



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM FITOTECNIA**

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ALTERAÇÕES BIOFÍSICAS NA CULTURA DO**  
**CAFÉ**

**INGRID THALIA PRADO DE CASTRO**

**VITÓRIA DA CONQUISTA – BA**  
**BAHIA – BRASIL**  
**2026**

**INGRID THALIA PRADO DE CASTRO**

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ALTERAÇÕES BIOFÍSICAS NA CULTURA DO  
CAFÉ**

Tese apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Fitotecnia, para a obtenção do título de “Doutora”.

Orientador(a): Dr. ODAIR LACERDA LEMOS  
Coordenador(a): Dr. CRISTIANO TAGLIAFERRE

**VITÓRIA DA CONQUISTA – BA  
BAHIA – BRASIL**

C352m

Castro, Ingrid Thalia Prado de.

Mudanças climáticas e alterações biofísicas na cultura do café / Ingrid Thalia Prado de Castro, 2026.

75f.; il. color.

Orientador (a): Dr. Odair Lacerda Lemos.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de concentração em Fitotecnia. Vitória da Conquista, 2026.

Inclui referências.

1. Cafeicultura. 2. Sensoriamento remoto. 3. Variabilidade climática. 4. Índices espectrais. I. Lemos, Odair Lacerda. II. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. T.

CDD 633.73

*Catálogo na fonte: Karolyne Alcântara Profeta – CRB 5/2134*

UESB - Campus Vitória da Conquista – BA



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA  
Área de Concentração em Fitotecnia**

**Campus de Vitória da Conquista, BA**

**DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: “MUDANÇAS CLIMÁTICAS E ALTERAÇÕES BIOFÍSICAS NA CULTURA DO CAFÉ”.**

**AUTOR (A): Ingrid Thalia Prado de Castro**

**Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTORA EM AGRONOMIA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM FITOTECNIA, pela seguinte Banca Examinadora:**

Odair Lacerda Lemos, D.Sc. (UESB)

Cristiano Tagliaferre, D.Sc. (UESB)

Lorena Lima Ferraz, D.Sc. (UESB)

Rayka Kristian Alves Santos, D.Sc. (UESB)

Alessandro de Paula, D.Sc. (UESB)

Data de realização: 26 de janeiro de 2026.

Estrada do Bem Querer, Km 4, CEP 45031-900, Caixa Postal 95, Vitória da Conquista, Bahia,  
Brasil Telefone: (77) 3425-9383, e- mail: [ppgagronomia@uesb.edu.br](mailto:ppgagronomia@uesb.edu.br)

A Deus, minha família e amigos, pelo apoio e incentivo,

**DEDICO.**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me sustentar em todos os momentos, por me conceder força, sabedoria e perseverança para concluir mais esta etapa da minha vida.

À minha mãe Cleiva, pelo amor incondicional, pelo apoio constante, pelo carinho, pelos conselhos e por sempre me fortalecer com palavras de positividade, mesmo nos dias mais difíceis. Te amo!

Ao meu pai Wendell (*in memoriam*), homem íntegro, que desde pequena me incentivou a estudar e a acreditar no poder transformador do conhecimento. Seu exemplo e seus ensinamentos permanecem vivos em mim. Te amo!

Aos meus avós Alzinete, João, Noélia e Daniel (*in memoriam*), que sempre me auxiliaram dentro de suas possibilidades, oferecendo apoio, cuidado e incentivo ao longo da minha trajetória. Aos meus tios e demais familiares, pelo suporte e por sempre acreditarem em mim.

Ao professor Odair Lacerda Lemos, meu orientador, pelos anos de parceria que foram determinantes para a construção da minha carreira acadêmica. Agradeço pela confiança, pela atenção, pelos conselhos, pela amizade construída ao longo do tempo e pelos valiosos conhecimentos transmitidos. Sua orientação foi fundamental para o meu crescimento profissional e pessoal.

À equipe do Laboratório de Geotecnologias Aplicadas (LGEOTECH), por disponibilizar o espaço físico e as condições necessárias para a realização das avaliações e desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus colegas do LGEOTECH, em especial, às minhas amigas do coração: Crislaine, Bárbara e Jacqueline, por serem minhas ouvintes, conselheiras e companheiras de jornada. Ao Igor, Lucas e André, pela amizade, pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho e pelos momentos de descontração que tornaram o ambiente de trabalho mais leve.

Aos meus amigos que estão fora do ambiente acadêmico, mas sempre presentes na minha vida: Tainara, Emerson, Carol e, de maneira muito especial, Juliana que, além da amizade verdadeira, esteve ao meu lado em todos os momentos desta caminhada, contribuindo nos trabalhos, me incentivando e me fortalecendo nos períodos mais desafiadores. Minha eterna gratidão e carinho.

À Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela estrutura e suporte oferecidos para a condução dos experimentos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), pela concessão da bolsa de estudos, fundamental para a realização desta pesquisa.

Aos professores Cristiano Taliaferre, Rayka Kristian, Alessandro de Paula e Lorena Lima, por aceitarem prontamente o convite para compor a banca examinadora, contribuindo com valiosas considerações para o aprimoramento deste trabalho. Que Deus abençoe grandemente cada um de vocês.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização desta conquista e para o encerramento de mais um ciclo tão importante da minha vida, o meu sincero agradecimento.

## RESUMO

CASTRO, I. T. P. de. Mudanças climáticas e suas influências na produção cafeeira no município de Barra do Choça-BA. 2020, 75p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Área de concentração em Fitotecnia\*

A cafeicultura desempenha papel importante na agricultura brasileira. No Planalto da Conquista, a produção cafeeira está condicionada às variáveis climáticas, como precipitação, temperatura e disponibilidade hídrica, tornando o sistema produtivo particularmente sensível às mudanças climáticas de efeito local. Diante do exposto, o objetivo geral desta tese foi avaliar as alterações biofísicas dos cafeeiros no município de Barra do Choça (BA), em resposta às mudanças climáticas de efeito local, por meio da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto espectral. Inicialmente, foi realizada a análise da série histórica do padrão de precipitação anual no município de Barra do Choça, utilizando dados de sensoriamento remoto e de estação meteorológica, no período de 1990 a 2019, com o objetivo de identificar e compreender as mudanças nos regimes pluviométricos ao longo do tempo. Essa etapa permitiu caracterizar a variabilidade temporal das chuvas e fornecer subsídios para a compreensão dos impactos climáticos sobre os sistemas agrícolas locais. Em seguida, avaliou-se o potencial de índices espectrais derivados dos sensores Landsat-8/9 e Sentinel-2A na estimativa da evapotranspiração, da precipitação e do déficit hídrico em áreas cafeeiras do município, por meio de redes neurais artificiais do tipo *Multilayer Perceptron* (MLP). As análises foram segmentadas em três períodos sazonais: completo, seco e chuvoso, abrangendo o intervalo de 2019 a 2023. Para cada combinação de sensor, variável e período, foram desenvolvidos modelos neurais específicos, avaliados a partir de métricas estatísticas robustas, como RMSE, MAE, eficiência de Nash-Sutcliffe e coeficiente de concordância de Willmott. Os resultados evidenciaram que a importância relativa dos índices espectrais varia de acordo com a sazonalidade climática e o sensor utilizado, destacando maior sensibilidade aos processos de estresse hídrico, durante o período seco, e maior associação com o vigor vegetativo no período chuvoso. De modo geral, as redes neurais demonstraram elevada capacidade de representar a variabilidade espaço-temporal das variáveis agroclimáticas, reforçando o potencial do sensoriamento remoto espectral como ferramenta para a análise dos impactos climáticos sobre sistemas cafeeiros. Dessa forma, a tese integra análises pluviométricas históricas e modelagens agroclimáticas baseadas em dados orbitais, contribuindo para a compreensão dos efeitos das mudanças climáticas de escala local sobre a cafeicultura do município de Barra do Choça.

**Palavras-chave:** Sensoriamento remoto; variabilidade climática; índices espectrais.

\* Orientador: Prof. Odair Lacerda Lemos, D. Sc, UESB

## ABSTRACT

CASTRO, I. T. P. de. Climate change and its influence on coffee production in the municipality of Barra do Choça-BA. 2020, 75p. Doctoral thesis (PhD in Agronomy) – Area of concentration in Phytotechnics\*

Coffee cultivation plays an important role in Brazilian agriculture. In the Planalto da Conquista region, coffee production is conditioned by climatic variables such as precipitation, temperature, and water availability, making the production system particularly sensitive to local climate change. Given this, the general objective of this thesis was to evaluate the biophysical changes in coffee plants in the municipality of Barra do Choça (BA) in response to local climate change, through the application of spectral remote sensing techniques. Initially, an analysis of the historical series of annual precipitation patterns in the municipality of Barra do Choça was carried out, using remote sensing and meteorological station data from 1990 to 2019, with the aim of identifying and understanding changes in rainfall regimes over time. This step allowed for the characterization of the temporal variability of rainfall and provided support for understanding the climatic impacts on local agricultural systems. Next, the potential of spectral indices derived from Landsat-8/9 and Sentinel-2A sensors in estimating evapotranspiration, precipitation, and water deficit in coffee-growing areas of the municipality was evaluated using Multilayer Perceptron (MLP) artificial neural networks. The analyses were segmented into three seasonal periods: complete, dry, and rainy, covering the period from 2019 to 2023. For each combination of sensor, variable, and period, specific neural models were developed and evaluated using robust statistical metrics such as RMSE, MAE, Nash-Sutcliffe efficiency, and Willmott's coefficient of agreement. The results showed that the relative importance of the spectral indices varies according to climatic seasonality and the sensor used, highlighting greater sensitivity to water stress processes during the dry period and a greater association with vegetative vigor during the rainy period. In general, neural networks have demonstrated a high capacity to represent the spatiotemporal variability of agroclimatic variables, reinforcing the potential of spectral remote sensing as a tool for analyzing the climatic impacts on coffee systems. Therefore, this thesis integrates historical rainfall analyses and agroclimatic models based on orbital data, contributing to the understanding of the effects of local-scale climate change on coffee farming in the municipality of Barra do Choça.

**Keywords:** Remote sensing; climate variability; spectral indices.

\* Orientador: Prof. Odair Lacerda Lemos, D. Sc, UESB

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1** - Relationship between SPI and precipitation: (A) based on CHIRPS satellite data and (B) bases on NASA POWER satellite.....39
- Figura 2.1** - Mapa de localização da área de estudo, destacando as fazendas selecionadas no município de Barra do Choça, situado na região do Planalto da Conquista, estado da Bahia, Brasil.....67
- Figura 2.2** - Matriz de correlação de Pearson entre as estimativas anuais de precipitação obtidas a partir dos dados do TerraClimate (PC) e da estação meteorológica (PE), no período de 2014 a 2023.....71
- Figura 2.3** - Matriz de correlação de Pearson entre as estimativas anuais de evapotranspiração obtidas a partir dos dados do TerraClimate (TC) e do método empírico de Thornthwaite (TT), no período de 2014 a 2023.....71

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** - Average monthly precipitation  $\pm$  standard deviation ( $\text{mm month}^{-1}$ ), standard error of estimate (SEM,  $\text{mm month}^{-1}$ ), linear coefficient (a), angular coefficient (b), coefficient of determination ( $R^2$ ), correlation coefficient (r), Willmott's coefficient of agreement (d), coefficient of confidence and performance (c) and ranking of model performance for the Chirps and Nasa Power satellites in the municipality of Vitória da Conquista, BA.....37
- Tabela 2** - Kendall's correlation coefficients and p-values for different decades of analysis over the months of the year.....38
- Tabela 3** - Years when El Niño and La Niña occurred in Brazil.....38
- Tabela 4** - Importância relativa (%) dos índices espectrais na modelagem de variáveis climáticas: Evapotranspiração, Precipitação e Déficit Hídrico, por meio de redes neurais artificiais, utilizando imagens do satélite Sentinel-2A, segmentadas por períodos: completo (CTO), seco e chuvoso, para áreas cafeeiras em Barra do Choça (BA), no intervalo de 2019 a 2023.....68
- Tabela 5** - Importância relativa (%) dos índices espectrais na modelagem de variáveis climáticas: Evapotranspiração, Precipitação e Déficit Hídrico, por meio de redes neurais artificiais, utilizando imagens do satélite Landsat, segmentadas por períodos: completo (CTO), seco e chuvoso, para áreas cafeeiras em Barra do Choça (BA), no intervalo de 2019 a 2023.....69
- Tabela 6** - Importância relativa (%) dos índices espectrais na modelagem de variáveis climáticas: Evapotranspiração, Precipitação e Déficit Hídrico, por meio de redes neurais artificiais utilizando imagens do satélite Landsat, segmentadas por períodos: completo (CTO), seco e chuvoso, para áreas cafeeiras em Barra do Choça (BA), no intervalo de 2019 a 2023.....69

