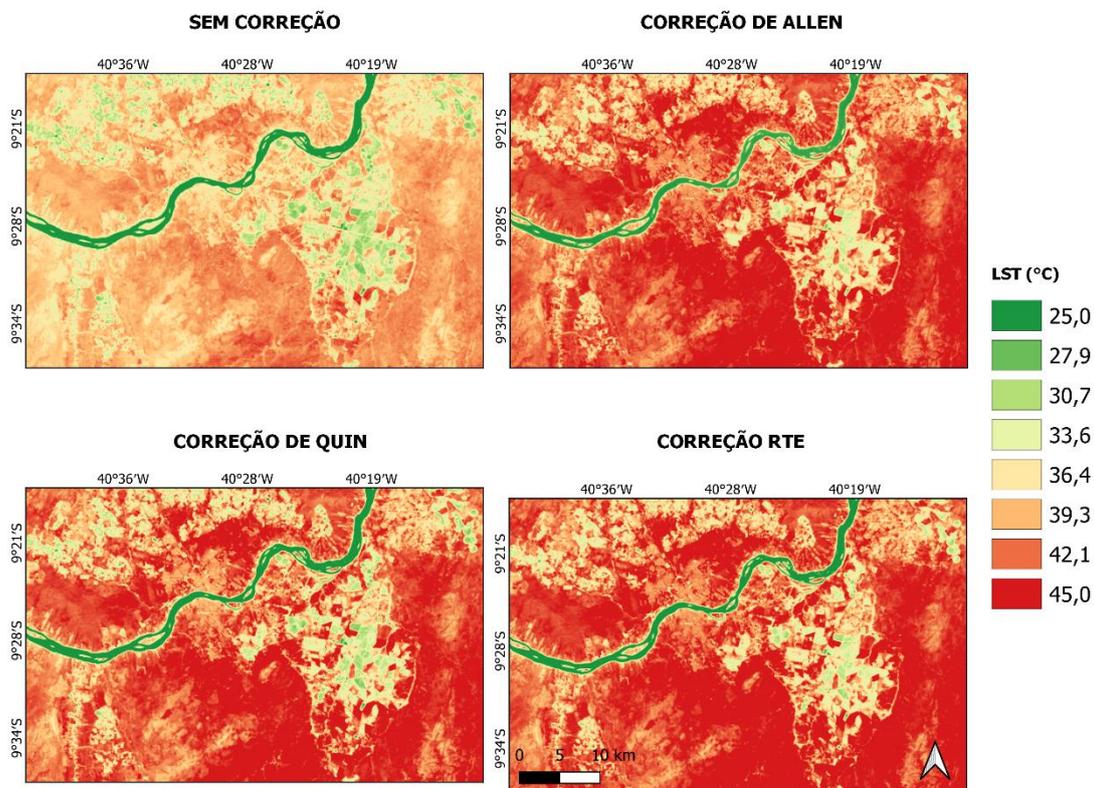
$$\sigma_{M_1-M_2} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}} \quad (46)$$

onde  $n_1$  e  $n_2$  correspondem ao número de elementos das amostras 1 e 2, respectivamente. Considerou-se o nível de significância  $\alpha = 0,01$ , com avaliação bicaudal. Para  $\alpha$  e  $Z_{\text{crit}}$  para  $n = 121$ ), foi igual 2,16, ou seja, a Hipótese Nula é rejeitada sempre que  $Z_{\text{cal}} > Z_{\text{crit}}$ .

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

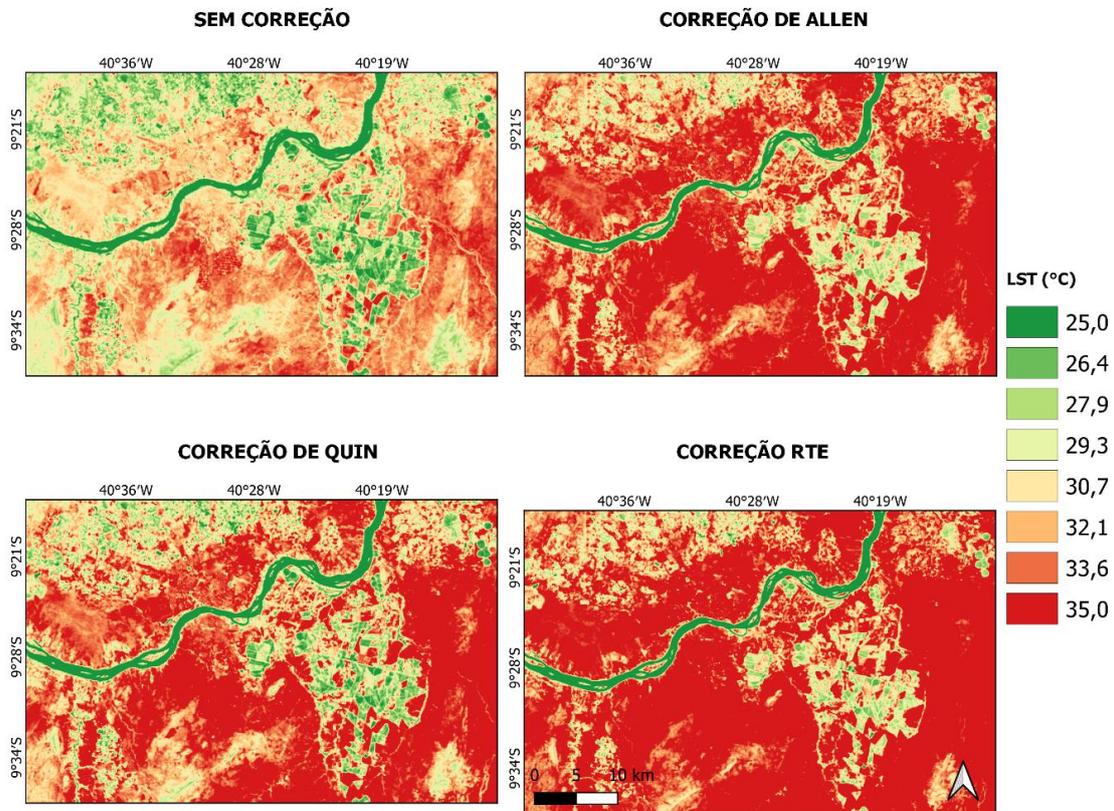
### 4.1. Temperatura da superfície

Foram selecionadas 51 imagens OLI/TIRS do satélite Landsat 8, adquiridas em diferentes datas no período de 2013 a 2023, com a finalidade de gerar a  $T_{\text{sup}}$  corrigida. Como visto na metodologia, foram considerados três métodos de correção atmosférica propostos por: Allen et al. (2007), Quin et al. (2001) e Sekertekin & Bonafoni (2020). Nas Figuras 5 a 7 estão representados os mapas temáticos obtidos nos dias 05 de outubro de 2013, 09 de janeiro de 2014 e 24 de agosto de 2015, respectivamente. Pode-se observar que em todos eles há grandes diferenças entre os mapas da  $T_{\text{sup}}$  sem correção com os corrigidos pelas três diferentes metodologias. A classe com os menores valores está representada em cor verde escura ( $T_{\text{sup}} < 25 \text{ °C}$ ) e a dos maiores valores ( $T_{\text{sup}} > 45 \text{ °C}$ ) está em vermelho. Percebe-se que embora os padrões apresentados pelas áreas com diferentes tipos de uso sejam muito semelhantes, os valores dos mapas sem correção (SC) e com correção atmosférica (CC) são bastantes diferentes, chegando a apresentar diferenças maiores que  $5 \text{ °C}$ .



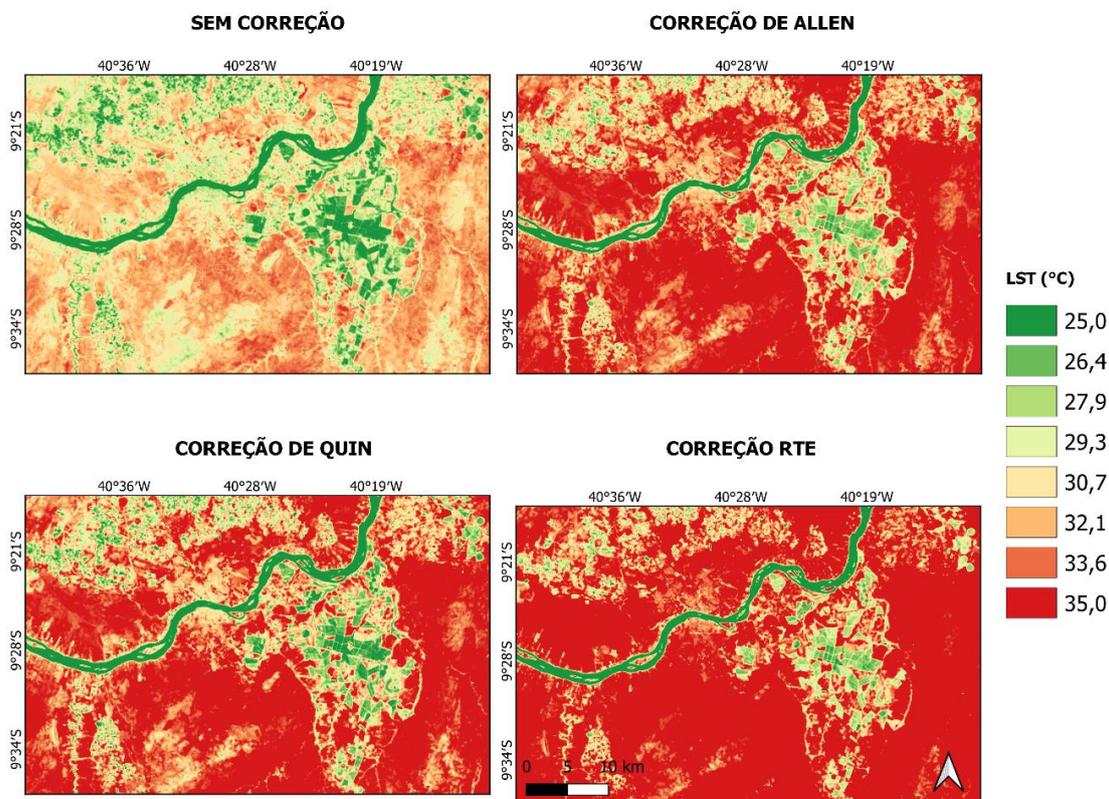
**Figura 5** – Temperatura da superfície com e sem correção atmosférica para o dia 05 de outubro de 2013.

No dia 09 de janeiro de 2014 esses padrões se repetem (Figura 6), mas pode-se deduzir que as diferenças entre SC e CC se mostram mais acentuadas com o método 3 proposto por Sekertekin & Bonafoni (2020). Deve-se destacar que no mapa temático de janeiro de 2014 os valores extremos estão numa classe que tem 10 °C a menos do que em agosto de 2013. Uma explicação para essa diferença tão marcante entre as áreas mais aquecidas está no regime pluviométrico local, com estação chuvosa muito curta, três a quatro meses, e janeiro se constitui num dos meses da estação chuvosa local, diferentemente de agosto. É provável que as secas registradas entre 2012 a 2017 possam de alguma forma ter influenciado nos valores observados em 2013.



**Figura 6** – Temperatura da superfície com e sem correção atmosférica para o dia 09 de janeiro de 2014.

Na Figura 7, de 24 de agosto de 2015, se observa mais uma vez os padrões que diferenciam as áreas irrigadas daquelas não irrigadas e também das cidades de Juazeiro-BA e Petrolina-PE, que exibem valores da  $T_{sup}$  muito elevados, como esperado. Para todas as datas selecionadas, foram elaborados os mapas da  $T_{sup}$ , que de algum modo retratam, com pequenas diferenças, os mesmos padrões observados nas três datas selecionadas para se apresentar as figuras mencionadas.

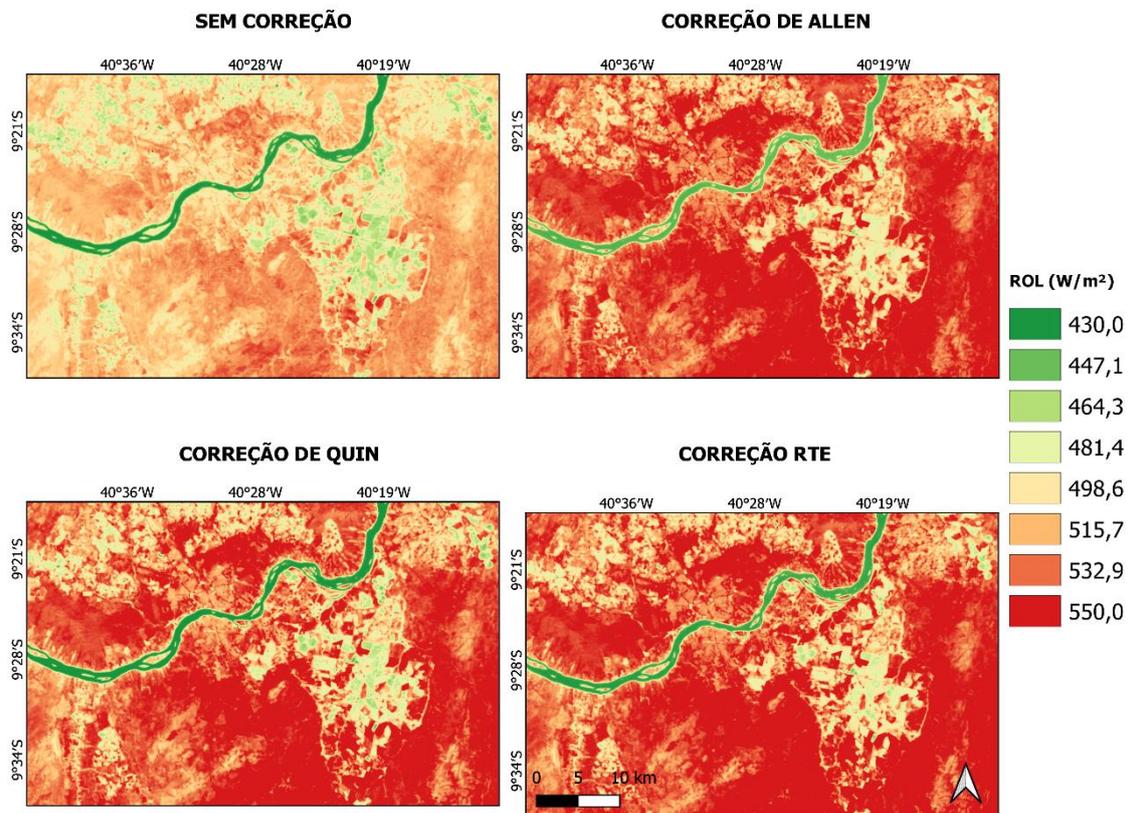


**Figura 7** – Temperatura da superfície com e sem correção atmosférica para o dia 24 de agosto de 2015.

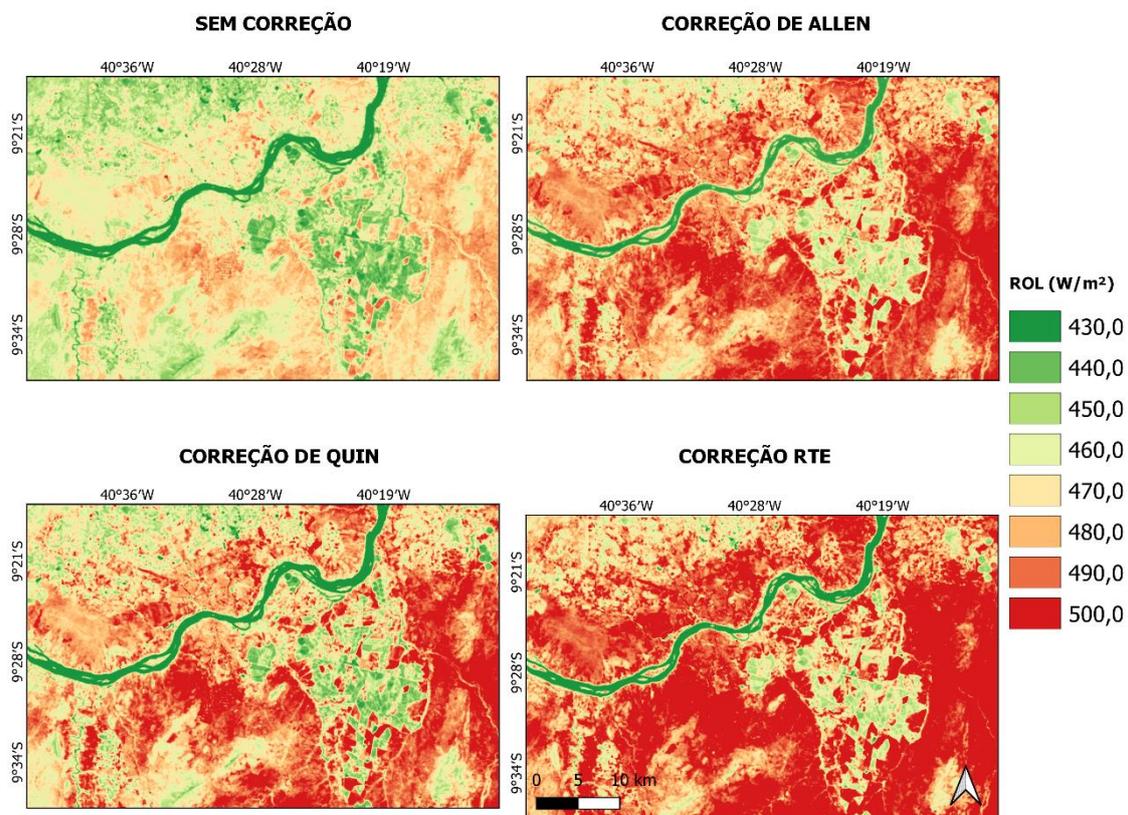
#### 4.2. Radiação de onda longa emitida pela superfície

Nas Figuras 8 a 10 estão representados os mapas temáticos da radiação de onda longa emitida pela superfície –  $R_{emi}$  ( $Wm^{-2}$ ) obtidos nos dias 05 de outubro de 2013, 09 de janeiro de 2014 e 24 de agosto de 2015, respectivamente. Pode-se observar em todos eles grandes diferenças entre os mapas SC e CC, aparentemente não tão evidentes como aquelas obtidas nos mapas da  $T_{sup}$ . A classe com os menores valores está representada em cor verde escura ( $R_{emi} < 430 Wm^{-2}$ ) e a dos maiores valores ( $550 Wm^{-2}$ ) está em vermelho. Percebe-se que embora os padrões apresentados pelas áreas com diferentes tipos de uso sejam muito semelhantes, os valores dos mapas SC com os CC são bastantes diferentes, chegando a apresentar diferenças maiores que  $100 Wm^{-2}$ . Ao se comparar as três datas, também usadas na representação dos mapas da  $R_{emi}$ , se observa que os maiores valores da  $R_{emi}$  foram observados em 05 de outubro, pelas mesmas razões apresentadas no caso

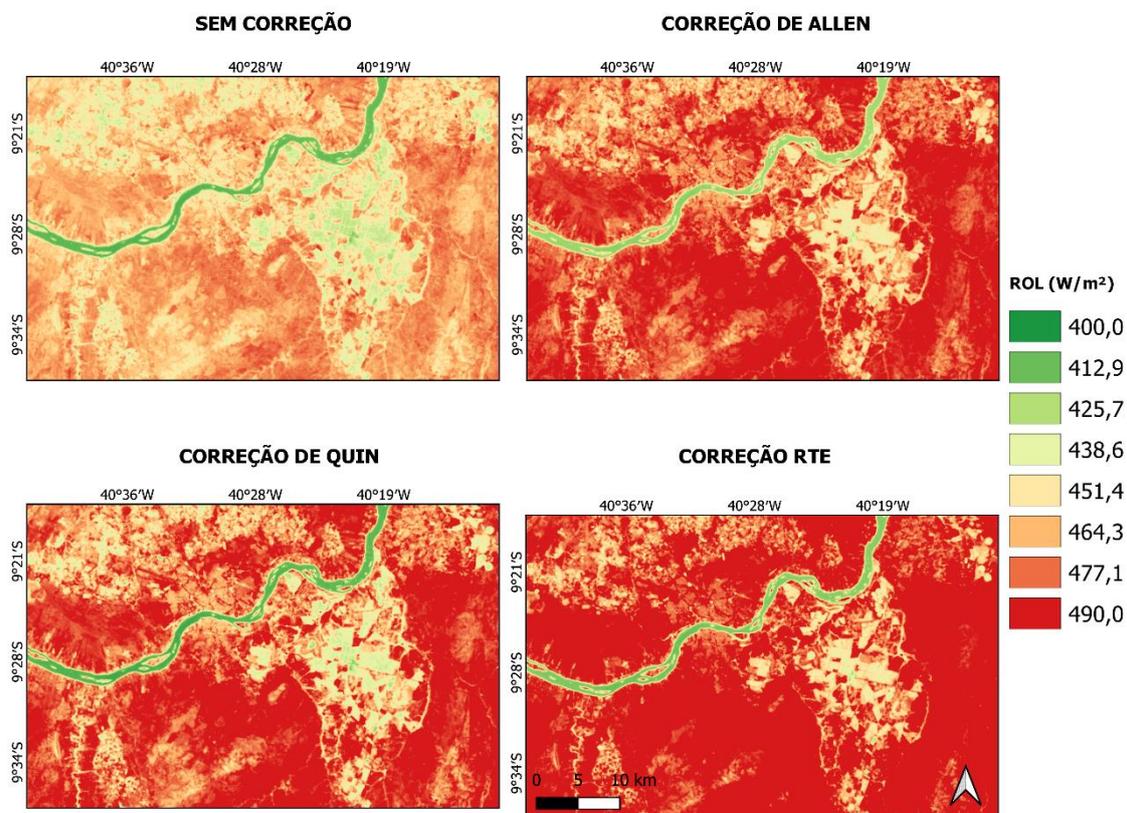
das  $T_{sup}$ , ou seja, uma explicação adequada seria associar esses valores elevados ao regime pluviométrico da área de estudo.