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>13</b>
<b>2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>16</b>
<b>3 ARTIGO I.....</b>	<b>17</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 INTRODUCTION .....</b>	<b>19</b>
<b>3.2 MATERIALS AND METHODS.....</b>	<b>21</b>
<b>3.3.1 Study area.....</b>	<b>21</b>
<b>3.3.2 Datasets ground-based rainfall observations.....</b>	<b>21</b>
<b>3.3.3 Satellite-based rainfall estimates.....</b>	<b>22</b>
<b>3.3.4 Evaluation of satellite rainfall performance.....</b>	<b>22</b>
<b>3.3.5 Trend analysis.....</b>	<b>23</b>
<b>3.3.6 Standardized Precipitation Index (SPI).....</b>	<b>23</b>
<b>3.3.7 Temporal alignment and integration of data sources.....</b>	<b>23</b>
<b>3.3.8 Software and computational procedures.....</b>	<b>24</b>
<b>3.3 RESULTS .....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.1. Satellite performance and correlation with ground observations .....</b>	<b>24</b>
<b>3.3.2. Rainfall trends based on the Mann–Kendall test.....</b>	<b>25</b>
<b>3.3.3. SPI variability and ENSO influence.....</b>	<b>25</b>
<b>3.4 DISCUSSION.....</b>	<b>26</b>
<b>3.5 ACKNOWLEDGMENTS .....</b>	<b>31</b>
<b>3.5 REFERENCES .....</b>	<b>33</b>
<b>4 ARTIGO II .....</b>	<b>40</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>41</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>42</b>
<b>4.1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>43</b>
<b>4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>45</b>
<b>4.2.1 Delimitação da área de estudo e obtenção dos dados espectrais e climáticos ...</b>	<b>45</b>
<b>4.2.2 Obtenção dos dados satelitais.....</b>	<b>46</b>
<b>4.2.3 Modelagem por Redes Neurais Artificiais .....</b>	<b>47</b>
<b>4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>49</b>

<b>4.3.1 Importância relativa dos índices espectrais na modelagem da evapotranspiração, precipitação e déficit hídrico em áreas cafeeiras .....</b>	<b>49</b>
<b>4.3.2 Análise das métricas estatísticas de desempenho das redes neurais artificiais na estimativa de variáveis climáticas .....</b>	<b>57</b>
<b>4.3.3 Correlação entre as estimativas de precipitação e evapotranspiração do TerraClimate .....</b>	<b>61</b>
<b>4.4 CONCLUSÕES.....</b>	<b>63</b>
<b>4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>65</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>72</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A cafeicultura configura-se como uma das cadeias produtivas agrícolas de maior expressão no Brasil, exercendo papel fundamental na economia nacional e na organização do espaço rural em diferentes polos produtores. Na Bahia, as condições edafoclimáticas associadas à altitude, predominantemente superior a 700 metros, possibilitaram a consolidação histórica dos cafezais, contribuindo para a geração de renda, emprego e desenvolvimento regional. Nessa região, o Planalto da Conquista destaca-se pela produção de café arábica, especialmente no município de Barra do Choça, reconhecido como um dos principais produtores do estado (Matiello, 2016; Dutra Neto, 2004).

Entretanto, nas últimas décadas, os sistemas agrícolas têm sido crescentemente impactados por alterações nos padrões climáticos globais e regionais. As mudanças climáticas vêm modificando o comportamento de variáveis meteorológicas, fundamentais para a produção agrícola, como temperatura do ar, precipitação e radiação solar, resultando em cenários de maior instabilidade e incerteza para culturas sensíveis, como o café (Assad et al., 2024). A cultura do café arábica é reconhecida por sua elevada sensibilidade às faixas térmicas e à disponibilidade de água no solo. Modificações consistentes nesses elementos podem afetar diretamente processos fisiológicos, como fotossíntese, transpiração, crescimento vegetativo e enchimento dos frutos, com reflexos negativos sobre a produtividade e a qualidade da bebida.

Entre as variáveis climáticas que mais afetam a dinâmica produtiva do cafeeiro, a evapotranspiração e a precipitação assumem papéis importantes no planejamento agrícola, especialmente em sistemas produtivos de sequeiro, como grande parte das áreas cafeeiras da Bahia. O conhecimento preciso desses elementos é indispensável para compreender o balanço hídrico e o nível de estresse a que as plantas estão submetidas. Tradicionalmente, tais informações são obtidas por meio de estações meteorológicas, as quais fornecem medições confiáveis, porém pontuais, com limitada representatividade espacial. Nesse cenário, o uso de dados provenientes de satélites e de produtos climáticos de reanálise surge como alternativa estratégica para complementar lacunas de monitoramento, ampliar a cobertura espacial das informações e permitir uma análise mais integrada dos processos agroclimáticos.

Paralelamente, o sensoriamento remoto tem se consolidado como ferramenta

essencial para o monitoramento agroambiental, possibilitando a avaliação contínua de informações biofísicas da vegetação, por meio de índices espectrais derivados de sensores orbitais (Zhang et al., 2016; Ghaderi et al., 2020; Duarte et al., 2024). Esses índices refletem propriedades relacionadas ao vigor vegetativo, à estrutura do dossel, ao conteúdo hídrico foliar e à atividade fotossintética, constituindo proxies indiretos dos processos que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera (Muraoka et al., 2013). Quando associados a métodos de aprendizado de máquina, como as redes neurais artificiais, tais indicadores tornam-se particularmente úteis na modelagem de relações não lineares e complexas, contribuindo para a compreensão dos impactos das variações climáticas em escala local e regional (Ajjur Al-Ghamdi, 2021; Dimitriadou e Nikolakopoulos, 2022; Nery et al., 2025). Dessa forma, abordagens integradas entre dados climáticos e espectrais oferecem maior detalhamento espacial e temporal, favorecendo o desenvolvimento de estudos voltados à análise da sustentabilidade e da produtividade da cafeicultura diante das mudanças climáticas (Gardner e Dorling, 1998; Molin et al., 2017).

O primeiro artigo desenvolvido nesta tese teve como objetivo analisar o comportamento histórico da precipitação em sistemas cafeeiros. Partindo da reconhecida dificuldade de obtenção contínua e espacialmente representativa de dados pluviométricos, buscou-se avaliar a série histórica do padrão de chuvas por meio da integração entre informações de satélite e de estação meteorológica. Sendo assim, estabeleceu-se como propósito central analisar a série histórica do padrão de precipitação anual, utilizando dados satelitais e registros da estação meteorológica no período de 1990 a 2019, com ênfase em identificar e compreender as mudanças nos padrões das chuvas ao longo desse intervalo de tempo. Para alcançar esse objetivo, foram empregadas rotinas de processamento no *Google Earth Engine*, permitindo caracterizar tendências temporais e avaliar a coerência entre diferentes fontes de dados climáticos observados.

No segundo artigo, o enfoque voltou-se à aplicação de técnicas avançadas de modelagem para a estimativa de variáveis agroclimáticas. Diante disso, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de índices espectrais derivados dos sensores Landsat-8/9 e Sentinel-2A, na estimativa da evapotranspiração, da precipitação e do déficit hídrico em áreas cafeeiras do município de Barra do Choça (BA), por meio de redes neurais artificiais, considerando os períodos seco, chuvoso e completo. Nessa etapa, foram extraídos índices

espectrais das imagens orbitais e utilizados como vetores de entrada em arquiteturas de redes neurais do tipo *Multilayer Perceptron* no *software* SPSS. Os modelos gerados foram avaliados por métricas estatísticas robustas e comparados entre sensores e períodos sazonais, permitindo identificar quais índices e quais conjuntos de dados apresentam maior eficiência preditiva.

Assim, os dois artigos que compõem esta tese integram-se de forma complementar: o primeiro voltado à análise e validação das séries históricas de precipitação, e o segundo dedicado à modelagem indireta de evapotranspiração e componentes do balanço hídrico por meio de dados espectrais. Conjuntamente, esses estudos fornecem uma base metodológica consistente para a compreensão da dinâmica climática dos cafezais do Planalto da Conquista, contribuindo para o monitoramento da cultura, frente às variações ambientais e às mudanças climáticas em curso.

## 2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AJJUR, S.B.; AL-GHAMDI, S.G. Evapotranspiration and water availability response to climate change in the Middle East and North Africa. *Climatic Change*, v. 166, n. 3-4, 28, 2021. Doi:

ASSAD, E. D.; ASSAD, M. L. R. C. L. Mudanças do clima e agropecuária: impactos, mitigação e adaptação. Desafios e oportunidades. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 38, n. 112, set./dez. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202438112.015>.

GHADERI, A.; DASINEH, M.; SHOKRI, M.; ABRAHAM, J. Estimation of actual evapotranspiration using the remote sensing method and SEBAL algorithm: a case study in Ein Khosh Plain, Iran. *Hydrology*, v. 7, n. 2, 36, 2020. doi: 10.3390/hydrology7020036

DIMITRIADOU, S.; NIKOLAKOPOULOS, K.G. Artificial neural networks for the prediction of the reference evapotranspiration of the Peloponnese Peninsula, Greece. *Water*, v. 14, n. 13, 2027, 2022. Doi: 10.3390/w14132027

DUARTE, M.L.; SILVA, D.C.C.; BARBOSA, R.L.; LOURENÇO, R.W. Modeling of soil organic matter using Sentinel-1 SAR and partial least squares (PLS) regression. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 17, 32, 2024. doi: 10.1007/s12517-023-11844-w

DUTRA NETO, C. Café e Desenvolvimento Sustentável: perspectivas para o desenvolvimento sustentável no Planalto de Vitória da Conquista. Vitória da Conquista: UESB, 2004. 168 p.

MATIELLO, J.B.; SANTINATO, R.; Almeida, S.R; Garcia, A.W.R. Cultura de café no Brasil: manual de recomendações. 1. ed. São Paulo: Futurama Editora, 2016. 585p.

MOLIN. P. G., FERRAZ, S. F. B., Cassiano, C. Sensoriamento remoto introdução e índices de vegetação. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4097918/mod\\_resource/content/1/4\\_Indices%20de%20Vegeta%C3%A7%C3%A3o2017.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4097918/mod_resource/content/1/4_Indices%20de%20Vegeta%C3%A7%C3%A3o2017.pdf).

MURAOKA, H.; NODA, H. M.; NAGAI, S.; MOTOHKA, T.; SAITOH, T. M.; NASAHARA, K. N.; SAIGUSA, N. Spectral vegetation indices as the indicator of canopy photosynthetic productivity in a deciduous broadleaf forest. *Journal of Plant Ecology*, v. 6, n. 5, p. 393-407, out. 2013.

NERY, L. M.; GOMES, G.; NICOMEDES, N. de P.; ARENAS, L. A. de Oro; SILVA, D. C. da C.. Estimativa da evapotranspiração com redes neurais artificiais e dados espectrais: aplicação em uma unidade de conservação. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 40, e40250003, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-778640250003>.

ZHANG, K.; KIMBALL, J.S.; RUNNING, S.W. A review of remote sensing based actual evapotranspiration estimation. *Wires Water*, v. 3, n. 6, p. 834-853, 2016.

**ARTIGO I**

Modelagem de variáveis climáticas em cafezais, por meio de redes neurais, utilizando índices espectrais

**Running title:** SPI trends on the Conquista Plateau

**Manuscript category:** Agrometeorology

**Climate change: Trends and changes in local standardized precipitation indices on the  
Conquista Plateau**

Ingrid Thalia Prado de Castro<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-2218-5275>, Odair Lacerda Lemos<sup>2</sup>  
<https://orcid.org/0000-0001-8347-8947>, Cristiano Tagliaferre<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4776-473X>, Alessandro de  
Paula<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0003-3676-3846>, Rayka Kristian Alves Santos<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2232-8288>,  
Bárbara Louise Pacheco Ramos<sup>4\*</sup> <https://orcid.org/0000-0001-5055-7120>, Jacqueline Lavinsky Costa  
Morais<sup>1</sup> <https://orcid.org/0009-0003-6883-612X>, Antônio Igor Rios de Sousa<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-5354-7814>

<sup>1</sup>State University of Southwest Bahia (UESB), Graduate Program in Phytotechnics, Vitória da Conquista, BA, Brazil

<sup>2</sup>State University of Southwest Bahia (UESB), Department of Agricultural Engineering and Soils, Vitória da Conquista, BA, Brazil

<sup>3</sup>State University of Southwest Bahia (UESB), Department of Plant and Animal Sciences, Vitória da Conquista, BA, Brazil

<sup>4</sup>State University of Southwest Bahia (UESB), Postdoctoral Researcher at Embrapa Café, Vitória da Conquista, BA, Brazil

\*Corresponding author <agro.barbara@outlook.com>

## **Abstract**

Changes in rainfall patterns directly affect agricultural systems, particularly in regions with limited meteorological monitoring. This study evaluated trends and variability in precipitation on the Conquista Plateau, Bahia, Brazil, using satellite-based datasets (CHIRPS and NASA POWER) and observations from a local weather station. The performance of satellite estimates was assessed using Pearson's correlation coefficient and Willmott's agreement index. Trend analysis was based on the Mann–Kendall test, and hydroclimatic variability was evaluated using the Standardized Precipitation Index (SPI). CHIRPS showed strong agreement with observed rainfall during the rainy season ( $r > 0.80$ ;  $d > 0.90$ ), whereas reduced accuracy was observed during the dry season, reflecting limitations in detecting low-intensity or shallow convective precipitation. Significant negative trends ( $p < 0.05$ ) were detected in monthly rainfall for June, August, and September, with declines ranging from  $-1.2$  to  $-2.5$  mm year<sup>-1</sup>, suggesting a modification in the regional rainfall regime. The SPI showed a clear association with ENSO phases, with El Niño years characterized by moderate to severe drought conditions ( $SPI \leq -1.5$ ) and La Niña years associated with positive rainfall anomalies favorable to agricultural activities. These results demonstrate that satellite rainfall products provide reliable information for climate monitoring and effectively complement ground observations in data-scarce regions. The observed reduction in rainfall during critical months, together with increased hydroclimatic variability, underscores the need for adaptive water management and agricultural planning strategies under ongoing climate change.

**Keywords:** CHIRPS, mann-kendall trend, NASA POWER, rainfall variability, remote sensing.

## **Introduction**

The analysis of climate variability and its implications for rainfall is fundamental for understanding environmental, social, and economic impacts in different regions. In the Brazilian semi-arid context, the Conquista Plateau in southwestern Bahia exhibits climatic characteristics strongly influenced by rainfall dynamics, with changes in precipitation patterns driven by global and local forcing mechanisms directly affecting agriculture, hydrological planning, and regional sustainable development. Reports from the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) indicate that human activities, especially greenhouse gas emissions, have increased global mean temperature by approximately 1.1 °C between 1850–1900 and 2011–2020, intensifying extreme weather events worldwide (IPCC, 2023). In Brazil, precipitation monitoring relies heavily on data from the National Institute of Meteorology (INMET); however, the uneven distribution of weather stations, concentrated in populated areas, limits the availability of long-term records in remote regions (Sun et al., 2018).

Traditional rain gauge networks play a central role in precipitation monitoring, but their spatial coverage is inherently limited. Gauge observations are concentrated almost exclusively over land areas, which represent only about one quarter of the Earth's surface, and even in continental regions station density is often irregular. Because rain gauges provide point measurements, their representativeness decreases rapidly with distance, making it difficult to obtain reliable estimates at broader spatial scales. These limitations are particularly critical in regions with sparse or poorly maintained monitoring networks, such as semi-arid environments (Kidd et al., 2017).

In this context, remote sensing has become an important alternative, offering broad spatial coverage and consistent climate estimates in data-limited environments. Historical

series analysis enables the identification of long-term trends in rainfall variability, the detection of climate change signals, and the monitoring of extreme events that affect agriculture, urban infrastructure, and water resources. The integration of satellite products and station observations provides a more comprehensive and efficient assessment of precipitation patterns (Beck et al. 2020).

Among recent technological tools, NASA's Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) project has improved global climate datasets, expanding their applicability to hydrological and environmental analyses (NASA, 2021), while CHIRPS provides more than three decades of rainfall data at ~5 km resolution, supporting studies in regions with limited meteorological infrastructure (Funk et al., 2015). In this context, the Conquista Plateau, an important coffee-producing area in Bahia, has experienced productivity declines possibly associated with changes in rainfall distribution, and this study aims to analyze long-term rainfall variability and trends using satellite-based and ground-based data.

## **Materials and Methods**

### **Study area**

The study site is located in the southwestern part of the state of Bahia, in the mesoregion South Central Bahia and in the microregion of Vitória da Conquista, between the coordinates of 14°30' and 15°30' S Latitude and 40°30' and 41°10' W Longitude, with an area of 3,705.83 km<sup>2</sup> (IBGE, 2018). From a climatic and environmental point of view, the municipality has three distinct microclimates: dry humid, semi-arid and dry sub-humid, derivations of the altitude tropical, which gives the place its peculiarity, with an average altitude of 960 m. The climate, according to the Köppen classification, is of the CWb type, a high-altitude tropical climate with dry winters and mild summers. The average annual

temperature is 21,5 °C, with an average annual rainfall of 734,3 mm (Marcelino, 2021).

## **Datasets**

### **Ground-based rainfall observations**

Daily and monthly rainfall data were obtained from weather stations operated by the National Institute of Meteorology (INMET). Only stations with consistent historical records and acceptable completeness criteria were included in the analysis.

### **Satellite-based rainfall estimates**

In order to evaluate the performance of the CHIRPS and NASA POWER satellites in estimating precipitation values, monthly time series were collected for the period 1990 to 2019 (30 years) from the meteorological station located in the municipality (code: 83344), along with the corresponding data from the aforementioned satellites. In addition to surface data, orbital data on a monthly scale was also used. Precipitation information was obtained by downloading the daily averages available on the NASA POWER website for the geographical location of the city of Vitória da Conquista. These daily averages were then consolidated into monthly values for analysis. Monthly data generated from satellite observations and reanalysis fields (Nasa Power, 2021).

The precipitation data from CHIRPS (Climate Hazards Group Infra-Red Precipitation with Station) was extracted using codes from the GEE platform database (Google Earth Engine). In order to evaluate the use of orbital data as an alternative in the analysis of rainfall variability in historical series, a comparative analysis was carried out on a global scale of the values observed (without failures) by the weather station and the values estimated by the satellites within the time interval from 1990 to 2019. Monthly data, ~5 km spatial resolution, derived from infrared observations blended with rain gauge measurements (Funk et al., 2015).

## **Evaluation of satellite rainfall performance**

The performance of CHIRPS and NASA POWER relative to ground data was assessed using: Pearson's correlation coefficient ( $r$ ), standard error of estimate (SEM), linear coefficient (a), angular coefficient (b), coefficient of determination ( $R^2$ ) and Willmott's index of agreement (d), as proposed by Willmott et al. (1985), and the performance coefficient (c) from Camargo & Sentelhas (1997).

These metrics provide complementary assessments of linear association, accuracy, dispersion, and systematic deviation. All statistical procedures were performed using standard routines in statistical software (Excel/XLSTAT 2019.2.2).

## **Trend analysis**

Trends in monthly and annual rainfall were identified using the Mann–Kendall (MK) test (Mann, 1945), a non-parametric method suitable for hydrometeorological time series. The magnitude of trends was estimated using Sen's slope estimator, which quantifies the direction and rate of change ( $\text{mm year}^{-1}$ ). Trend analyzes were conducted using a longer historical rainfall record (42 years), available from ground-based observations, in order to improve the robustness of trend detection.

## **Standardized Precipitation Index (SPI)**

The Standardized Precipitation Index (SPI), developed by McKee et al. (1993) and later consolidated for operational calculation by Guttman (2007), was processed from the historical precipitation data obtained from both the weather station and the CHIRPS and NASA POWER satellites. The SPI was used to quantify precipitation deficits on different time scales, allowing the impact of droughts on the availability of water resources to be assessed. The analysis covered the period from 1990 to 2019. In addition, SPI classification followed the standard thresholds proposed by the World Meteorological Organization

(WMO, 2012).

### **Temporal alignment and integration of data sources**

Satellite and station datasets were temporally aligned using common periods of observations. Monthly precipitation totals were aggregated to ensure comparability among data sources.

### **Software and computational procedures**

Data organization, statistical analyses, and graphical representation were performed using Microsoft Excel coupled with the XLSTAT add-in (version 2019.2.2). Spatial data processing, visualization, and map generation were conducted using QGIS software (version 3.20, Odense).

## **Results**

### **Satellite performance and correlation with ground observations**

Correlation analysis between satellite estimates and station data showed strong agreement in several months (Table 1). Both CHIRPS and NASA POWER presented correlation coefficients above 0.80 during the rainy season, particularly in March, when CHIRPS reached  $r = 0.90$  and NASA POWER  $r = 0.94$ . Moderate correlations were observed in May, July, and August, indicating that satellites captured the general precipitation variability during these months. The lowest correlations occurred in June, with  $r = 0.52$  for both CHIRPS and NASA POWER.

Willmott's agreement index confirmed higher accuracy in January, March, April, October, November, and December, with  $d$  values exceeding 0.70. In February, May, and September, both datasets showed strong agreement, with CHIRPS reaching  $d = 0.86$ ,  $0.74$ , and  $0.81$ , respectively, and NASA POWER  $d = 0.89$ ,  $0.49$ , and  $0.67$ . During the winter months (June–August), agreement decreased substantially, with CHIRPS presenting  $d$  values

between 0.36 and 0.60 and NASA POWER between 0.25 and 0.30.

The coefficient of determination ( $R^2$ ) exceeded 0.72 in rainy months, whereas in June NASA POWER showed  $R^2 = 0.00$ . These results indicate higher accuracy of satellite estimates during the rainy season and reduced performance during the dry season.

### **Rainfall trends based on the Mann–Kendall test**

The Mann–Kendall test indicated predominantly negative trends in monthly rainfall over the 42-year period (Table 2). Significant downward trends were detected in June ( $\tau = -0.28$ ;  $p = 0.01$ ), August ( $\tau = -0.22$ ;  $p = 0.04$ ), September ( $\tau = -0.33$ ;  $p = 0.00$ ), and October ( $\tau = -0.21$ ;  $p = 0.05$ ). In April, a strong negative trend occurred in the first decade ( $\tau = -0.69$ ;  $p = 0.01$ ), followed by a positive trend in the third decade ( $\tau = 0.38$ ;  $p = 0.15$ ).

The decennial analysis showed an intensification of rainfall reduction in recent decades, particularly in the fourth decade, when June ( $\tau = -0.72$ ;  $p = 0.00$ ; Table 2) and September ( $\tau = -0.46$ ;  $p = 0.05$ ; Table 2) showed the most pronounced decreases. Non-significant negative trends were observed in May ( $\tau = -0.13$ ;  $p = 0.24$ ), July ( $\tau = -0.17$ ;  $p = 0.12$ ) and December ( $\tau = -0.10$ ;  $p = 0.35$ ) when analyzing the 42 years.

### **SPI variability and ENSO influence**

Figures 1 present the annual precipitation totals and the corresponding Standardized Precipitation Index (SPI) derived from the CHIRPS and NASA POWER datasets for the period 1990–2019. Annual precipitation ranged from approximately 440 mm to 1,050 mm in CHIRPS and from 300 mm to 980 mm in NASA POWER. The highest precipitation total was recorded in 1992 (>1,000 mm in CHIRPS and close to 1,000 mm in NASA POWER), corresponding to SPI values  $\geq 2.0$  and classified as extremely wet. The lowest precipitation totals occurred in 2003 and 2019 in CHIRPS (<500 mm) and in 1993, 2003 and 2015 in NASA POWER (<350 mm), associated with SPI values  $\leq -2.0$  and classified as extremely

dry.