**Figura 8** – Radiação de onda longa emitida pela superfície –  $R_{emi}$  com e sem correção atmosférica para o dia 05 de outubro de 2013.



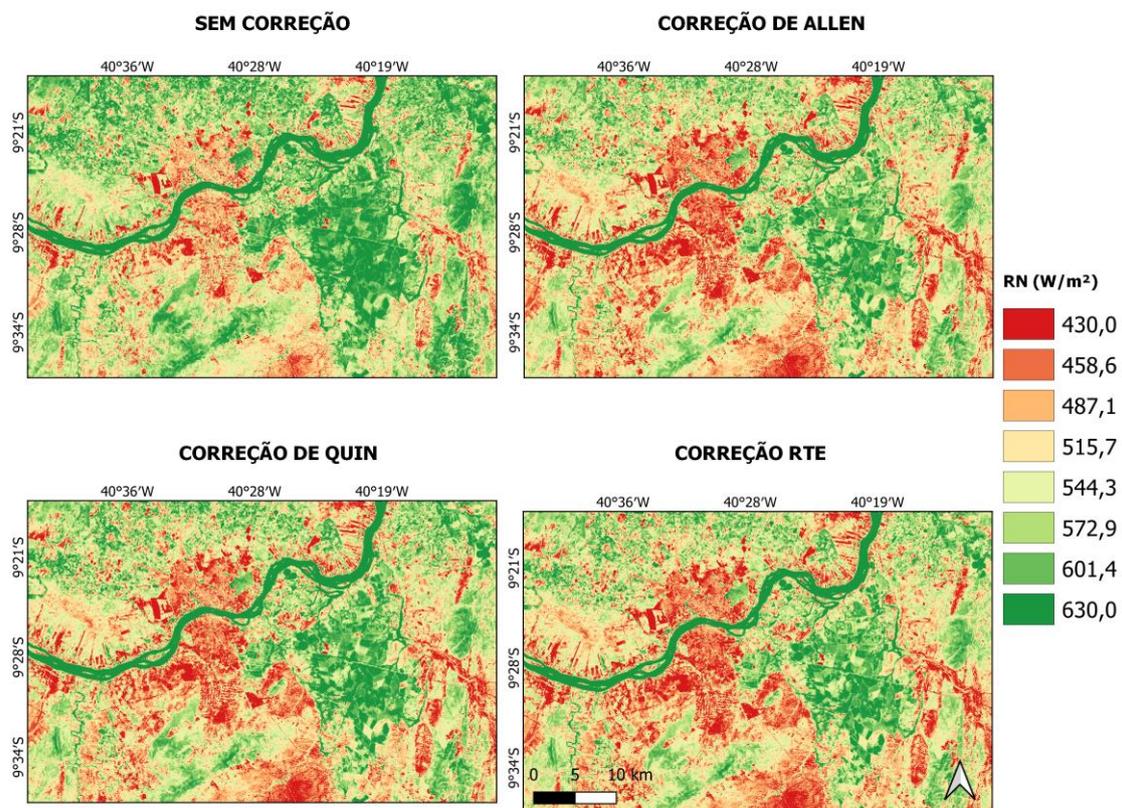
**Figura 9** – Radiação de onda longa emitida pela superfície –  $R_{emi}$  com e sem correção atmosférica para o dia 09 de janeiro de 2014.



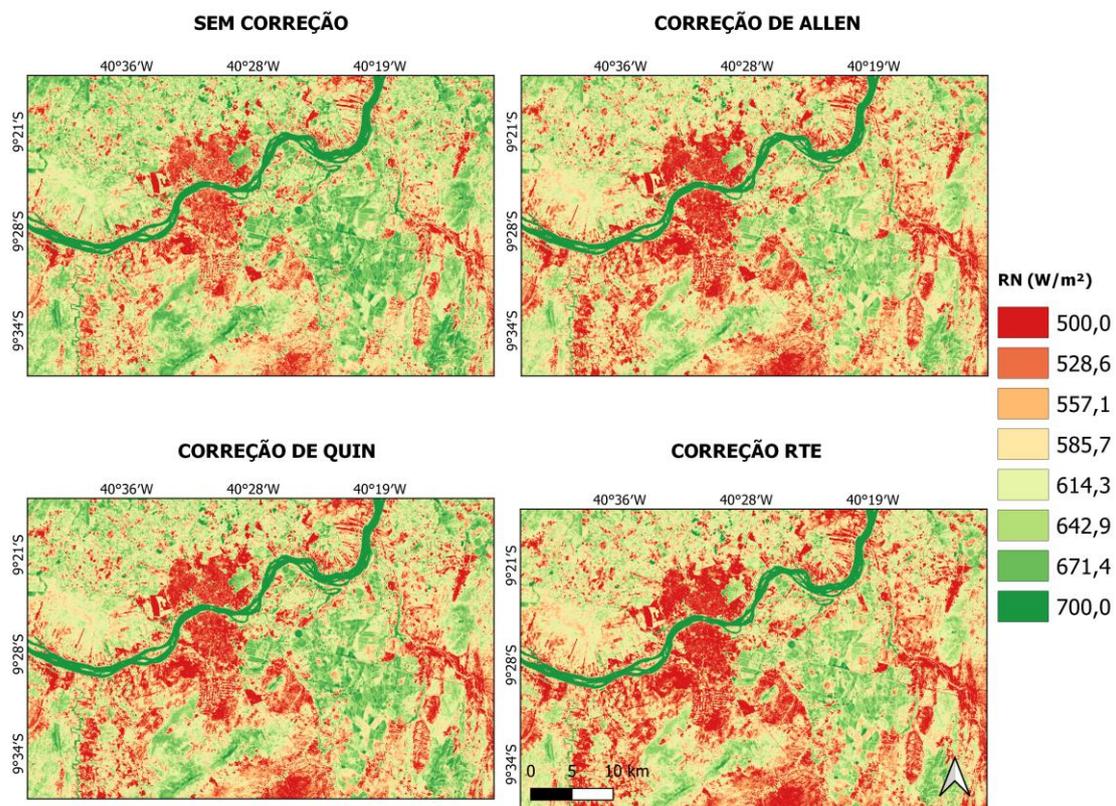
**Figura 10** – Radiação de onda longa emitida pela superfície –  $R_{emi}$  com e sem correção atmosférica para o dia 24 de agosto de 2015.

### 4.3. Saldo de radiação de onda longa emitida à superfície

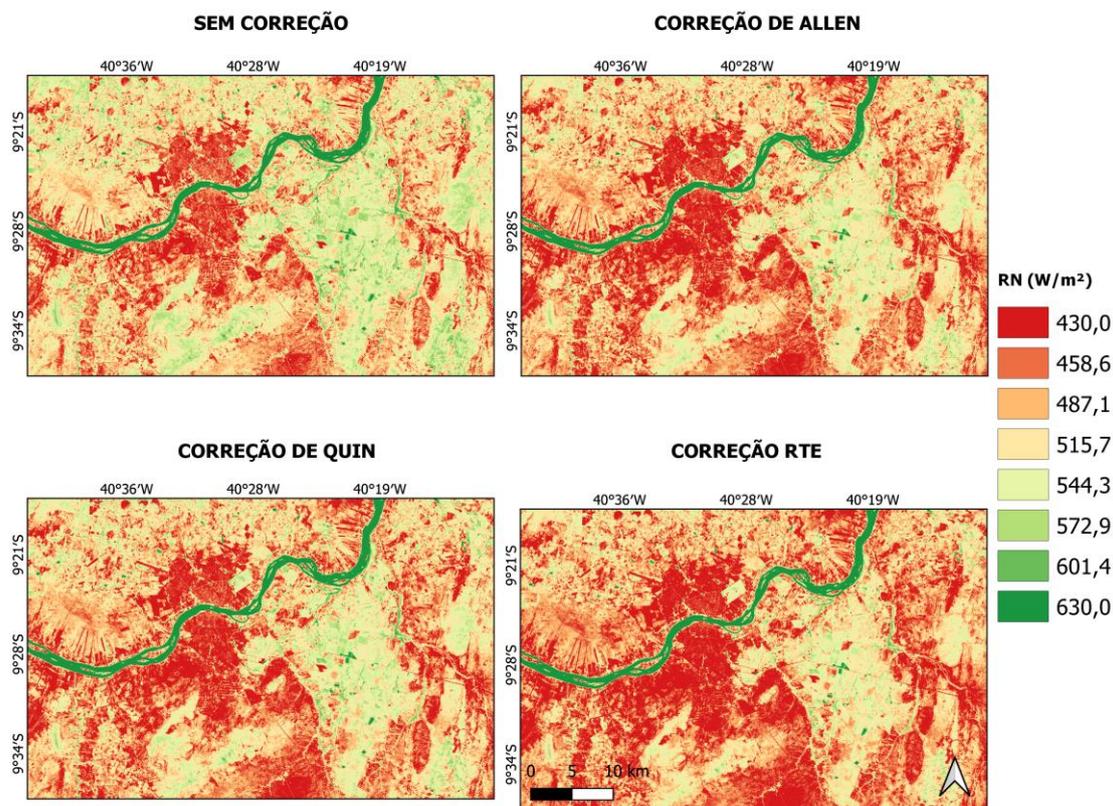
Nas Figuras 11 a 13 estão representados os mapas temáticos do saldo de radiação instantâneo à superfície –  $R_n$  (W/m<sup>2</sup>) obtidos nos dias 05 de outubro de 2013, 09 de janeiro de 2014 e 24 de agosto de 2015, respectivamente. Pode-se observar em todos eles grandes diferenças entre os mapas SC e CC, menos evidentes que aqueles obtidos nos mapas da  $T_{sup}$ . De um modo geral, os valores do  $R_n$  CC são menores que os SC, o que se justifica em virtude da correção promover aumento da  $T_{sup}$ . O dia que apresentou os maiores valores do  $R_n$  foi o do mês de janeiro, com maior oferta de radiação de onda curta, ou seja, radiação solar. Deve-se destacar que o valor final do  $R_n$  sofre grande influência da irradiância solar, e por essa razão, quanto maior a irradiância maior o saldo, naturalmente num mesmo tipo de uso do solo.



**Figura 11** – saldo de radiação – Rn (W/m<sup>2</sup>) com e sem correção atmosférica para o dia 5 de outubro de 2013.



**Figura 12** – Saldo de radiação – Rn ( $W/m^2$ ) com e sem correção atmosférica para o dia 09 de janeiro de 2014.

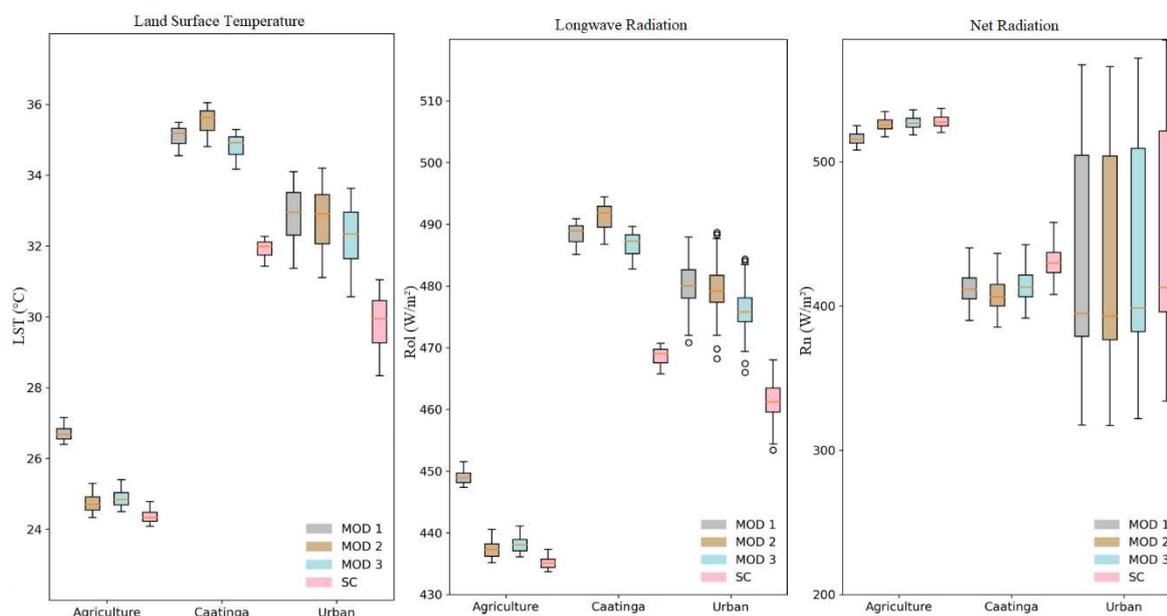


**Figura 13** – Saldo de radiação –  $R_n$  ( $W/m^2$ ) com e sem correção atmosférica para o dia 24 de agosto de 2015.

#### 4.4. Avaliação dos componentes do balanço de radiação em diferentes tipos de uso do solo

Os boxplots de  $T_{sup}$  ( $^{\circ}C$ ),  $R_{emi}$  ( $W/m^2$ ) e  $R_n$  ( $W/m^2$ ) selecionados, com e sem correção, estão ilustrados na Figura 14. Foram extraídos recortes em três tipos de uso do solo: área urbana (Juazeiro-BA), área da caatinga e área agrícola (localizada em um talhão irrigado de cana-de-açúcar), para melhor ilustrar os resultados obtidos. Ficou evidenciado que para a área da caatinga, os valores de  $T_{sup}$  foram mais elevados do que nas duas outras áreas estudadas. A  $T_{sup}$  SC em todo o conjunto de dados apresentou sempre valores menores dos que as que receberam correção. As diferenças de  $T_{sup}$  para as áreas agrícola, caatinga e urbana mostram que, para todos os tipos de coberturas do solo, apresentaram comportamento semelhante. A distância interquartílica na área agrícola é bem menor do que nas demais áreas, tanto para a  $T_{sup}$ , quanto  $R_{emi}$  e  $R_n$ . Destaca-se, ainda, a quantidade

de “outliers” na área urbana devido a heterogeneidade da área. Os maiores valores de  $R_{emi}$  foram registrados para a área da caatinga enquanto os maiores valores do  $R_n$  foram registrados sistematicamente na área agrícola. Pode-se observar que há grandes diferenças entre os dados SC e CC para as diferentes variáveis estudadas e metodologias de correção atmosférica aplicadas.



**Figura 14** – Boxplots da temperatura da superfície terrestre –  $T_{sup}$  (oC), radiação de onda longa emitida –  $R_{emi}$  ( $W/m^2$ ) e saldo de radiação –  $R_n$  ( $W/m^2$ ) para o recorte das áreas de agricultura irrigada, caatinga e área urbana no dia 30 de março de 2013.

Dentre as áreas estudadas, os valores de  $R_n$  variaram de 300  $W/m^2$  a 600  $W/m^2$ , aproximadamente. Vale salientar que, devido à falta de correção atmosférica, os valores de  $R_n$  SC são mais expressivos do que os corrigidos. Sekertekin & Bonafoni (2020) utilizaram o método 3 para recuperação da  $T_{sup}$  com imagens Landsat 8. Embora este método tenha apresentado bons resultados, quando comparado com os demais métodos da pesquisa atual, ele mostrou-se menos eficaz, destacando-se como mais eficaz o método 1 (Allen et al., 2007).

Para avaliar o desempenho dos métodos de correção atmosférica empregados, foi elaborada a Tabela 2 que apresenta, para cada data selecionada, o valor da  $T_{sup}$  SC e CC. Conforme se depreende da análise da tabela, os valores médios da  $T_{sup}$  extraídos nas

imagens Landsat SC foram iguais a 32,57 °C, 27,55 °C e 35,26 °C nas áreas urbana, agricultura irrigada e caatinga, respectivamente. Por sua vez, o método de correção atmosférica Método 1 proporcionou diferenças de até 4,28 °C em relação aos valores SC, na área de caatinga. Portanto, negligenciar a correção atmosférica produz subestimativas da  $T_{sup}$ , o que vai impactar significativamente diferentes componentes dos balanços de radiação e energia.

**Tabela 2** – Médias da temperatura da superfície terrestre –  $T_{sup}$  (°C) para os três recortes: Urbana, Agricultura e Caatinga, Sem Correção (SC) e Com Correção (CC) pelos modelos propostos.