Most years exhibited SPI values between  $-1.5$  and  $1.5$ , indicating a predominance of near-normal to moderately anomalous conditions in both datasets. Very dry years were identified in 1993, 2003, 2011, 2012 and 2019 ( $SPI \leq -2.0$ ; Figures 1 and 2), whereas 1992 was classified as extremely wet. Moderately dry conditions occurred in 1996 and 2005, while moderately wet years were observed in 1997 and 2018. These anomalies coincided with El Niño and La Niña phases, as indicated in Table 3.

Both datasets consistently captured marked interannual variability, with a close correspondence between annual precipitation totals and SPI classification, allowing the identification of wet, dry and extreme years throughout the study period.

## **Discussion**

The performance of satellite-based precipitation products in representing local rainfall dynamics has been widely discussed in the literature, particularly in regions with limited meteorological infrastructure. Yakubailik and Yakubailik (2020) reported a high correspondence between satellite estimates and terrestrial precipitation metrics in Central Siberia, suggesting that statistical indicators can effectively bridge gaps between satellite observations and local climate conditions. These findings indicate that products such as NASA POWER have strong potential for validation in environments with sparse station coverage, as observed in the present study.

Similarly, previous studies have confirmed the reliability of CHIRPS data under diverse climatic conditions. Simanjuntak et al. (2024) validated CHIRPS estimates against local rainfall observations in northern Sumatra, demonstrating its usefulness for characterizing seasonal precipitation dynamics. Bayissa et al. (2017) also reported substantial

agreement between CHIRPS and in situ measurements for drought and precipitation monitoring, confirming its applicability across heterogeneous geographical regions. These results are consistent with the performance observed in Vitória da Conquista, especially during the rainy season.

The distinct performance of CHIRPS and NASA POWER reflects their different data acquisition and calibration strategies. CHIRPS relies heavily on ground stations, using a network of more than 47,000 stations to calibrate its estimates, which enhances its accuracy in regions with available observations, such as Vitória da Conquista. This approach explains the higher performance observed during rainy months, with coefficients of determination exceeding 0.72 and high performance levels according to the adopted accuracy metrics. However, its accuracy decreases during dry months due to the intrinsic limitations of infrared sensors in detecting low-intensity convective rainfall or poorly developed cloud systems.

In contrast, the GPM IMERG product used by NASA POWER integrates microwave and infrared satellite sensors, prioritizing satellite observations and applying ground calibration only in the Final Run, with a latency of approximately three months. This strategy explains the discrepancies observed during dry periods, particularly in June, when the absence of real-time calibration compromises accuracy (Nasa Power, 2023). Conversely, during months with intense and organized convection, such as March, IMERG exhibits its highest accuracy levels, benefiting from the sensitivity of microwave sensors to precipitation associated with deep cloud systems.

Independent validation studies further corroborate these results. Correia (2024) reported strong agreement between INMET observations and NASA POWER estimates, with coefficients of determination of 0.968 for monthly rainfall and 0.907 for annual totals, consistent with the agreement observed in the present study. Likewise, Prado et al. (2018)

found that Willmott concordance indices between ECMWF estimates and in situ data increased during specific seasons, reinforcing the influence of seasonal variability on model performance. These findings highlight that satellite accuracy is not uniform throughout the year but strongly modulated by prevailing meteorological conditions.

The heterogeneity of rainfall trends identified in the Mann–Kendall analysis reflects the complexity of climatic drivers affecting the region. Variations in atmospheric circulation, local land-use changes, and global climate phenomena contribute jointly to the observed patterns. The predominance of negative trends in traditionally wet months, such as June, August, September, and October, as evidenced by the significant  $\tau$  values reported in Table 2, suggests a progressive reduction in rainfall during critical periods, with potential implications for water availability and agricultural productivity.

Comparable long-term trends have been reported in other Brazilian regions. Santos et al. (2022) identified an initial increase followed by a downward trend in precipitation over central São Paulo using CHIRPS data, while Sanches et al. (2020) reported decreasing rainfall in São Carlos. Penereiro et al. (2018) further observed that municipalities exhibiting negative rainfall trends are distributed across multiple biomes, including the Caatinga, where Vitória da Conquista is located. These regional-scale consistencies suggest that the downward trends detected in the Conquista Plateau are part of a broader climatic signal.

The identification of non-significant trends should not be interpreted as the absence of climatic change. As noted by the proximity of several p-values to the significance threshold, natural variability may obscure long-term tendencies, emphasizing the importance of continuous monitoring to detect emerging signals as longer records become available.

The strong association between SPI anomalies and ENSO phases reinforces the dominant role of large-scale climate drivers in shaping regional rainfall variability. Herrera

and Correa (2016) demonstrated that El Niño events are typically associated with drier conditions, whereas La Niña phases promote wetter regimes and increased rainfall variability. Similar oscillatory behavior was reported for the Pampean Region, where droughts were linked to El Niño and enhanced rainfall to La Niña episodes (Cai, 2020).

However, the impacts of the El Niño–Southern Oscillation (ENSO) over Northeastern Brazil are not spatially uniform, as regional atmospheric and oceanic conditions modulate the magnitude and even the direction of rainfall anomalies. El Niño events generally intensify drought conditions in the semi-arid core, but eastern coastal sectors may experience weaker anomalies depending on the thermal state of the Tropical Atlantic (Kayano and Andreoli, 2006). This spatial heterogeneity highlights the importance of regional-scale analyses to properly interpret how global climate signals are modulated by local environmental controls.

Consistent with this regional complexity, the present results also indicate that local climatic factors can partially override ENSO-related signals. Years such as 1996 and 1997 showed rainfall anomalies that were not fully consistent with their associated ENSO phases, suggesting additional influence from regional atmospheric dynamics. Together, these findings support the interpretation that precipitation variability in northeastern Brazil results from the interaction between large-scale climate forcing and local-scale processes, which should be jointly considered in hydroclimatic assessments. The implications of this climatic variability for agriculture are particularly relevant in coffee-producing regions. Alternating El Niño and La Niña phases strongly affect water availability, temperature regimes, and crop development cycles. Prolonged droughts during El Niño episodes directly impair vegetative growth, flowering, and fruit maturation, reducing yields and increasing susceptibility to pests and diseases, such as the coffee berry borer. Conversely, La Niña conditions may enhance productivity through increased water availability, although excessive or poorly distributed

rainfall can promote soil waterlogging and fungal diseases, such as coffee rust, compromising bean quality and post-harvest processing.

Overall, the results demonstrate that orbital remote sensing constitutes a reliable and complementary tool for climate monitoring in data-scarce regions, while also revealing a progressive alteration of rainfall regimes in the Conquista Plateau. The combined evidence from trend analysis and SPI variability highlights increasing climatic risks for water resources and agricultural sustainability, reinforcing the importance of integrating satellite observations with ground data to support adaptive management strategies in coffee-growing areas.

The comparative analysis of precipitation data from the CHIRPS and NASA POWER satellites for Vitória da Conquista, BA, revealed consistent and complementary patterns, indicating a tendency toward decreasing rainfall in specific months, particularly June, August, September, and October, which are critical to the regional seasonal rainfall regime, especially during the transition from the dry to the wet period. These results indicate a progressive modification in the temporal distribution of rainfall throughout the year, with a reduction in precipitation during critical months of the rainy season.

Both satellite products showed good agreement with ground observations, especially during the spring and summer months, while reduced performance was observed during the winter period. The Willmott concordance index confirmed that the accuracy of precipitation estimates varies seasonally, with higher reliability in wetter months and greater uncertainty under dry-season conditions. In general, CHIRPS exhibited more consistent agreement throughout the year, although limitations were also observed during periods of low rainfall.

The association between SPI variability and ENSO phases highlights the vulnerability of the Conquista Plateau to climatic extremes. El Niño years were predominantly associated

with drought conditions, whereas La Niña phases favored wetter regimes and more favorable conditions for agriculture. However, the alternation between these climatic modes and the occurrence of non-significant or inconsistent trends indicate that both large-scale climate drivers and local atmospheric dynamics jointly control rainfall variability in the region.

In this context, the present study contributes to the existing literature by demonstrating the combined use of long-term satellite products and ground observations as an effective approach for detecting rainfall trends and hydroclimatic extremes in regions with limited monitoring infrastructure. By identifying seasonal shifts and increasing rainfall deficits during agriculturally critical periods, this work provides relevant information for climate risk assessment and water resource management in coffee-producing areas.

Future studies should incorporate longer time series, additional satellite products, and spatially distributed observations to improve the representation of local rainfall patterns and reduce uncertainties during dry periods. The integration of climate projections and crop response models is also recommended to better quantify the impacts of ongoing climatic changes on agricultural productivity and to support the development of adaptive management strategies aimed at increasing the resilience of coffee-growing systems in the Conquista Plateau and similar environments.

## **Acknowledgments**

The authors thank CAPES (Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel) for financial support and scholarship assistance.

## **Authors' Contributions**

Authors' Contributions

Conceptualization: Castro ITP.

Data curation: Castro ITP, Lemos OL.

Formal analysis: Lemos OL, Paula A, Santos RKA, Ramos BLP.

Investigation: Lemos OL.

Methodology: Castro ITP, Lemos OL.

Project administration: Castro ITP, Lemos OL.

Resources: Lemos OL.

Software: Castro ITP, Tagliaferre C, Ramos BLP.

Supervision: Tagliaferre C.

Validation: Castro ITP, Tagliaferre C.

Visualization: Castro ITP, Lemos OL, Tagliaferre C.

Writing – original draft: Castro ITP, Paula A, Santos RKA.

Writing – review & editing: Paula A, Santos RKA, Ramos BLP, Morais JLC, Sousa AIR.

## **Conflict of interest**

The authors declare that there are no conflicts of interest regarding the publication of this manuscript.

## **Data availability statement**

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author upon reasonable request.

## **Declaration of Use of AI Technologies**

Artificial intelligence tools were used exclusively to assist with language revision and text organization. The authors take full responsibility for the content, interpretation of the results, and conclusions presented in this manuscript.

## **References**

Bayissa Y, Tadesse T, Demisse G, Shiferaw A. 2017. Evaluation of satellite-based rainfall estimates and application to monitor meteorological drought for the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Remote Sensing* 9: 669. <https://doi.org/10.3390/rs9070669>

Beck HE, Vergopolan N, Pan M, Levizzani V, van Dijk AIJM, Weedon GP. 2020. Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling. In: Levizzani V, Kidd C, Kirschbaum D, Kummerow C, Nakamura K, Turk F (eds) *Satellite Precipitation Measurement. Advances in Global Change Research*, vol 69. Springer, Cham. p. 625–653. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35798-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35798-6_9)

Cai W, McPhaden MJ, Grimm AM, Rodrigues RR, Taschetto AS, Garreaud RD, Dewitte B, Poveda G, Ham YG, Santoso A. 2020. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. *Nature Reviews Earth & Environment* 1: 215–231. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>

Camargo AP, Camargo MBP. 2001. Definition and schematization of the phenological phases of the Arabica coffee tree in tropical conditions of Brazil. *Bragantia* 60: 65–68. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052001000100008>

Camargo AP, Sentelhas PC. 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 5: 89–97. (in Portuguese, with abstract in English)

Correia AA. 2024. Performance of the POWER/NASA project for estimating rainfall and air temperature in the Brazilian semiarid region. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto* 5: 46–60. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14613256>

dos Santos LOF, Machado NG, Biudes MS, Geli HME, Querino CAS, Ruhoff AL, Ivo IO, Lotufo Neto N. 2023. Trends in precipitation and air temperature extremes and their relationship with sea surface temperature in the Brazilian Midwest. *Atmosphere* 14(3): 426. <https://doi.org/10.3390/atmos14030426>

Funk C, Peterson P, Landsfeld M, Pedreros D, Verdin J, Shukla S, Husak G, Rowland J, Harrison L, Hoell A, Michaelsen J. 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations — a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data* 2: 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

Guttman NB. 1999. Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association* 35: 311–322. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x>

Herrera M, Correa C. 2016. An assessment of El Niño and La Niña impacts focused on

monthly and seasonal rainfall and extreme dry/precipitation events in mountain regions of Colombia and Mexico. *Advances in Geosciences* 42: 23–33. <https://doi.org/10.5194/adgeo-42-23-2016>

IPCC. 2023. *Climate change 2023: Synthesis report – summary for policymakers*. IPCC, Geneva, Switzerland.