Data	Urbana				Agricultura				Caatinga			
	SC	M. 1	M. 2	M. 3	SC	M. 1	M. 2	M. 3	SC	M. 1	M. 2	M. 3
30/03/2013	29,76	32,82	32,77	32,2	24,37	26,72	24,75	24,89	31,96	35,14	35,58	34,87
03/09/2013	28,7	31,5	31,0	30,8	21,85	23,87	22,01	22,38	34,28	37,74	38,42	37,64
05/10/2013	37,1	41,0	40,2	40,4	29,06	32,02	29,87	30,52	39,63	43,75	43,43	43,41
09/01/2014	31,5	34,6	34,1	36,0	25,27	27,73	25,85	27,53	31,21	34,32	33,67	35,56
05/08/2014	28,0	30,7	30,2	31,2	27,58	30,19	29,5	30,45	30,45	33,43	33,6	34,5
22/09/2014	35,69	39,39	38,29	40,69	33,16	36,53	34,93	37,26	39,26	43,32	42,83	45,32
02/04/2015	32,38	35,66	35,82	36,72	25,35	27,82	25,51	26,81	32,53	35,79	35,9	36,83
24/08/2015	30,08	33,1	32,78	34,86	28,15	30,85	30,04	31,99	32,11	35,3	35,35	37,5
09/09/2015	32,1	35,35	35,44	34,23	29,65	32,56	31,92	31,16	35,09	38,65	39,47	37,81
27/10/2015	36,28	40,07	41,09	38,71	30,0	33,0	32,4	31,06	40,32	44,52	46,5	43,5
14/12/2015	36,67	40,51	40,91	39,59	28,59	31,48	29,95	29,86	41,04	45,32	46,73	44,74
Média	32,57	35,88	35,69	35,95	27,55	30,25	28,79	29,45	35,26	38,84	39,23	39,24

#### 4.5. Análise estatística para detecção de mudanças significativas

Foi empregado o teste estatístico “Diferença entre Médias para Grandes Amostras” considerando o nível de significância  $\alpha = 0,01$ , com avaliação bicaudal, a fim de avaliar a existência, ou não, de diferença significativa entre as médias para cada um dos métodos de correção atmosférica comparados aos dados SC. Para tanto, se faz necessário utilizar a média e desvio padrão de cada recorte para todas as datas utilizadas na pesquisa. Foi aplicado o teste nos três tipos de uso do solo (área urbana, área da caatinga e área agrícola), para os três métodos de correção (método 1, método 2 e método 3) envolvendo os três parâmetros ( $T_{sup}$ ,  $R_{emi}$  e  $R_n$ ), o que resultou na aplicação do teste

em 297 amostras. Verificou-se que em 293 casos rejeitou-se a hipótese nula, ou seja, de que não haveria diferença significativa entre as amostras. Portanto, ficou evidenciado haver diferença significativa entre os valores das três variáveis investigadas e que esse resultado deve ser considerado ao se efetivar um balanço de radiação com imagens orbitais. Dentre as três variáveis investigadas, o  $R_n$  não apresentou diferenças significativas em apenas 1,7% dos dados.

A média das diferenças, em valor absoluto, entre os dados da Torre com os dados SC e com os outros três métodos CC – seguindo a ordem: SC, método 1 (Allen et al., 2007), método 2 (Quin et al., 2001) e método 3 (Sekertekin & Bonafoni, 2020), foi de 3,1 °C, 1,4 °C, 2,0 °C e 1,8 °C, respectivamente. Logo, o melhor desempenho foi obtido pelo método 1, cujo resultados teve aplicação mais simplificada e direta. A maior diferença entre os valores da  $T_{sup}$  com os valores da Torre foi registrada em 2 de abril de 2014 com os dados SC, quando atingiu uma diferença de 5,4 °C. Esses resultados sugerem que se pode efetuar a correção atmosférica aos dados da  $T_{sup}$  obtidos com imagens Landsat 8 de modo simples e direto, com ganho substancial de qualidade nos valores da  $T_{sup}$  e parâmetros derivados.

A precisão de  $R_{emi}$  SC,  $T_{sup}$  e  $R_n$  comparados com os parâmetros meteorológicos medidos *in situ* pela Torre Micrometeorológica e com os valores estimados pelos métodos propostos na pesquisa, usando MAE (Erro Médio Absoluto), MRE (Erro Médio Relativo) e RMSE (Raiz Quadrada do Erro Médio) para todas as datas verificados no presente estudo estão dispostos na Tabela 3. Com base nos resultados obtidos com a aplicação dos testes estatísticos MAE, MRE e RMSE entre os dados observados e estimados, o método 1 (Allen et al., 2007) produziu as melhores estimativas apresentando o menor erro entre os demais – MAE de 1,44 °C para a  $T_{sup}$ , MRE de 2,41% para  $R_{emi}$  e RMSE de 4,77 °C para  $T_{sup}$  e 38,08 w/m<sup>2</sup> para  $R_{emi}$ , todos no recorte Agricultura. Em contrapartida, a  $T_{sup}$  SC apresentou o pior desempenho com erros mais acentuados, cerca de 8% em relação ao modelo de melhor desempenho.

Verifica-se que os valores obtidos para  $R_{emi}$  SC apresentam os maiores erros – de 25,89, 5,41 e 85,88 para o MAE, MRE e RMSE, como esperado, devido ao impacto da falta de correção atmosférica nos dados. Por outro lado, os resultados obtidos através dos

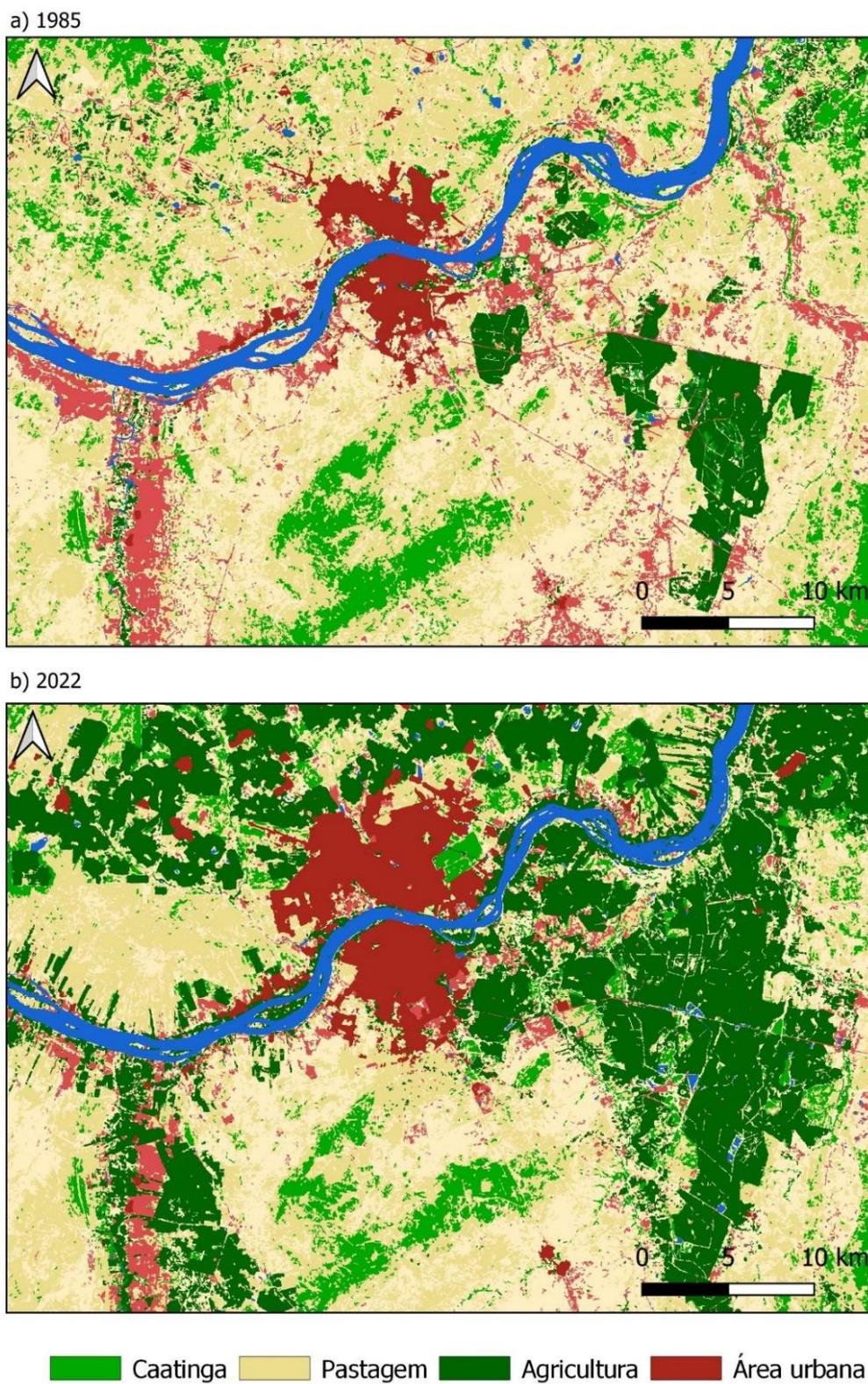
modelos foram bastante satisfatórios. O Método 1 (Allen et al., 2007) apresentou a melhor estimativa seguido do método 3 (Sekertekin & Bonafoni, 2020), com valores referentes a 2,41 e 3,64, respectivamente. Ao utilizar os testes estatísticos para  $R_n$ , observou-se que os valores sem correção apresentam os piores erros, da mesma forma que foi observado nas demais variáveis meteorológicas. Aliabad et al. (2021) utilizaram validação cruzada para estimar a  $T_{sup}$ . Obtiveram RMSE espacial de 5,3 °C e maior precisão entre os algoritmos que usam duas bandas térmicas com RMSE menor que 5 °C. Wang et al. (2021) utilizaram rede neural para recuperação da temperatura superfície. A validação *in situ* mostrou que o MAE mínimo é de aproximadamente 1 K (RMSE = 1,123 K, e  $R^2=0,902$ ).

**Tabela 3** – Comparação entre os erros MAE (%), MRE (%) e RMSE (°C) da temperatura da superfície terrestre –  $T_{sup}$  (oC), radiação de onda longa emitida –  $R_{emi}$  (W/m<sup>2</sup>) e saldo de radiação –  $R_n$  (W/m<sup>2</sup>) para todas as datas utilizadas na pesquisa, nos três recortes: Urbana, Agricultura e Caatinga, Sem Correção (SC) e Com Correção (CC) pelos modelos propostos, comparados com dados da Torre Micrometeorológica instalada na área de estudo.

	Urbana				Agricultura				Caatinga				Unit
	$T_{sup}$ SC	$T_{sup}$ M. 1	$T_{sup}$ M. 2	$T_{sup}$ M. 3	$T_{sup}$ SC	$T_{sup}$ M. 1	$T_{sup}$ M. 2	$T_{sup}$ M. 3	$T_{sup}$ SC	$T_{sup}$ M. 1	$T_{sup}$ M. 2	$T_{sup}$ M. 3	
MAE	3.05	5.48	5.38	5.45	3.09	1.44	2.02	1.68	4.91	8.21	8.59	8.61	°C
MRE	10.09	18.18	17.85	18.02	10.28	4.78	6.9	5.67	16.41	27.28	28.56	28.51	%
RMSE	10.10	18.17	17.84	18.08	10.26	4.77	6.71	5.58	16.27	27.24	28.50	28.57	°C
	$R_{emi}$ SC	$R_{emi}$ M. 1	$R_{emi}$ M. 2	$R_{emi}$ M. 3	$R_{emi}$ SC	$R_{emi}$ M. 1	$R_{emi}$ M. 2	$R_{emi}$ M. 3	$R_{emi}$ SC	$R_{emi}$ M. 1	$R_{emi}$ M. 2	$R_{emi}$ M. 3	Unit
MAE	16.01	24.58	24.33	24.63	25.89	11.48	17.35	13.84	21.26	36.90	39.32	38.22	W/m <sup>2</sup>
MRE	3.33	5.18	5.12	5.17	5.41	2.41	3.64	2.91	4.48	7.78	8.29	8.05	%
RMSE	53.11	81.53	80.68	81.69	85.88	38.08	57.54	45.91	70.51	122.37	130.42	126.77	W/m <sup>2</sup>
	$R_n$ SC	$R_n$ M. 1	$R_n$ M. 2	$R_n$ M. 3	$R_n$ SC	$R_n$ M. 1	$R_n$ M. 2	$R_n$ M. 3	$R_n$ SC	$R_n$ M. 1	$R_n$ M. 2	$R_n$ M. 3	Unit
MAE	135.33	157.06	156.09	157.35	33.72	42.27	40.54	41.58	121.65	145.51	147.38	148.05	W/m <sup>2</sup>
MRE	21.23	24.73	24.56	24.78	5.63	6.85	6.67	6.85	19.13	22.97	23.27	23.38	%
RMSE	448.83	520.90	517.70	521.87	111.85	140.21	134.47	137.89	403.48	482.59	488.81	491.02	W/m <sup>2</sup>

#### 4.6. Mudanças no uso e ocupação do solo

Nas últimas décadas, especialmente a partir do ano 2000, a vulnerabilidade natural do clima terrestre motivou uma preocupação constante quanto ao estado da mudança climática global, seja por interferência das atividades naturais e/ou antropogênicas. A Figura 15 exhibe as mudanças no uso e cobertura do solo – LUCCs no recorte da área de estudo para os anos de 1985 e 2022, obtidas pela coleção 8 do projeto MapBiomas (MapBiomas, 2023). Embora o recorte da área de estudo faça parte do bioma Caatinga, localizado entre os estados da Bahia e Pernambuco, com marcante característica semiárida, boa parte dessa região se caracteriza com o tipo de uso pastagem (Figura 15-a). A maior parte da região em estudo se encontra muito antropizada, pertencente nos dias atuais a grandes áreas com agricultura irrigada (Figura 15-b). O desmatamento para expansão de agricultura, desenvolvimento de infraestrutura e incentivos políticos e financeiros à ocupação de terras são os principais impulsionadores das mudanças de uso da terra nos biomas brasileiros, afetando a biodiversidade, os recursos hídricos, as emissões de carbono, o clima regional e local (Souza Jr. et al., 2020). Portanto, revela-se por meio das LUCCs as transformações na região de estudo e considera-se a hipótese de que as LUCCs estejam afetando as trocas de calor e massa entre a superfície e a camada limite planetária do bioma Caatinga e que variáveis meteorológicas e biofísicas também estejam sendo afetadas por essas mudanças. Informações espacialmente explícitas sobre as trajetórias históricas das LUCCs são fundamentais para melhorar o planejamento e a gestão sustentável dos recursos naturais, a formulação de políticas, entre outras aplicações sociais. Torna-se evidente a preocupação em buscar a conservação e o manejo sustentável dos recursos naturais, como forma de combate às mudanças climáticas.



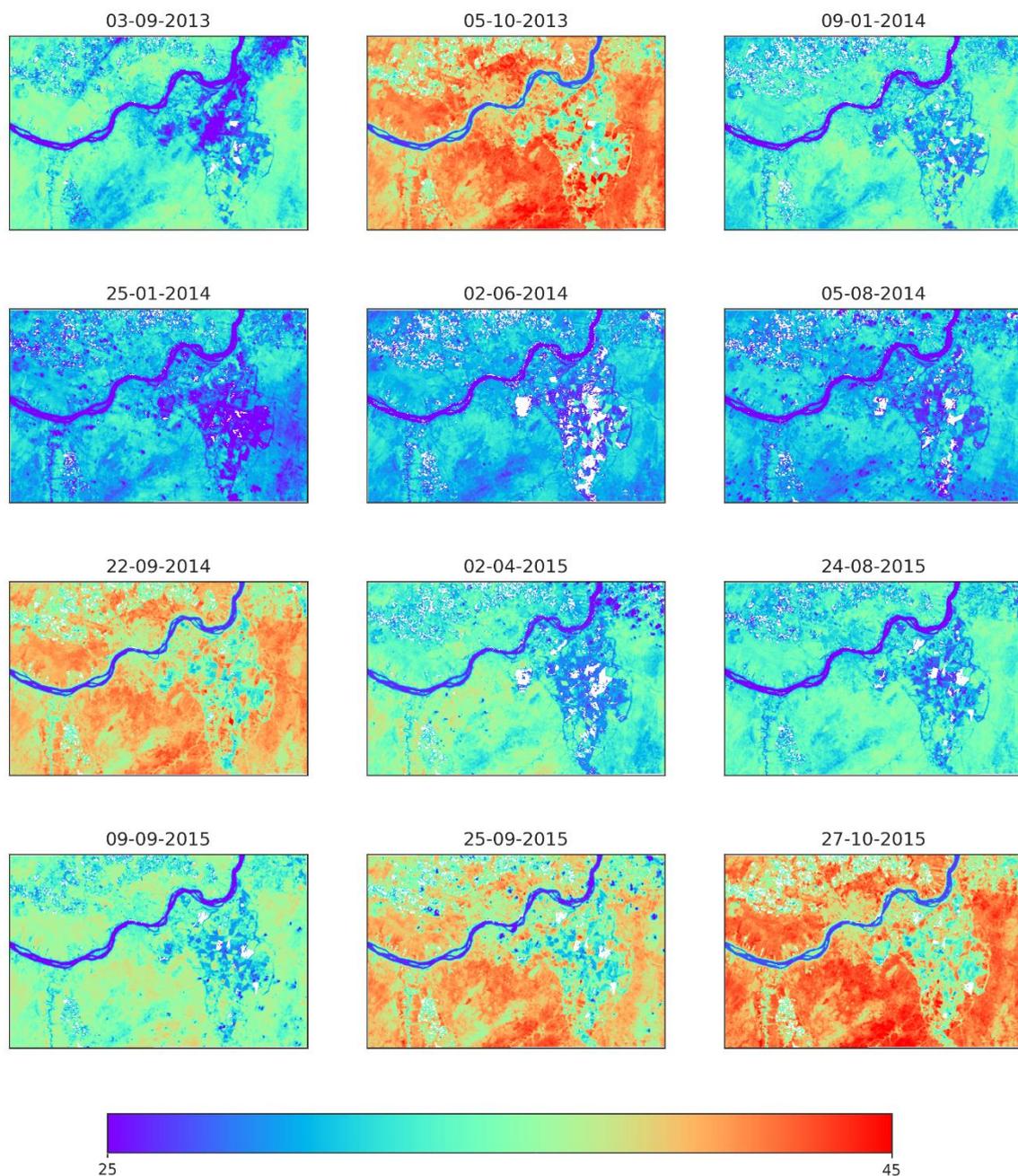
**Figura 15** – Uso e ocupação do solo no recorte da área de estudo para o ano de a) 1985 e b) 2022. Fonte: MapBiomass (2023).

#### 4.7. Variabilidade anual dos componentes do balanço de radiação

A seguir serão mostrados e descritos os resultados obtidos a partir da análise da variabilidade espacial da temperatura da superfície terrestre ( $T_{sup}$ ), através dos mapas temáticos que ilustram as classes de cores com os menores valores de  $T_{sup}$  na cor violeta ( $T_{sup} < 25$  °C) e os maiores valores ( $T_{sup} > 45$  °C) em vermelho. Na Figura 16, as imagens do ano de 2013, representado pelas imagens do dia 03 de setembro e 05 de outubro, apresentam padrões distintos, apesar da defasagem de apenas um mês. Deve-se destacar que no ano de 2014, representado pelas imagens dos dias 09 e 25 de janeiro, 02 de junho, 05 de agosto e 22 de setembro de 2014, os valores de  $T_{sup}$  estão caracterizados em tons mais frios da classe de cores. É provável que as secas registradas entre 2012 a 2017 possam de alguma forma ter influenciado nos valores observados (Marengo et al., 2020).

O mês que apresentou os maiores valores de  $T_{sup}$  foi o mês de outubro, com maior oferta de radiação de onda curta, sofrendo grande influência da irradiância solar. Observa-se que os padrões que diferenciam os diversos tipos de uso e cobertura do solo (as áreas irrigadas daquelas não irrigadas e também das áreas urbanas), são bastante distintos, chegando a apresentar diferenças maiores que 5 °C.

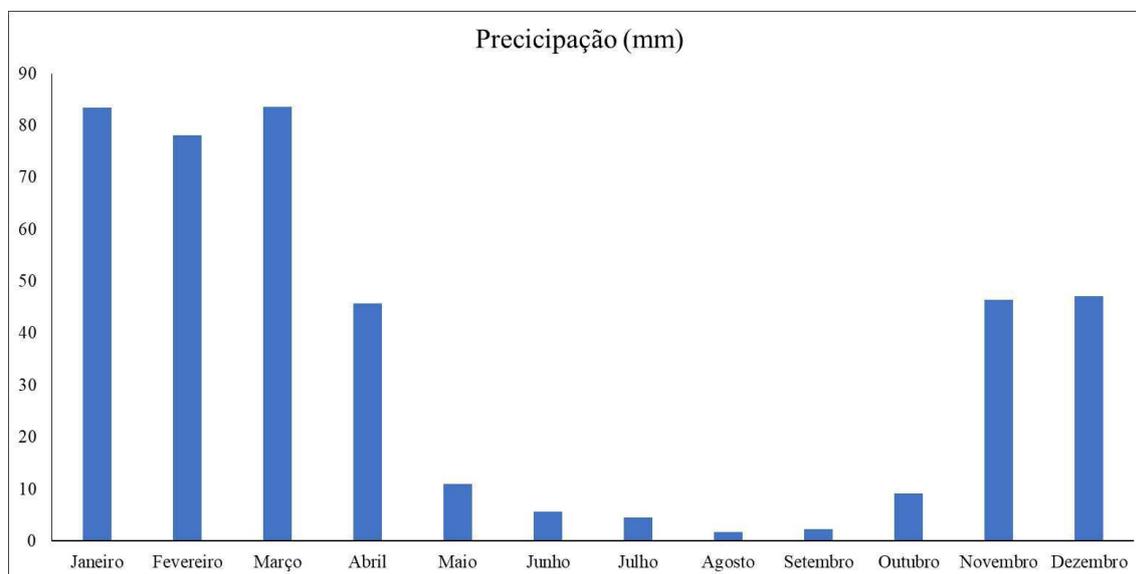
A fim de aprimorar a compreensão das flutuações sazonais e interanuais, e, sobretudo, entender os efeitos dessas variáveis decorrentes das LUCCs na região de estudo, é essencial analisar o padrão de chuvas na área em questão.



**Figura 16** – Mapas temáticos da Temperatura da Superfície Terrestre (Tsup) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 03-09-2013, 05-10-2013, 09-01-2014, 25-01-2014, 02-06-2014, 05-08-2014, 22-09-2014, 02-04-2015, 24-08-2015, 09-09-2015, 25-09-2015, 27-10-2015.

Como pode ser observado (Figura 17), no período de novembro a abril as chuvas acumuladas mensalmente são superiores aos 50 mm, enquanto de maio a setembro, no período seco, há pouca ocorrência de eventos chuvosos. As chuvas nesse período podem estar associadas à atuação de sistemas meteorológicos como os VCANs e principalmente a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que devido a sua posição mais ao sul do Equador, entre os meses de fevereiro a abril, causando chuvas no norte e nordeste brasileiro (Ferreira et al., 2005).

Já na Tabela 4, são apresentadas as intensidades do El Niño e da La Niña durante o período de 2013 a 2023, obtidos pelo site da National Oceanic And Atmospheric Administration (NOOA), de modo a proporcionar melhor interpretação das influências do regime pluviométrico.

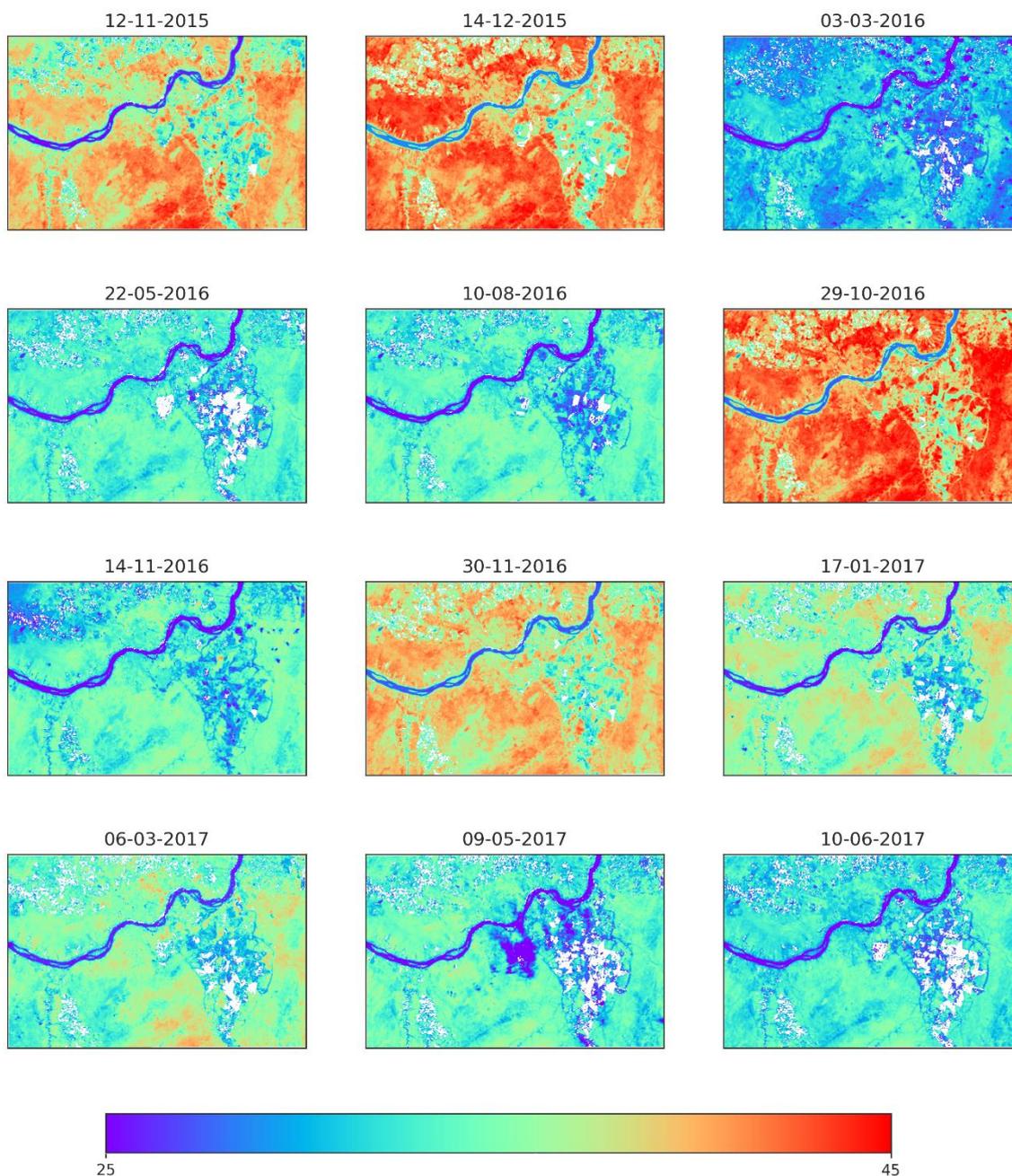


**Figura 17** – Precipitação mensal (mm) normalizada para o período de 1991 a 2020 obtidos pela estação meteorológica do INMET de Petrolina-PE.

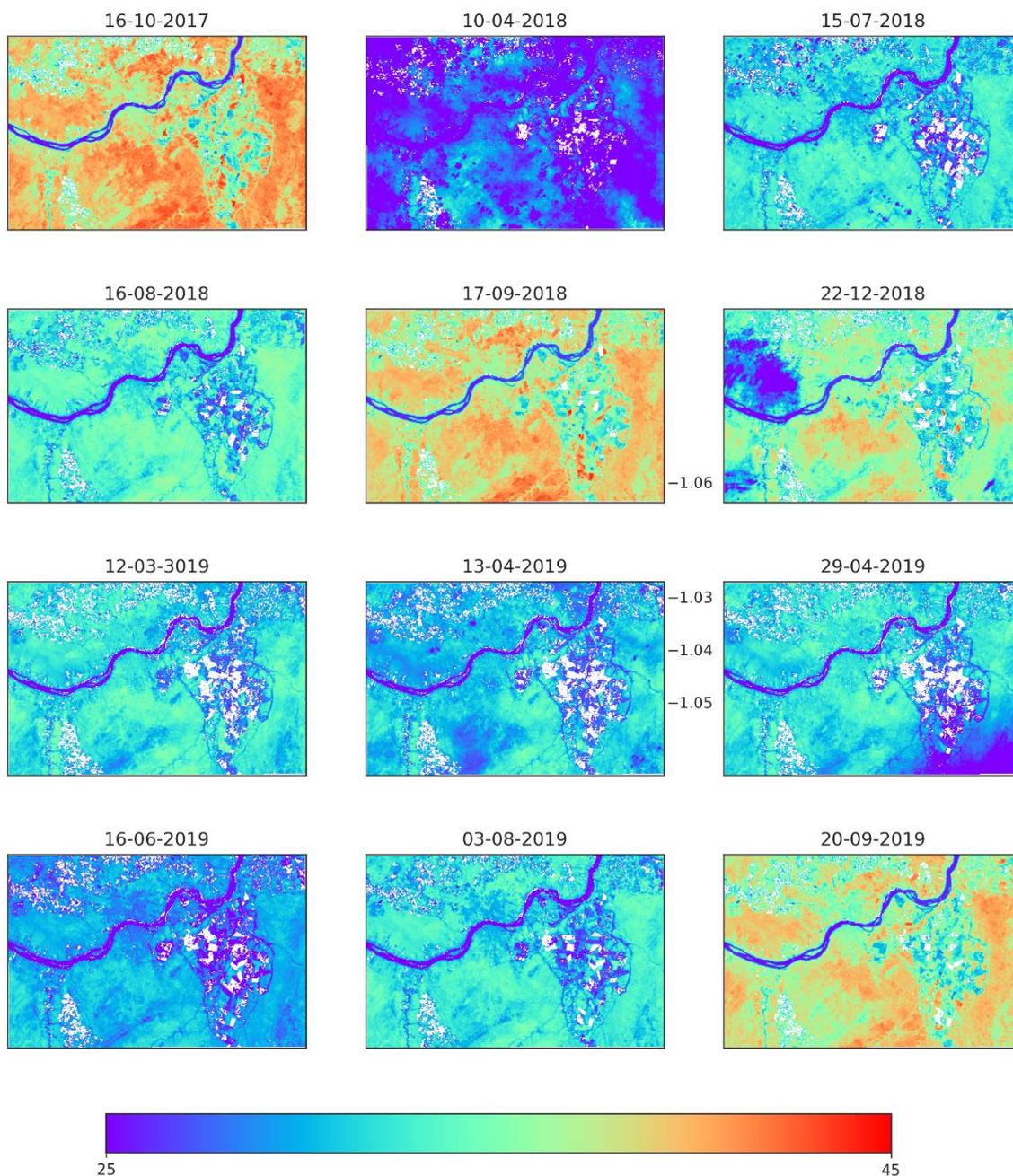
**Tabela 4** – Intensidade do El Niño e da La Niña durante o período de 2013 a 2023. Valores descritos azul sendo anos de ocorrência de La Niña, em vermelho El Niño e em preto, anos neutros.

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7
2015	0.5	0.5	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6
2016	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-1.0
2018	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8
2019	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5
2020	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.2	-1.3	-1.2
2021	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	-1.0	-1.0
2022	-1.0	-0.9	-1.0	-1.1	-1.0	-0.9	-0.8	-0.9	-1.0	-1.0	-0.9	-0.8
2023	-0.7	-0.4	-0.1	0.2	0.5	0.8	1.1	1.3	1.6	1.8	1.9	

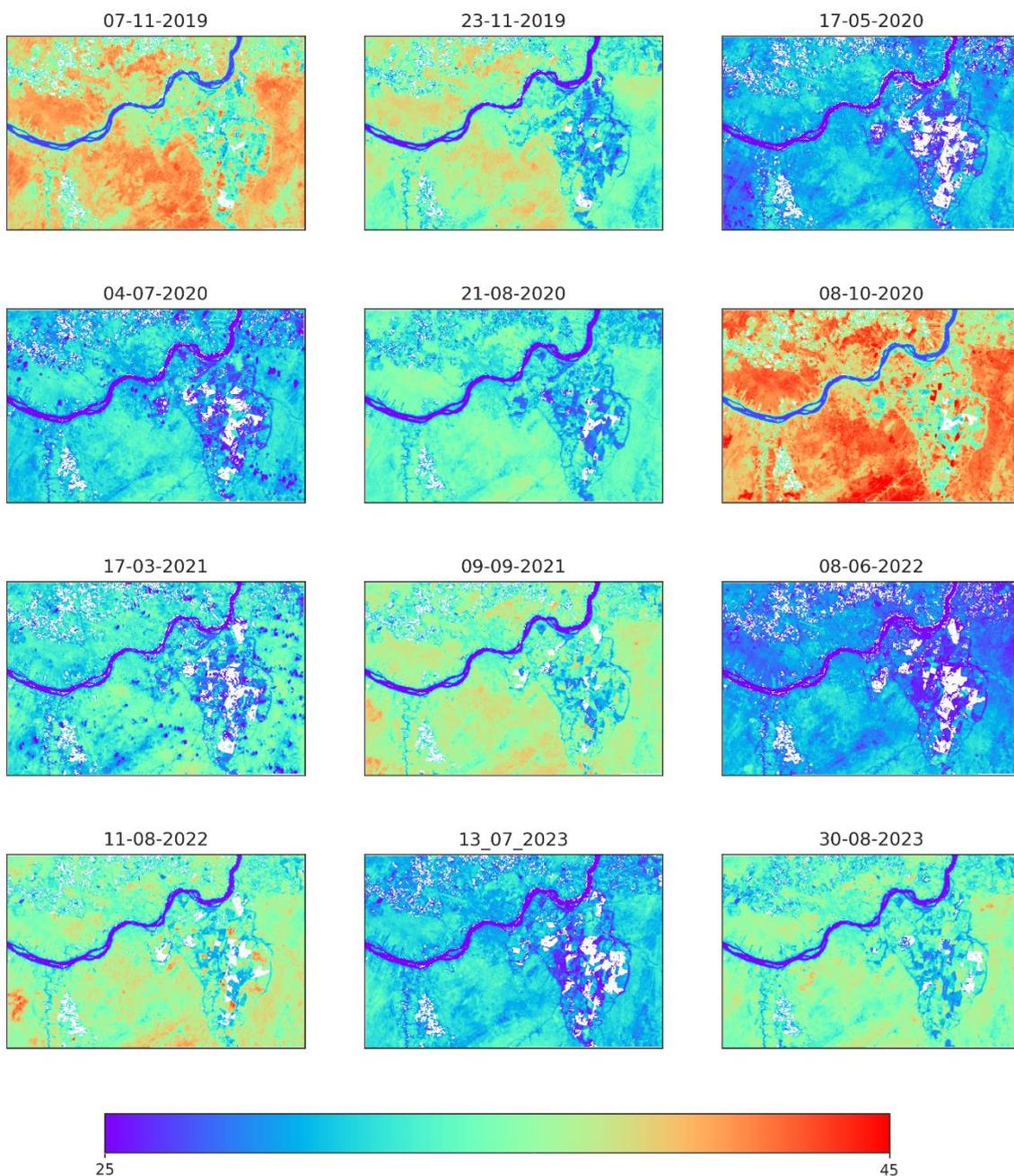
De um modo geral, as diferenças na  $T_{sup}$  se mostram mais acentuadas entre as datas referentes aos meses que determinam cada estação do ano. Observa-se na transição entre as estações, os maiores valores da  $T_{sup}$  (setembro, outubro e novembro, são os meses mais quentes). Apenas os anos de 2015 e 2020 apresentam o mês de dezembro com temperaturas mais expressivas. Uma explicação para esse fato incomum pode estar associada com o fenômeno meteorológico do El Niño, que no ano de 2015 esteve mais intenso.



**Figura 18** – Mapas temáticos da Temperatura da Superfície Terrestre ( $T_{sup}$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 12-11-2015, 14-12-2015, 03-03-2016, 22-05-2016, 10-08-2016, 29-10-2016, 14-11-2016, 30-11-2016, 17-01-2017, 06-03-2017, 09-05-2017, 10-06-2017.



**Figura 19** – Mapas temáticos da Temperatura da Superfície Terrestre ( $T_{sup}$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 16-10-2017, 10-04-2018, 15-07-2018, 16-08-2018, 17-09-2018, 22-12-2018, 08-02-2019, 12-03-2019, 13-04-2019, 29-04-2019, 16-06-2019, 03-08-2019, 20-09-2019.

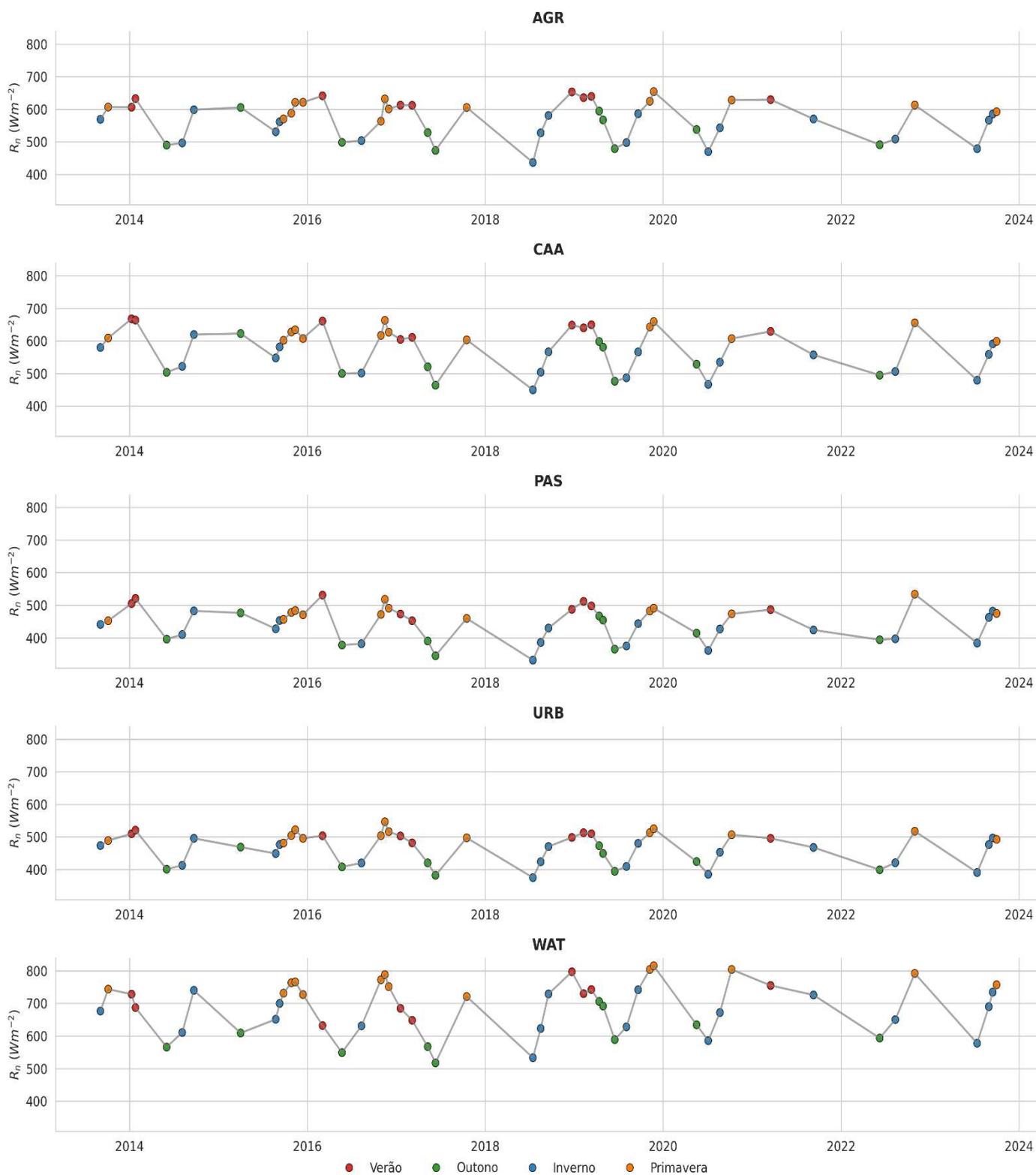


**Figura 20** – Mapas temáticos da Temperatura da Superfície Terrestre ( $T_{sup}$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 07-11-2019, 23-11-2019, 17-05-2020, 04-07-2020, 21-08-2020, 08-10-2020, 17-03-2021, 09-09-2021, 08-06-2022, 11-08-2022, 13-07-2023, 30-08-2023.