Kidd C, Huffman GJ. 2011. Global precipitation measurement. *Meteorological Applications* 18:334-353. <https://doi.org/10.1002/met.284>

Kendall MG. 1975. *Rank correlation methods*. Charles Griffin, London, UK.

Lopes AB, Vieira MRS, Lima Filho AA, Silvestrim EG, Silvestrim FG. 2021. Anomalies in the precipitation of four municipalities of the Amazonas, Brazil. *Research, Society and Development* 10(14): e196101421766. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i14.21766>

Mann HB. 1945. Non-parametric tests against trend. *Econometrica* 13: 245–259.

Marcelino RL. 2021. Climate behavior of the municipality of Vitória da Conquista in relation to El Niño. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research* 4: 2156–2173. <https://doi.org/10.34188/bjaerv4n2-048>

McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*,

Anaheim, USA.

NASA. 2021. Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) project. NASA Langley Research Center, Hampton, USA.

Penereiro JC, Badinger A, Maccheri NA, Meschiatti MC. 2018. Seasonal trend distributions of mean temperature and precipitation in Brazilian biomes. *Revista Brasileira de Meteorologia* 33: 97–113. <https://doi.org/10.1590/0102-7786331012>

Prado RC, Blain GC, Ploeg MCA. 2018. Rainfall data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts for monitoring meteorological drought in São Paulo state. *Acta Scientiarum. Technology* 40: e34947. <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v40i1.34947>

Sanches RG, Santos BCD, Miani RS, Neves GZF, Silva MSD, Tech ARB. 2020. Analysis of daily rainfall in São Carlos, Brazil over 1979–2017 using Laplace trend test. *Journal of Geoscience and Environment Protection* 8: 104–125. <https://doi.org/10.4236/gep.2020.87006>

Santos BC, Sanches RG, Moreira RM, Bourscheidt V, Souza PH. 2022. Spatio-temporal analysis of precipitation in central São Paulo using CHIRPS data. *Revista Brasileira de Geografia Física* 15: 2582–2600. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2582-2600>

Simanjuntak NMM, Giarno A, Darmawan Y, Sudarisman M, Saragih IJA. 2024. The

accuracy of CHIRPS rainfall data and its use in determining wet and dry season onset in northern Sumatra. *Mausam* 75: 679–690. <https://doi.org/10.54302/mausam.v75i3.6262>

Sun Q, Miao C, Duan Q, Ashouri H, Sorooshian S, Hsu KL. 2018. A review of global precipitation data sets: data sources, estimation, and intercomparisons. *Reviews of Geophysics* 56(1): 79–107. <https://doi.org/10.1002/2017RG000574>

World Meteorological Organization (WMO). 2012. *Standardized Precipitation Index User Guide*. WMO-No. 1090. Geneva, Switzerland.

Yakubailik OE, Yakubailik TV. 2025. Analysis of accumulated precipitation based on satellite data in Central Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 548: 032025. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/3/032025>

**Table 1.** Average monthly precipitation  $\pm$  standard deviation ( $\text{mm month}^{-1}$ ), standard error of estimate (SEM,  $\text{mm month}^{-1}$ ), linear coefficient (a), angular coefficient (b), coefficient of determination ( $R^2$ ), correlation coefficient (r), Willmott's coefficient of agreement (d), coefficient of confidence and performance (c) and ranking of model performance for the Chirps and Nasa Power satellites in the municipality of Vitória da Conquista, BA.

Month	Sensor	Prec	ePrec	a	b	$R^2$	r	d	C	Class.***
Jan	Chirps	$86,50 \pm 71,46$	0,08	2,47	1,03	0,78	0,88	0,93	0,82	MB
	Nasa	$86,75 \pm 82,92$	0,09	20,90	0,84	0,74	0,86	0,92	0,79	MB
Feb	Chirps	$69,54 \pm 49,90$	0,11	3,22	1,11	0,65	0,80	0,86	0,69	B
	Nasa	$70,99 \pm 56,87$	0,10	15,03	1,03	0,72	0,85	0,89	0,76	MB
Mar	Chirps	$92,27 \pm 72,34$	0,08	-18,29	1,30	0,82	0,90	0,92	0,83	MB
	Nasa	$90,97 \pm 65,91$	0,06	4,45	1,15	0,90	0,95	0,95	0,90	O
Apr	Chirps	$58,71 \pm 27,58$	0,07	-12,77	1,30	0,83	0,91	0,93	0,85	O
	Nasa	$63,28 \pm 36,39$	0,08	7,14	1,38	0,78	0,88	0,82	0,72	MB

May	Chirps	29,86 ± 11,49	0,14	5,99	0,22	0,40	0,64	0,74	0,47	S
	Nasa	34,51 ± 13,34	0,14	13,88	1,29	0,47	0,68	0,49	0,33	P
Jun	Chirps	20,34 ± 7,50	0,16	6,18	0,27	0,27	0,52	0,60	0,31	P
	Nasa	27,68 ± 9,42	0,18	24,54	0,15	0,00	0,72	0,26	0,19	P
Jul	Chirps	24,31 ± 6,77	0,14	-21,62	2,34	0,45	0,67	0,49	0,33	P
	Nasa	28,04 ± 9,66	0,14	19,59	2,50	0,43	0,66	0,25	0,17	P
Aug	Chirps	13,23 ± 4,08	0,14	-3,93	2,38	0,42	0,64	0,36	0,23	P
	Nasa	24,08 ± 8,11	0,14	14,21	1,85	0,44	0,66	0,30	0,20	P
Set	Chirps	17,15 ± 7,98	0,09	-12,73	1,73	0,74	0,86	0,81	0,70	B
	Nasa	27,25 ± 14,67	0,15	11,99	0,65	0,33	0,58	0,67	0,39	P
Out	Chirps	47,27 ± 31,26	0,08	-1,53	1,04	0,80	0,90	0,94	0,85	O
	Nasa	62,81 ± 40,48	0,10	9,20	0,78	0,70	0,83	0,91	0,76	MB
Nov	Chirps	124,19 ± 59,25	0,09	-19,53	1,07	0,72	0,85	0,90	0,77	MB
	Nasa	125,43 ± 65,58	0,09	19,56	0,84	0,73	0,85	0,92	0,78	MB
Dez	Chirps	135,45 ± 90,71	0,09	-19,83	1,10	0,74	0,86	0,91	0,78	MB
	Nasa	129,56 ± 88,35	0,10	-2,53	0,98	0,72	0,85	0,91	0,77	MB

\*\*\* Performance classification, according to Index c, according to Camargo and

Sentelhas (1997).

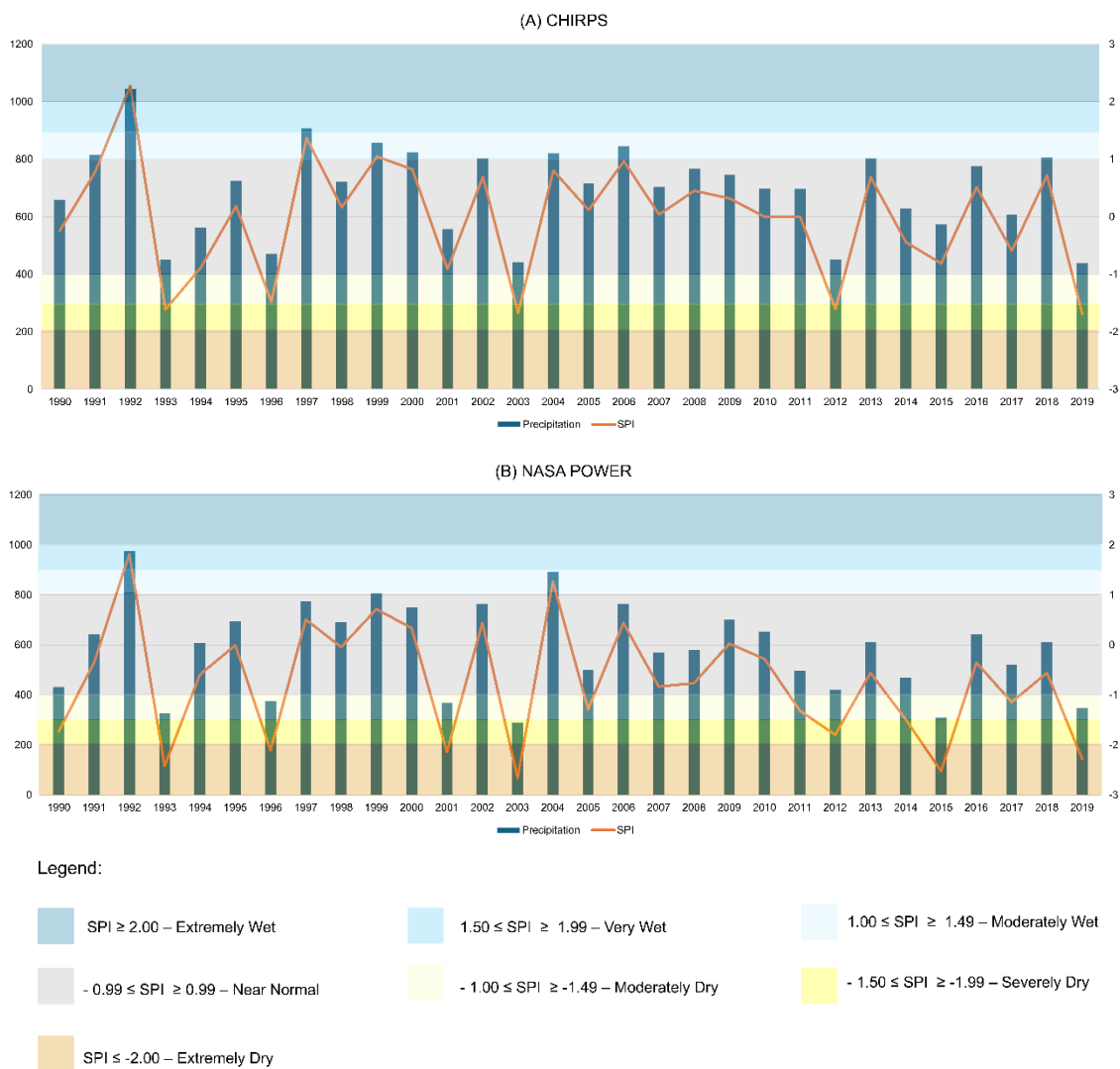
**Table 2.** Kendall's correlation coefficients and p-values for different decades of analysis over the months of the year.

Month	1ST DEC		2ND DEC		3RD DEC		4TH DEC		GENERAL (42 YEARS)	
	Kendall's Tau	p-value	Kendall's Tau	p-value	Kendall's Tau	p-value	Kendall's Tau	p-value	Kendall's Tau	p-value
Jan	-0,33	0,21	-0,07	0,86	-0,33	0,21	0,15	0,50	-0,03	0,79
Feb	-0,16	0,59	-0,29	0,28	-0,24	0,37	0,21	0,36	0,01	0,92
Mar	-0,02	1,00	0,24	0,37	0,33	0,21	-0,05	0,85	-0,08	0,45
Apr	-0,69	0,01	-0,20	0,47	0,38	0,15	0,26	0,25	0,09	0,41
May	0,29	0,28	-0,11	0,72	-0,16	0,59	-0,36	0,10	-0,13	0,24
Jun	0,33	0,21	-0,20	0,47	-0,47	0,07	-0,72	0,00	-0,28	0,01
Jul	-0,02	1,00	0,11	0,72	-0,29	0,28	-0,41	0,06	-0,17	0,12
Aug	0,20	0,47	-0,20	0,47	-0,33	0,21	-0,05	0,85	-0,22	0,04
Set	-0,20	0,47	0,42	0,11	-0,11	0,72	-0,41	0,06	-0,33	0,00
Out	0,11	0,72	-0,02	1,00	0,20	0,47	0,05	0,85	-0,21	0,05
Nov	0,38	0,15	0,20	0,47	0,24	0,37	-0,10	0,67	0,10	0,34
Dec	0,29	0,28	0,16	0,59	0,20	0,47	0,03	0,95	-0,10	0,35

**Table 3.** Years when El Niño and La Niña occurred in Brazil.

El Niño		La Niña	
1991-1992	1994-1995	1988-1989	1995-1996
1997-1998	2002-2003	1998-2001	2005-2006
2004-2005	2006-2007	2007-2009	2010-2012
2009-2010	2014-2016	2016-2018	
2018-2019			

Source: Lopes et al. (2021).