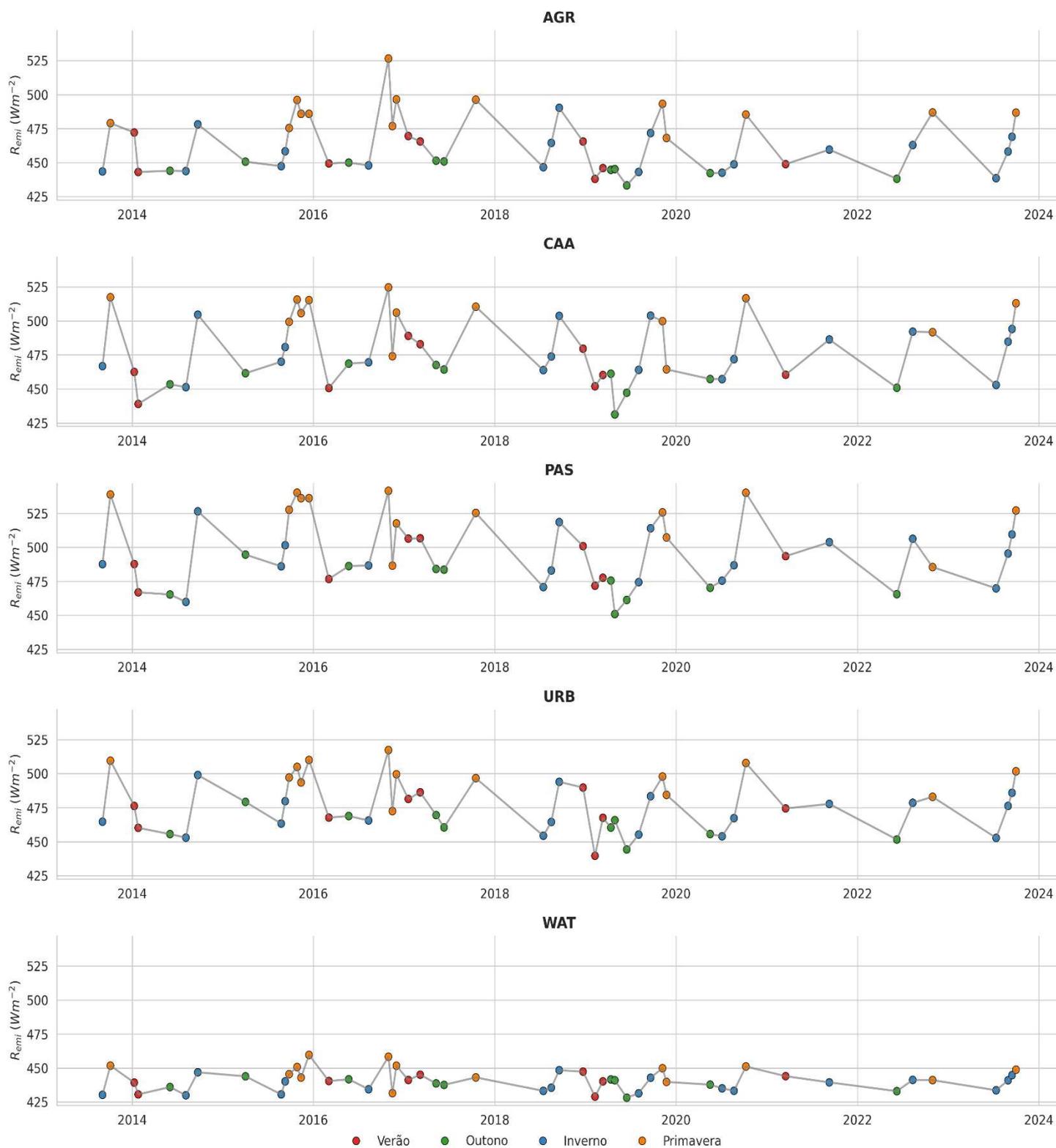
Para todas as imagens selecionadas no presente estudo, foram elaborados os mapas da  $T_{sup}$ ,  $R_{emi}$  e  $R_n$  (Apêndice B) que de algum modo retratam, os mesmos padrões observados na  $T_{sup}$  nas figuras apresentadas.

Para a análise da evolução temporal do saldo de radiação –  $R_n$ , foram selecionados recortes das principais classes de cobertura do solo na área de estudo, sendo eles: AGR = agricultura irrigada, CAA = vegetação caatinga, PAS = pastagem, URB = área urbana e WAT = corpos d'água. Foi extraído de cada recorte o valor médio de  $R_n$ ,  $R_{emi}$  e  $T_{sup}$ , plotados para o período de 2013 a 2023 (Figuras 21, 22 e 23). Verifica-se que os recortes associados a classes vegetais (AGR, CAA e PAS) apresentaram comportamento semelhante. Porém para o recorte da Caatinga (CAA) os valores de  $R_n$  foram mais elevados (Figura 21), mínimo de  $450 \text{ Wm}^{-2}$  e máximo de aproximadamente  $700 \text{ Wm}^{-2}$ , por ser uma vegetação de pequeno a médio porte, com distribuição mais espaçada, sofre influência do solo. As áreas urbanas têm médias de  $R_n$  na faixa de 469 a  $672 \text{ Wm}^{-2}$ . Verifica-se também a distribuição do  $R_n$  médio por estação do ano, em que se pode observar as semelhanças entre primavera-verão e outono-inverno e o simultâneo distanciamento entre esses dois grupos. No Apêndice C, encontra-se a tabela com os respectivos valores médios.

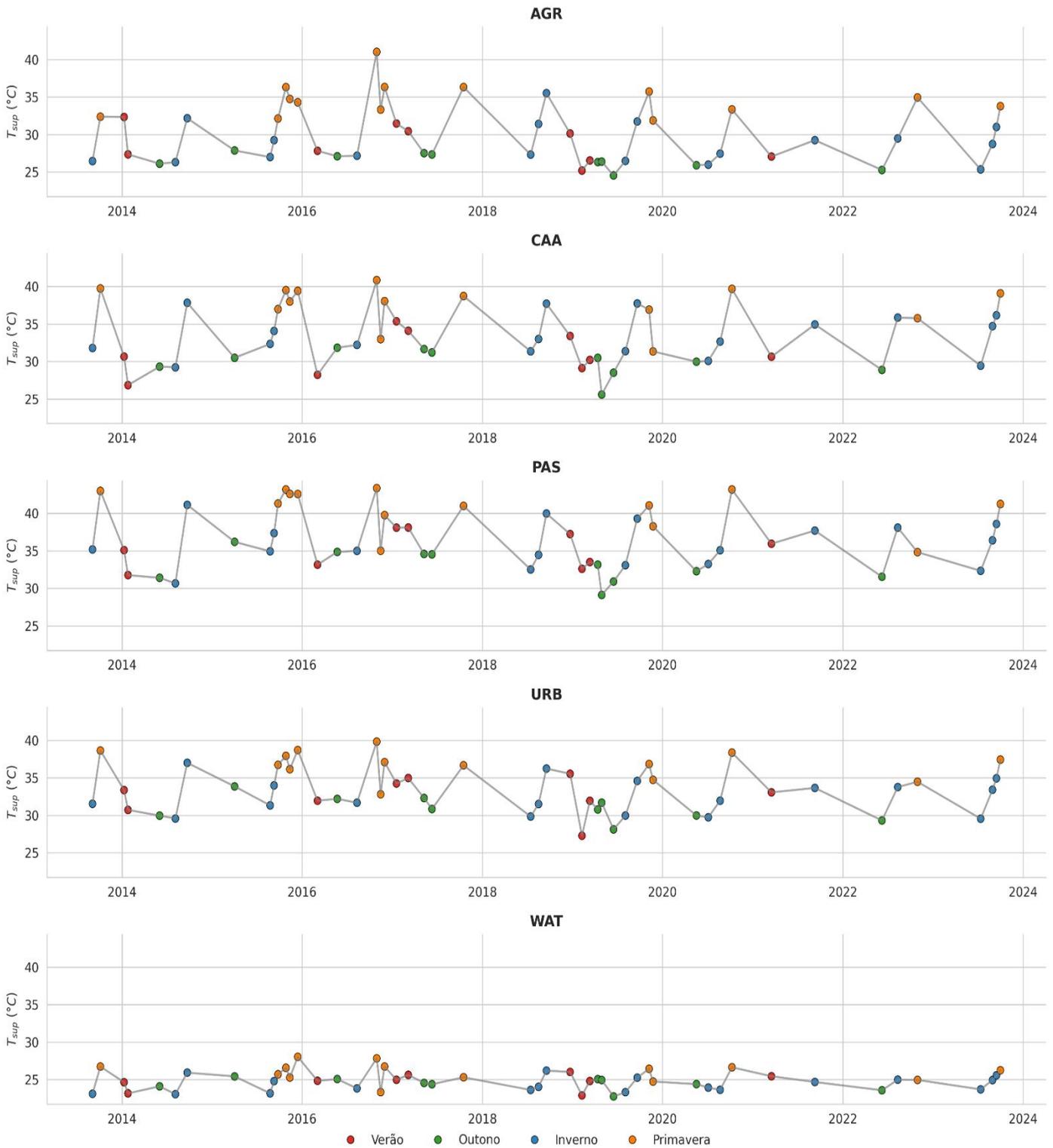
Os valores positivos de  $R_n$  indicam que a superfície apresenta um ganho líquido de energia. Essa energia fica disponível aos processos que ocorrem na superfície, podendo ser utilizada no aquecimento dos seus componentes – solo, plantas, construções etc. – e do ar (calor sensível), na fotossíntese e na evapotranspiração (calor latente).



**Figura 21** – Evolução temporal do Saldo de Radiação –  $R_n$  de 2013 a 2023 nos diferentes tipos de uso do solo (AGR = agricultura irrigada, CAA = vegetação caatinga, PAS = pastagem, URB = área urbana, WAT = corpos d'água).

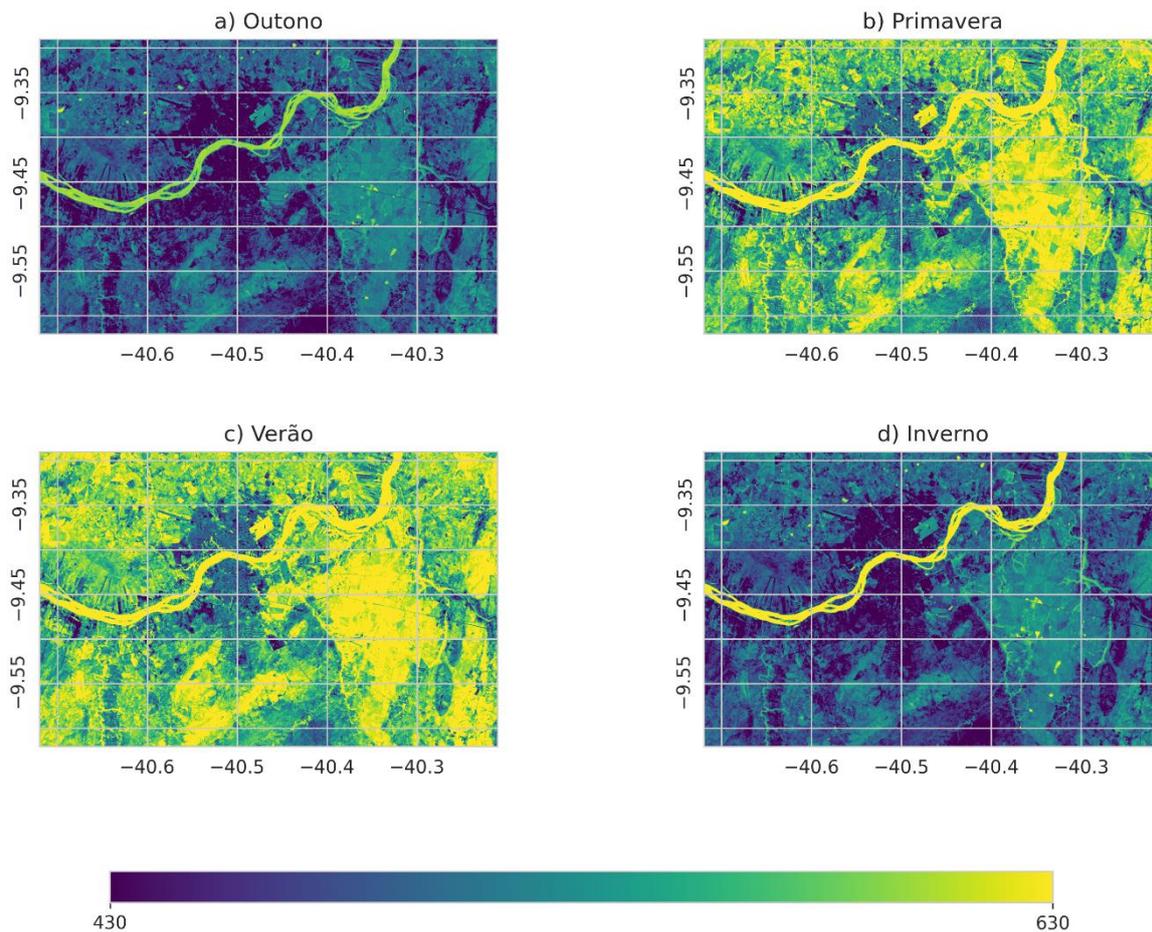


**Figura 22** – Evolução temporal da Radiação de Onda Longa Emitida – Remi de 2013 a 2023 nos diferentes tipos de uso do solo (AGR = agricultura irrigada, CAA = vegetação caatinga, PAS = pastagem, URB = área urbana, WAT = corpos d'água).



**Figura 23** – Evolução temporal da Temperatura da Superfície Terrestre –  $T_{sup}$  de 2013 a 2023 nos diferentes tipos de uso do solo (AGR = agricultura irrigada, CAA = vegetação caatinga, PAS = pastagem, URB = área urbana, WAT = corpos d'água).

As médias sazonais de  $R_n$  são exibidas na Figura 24. Entre a primavera e o verão (Figura 24.b e 24.c) há um aumento geral de  $R_n$  ( $24 \text{ Wm}^{-2}$  em média). Esse aumento é mais significativo nas áreas de agricultura, nos outros tipos de cobertura do solo o aumento é inferior. Já para o outono e inverno (Figura 24.a e 24.d) há uma queda geral do  $R_n$  médio ( $215 \text{ Wm}^{-2}$ ) com a chegada do outono. Entre o outono e o inverno se registram as menores variações de  $R_n$ , cuja média gira em torno de  $1,4 \text{ Wm}^{-2}$ . Contudo, a chegada da primavera provoca as maiores diferenças.



**Figura 24** – Médias sazonais a) outono, b) primavera, c) verão e d) inverno da do Saldo de Radiação –  $R_n$  no período de 2013 a 2023.

## 5. CONCLUSÕES

A partir da metodologia empregada para estimar  $T_{sup}$ ,  $R_{emi}$  e  $R_n$  usando 3 métodos de correção atmosférica (CC), bem como sem correção (SC) na região do submédio do rio São Francisco, pode-se concluir que:

1. As diferenças significativas da  $T_{sup}$  média dos plots obtidos em três diferentes tipos de alvo. Os mapas da  $T_{sup}$ ,  $R_{emi}$  e  $R_n$  evidenciam mudanças perceptíveis nas intensidades dos valores dessas variáveis ao se comparar valores CC e SC. As diferenças entre a  $T_{sup}$  CC e SC ultrapassaram mais de 6 °C em áreas de caatinga, o que reduz substancialmente o saldo de radiação. As diferenças entre a  $T_{sup}$  CC e  $T_b$  ultrapassaram 10 °C.

2. A conclusão mais relevante desde estudo sugere que a correção atmosférica na  $T_{sup}$  deve ser efetuada, uma vez que ela impacta significativamente componentes importantes do balanço de radiação e indiretamente no balanço de energia. As simulações feitas revelam uma boa performance dos métodos de correção utilizados na estimativa da  $T_{sup}$  no presente trabalho.

3. O método apresenta uma sensibilidade relativamente baixa em relação a temperatura da atmosfera e a transmitância, o que permite utilizar, para ambas, uma única equação empírica. A eficiência do método deve ser comprovada com medidas de temperatura a superfície no momento da passagem do satélite, com dados de Torre Micrometeorológica, por exemplo. Compreender esses processos é fundamental para prever as mudanças climáticas e seus efeitos no meio ambiente e na sociedade.

4. Considera-se a hipótese de que as LUCCs estejam afetando as trocas de calor e massa entre a superfície e a camada limite planetária do bioma Caatinga e que variáveis meteorológicas e biofísicas também estejam sendo afetadas por essas mudanças. Informações espacialmente explícitas sobre as trajetórias históricas das LUCCs são fundamentais para melhorar o planejamento e a gestão sustentável dos recursos naturais, a formulação de políticas, entre outras aplicações sociais.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, Richard G. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, v. 122, n. 2, p. 97-106, 1996.

Allen, R. G. et al. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). *Advance Training and User's Manual—Idaho Implementation, Version*, v. 1, p. 97, 2002.

Allen R. G.; Tasumi, M.; Morse, A; Trezza. R; Wright, J. L; Bastiaanssen, W.; Kramber, W.; Lorite, I; Robison, C. W. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce*, v.133, n. 4, p.395–406, 2007.

ALLEN, Richard G.; TASUMI, Masahiro; TREZZA, Ricardo. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce*, v. 133, n. 4, p. 380-394, 2007a.

Aliabad, F. A.; Zare, M.; & Malamiri, H. G. Comparison of the accuracy of daytime land surface temperature retrieval methods using Landsat 8 images in arid regions. *Infrared Physics & Technology*, v. 115, p. 103692, 2021.

Amani, Meisam et al. Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: A comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 13, p. 5326-5350, 2020.

Barreto, Robson Duarte. *Uso e ocupação do solo às margens do Rio São Francisco no Município de Petrolina-PE: impactos ambientais no canal fluvial*. 2015. Dissertação de Mestrado.

Bastiaanssen, W. G.; Menenti, M.; Feddes, R. A.; Holtslag, A. A. M. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of hydrology*, v. 212, p. 198-212, 1998.