**Figure 1.** Relationship between SPI and precipitation: (A) based on CHIRPS satellite data and (B) bases on NASA POWER satellite.

**ARTIGO II**

Modelagem de variáveis climáticas em cafezais, por meio de redes neurais, utilizando índices espectrais

---

\* **Situação:** submetido

**Modelagem de variáveis climáticas em cafezais, por meio de redes neurais, utilizando índices espectrais**

## RESUMO

Este estudo avaliou o potencial de índices espectrais derivados dos sensores Landsat-8/Landsat-9 e Sentinel-2A, na modelagem de variáveis climáticas, em áreas cafeeiras de Barra do Choça, utilizando Redes Neurais Artificiais (RNAs). Foram estimadas a evapotranspiração (ET), a precipitação (P) e o déficit hídrico (DH) em três recortes sazonais: período seco, chuvoso e anual. Os índices espectrais representaram atributos biofísicos associados ao vigor da vegetação, à estrutura do dossel, ao conteúdo hídrico foliar e à atividade fotossintética, integrados a dados climáticos do conjunto TerraClimate. As RNAs do tipo *Perceptron* Multicamadas foram implementadas no IBM SPSS *Statistics*, com avaliação baseada no coeficiente de determinação ( $R^2$ ), índice de concordância de Willmott, eficiência de Nash–Sutcliffe, erro quadrático médio e erro absoluto médio. Os resultados indicaram que índices relacionados ao conteúdo hídrico e ao vigor do dossel foram mais relevantes na estimativa da ET e do DH, enquanto aqueles associados à eficiência fotossintética e à senescência tiveram maior importância na modelagem da P. O Sentinel-2A apresentou melhor desempenho na estimativa de ET e P, especialmente nos períodos seco e chuvoso, devido à maior resolução espectral e temporal. O Landsat destacou-se na modelagem do DH sob estresse hídrico intenso. A forte correlação entre ET e P do TerraClimate reforçou a confiabilidade dos dados, evidenciando que a integração entre sensoriamento remoto e RNAs é promissora para o monitoramento agroclimático da cafeicultura.

**Palavras-chave:** Sensoriamento remoto; Redes neurais artificiais; Variáveis agroclimáticas.

## **ABSTRACT**

This study evaluated the potential of spectral indices derived from Landsat-8/Landsat-9 and Sentinel-2A sensors in modeling climatic variables in coffee-growing areas of Barra do Choça, using Artificial Neural Networks (ANNs). Evapotranspiration (ET), precipitation (P), and water deficit (HD) were estimated in three seasonal periods: dry, rainy, and annual. The spectral indices represented biophysical attributes associated with vegetation vigor, canopy structure, leaf water content, and photosynthetic activity, integrated with climatic data from the TerraClimate dataset. Multilayer Perceptron ANNs were implemented in IBM SPSS Statistics, with evaluation based on the coefficient of determination ( $R^2$ ), Willmott's index of agreement, Nash–Sutcliffe efficiency, root mean square error, and mean absolute error. The results indicated that indices related to water content and canopy vigor were more relevant in estimating ET and DH, while those associated with photosynthetic efficiency and senescence were more important in modeling P. Sentinel-2A showed better performance in estimating ET and P, especially during dry and rainy periods, due to its higher spectral and temporal resolution. Landsat stood out in modeling DH under intense water stress. The strong correlation between ET and P from TerraClimate reinforced the reliability of the data, demonstrating that the integration between remote sensing and ANNs is promising for the agroclimatic monitoring of coffee cultivation.

**Keywords:** Remote sensing; Artificial neural networks; Agroclimatic variables.

## **INTRODUÇÃO**

A estimativa precisa de variáveis climáticas, como evapotranspiração, precipitação e déficit hídrico, é fundamental para o planejamento e o manejo sustentável da cafeicultura.

Devido às limitações associadas à realização de medições diretas, a utilização de métodos indiretos tem se consolidado como uma alternativa promissora para a estimativa da evapotranspiração, conforme evidenciado por Sanches et al. (2015) e Paiva et al. (2016). Dentre os diferentes métodos disponíveis, o de Penman-Monteith se destaca por ser recomendado pela *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) e amplamente empregado como referência para a calibração de outras metodologias, em razão de sua eficiência sob distintas condições climáticas. Contudo, Camargo e Camargo (2000) ressaltam que a aplicação desse método pode ser limitada pela indisponibilidade de algumas variáveis meteorológicas, o que torna necessária a adoção de métodos indiretos alternativos, que demandam um conjunto menor de dados.

Tradicionalmente, tais variáveis são obtidas por meio de estações meteorológicas ou de abordagens empíricas, as quais apresentam restrições relacionadas à baixa cobertura espacial e à dificuldade de representar a variabilidade regional. Nesse contexto, estudos mais recentes têm demonstrado que as redes neurais artificiais (RNAs) constituem ferramentas eficientes para a estimativa da evapotranspiração real, sobretudo por sua capacidade de representar relações não lineares entre variáveis climáticas e biofísicas (Zanetti, 2007). Paralelamente, o sensoriamento remoto tem se consolidado como uma abordagem estratégica no monitoramento agroclimático, ao possibilitar a obtenção contínua e espacialmente distribuída de informações sobre o comportamento da vegetação. Por meio da utilização de índices espectrais, é possível caracterizar atributos relacionados ao vigor vegetativo, à estrutura do dossel, ao conteúdo hídrico foliar e à atividade fotossintética, os quais podem

atuar como proxies indiretos dos processos hidrológicos da vegetação, incluindo a evapotranspiração.

Contudo, a relação entre índices espectrais e variáveis climáticas é intrinsecamente não linear, o que limita a aplicação de métodos estatísticos tradicionais. As Redes Neurais Artificiais (RNAs) surgem, portanto, como uma abordagem robusta para modelar essas relações complexas, sendo capazes de integrar múltiplas variáveis de entrada e capturar padrões não lineares com maior precisão. As redes neurais artificiais têm sido amplamente aplicadas em estudos hidrológicos desde a década de 1990, inicialmente em modelagens de precipitação, e posteriormente em aplicações como previsão de vazões, estimativa de evapotranspiração, análise de águas subterrâneas, qualidade da água e séries temporais hidrológicas (Kumar et al., 2011).

Nesse contexto, o avanço dos sensores orbitais, como Landsat e Sentinel-2, ampliou significativamente o potencial do sensoriamento remoto aplicado à modelagem agroclimática. Esses sensores possibilitam a extração de índices espectrais capazes de explorar o comportamento diferencial da reflectância da vegetação, permitindo a inferência indireta de propriedades biofísicas, como vigor vegetativo, biomassa, conteúdo hídrico foliar e atividade fotossintética, os quais estão diretamente associados aos processos de evapotranspiração, déficit hídrico e resposta às condições pluviométricas (Rouse et al., 1974; Tucker, 1979; Bannari et al., 1995). A integração desses índices em modelos baseados em aprendizado de máquina, especialmente redes neurais artificiais, tem se mostrado uma abordagem promissora para capturar as relações não lineares do sistema solo-planta-atmosfera, permitindo estimativas mais robustas e espacialmente detalhadas de variáveis climáticas em ambientes agrícolas.

Apesar dos avanços recentes, ainda são escassos os estudos que avaliam, de forma comparativa, o desempenho dos sensores Landsat e Sentinel-2 na modelagem de variáveis climáticas em sistemas cafeeiros, considerando diferentes períodos sazonais, e analisando a importância relativa dos índices espectrais na arquitetura das redes neurais.

Diante disso, o objetivo deste estudo foi avaliar o potencial de índices espectrais derivados dos sensores Landsat-8/9 e Sentinel-2A, na estimativa de evapotranspiração, precipitação e déficit hídrico, em áreas cafeeiras do município de Barra do Choça (BA), por meio de redes neurais artificiais, considerando os períodos seco, chuvoso e completo.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

### *Delimitação da área de estudo e obtenção dos dados espectrais e climáticos*

O estudo foi realizado em uma lavoura comercial de café arábica (*Coffea arábica*), localizada no município de Barra do Choça, Bahia, 14° 52' Latitude Sul, 40° 39' Longitude Oeste, a uma altitude média de 900 metros. De acordo com a Köppen e Geiger, o clima é classificado como clima subtropical úmido (Cfa), com temperatura média anual em torno de 20.4 °C e uma precipitação anual média de 854 mm. A área avaliada era rodeada nas laterais norte, sul e oeste por talhões de café; e na lateral leste com estrada vicinal de terra. As avaliações em campo foram realizadas mensalmente entre julho de 2021 a julho de 2022.

A área de estudo foi georreferenciada utilizando-se coordenadas obtidas por meio de um receptor GNSS geodésico, da marca Javad, modelo Triumph I. Foi utilizado o método de posicionamento RTK (*Real Time Kinematic*). Os dados foram processados no *software*

Justin, utilizando-se uma base da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) para melhorar a acurácia dos pontos levantados em campo.

#### *Obtenção dos dados satelitais*

Com as geometrias definidas, foi iniciada a extração dos valores médios dos seguintes índices espectrais: *Cellulose Absorption Index* (CAI), *Enhanced Vegetation Index* (EVI), *Normalized Difference Infrared Index* (NDII), *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Photochemical Reflectance Index* (PRI), *Plant Senescence Reflectance Index* (PSR), *Red-Green Ratio* (RGR), *Soil Adjusted Total Vegetation Index* (SATVI) e *Water Content Index* (WCI). Esses índices foram derivados das bibliotecas do Landsat-8/9 e do Sentinel-2A, disponíveis na plataforma GEE, utilizando composições mensais com correção atmosférica para reflectância de superfície (SR).

Simultaneamente, foram extraídas as variáveis climáticas correspondentes à área de estudo: Precipitação (P), Evapotranspiração (ET) e Déficit Hídrico (DH), a partir da coleção TerraClimate, também acessada via GEE. Os dados foram harmonizados em termos de resolução espacial e temporal para garantir a integridade na integração com os índices espectrais.

Os dados foram organizados em três conjuntos distintos, conforme a sazonalidade agrícola da região de estudo, sendo o Período Chuvoso compreendido entre os meses de outubro a março, o Período Seco de abril a setembro, e o Período Completo correspondente ao ciclo anual de janeiro a dezembro. Cada conjunto foi construído separadamente para os

sensores Landsat e Sentinel-2A, com o intuito de avaliar o desempenho comparativo entre os dois sistemas de observação remota, na modelagem das variáveis climáticas.

### *Modelagem por Redes Neurais*

A modelagem das variáveis climáticas foi realizada por meio de Redes Neurais Artificiais do tipo *Perceptron* Multicamadas (MLP), implementadas no *software* IBM SPSS *Statistics*. As redes foram configuradas com uma camada de entrada composta pelos índices espectrais, uma camada oculta e uma camada de saída correspondente à variável climática modelada (ET, P ou DH).

Os dados foram previamente normalizados para evitar dominância de variáveis com maior amplitude numérica. O conjunto de dados foi dividido em três subconjuntos: treinamento (70%), validação (15%) e teste (15%). O algoritmo de retropropagação do erro (*backpropagation*) foi utilizado para o ajuste dos pesos sinápticos, adotando-se funções de ativação não lineares. O desempenho das redes foi avaliado por meio do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), índice de concordância de Willmott, eficiência de Nash–Sutcliffe, erro quadrático médio (RMSE) e erro absoluto médio (MAE).