Bastiaanssen, W. G. M. SEBAL – based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, v.229, p.87-100, 2000.

Bastiaanssen W. G. M.; Noordman E. J. M.; Pelgrum H.; Davids G.; Thoreson B. P.; Allen R. G. SEBAL model with remotely sensed data to improve water-resources management under actual field conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 131, p. 85–93, 2005.

Castro, Silvia Garcia de. *Análise espacial e temporal da precipitação, do material particulado e da radiação global em municípios paulistas*. 2015.

Chander, Gyanesh; Markham, Brian. Revised Landsat 5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v.41, n.11, p.2674-2677, 2003.

Cibin, R.; Sudheer, K. P.; Chaubey, Indrajeet. Sensitivity and identifiability of stream flow generation parameters of the SWAT model. *Hydrological Processes: An International Journal*, v. 24, n. 9, p. 1133-1148, 2010.

CNUC/MMA – Cadastro Nacional de Unidades de Conservação/Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80238/CNUC\\_FEV18%20-%20C\\_Bio.pdf](http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80238/CNUC_FEV18%20-%20C_Bio.pdf)>. Acesso em: 01 de abril de 2023.

Couto, F.T.; Salgado, R.; Costa, M.J.; Prior, V. Precipitation in the Madeira Island over a 10-year period and the meridional water vapor transport during the winter seasons. *International Journal of Climatology*, v. 35, n. 13, p. 3748-3759, 2015.

ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. 2019. Disponível em: <[www.ecmwf.int](http://www.ecmwf.int)>. Acesso em: 15 de maio de 2023.

Fausto, M. A. et al. Net radiation estimated by remote sensing in Cerrado areas in the Upper Paraguay River Basin. *Journal of Applied Remote Sensing*, v. 8, n. 1, p. 83541, 2014.

Ferreira, Antônio Geraldo; da Silva Mello, Namir Giovanni. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 1, n. 1, 2005.

Ferreira, T. R., da Silva, B. B., de Moura, M. S., Verhoef, A., & Nobrega, R. L. The use of remote sensing for reliable estimation of net radiation and its components: A case study for contrasting land covers in an agricultural hotspot of the Brazilian semiarid region. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 291, p. 108052, 2020.

Figueiredo, D. *Conceitos Básicos de Sensoriamento Remoto*. São Paulo, 2005. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos\\_sm](http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm)> Acesso em 16 de maio de 2023.

Garrison, John D.; Adler, Glen P. Estimation of precipitable water over the United States for application to the division of solar radiation into its direct and diffuse components. *Solar Energy*, v. 44, n. 4, p. 225-241, 1990.

Gorelick, N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, v. 202, p. 18-27, 2017.

Guedes, Jânio; da Silva, Sebastião Milton Pinheiro. Sensoriamento Remoto no Estudo da Vegetação: Princípios Físicos, Sensores e Métodos. *Acta Geográfica*, v. 12, n. 29, p. 127-144, 2018.

Gusmão, A. C. V. L. et al. Determination of the net radiation in Bananal Island, TO with orbital images. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 10, p. 1107–1114, 2012.

Iqbal, Muhammad. *An introduction to solar radiation*, Elsevier. 1983.

Markham, B. L.; Barker, J. L. Landsat MSS and TM Post-Calibration Dynamic Ranges, Exoatmospheric Reflectance and At-Satellite Temperatures. *EOSAT Landsat Technical Notes*, p. 3-8, 1986.

Marengo, J. A.; Cunha, A. P. M. A.; Nobre, C. A.; Ribeiro Neto, G. G.; Magalhaes, A. R.; Torres, R. R.; Sampaio, G.; Alexandre, F.; Alves, L. M.; Cuartas, L. A.; Deusdará, K. R. L.; Alvalá, R. C. S. Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C. *Natural Hazards*, v. 102, p. 1-26, 2020.

Marques, H. O. et al. Estimated net radiation in an Amazon-Cerrado transition forest by Landsat 5 TM. *Journal of Applied Remote Sensing*, v. 11, n. 04, p. 1, 2017.

Mendonça, Francisco; Danni-Oliveira, Inês Moresco. *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil*. Oficina de textos, 2017.

Meneses, Paulo Roberto; Almeida, T. de. *Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto*. Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

Miranda, V. F. V. V. et al. Urbanization-induced impacts on heat-energy fluxes in tropical South America from 1984 to 2020: The Metropolitan Area of Rio de Janeiro/Brazil. *Building and Environment*, v. 216, p. 109008, 2022.

Oliveira, G. et al. Effects of land-cover changes on the partitioning of surface energy and water fluxes in Amazonia using high-resolution satellite imagery. *Ecohydrology*, v. 12, n. 6, 2019.

Oliveira, L. M. M. et al. Balanço de radiação por sensoriamento remoto em bacia hidrográfica da zona da mata nordestina. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 30, p. 16-28, 2015.

Paranhos-Filho, A. C; Lastoria, G; Torres, T. G. *Sensoriamento Remoto ambiental aplicado: Introdução as Geotecnologias*. Ed. UFMS, Campo Grande/MS, 2008.

Peres, Renata Bovo. *Uso e ocupação do solo e impactos ambientais urbanos*. Cadernos do Cescar. São Carlos: Gráfica e Editora Futura, p. 173-183, 2011.

Qin, Z.; Karnieli, A.; Berliner, P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International journal of remote sensing*, v. 22, n. 18, p. 3719-3746, 2001.

Santos, Leonardo Laipelt dos. geeSEBAL: uma ferramenta Google Earth Engine para estimativa de séries temporais de evapotranspiração. 2020.

Schirmbeck, J.; Fontana, D. C.; Roberti, D. R. Evaluation of OSEB and SEBAL models for energy balance of a crop area in a humid subtropical climate. *Bragantia*, v. 77, n. 4, p. 609-621, 2018.

Sekertekin, A. Validation of Physical Radiative Transfer Equation-Based Land Surface Temperature Using Landsat 8 Satellite Imagery and SURFRAD. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.196, p. 105161, 2019.

Sekertekin A.; Bonafoni, S. Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 5, 7, and 8 over Rural Areas: Assessment of Different Retrieval Algorithms and Emissivity Models and Toolbox Implementation, v.12, n.294, p.1-32, 2020.

Silva, Bernardo Barbosa da; Lopes, Gláucia Miranda; de Azevedo, Pedro Vieira. Determinação do albedo de áreas irrigadas com base em imagens Landsat 5 TM. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 13, n. 2, p. 201-211, 2005

Silva, B. B. et al. Determination of instantaneous and daily net radiation from TM - Landsat 5 data in a subtropical watershed. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 135, p. 42-49, 2015.

Silva, Bernardo B. et al. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 20, p. 3-8, 2016.

Silva, Gláucia de Fátima Gomes da et al. Análise de Sensibilidade do NDVI na parametrização da Modelagem Atmosférica para a região Oeste do Pará. 2014. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Oeste do Pará.

Singh, Ashbindu. Review article digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International journal of remote sensing*, v. 10, n. 6, p. 989-1003, 1989.

Souza, J. D. Silva, B. B. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM – Landsat 5. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23, 349 - 358, 2005.

Souza, Juarez Dantas de et al. Modelo físico-matemático de correção atmosférica para imagens TM-Landsat 5 e MODIS Terra/Aqua. 2008.

Souza Jr, Carlos M. et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. *Remote Sensing*, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020.

Srivastava, P. K.; Jaiswal, N.; Suman, S.; Mohanty, S.; Mona, S. Appraisal of radiative transfer model 6SV for atmospheric correction of multispectral satellite image towards land surface temperature retrieval. In *Atmospheric Remote Sensing*, p. 105-120, 2023.

Tasumi, Masahiro; Allen, Richard G.; Trezza, Ricardo. At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 13, n. 2, p. 51-63, 2008.

Teixeira, A. H. C., Bastiaanssen, W. G. M., Ahmad, M. D., Moura, M. S. B., Bos, M. G. (2008). Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. *J. Hydrol.*, 362, 110-127.

Vanhellemont, Q. Combined land surface emissivity and temperature estimation from Landsat 8 OLI and TIRS. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 166, p. 390-402, 2020.

Vianello, R. L.; Alves, A. R. *Meteorologia básica e aplicações* 2. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2012.

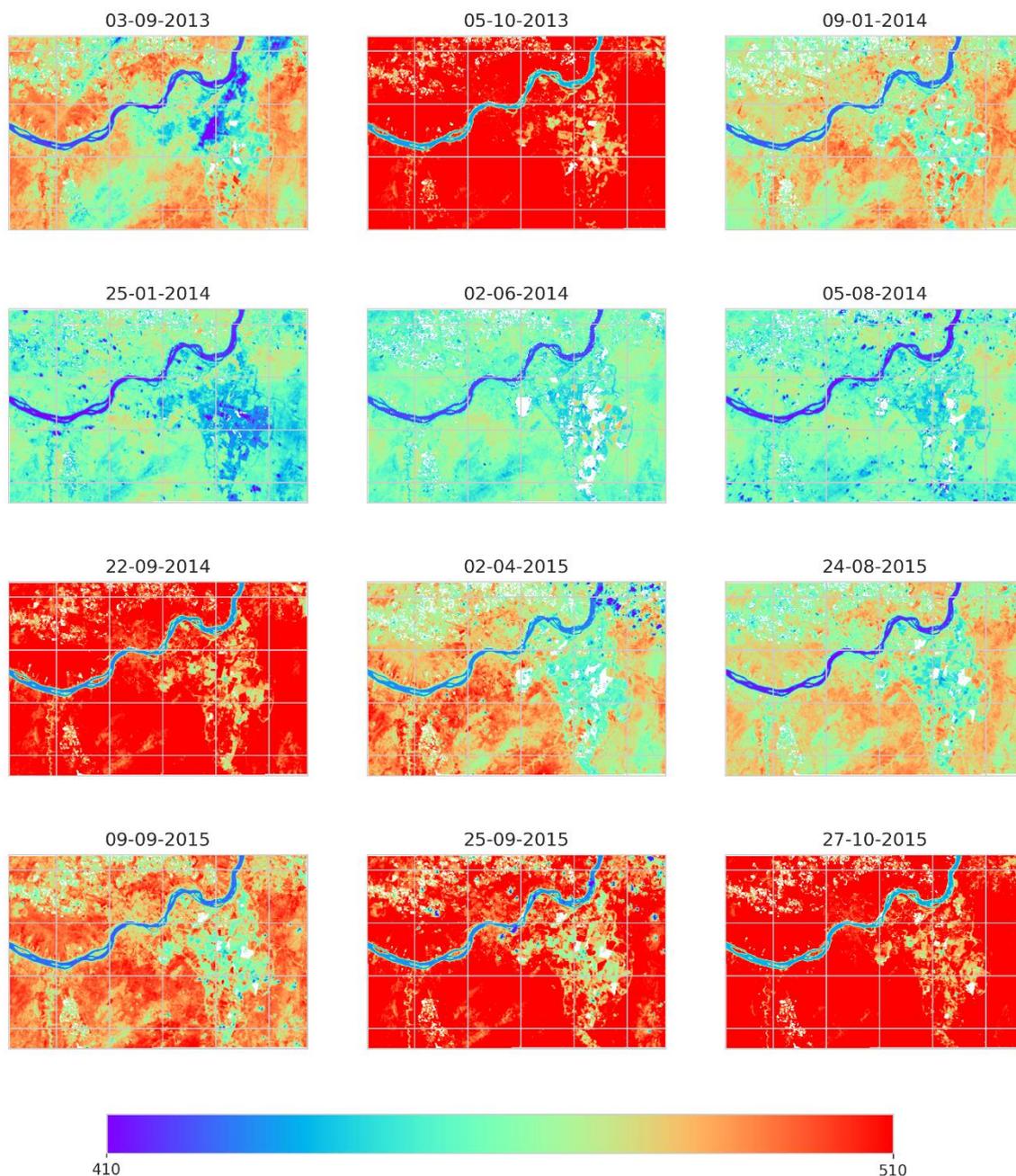
Wang, H.; Mao, K.; Yuan, Z.; Shi, J.; Cao, M.; Qin, Z.; Tang, B. A method for land surface temperature retrieval based on model-data-knowledge-driven and deep learning. *Remote Sensing of Environment*, v. 265, p. 112665, 2021.

## 7. APÊNDICE A

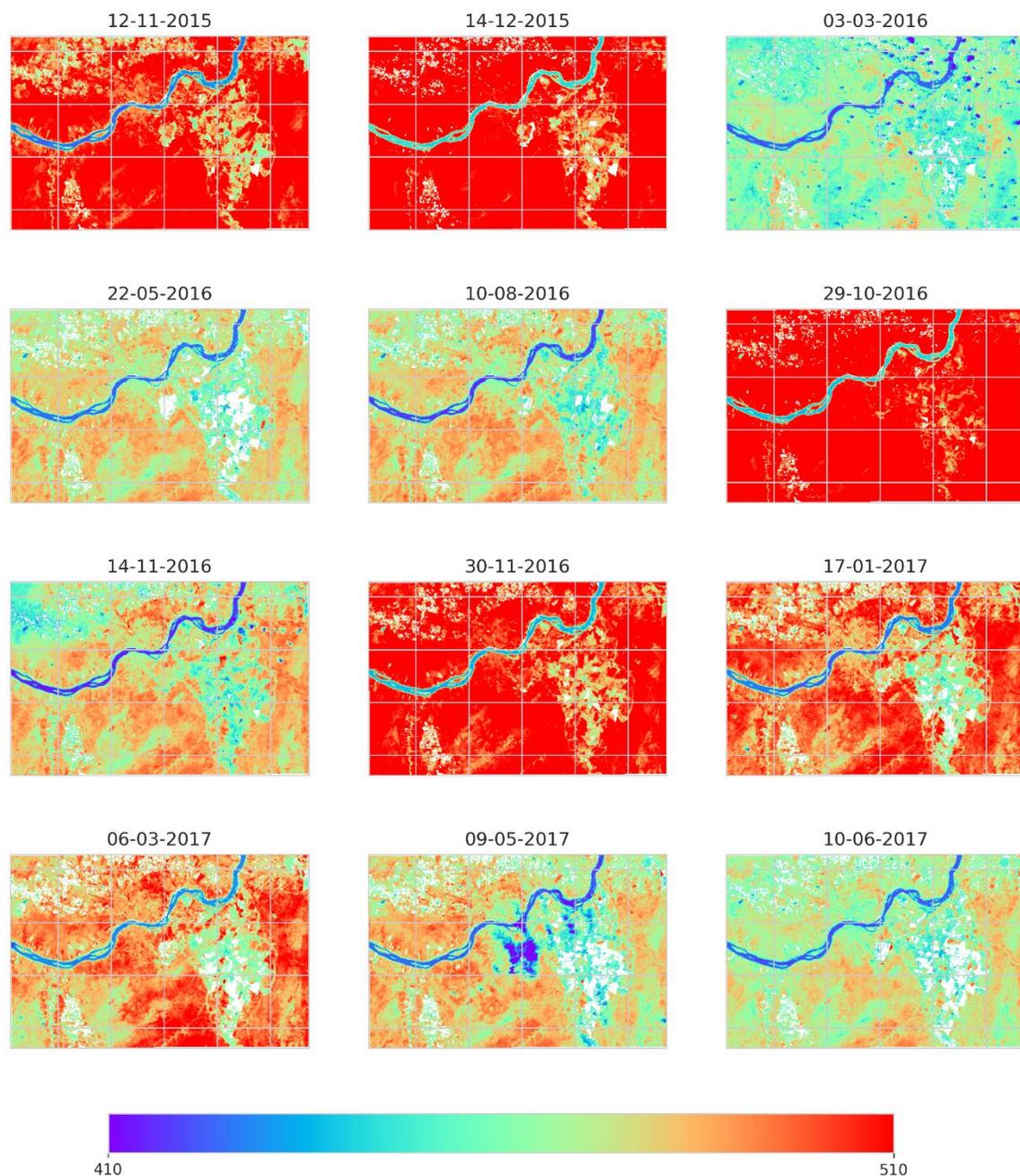
**Tabela 5** – Lista de imagens utilizadas. Fonte: Autor, 2024.

Index	ID	Date	Time	Season	Cloudiness	Earth Sun Distance
1	LC08_217067_20130903	03/09/2013	12:50:26.8611510Z	Winter	0,000929566	1,0086565
2	LC08_217067_20131005	05/10/2013	12:50:17.7453560Z	Spring	1,76E-06	0,9999552
3	LC08_217067_20140109	09/01/2014	12:49:40.8669130Z	Summer	0,000641171	0,9833916
4	LC08_217067_20140125	25/01/2014	12:49:31.7590210Z	Summer	0,017428068	0,98453
5	LC08_217067_20140602	02/06/2014	12:48:01.5930440Z	Fall	0,000580758	1,0141974
6	LC08_217067_20140805	05/08/2014	12:48:25.1869090Z	Winter	0,027673415	1,0143886
7	LC08_217067_20140922	22/09/2014	12:48:30.2340550Z	Winter	3,09E-06	1,0037433
8	LC08_217067_20150402	02/04/2015	12:47:47.4451810Z	Fall	0,026124802	0,9994704
9	LC08_217067_20150824	24/08/2015	12:48:11.1623680Z	Winter	0,000188294	1,0110377
10	LC08_217067_20150909	09/09/2015	12:48:17.3183510Z	Winter	0,005932543	1,0072894
11	LC08_217067_20150925	25/09/2015	12:48:24.3020880Z	Spring	0,017062389	1,0029028
12	LC08_217067_20151027	27/10/2015	12:48:30.3203390Z	Spring	1,85E-05	0,9938489
13	LC08_217067_20151112	12/11/2015	12:48:30.3277940Z	Spring	0,000265464	0,9898871
14	LC08_217067_20151214	14/12/2015	12:48:32.1370600Z	Spring	1,59E-05	0,9843935
15	LC08_217067_20160303	03/03/2016	12:48:17.8615870Z	Summer	0,023381478	0,9914986
16	LC08_217067_20160522	22/05/2016	12:48:01.0381800Z	Fall	0,000131409	1,0124104
17	LC08_217067_20160810	10/08/2016	12:48:26.3145640Z	Winter	0,000166246	1,013569
18	LC08_217067_20161029	29/10/2016	12:48:45.5618820Z	Spring	6,70E-05	0,9931586
19	LC08_217067_20161114	14/11/2016	12:48:44.5259490Z	Spring	0,002830148	0,9891874
20	LC08_217067_20161130	30/11/2016	12:48:44.4607020Z	Spring	8,33E-05	0,9861556
21	LC08_217067_20170117	17/01/2017	12:48:33.2944710Z	Summer	0,000709962	0,9837961
22	LC08_217067_20170306	06/03/2017	12:48:13.0773940Z	Summer	0,00089337	0,9921887
23	LC08_217067_20170509	09/05/2017	12:47:46.1293449Z	Fall	0,017388474	1,0095779
24	LC08_217067_20170610	10/06/2017	12:48:05.0183700Z	Fall	0,000360714	1,0152535
25	LC08_217067_20171016	16/10/2017	12:48:42.1692860Z	Spring	0,000394669	0,9967948
26	LC08_217067_20180715	15/07/2018	12:47:34.7507260Z	Winter	0,009413543	1,0164746
27	LC08_217067_20180816	16/08/2018	12:47:51.0439709Z	Winter	0,00012259	1,0126199
28	LC08_217067_20180917	17/09/2018	12:48:02.3292720Z	Winter	8,82E-07	1,0050909
29	LC08_217067_20181222	22/12/2018	12:48:17.1179990Z	Summer	0,015665988	0,9836353
30	LC08_217067_20190208	08/02/2019	12:48:10.0024780Z	Summer	0,005078554	0,9864334
31	LC08_217067_20190312	12/03/2019	12:48:01.1374410Z	Summer	0,000297655	0,9936155
32	LC08_217067_20190413	13/04/2019	12:47:52.9345340Z	Fall	0,003393729	1,0026407
33	LC08_217067_20190429	29/04/2019	12:47:49.1694580Z	Fall	2,98E-06	1,0070273
34	LC08_217067_20190616	16/06/2019	12:48:14.4930329Z	Fall	0,000288395	1,0158323
35	LC08_217067_20190803	03/08/2019	12:48:28.6100410Z	Winter	0,000125236	1,0147945
36	LC08_217067_20190920	20/09/2019	12:48:42.8419900Z	Winter	5,47E-05	1,0043595
37	LC08_217067_20191107	07/11/2019	12:48:46.9965900Z	Spring	2,07E-05	0,9910324
38	LC08_217067_20191123	23/11/2019	12:48:43.5463099Z	Spring	0,00021343	0,9875279
39	LC08_217067_20200517	17/05/2020	12:47:50.1038949Z	Fall	0,010299141	1,0114578
40	LC08_217067_20200704	04/07/2020	12:48:12.7742070Z	Winter	0,019268651	1,0166942
41	LC08_217067_20200821	21/08/2020	12:48:28.6612329Z	Winter	0,000210343	1,0115707
42	LC08_217067_20201008	08/10/2020	12:48:44.2561830Z	Spring	1,76E-06	0,9990139
43	LC08_217067_20210317	17/03/2021	12:48:13.9223950Z	Summer	0,02491034	0,9951219
44	LC08_217067_20210909	09/09/2021	12:48:40.5199350Z	Winter	0,000135819	1,0071819
45	LC08_217067_20220608	08/06/2022	12:48:30.4051610Z	Fall	0,000956688	1,0149884
46	LC08_217067_20220811	11/08/2022	12:48:54.8525259Z	Winter	0,0001001	1,0134826
47	LC08_217067_20221030	30/10/2022	12:49:03.0701370Z	Spring	0,029197667	0,9930917
48	LC08_217067_20230713	13/07/2023	12:48:06.7476380Z	Winter	0,000239888	1,0165812
49	LC08_217067_20230830	30/08/2023	12:48:24.4502190Z	Winter	6,88E-05	1,009734
50	LC08_217067_20230915	15/09/2023	12:48:28.0519130Z	Winter	5,20E-05	1,0057706
51	LC08_217067_20231001	01/10/2023	12:48:32.0595520Z	Spring	9,35E-05	1,0012417

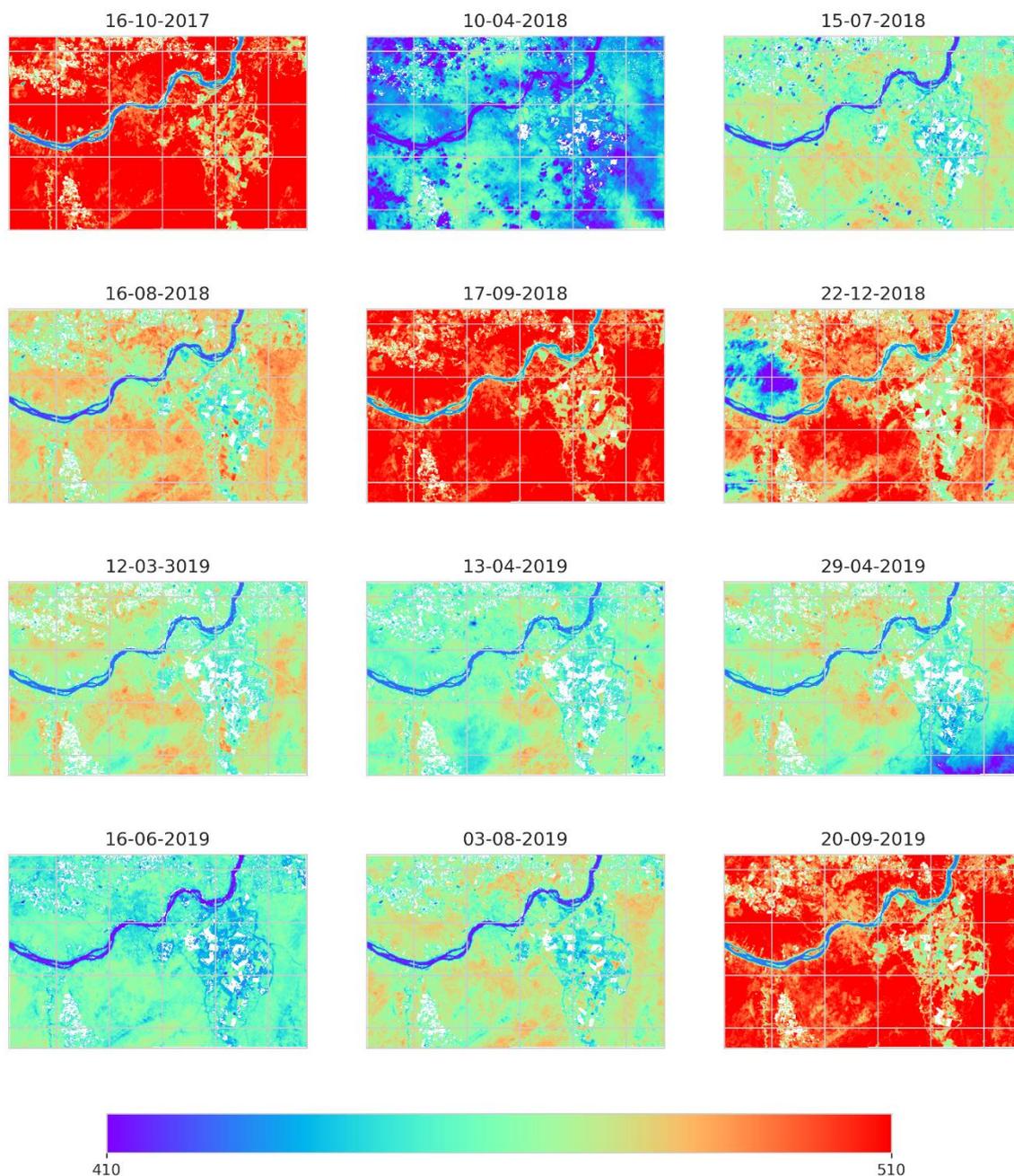
## 8. APÊNDICE B



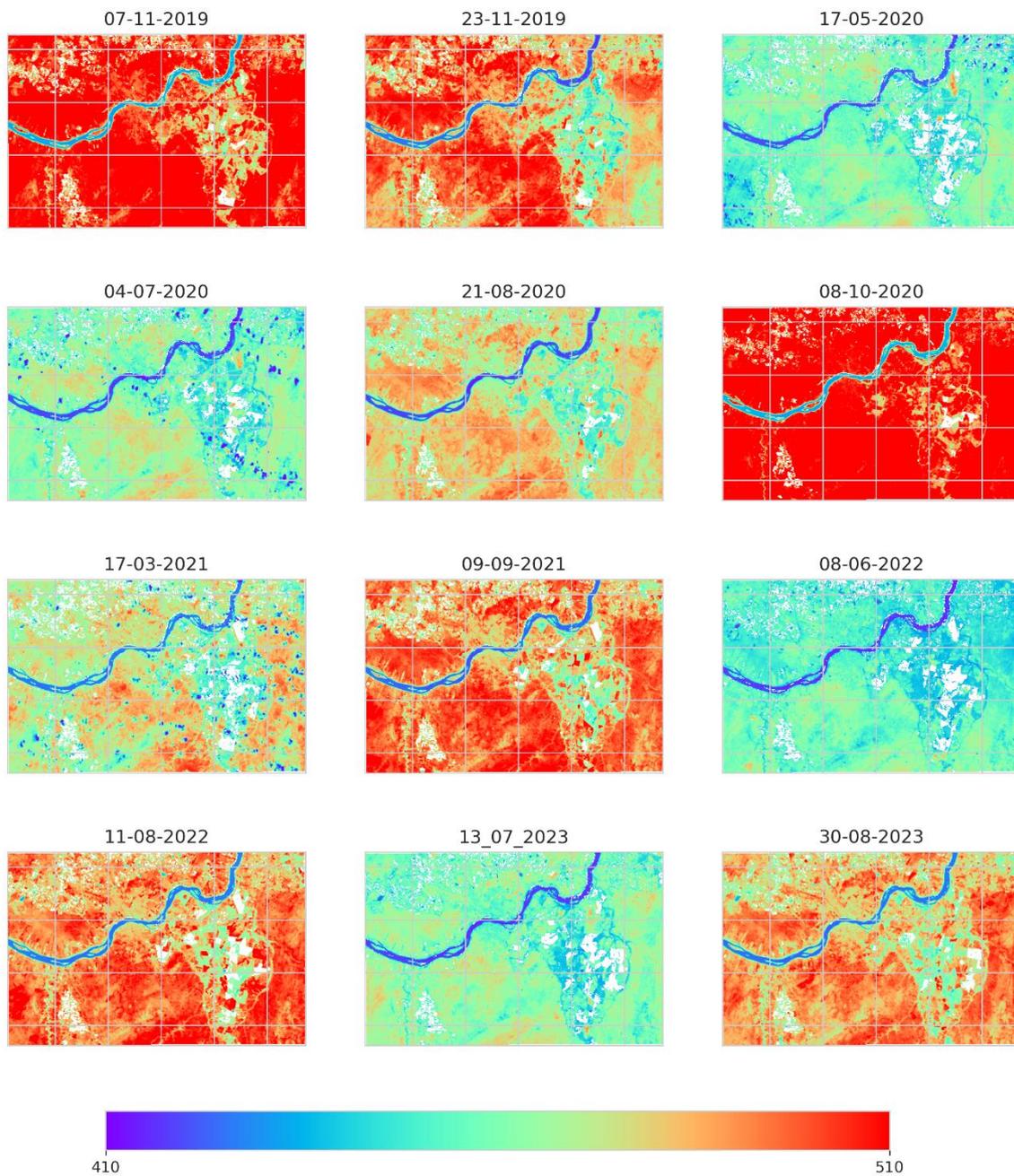
**Figura 25** – Mapas temáticos da Radiação de Onda Longa Emitida ( $R_{emi}$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 03-09-2013, 05-10-2013, 09-01-2014, 25-01-2014, 02-06-2014, 05-08-2014, 22-09-2014, 02-04-2015, 24-08-2015, 09-09-2015, 25-09-2015, 27-10-2015.



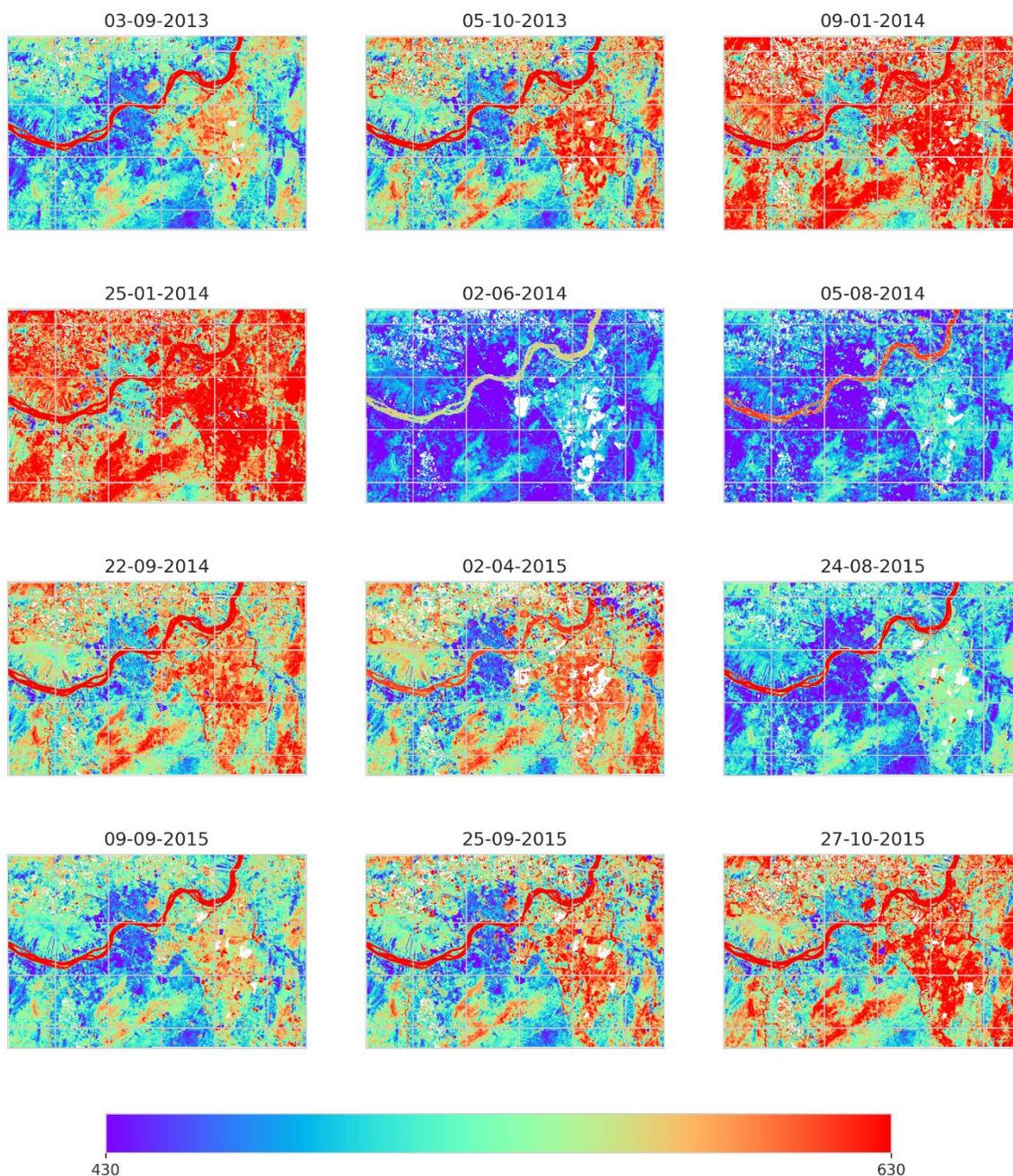
**Figura 26** – Mapas temáticos da Radiação de Onda Longa Emitida ( $R_{emi}$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 12-11-2015, 14-12-2015, 03-03-2016, 22-05-2016, 10-08-2016, 29-10-2016, 14-11-2016, 30-11-2016, 17-01-2017, 06-03-2017, 09-05-2017, 10-06-2017.



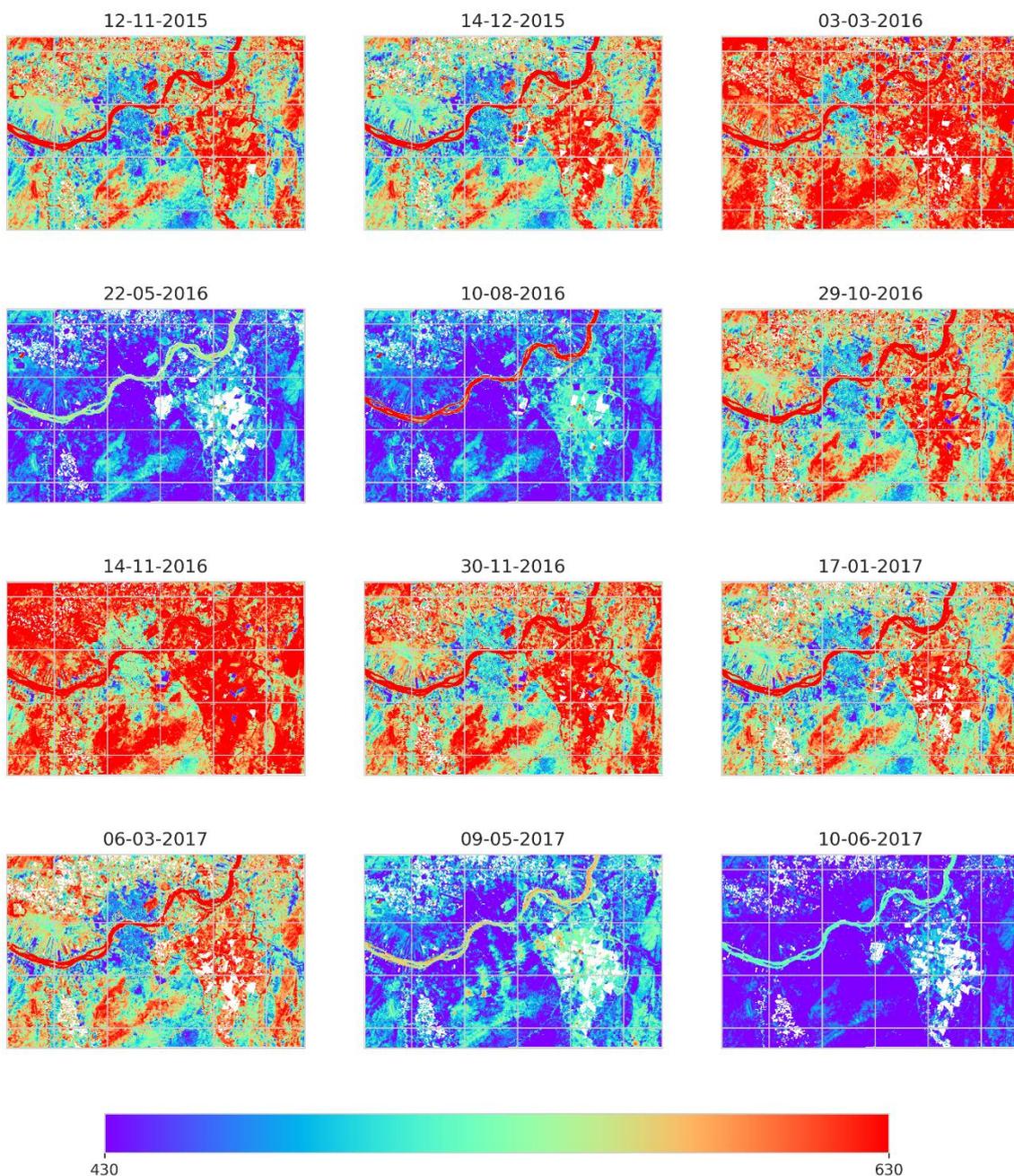
**Figura 27** – Mapas temáticos da Radiação de Onda Longa Emitida ( $R_{emi}$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 16-10-2017, 10-04-2018, 15-07-2018, 16-08-2018, 17-09-2018, 22-12-2018, 08-02-2019, 12-03-2019, 13-04-2019, 29-04-2019, 16-06-2019, 03-08-2019, 20-09-2019.