A Rede Neural Artificial do tipo *Perceptron* Multicamadas (RNA-MLP) é composta por um conjunto de neurônios, organizados em camadas interconectadas por pesos sinápticos, sendo capaz de representar relações complexas e não lineares entre vetores de entrada e saída (Gardner & Dorling, 1998). Cada neurônio realiza a combinação linear das entradas ponderadas, seguida da aplicação de uma função de ativação não linear, responsável por introduzir flexibilidade ao modelo e permitir a captura de padrões não lineares nos dados.

Para a validação dos dados climáticos empregados neste estudo, foi inicialmente realizada a correlação de Pearson entre a precipitação estimada pelo conjunto de dados TerraClimate (PC) e os dados observados de precipitação (PE), provenientes da estação meteorológica mais próxima e de referência para o município de Barra do Choça–BA, localizada em Vitória da Conquista–BA, com o objetivo de avaliar o grau de concordância linear entre as estimativas espaciais e as medições pontuais em superfície. Como etapa complementar de validação, as estimativas de evapotranspiração provenientes do TerraClimate (TC) foram comparadas com a evapotranspiração potencial, calculada pelo método empírico de *Thornthwaite* (TT), com base em dados observados, por meio do coeficiente de correlação de Pearson, considerando séries temporais mensais, a fim de verificar a consistência e a confiabilidade das estimativas de evapotranspiração utilizadas na modelagem.

O método de *Thornthwaite* foi adotado por sua ampla aplicação em estudos agrometeorológicos e climatológicos, especialmente em regiões com disponibilidade limitada de dados meteorológicos, uma vez que utiliza apenas a temperatura média do ar como variável de entrada. Além disso, trata-se de um método clássico, consolidado na literatura, frequentemente empregado como referência em análises comparativas e estudos de balanço hídrico climatológico. A utilização do *Thornthwaite*, neste estudo, permitiu verificar a consistência das estimativas de evapotranspiração do TerraClimate em escala regional, assegurando maior confiabilidade às análises subsequentes, realizadas por meio das redes neurais artificiais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

*Importância relativa dos índices espectrais na modelagem da evapotranspiração, precipitação e déficit hídrico em áreas cafeeiras*

A aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNA) permitiu modelar três variáveis climáticas: Evapotranspiração (ET), Precipitação (P) e Déficit Hídrico (DH), com base em índices espectrais derivados de dados dos sensores Landsat-8/9 e Sentinel-2, para o período de 2019 a 2023, na região produtora de café em Barra do Choça (BA). A modelagem foi segmentada em três períodos: completo (anual), seco (abril a setembro) e chuvoso (outubro a março), considerando a variabilidade sazonal da resposta da vegetação às condições climáticas.

A análise da importância relativa das variáveis independentes dentro da arquitetura da rede neural é um recurso fundamental para interpretação dos modelos de previsão climática, baseados em dados espectrais, já que permitem quantificar o peso individual de cada entrada na geração da saída (variável dependente), revelando quais índices espectrais têm maior influência na predição dos processos hidrológicos. Neste trabalho, a análise da importância das variáveis independentes revelou padrões consistentes com o comportamento fisiológico e fenológico da vegetação, frente ao regime hídrico, levando em consideração o valor de 20%.

A avaliação da importância das variáveis em redes neurais é amplamente reconhecida como etapa decisiva para aprimorar a acurácia e interpretar os modelos. Conforme destacado por Giordano et al. (2014), a identificação das variáveis mais relevantes é fundamental para a robustez do modelo. Nos modelos neurais aplicados neste estudo, a hierarquização da importância dos índices espectrais permitiu priorizar aqueles com maior influência na

estimativa da evapotranspiração, precipitação e déficit hídrico, elevando a precisão das previsões.

Na Tabela 1, observa-se que, para a estimativa da evapotranspiração no período completo, os índices de maior importância foram o CAI (100%), seguido pelo SATVI (80,8%), NDII (71,2%) e NDVI (26,4%), evidenciando a relevância conjunta da estrutura do dossel, do conteúdo hídrico da vegetação e da cobertura do solo na modelagem da evapotranspiração ao longo do ciclo anual. No período seco, destacaram-se novamente o CAI (100%) e o NDII (97,1%), acompanhados pelo NDVI (77,8%) e WCI (62,0%), reforçando a sensibilidade desses índices à biomassa ativa e às condições de estresse hídrico da cultura. Já no período chuvoso, o WCI (100%) apresentou a maior importância relativa, seguido por RGR (65,1%), PSR (57,3%) e NDVI (47,2%), refletindo a predominância de processos associados à elevada disponibilidade hídrica, ao vigor vegetativo e à intensificação da transpiração durante a estação chuvosa.

As estimativas de evapotranspiração, obtidas a partir dos dados do satélite Sentinel, evidenciam uma forte dependência de índices associados ao vigor da vegetação, à estrutura do dossel e ao conteúdo hídrico foliar, com variações bem definidas entre os períodos analisados. No período completo, observa-se uma contribuição de índices estruturais e hídricos, com destaque para o CAI (100%), o SATVI (80,8%) e o NDII (71,2%), enquanto o NDVI apresentou menor, porém relevante, contribuição (26,5%). Esse conjunto de índices indica que, ao longo do ciclo anual, a evapotranspiração é controlada pela interação entre a estrutura do dossel, a cobertura do solo e o conteúdo de água na vegetação.

Durante o período seco, intensifica-se a relevância dos índices associados ao conteúdo de água e ao estresse hídrico da vegetação, com destaque para o NDII (100%) e o CAI

(97,2%), seguidos pelo RGR (77,8%), WCI (62%) e pelo NDVI (40%). Esse padrão demonstra a elevada sensibilidade do Sentinel à resposta espectral do dossel, sob condições de restrição hídrica, captando alterações fisiológicas relacionadas à redução da transpiração e à diminuição da atividade fotossintética.

No período chuvoso, os índices ligados ao vigor vegetativo e à atividade fotossintética assumem maior importância na estimativa da evapotranspiração, com destaque para o EVI (100%), seguido pelo NDII (82,3%) PSR (57,3%), pelo RGR (65,1%) e pelo NDVI (47,1%). Esses resultados indicam que, sob elevada disponibilidade hídrica, a evapotranspiração passa a ser fortemente modulada pela biomassa ativa, pela densidade do dossel e pela intensificação dos processos fotossintéticos, refletindo condições favoráveis ao desenvolvimento do cafeeiro e ao aumento das taxas de transpiração.

Esse comportamento é consistente com os resultados observados por Jayakumar et al. (2016), que utilizaram regressão estatística no SPSS para prever a produtividade de *Coffea arabica* e *Coffea canephora* com base em variáveis climáticas, como temperatura, umidade e precipitação, evidenciando a relevância das condições ambientais na determinação do desempenho da cultura. A presente pesquisa avança nesse contexto ao empregar redes neurais artificiais associadas a índices espectrais derivados do Sentinel, permitindo capturar relações não lineares entre a resposta espectral da vegetação e a evapotranspiração, com ganhos em desempenho estatístico e maior detalhamento espacial das estimativas.

Na modelagem do déficit hídrico com dados do satélite Sentinel, os resultados indicam que os índices espectrais respondem de forma distinta, conforme a sazonalidade climática, refletindo adequadamente os períodos de maior e menor restrição hídrica. No período completo, observa-se a predominância de índices associados à estrutura da vegetação

e ao balanço hídrico do dossel, com destaque para o PSR presente em 100% das arquiteturas modeladas, seguido pelo CAI (85,7%) e pelo RGR (75,9%) e PRI (65,6%).

No período seco, os índices associados à resposta fisiológica e estrutural da vegetação ao estresse hídrico tornam-se dominantes, destacando-se o EVI (100%), o PRI (87,7%) e o RGR (57,6%). Esses resultados indicam que, sob condições de restrição hídrica, o déficit hídrico é refletido, principalmente por alterações no vigor vegetativo, na eficiência do uso da luz e na estrutura do dossel. Em contrapartida, no período chuvoso, observa-se uma redução da importância relativa dos índices tradicionalmente associados ao estresse hídrico, com o PSR apresentando a maior relevância (100%), seguido pelo CAI (33,6%) e pelo RGR (31,2%). Esse padrão indica menor limitação hídrica no sistema solo–planta–atmosfera, com o déficit hídrico sendo condicionado principalmente por fatores atmosféricos e pela dinâmica da evapotranspiração, mesmo em condições de elevada disponibilidade de água no solo.

Resultados semelhantes foram observados por Maciel et al. (2020), que demonstraram que o potencial hídrico foliar pode ser estimado com precisão, a partir de imagens orbitais, com destaque para o NDVI, que apresentou correlação significativa ( $R^2 \approx 0,85$ ) com medições de campo. Esses achados reforçam que a capacidade dos índices espectrais em representar o estado hídrico das plantas respalda sua aplicação em modelos baseados em redes neurais artificiais, como os empregados neste estudo, sobretudo para a estimativa de variáveis hidrológicas, como evapotranspiração e déficit hídrico.

Para a variável precipitação, os resultados obtidos a partir das redes neurais com dados Sentinel revelam uma relação indireta, porém consistente, entre os índices espectrais e os regimes pluviométricos. No período completo, destacam-se índices associados à resposta integrada da vegetação às condições climáticas acumuladas, indicando que a precipitação

influencia o comportamento espectral do dossel de forma cumulativa ao longo do ano. Durante o período seco, a menor variabilidade da precipitação limita a resposta direta dos índices, tornando mais evidentes aqueles relacionados à resiliência da vegetação e à manutenção da biomassa sob escassez hídrica. Já no período chuvoso, os índices ligados ao vigor vegetativo, à cobertura do solo e à intensificação da atividade fotossintética assumem maior relevância, refletindo a rápida resposta do cafeeiro às chuvas e à reposição da umidade no perfil do solo.

De modo geral, os resultados indicam que, mesmo em condições de maior umidade (período chuvoso), sinais de estresse hídrico residual podem ser detectados por meio de índices relacionados à senescência e à estrutura da vegetação. Observa-se ainda que, embora os modelos com dados Sentinel apresentem elevada robustez no período seco para a estimativa de evapotranspiração, esse desempenho não se repete integralmente para o déficit hídrico, cujos resultados se mantiveram estáveis, entretanto, com acurácia moderada. Tal comportamento pode estar associado à menor variabilidade hídrica, efetivamente capturada pelo sensor, nesse intervalo temporal.

Na Tabela 2, observa-se que, para a modelagem da evapotranspiração obtida por meios de índices espectrais derivados do satélite Landsat, no período completo (CTO), o índice de maior importância relativa foi o EVI (100%), seguido por NDVI (60,3%) e WCI (49,0%), evidenciando a forte influência do vigor vegetativo, da densidade do dossel e do estado hídrico da vegetação na estimativa desse processo. No período seco, destacaram-se NDII (100%), CAI (97,9%) e PSR (75,7%), indicando elevada sensibilidade dos índices associados ao conteúdo de água e à condição estrutural da vegetação em cenários de estresse hídrico. Já no período chuvoso, os maiores valores de importância foram observados para

EVI (100%), WCI (99,5%), PSR (99,6%) e SATVI (88,6%), refletindo a predominância de índices relacionados à biomassa, vigor e eficiência fotossintética sob condições de maior disponibilidade hídrica.

Para a variável precipitação, no período completo, o índice PSR apresentou a maior importância (100%), seguido por NDVI (89,6%) e WCI (48,8%), sugerindo uma forte relação entre a resposta espectral da vegetação e a variabilidade pluviométrica acumulada. No período seco, destacaram-se os índices PRI (100%), PSR (90,8%) e WCI (94,5%), indicando a relevância de métricas associadas à eficiência do uso da radiação e ao estado fisiológico da vegetação, sob condições de restrição hídrica. Já no período chuvoso, os maiores valores de importância foram atribuídos ao PRI (100%), EVI (51,0%) e NDVI (67,8%), evidenciando a resposta espectral do dossel em condições de elevada disponibilidade hídrica e crescimento vegetativo.