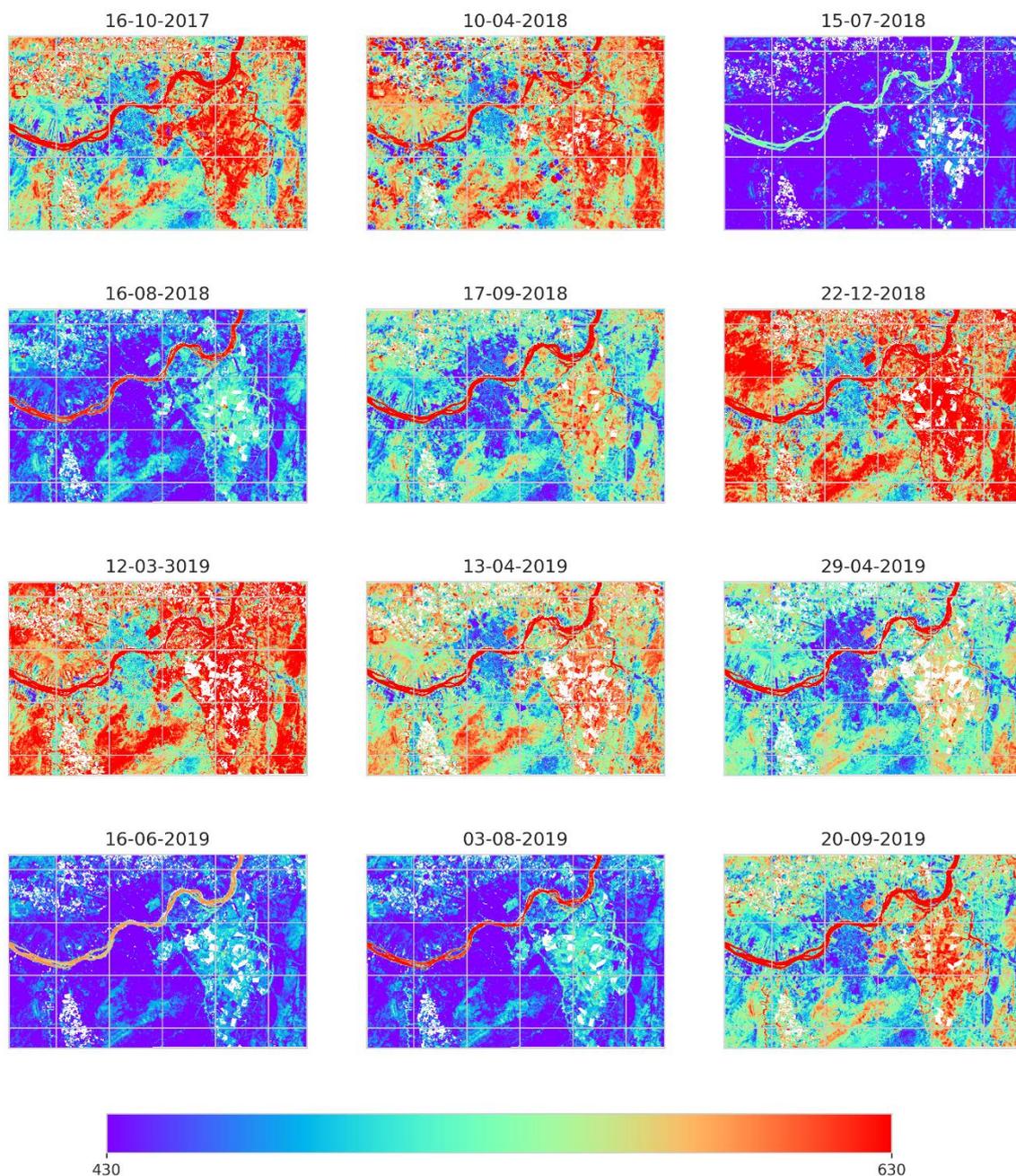
**Figura 28** – Mapas temáticos da Radiação de Onda Longa Emitida ( $R_{emi}$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 07-11-2019, 23-11-2019, 17-05-2020, 04-07-2020, 21-08-2020, 08-10-2020, 17-03-2021, 09-09-2021, 08-06-2022, 11-08-2022, 13-07-2023, 30-08-2023.



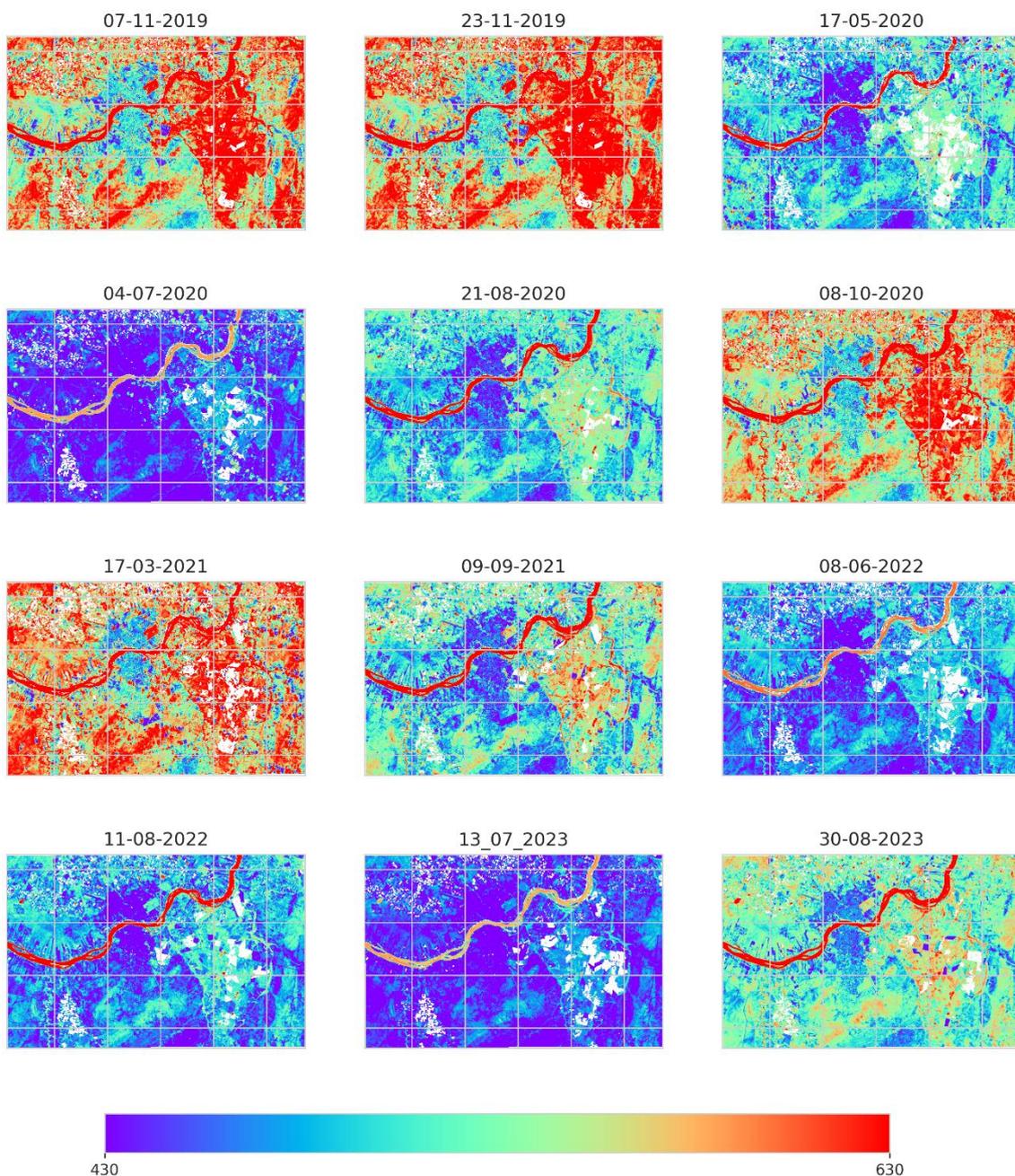
**Figura 29** – Mapas temáticos do Saldo de Radiação ( $R_n$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 03-09-2013, 05-10-2013, 09-01-2014, 25-01-2014, 02-06-2014, 05-08-2014, 22-09-2014, 02-04-2015, 24-08-2015, 09-09-2015, 25-09-2015, 27-10-2015.



**Figura 30** – Mapas temáticos do Saldo de Radiação ( $R_n$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 12-11-2015, 14-12-2015, 03-03-2016, 22-05-2016, 10-08-2016, 29-10-2016, 14-11-2016, 30-11-2016, 17-01-2017, 06-03-2017, 09-05-2017, 10-06-2017.



**Figura 31** – Mapas temáticos do Saldo de Radiação ( $R_n$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 16-10-2017, 10-04-2018, 15-07-2018, 16-08-2018, 17-09-2018, 22-12-2018, 08-02-2019, 12-03-2019, 13-04-2019, 29-04-2019, 16-06-2019, 03-08-2019, 20-09-2019.



**Figura 32** – Mapas temáticos do Saldo de Radiação ( $R_n$ ) em ordem cronológica obtidas com imagens Landsat 8 para as datas: 07-11-2019, 23-11-2019, 17-05-2020, 04-07-2020, 21-08-2020, 08-10-2020, 17-03-2021, 09-09-2021, 08-06-2022, 11-08-2022, 13-07-2023, 30-08-2023.

## 9. APÊNDICE C

**Tabela 6** – Valor médio do  $R_n$  por tipo de uso do solo. Fonte: Autor, 2024.

<b>Datas</b>	<b>AGR</b>	<b>CAA</b>	<b>PAS</b>	<b>URB</b>	<b>WAT</b>
03/09/2013	568,33	578,29	439,18	465,04	676,89
05/10/2013	601,78	606,84	449,36	480,7	743,89
09/01/2014	605,98	664,18	503,91	499,85	731,44
25/01/2014	630,85	661,09	519,33	513,32	687,93
02/06/2014	485,24	502,37	394,85	393,12	566,73
05/08/2014	496,44	518,99	408,38	408,51	612,39
22/09/2014	598,07	618,79	481,11	488,17	739,93
02/04/2015	604,25	621,61	476,24	459,9	611,46
24/08/2015	532,87	547,92	426,18	441,03	651,87
09/09/2015	565,02	582,03	452,08	469,52	699,66
25/09/2015	579,99	602,93	455,78	473,64	730,23
27/10/2015	591,7	628,22	476,05	494,82	763,45
12/11/2015	622,3	634,94	482,04	513,57	766,92
14/12/2015	615,37	607,8	469,86	486,44	727,35
03/03/2016	636,72	659,79	532,79	496,26	634,09
22/05/2016	490,94	499,16	377,73	398,94	550,3
10/08/2016	506,15	501,48	381,55	411,6	630,86
29/10/2016	535,98	618,4	471,6	496,43	774,78
14/11/2016	592,19	664,05	516,58	538,73	790,17
30/11/2016	578,42	627,82	490,73	506,98	755,11
17/01/2017	597,88	605,2	472,9	494,28	684,79
06/03/2017	607,68	610,9	451,98	473,75	649,44
09/05/2017	519,52	520,14	388,97	413,86	570,24
10/06/2017	468,61	463,3	343,91	373,67	520,39
16/10/2017	606,94	604,04	457,1	489,32	724,01
15/07/2018	413,5	449,08	350,76	367,44	535,83
16/08/2018	526,35	502,97	384,12	416,48	624,62
17/09/2018	578,69	565,26	428,11	463,27	729,17
22/12/2018	651,3	646,07	495,25	490,2	797,07
08/02/2019	639,04	639,42	512,78	505,81	731,36
12/03/2019	638,93	647,23	497,48	503,43	744,41
13/04/2019	593,33	596,49	476,25	465,74	706,37
29/04/2019	565,95	579,93	453,78	441,49	691,93
16/06/2019	478,63	474,68	364,67	387	589,25
03/08/2019	498,27	485,4	374,16	402,43	628,33
20/09/2019	594,59	564,53	441,57	472,27	740,31
07/11/2019	626,36	641,46	480,49	504,56	803,83
23/11/2019	645,6	658,16	489,15	516,52	814,6
17/05/2020	536,75	526,88	414,61	417,19	634,63
04/07/2020	463,61	465,76	360,42	377,68	585,54

21/08/2020	542,61	534,13	426,26	446,42	671,71
08/10/2020	627,42	606,71	472,19	499,55	804,16
17/03/2021	626,18	633,25	488,61	489,1	756,22
09/09/2021	566,32	557	423,07	460,08	725,79
08/06/2022	491,19	493,82	392,22	392,23	592,88
11/08/2022	505,34	505,24	397,32	412,99	650,01
30/10/2022	558,01	655,07	533,66	510,88	792,37
13/07/2023	478,35	477,82	384,42	382,86	577,15
30/08/2023	562,74	557,64	463,83	470,22	689,85
15/09/2023	567,4	589,72	482,57	489,42	734,47
01/10/2023	546,78	597,62	475,45	483,57	758,66

**Tabela 7** – Valor médio do  $R_{emi}$  por tipo de uso do solo. Fonte: Autor, 2024.

<b>Datas</b>	<b>AGR</b>	<b>CAA</b>	<b>PAS</b>	<b>URB</b>	<b>WAT</b>
03/09/2013	444,55	466,95	487,58	465,76	430,48
05/10/2013	487,01	516,84	538,87	511,11	452,10
09/01/2014	470,94	462,61	487,94	476,61	439,37
25/01/2014	443,23	439,08	466,96	460,33	430,68
02/06/2014	447,71	453,44	465,42	455,89	436,10
05/08/2014	446,64	451,40	459,76	453,29	429,99
22/09/2014	480,63	504,38	526,42	499,95	447,00
02/04/2015	450,85	461,92	494,79	479,71	444,07
24/08/2015	449,46	470,16	485,56	464,61	430,44
09/09/2015	459,38	480,69	500,85	481,12	439,95
25/09/2015	480,66	499,15	527,90	498,71	445,65
27/10/2015	497,14	515,67	540,79	506,34	450,89
12/11/2015	489,30	505,25	535,58	494,97	443,23
14/12/2015	487,72	515,02	534,97	511,64	459,90
03/03/2016	448,77	450,83	475,33	467,71	440,51
22/05/2016	453,21	468,53	486,35	469,76	441,75
10/08/2016	450,82	469,50	487,08	466,96	434,01
29/10/2016	522,83	524,29	541,21	519,31	458,35
14/11/2016	470,27	473,63	487,06	474,18	431,70
30/11/2016	494,84	505,78	517,66	501,34	451,72
17/01/2017	470,23	488,69	506,58	482,95	441,50
06/03/2017	468,85	482,51	506,79	486,53	445,16
09/05/2017	455,23	467,40	484,02	469,51	438,38
10/06/2017	456,34	464,35	483,54	461,97	437,32
16/10/2017	498,83	509,76	525,21	498,30	443,14
15/07/2018	450,94	463,61	469,18	455,18	432,83
16/08/2018	463,43	473,37	482,87	465,42	435,10
17/09/2018	490,43	503,26	518,74	495,17	448,52
22/12/2018	466,14	479,32	502,30	490,86	446,98

08/02/2019	438,30	451,60	471,95	439,83	429,05
12/03/2019	446,19	459,76	477,70	467,41	439,58
13/04/2019	444,39	460,87	474,72	460,36	441,07
29/04/2019	445,38	430,83	450,65	466,37	440,47
16/06/2019	433,39	446,99	461,43	445,01	427,94
03/08/2019	448,86	463,86	474,68	456,15	431,16
20/09/2019	475,19	503,32	513,50	484,48	442,93
07/11/2019	494,84	498,64	525,67	498,95	449,74
23/11/2019	471,44	463,88	507,63	485,72	440,00
17/05/2020	442,43	457,27	470,47	455,74	437,83
04/07/2020	443,98	456,27	475,55	454,49	435,14
21/08/2020	453,71	471,38	486,71	467,84	432,91
08/10/2020	492,54	515,78	539,75	508,35	451,53
17/03/2021	449,10	460,16	488,95	474,49	443,99
09/09/2021	464,20	486,05	503,56	478,32	439,80
08/06/2022	438,00	450,78	465,70	451,62	433,00
11/08/2022	466,40	491,50	506,78	478,75	441,54
30/10/2022	484,87	490,70	485,56	481,67	441,29
13/07/2023	438,73	452,76	470,08	453,33	433,64
30/08/2023	463,72	484,49	495,45	476,75	441,16
15/09/2023	475,42	493,53	509,28	486,45	444,94
01/10/2023	491,76	512,28	526,61	502,38	448,90

**Tabela 8** – Valor médio do  $T_{sup}$  por tipo de uso do solo. Fonte: Autor, 2024.

<b>Datas</b>	<b>AGR</b>	<b>CAA</b>	<b>PAS</b>	<b>URB</b>	<b>WAT</b>
03/09/2013	26,72	31,83	35,19	31,70	23,15
05/10/2013	33,89	39,66	43,01	38,87	26,81
09/01/2014	31,83	30,66	35,14	33,40	24,67
25/01/2014	27,07	26,87	31,78	30,74	23,19
02/06/2014	27,08	29,34	31,43	30,00	24,11
05/08/2014	27,17	29,23	30,65	29,60	23,07
22/09/2014	32,83	37,80	41,15	37,14	25,97
02/04/2015	27,80	30,54	36,24	33,91	25,46
24/08/2015	27,59	32,37	34,88	31,51	23,19
09/09/2015	29,48	34,07	37,27	34,18	24,82
25/09/2015	33,24	36,98	41,38	36,95	25,73
27/10/2015	36,26	39,51	43,29	38,12	26,60
12/11/2015	35,05	37,92	42,52	36,37	25,32
14/12/2015	34,41	39,39	42,43	38,93	28,09
03/03/2016	27,69	28,31	32,93	31,95	24,86
22/05/2016	27,90	31,84	34,90	32,31	25,09
10/08/2016	27,88	32,21	35,07	31,88	23,87
29/10/2016	40,29	40,81	43,33	40,10	27,88

14/11/2016	32,06	32,92	35,10	33,07	23,38
30/11/2016	35,81	37,99	39,80	37,36	26,81
17/01/2017	31,45	35,32	38,12	34,47	25,03
06/03/2017	30,97	34,00	38,16	35,00	25,65
09/05/2017	28,33	31,61	34,59	32,30	24,57
10/06/2017	28,68	31,21	34,54	31,06	24,43
16/10/2017	36,72	38,63	41,00	36,90	25,36
15/07/2018	28,27	31,32	32,26	29,95	23,65
16/08/2018	30,93	32,92	34,46	31,64	24,08
17/09/2018	35,29	37,65	40,02	36,40	26,27
22/12/2018	30,37	33,32	37,43	35,69	26,07
08/02/2019	25,32	29,02	32,65	27,34	22,93
12/03/2019	26,62	30,12	33,53	31,89	24,83
13/04/2019	26,38	30,41	33,01	30,74	25,08
29/04/2019	26,49	25,51	29,08	31,74	24,97
16/06/2019	24,57	28,46	30,95	28,22	22,77
03/08/2019	27,67	31,36	33,14	30,11	23,35
20/09/2019	32,23	37,65	39,23	34,72	25,30
07/11/2019	35,97	36,68	41,06	36,99	26,46
23/11/2019	32,31	31,22	38,33	34,92	24,79
17/05/2020	25,97	29,97	32,33	29,97	24,42
04/07/2020	26,37	29,93	33,26	29,80	23,97
21/08/2020	28,37	32,59	35,07	32,03	23,67
08/10/2020	34,79	39,55	43,14	38,43	26,71
17/03/2021	27,15	30,54	35,27	33,05	25,45
09/09/2021	30,23	34,90	37,69	33,73	24,74
08/06/2022	25,28	28,88	31,56	29,30	23,58
11/08/2022	30,24	35,78	38,18	33,78	25,04
30/10/2022	34,49	35,61	34,83	34,25	24,99
13/07/2023	25,41	29,42	32,37	29,61	23,72
30/08/2023	29,88	34,66	36,41	33,46	24,97
15/09/2023	32,04	36,08	38,56	35,01	25,61
01/10/2023	34,82	38,98	41,19	37,51	26,27

---