As estimativas de evapotranspiração, obtidas a partir dos dados do satélite Landsat, evidenciam a importância de índices espectrais, associados tanto à estrutura da vegetação quanto ao conteúdo hídrico do dossel, com respostas distintas em função da sazonalidade climática. No período completo, observa-se a predominância de índices estruturais e funcionais, relacionados à densidade foliar e à atividade fotossintética, indicando que a evapotranspiração anual é fortemente condicionada pelo vigor da vegetação ao longo do ciclo produtivo do cafeeiro. Durante o período seco, destaca-se o aumento da relevância de índices sensíveis ao conteúdo de água e ao estresse hídrico, refletindo a capacidade do Landsat em captar alterações espectrais associadas à redução da transpiração e às respostas fisiológicas das plantas sob limitação hídrica. No período chuvoso, os índices relacionados ao vigor vegetativo e à biomassa ativa assumem maior importância, acompanhando o aumento da

transpiração decorrente da maior disponibilidade de água no solo e das condições climáticas favoráveis ao crescimento vegetativo.

Resultados semelhantes foram reportados por Silva et al. (2024), que avaliaram genótipos de *Coffea arabica* sob diferentes regimes hídricos, utilizando índices espectrais como NDVI, OSAVI, MCARI, NDRE e GDVI, observando forte correlação com variáveis fisiológicas, incluindo transpiração e fotossíntese. Os autores destacaram variações significativas nos valores dos índices entre os níveis de irrigação, permitindo a discriminação de genótipos com maior adaptação ao estresse hídrico. Esses achados reforçam a consistência do uso de índices espectrais, como proxies de processos hidrológicos da vegetação, corroborando a abordagem adotada neste estudo para a modelagem da evapotranspiração e do déficit hídrico por meio de redes neurais aplicadas a dados orbitais.

Em relação ao déficit hídrico, no período completo, os índices mais relevantes foram NDVI (100%), PSR (96,5%) e WCI (51,9%), demonstrando a capacidade desses indicadores em representar o balanço entre oferta e demanda hídrica. No período seco, destacaram-se NDII (100%), PSR (90,7%) e PRI (65,6%), reforçando a eficiência desses índices na detecção de estresse hídrico. No período chuvoso, o PRI apresentou a maior importância (100%), seguido por CAI (53,9%) e EVI (46,6%), sugerindo maior influência de variáveis fisiológicas e estruturais da vegetação na modulação do déficit hídrico, sob condições de maior disponibilidade de água no solo. Na modelagem do déficit hídrico, com dados Landsat, os resultados indicam uma forte sensibilidade dos índices espectrais às variações sazonais da disponibilidade de água, especialmente nos períodos de maior restrição hídrica. No período completo, o déficit hídrico é explicado por uma combinação de índices estruturais e índices

relacionados ao balanço hídrico da vegetação, sugerindo que o estresse hídrico anual reflete tanto limitações climáticas quanto variações na cobertura e no desenvolvimento do dossel.

Durante o período seco, os índices associados ao conteúdo de água na vegetação e à resposta espectral ao estresse hídrico tornam-se predominantes, demonstrando a capacidade do Landsat em detectar alterações fisiológicas do cafeeiro sob déficit prolongado, como fechamento estomático e redução da atividade transpiração. Em contraste, no período chuvoso, observa-se uma redução da influência desses índices, indicando menor limitação hídrica e maior controle atmosférico sobre o balanço hídrico, com o déficit sendo condicionado principalmente por variações na demanda evaporativa. Nunes et al. (2023) demonstraram que índices espectrais, como PRI e NDVI, podem ser eficazes para estimar o potencial hídrico foliar de plantas de café por meio de redes neurais, obtendo índice de confiança de aproximadamente 0,855. Esses resultados corroboram a eficiência do uso de índices espectrais combinados com redes neurais como ferramenta robusta para estimativas hidrológicas em cultura do café, alinhando-se com os modelos de evapotranspiração e déficit hídrico desenvolvidos neste estudo. Santos et al. (2021) demonstraram que redes neurais artificiais são eficientes na modelagem de variáveis climáticas, com resultados superiores aos modelos de regressão linear. Esses achados corroboram o uso de RNA na presente pesquisa, que empregou essa técnica para estimar evapotranspiração, precipitação e déficit hídrico com base em índices espectrais, mostrando a adaptabilidade e precisão da metodologia no contexto agroclimáticos.

Para a variável precipitação, os resultados derivados das redes neurais com dados Landsat revelam uma relação indireta, porém consistente, entre os índices espectrais e os regimes pluviométricos. No período completo, os índices associados à resposta integrada da

vegetação ao longo do ano apresentam maior relevância, indicando que a precipitação influencia o comportamento espectral do dossel de forma cumulativa, por meio de seus efeitos sobre o crescimento vegetativo e a umidade do solo. Durante o período seco, a menor variabilidade da precipitação reduz a capacidade de detecção direta de seus efeitos, tornando mais evidentes os índices relacionados à manutenção da biomassa e à resiliência da vegetação, sob condições de escassez hídrica. Já no período chuvoso, os índices ligados ao vigor da vegetação, à cobertura do solo e à intensificação da atividade fotossintética tornam-se mais relevantes, refletindo a resposta rápida do cafeeiro ao aumento da disponibilidade hídrica.

#### *Análise das métricas estatísticas de desempenho das redes neurais artificiais na estimativa de variáveis climáticas*

A acurácia dos modelos foi avaliada por meio das métricas  $R^2$ , índice de concordância de Willmott (d), erro quadrático médio (RMSE), erro absoluto médio (MAE) e coeficiente de Nash-Sutcliffe (Tabela 3).

Os resultados indicaram que o sensor Sentinel-2 apresentou desempenho superior na estimativa da evapotranspiração em comparação ao Landsat. Para o Sentinel, os melhores ajustes ocorreram tanto no período seco ( $R^2 = 0,76$ ) quanto no chuvoso ( $R^2 = 0,78$ ), com altos valores de concordância (Willmott = 0,93) e baixos erros (RMSE = 56,41 mm na seca e 69,79 mm na chuva). O MAE também foi satisfatório, variando entre 45,10 e 50,63 mm, refletindo precisão na modelagem. Kittichotsawat et al. (2022) demonstraram que as redes neurais artificiais apresentam desempenho superior às abordagens lineares tradicionais, como a regressão múltipla, na modelagem de variáveis agrícolas complexas, como a produtividade

do café. A aplicação da ANN permitiu capturar interações não lineares entre variáveis climáticas, elevando a precisão preditiva do modelo.

O Landsat apresentou seus melhores desempenhos no chuvoso ( $R^2 = 0,61$ , Willmott =  $0,85$ , MAE =  $58,95$  mm), seguido pelo período seco ( $R^2 = 0,61$ , Willmott =  $0,85$ ). No entanto, os erros foram mais elevados (RMSE =  $72,69$  mm no período chuvoso e  $72,50$  no período seco). A diferença entre os sensores pode ser atribuída à resolução temporal e espectral mais favorável do Sentinel, capaz de captar o vigor vegetativo e os ciclos hidrológicos com mais frequência.

Na modelagem da precipitação, o Sentinel destacou-se novamente no período chuvoso, com o melhor desempenho geral do estudo ( $R^2 = 0,78$ , Willmott =  $0,93$ , MAE =  $29,70$  mm). Este resultado evidencia a eficácia das bandas red-edge em captar a rápida resposta da vegetação a eventos pluviométricos intensos. Em contraste, no período seco, a modelagem foi menos eficaz para ambos os sensores, especialmente para o Sentinel ( $R^2 = 0,16$ ). Em contrapartida, o Landsat obteve melhor desempenho que o Sentinel no período seco ( $R^2 = 0,53$ ). No entanto, no período chuvoso, seu desempenho foi ligeiramente mais fraco ( $R^2 = 0,46$ ), sugerindo menor sensibilidade à resposta vegetativa imediata.

O déficit hídrico apresentou comportamento distinto entre os sensores. O Landsat teve seu melhor desempenho no período seco ( $R^2 = 0,83$ , Willmott =  $0,93$ , MAE =  $81,22$  mm), sendo este o melhor ajuste entre todas as combinações analisadas. Por outro lado, o Sentinel apresentou desempenho estável e moderado nos três períodos, com  $R^2$  de  $0,47$  em todos os períodos e Willmott variando entre  $0,75$  e  $0,81$ . Messias et al. (2012) utilizaram redes neurais artificiais para modelar a influência de compostos químicos na qualidade sensorial do café. Na presente pesquisa, verificou-se que a aplicação de RNAs também é

eficaz na predição de variáveis climáticas a partir de índices espectrais, com desempenho superior aos métodos estatísticos lineares tradicionais.

Walls et al. (2020) demonstraram que a modelagem da evapotranspiração por meio de RNAs apresenta desempenho superior, quando comparada a métodos empíricos tradicionais, sobretudo por sua aptidão em capturar relações não lineares entre variáveis ambientais. De forma semelhante, os resultados obtidos indicam que a evapotranspiração é fortemente condicionada pela variabilidade climática e por respostas integradas do sistema solo-planta-atmosfera, reforçando a natureza multifatorial desse processo. A segmentação sazonal adotada (períodos seco, chuvoso e completo) permitiu identificar variações consistentes no desempenho das RNAs e na importância relativa dos índices espectrais, de acordo com a influência temporal destacada no estudo de referência. Dessa forma, os achados confirmam que abordagens baseadas em aprendizado de máquina constituem ferramentas robustas para a modelagem da evapotranspiração em sistemas agrícolas, especialmente quando integradas a dados de sensoriamento remoto, possibilitando maior detalhamento espacial e melhor interpretação fisiológica das respostas da vegetação.

Os dados indicam que o Sentinel é mais preciso para modelar variáveis associadas à resposta vegetativa rápida e disponibilidade hídrica (Evapotranspiração e Precipitação), enquanto o Landsat se destaca em condições de estresse hídrico mais intenso e prolongado (Déficit Hídrico).

A captação de informações espectrais, durante a estação seca, apresentou limitações, especialmente no que se refere à acurácia dos modelos de rede neural em determinadas estimativas. A presença de material seco, senescente ou solo nu aumenta a variabilidade espectral, o que pode dificultar a resposta consistente dos índices biofísicos, principalmente

aqueles relacionados à atividade fotossintética. No período seco, há uma maior interferência atmosférica por nuvens, já que é comum a ocorrência de neblinas na região, o que afeta a qualidade das imagens ópticas captadas pelos sensores do Landsat e Sentinel-2.

Por outro lado, os resultados dos modelos gerados para o período chuvoso apresentaram maior estabilidade, evidenciando uma melhor performance dos sensores remotos nesse intervalo temporal. A maior disponibilidade hídrica favorece o desenvolvimento vegetativo das culturas, o que se reflete em índices espectrais mais precisos, como NDVI, EVI e NDII, ampliando a capacidade de detecção dos satélites em relação à dinâmica hidrológica e fisiológica das plantas. Além disso, a maior homogeneidade do dossel vegetativo, durante a estação chuvosa, reduz a variabilidade espectral entre as áreas analisadas, contribuindo para a consistência das estimativas.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram os achados de Zanetti (2007), que demonstraram a eficiência das redes neurais artificiais na estimativa da evapotranspiração, evidenciando sua capacidade de capturar relações não lineares entre variáveis ambientais e hidrológicas. De forma semelhante, observou-se que índices espectrais associados ao vigor da vegetação e ao conteúdo hídrico do dossel apresentaram elevada importância relativa, reforçando a ideia de que a evapotranspiração é fortemente controlada pelo estado fisiológico da vegetação. Além disso, assim como reportado na literatura, os resultados evidenciam uma clara dependência sazonal, com diferentes conjuntos de variáveis assumindo maior relevância nos períodos seco e chuvoso. O presente estudo avança ao integrar dados orbitais de alta resolução espacial com redes neurais artificiais, permitindo maior detalhamento da variabilidade espacial e temporal da evapotranspiração em áreas cafeeiras.

### *Correlações entre as estimativas de evapotranspiração e precipitação do TerraClimate*

Os resultados da correlação de Pearson entre a precipitação estimada pelo conjunto de dados TerraClimate (PC) e os registros observados na estação meteorológica (PE) indicam elevada coerência temporal entre as duas fontes de dados ao longo do período analisado. Os coeficientes de correlação revelam concordância moderada a forte na maioria dos anos, com valores superiores a 0,70 em diversos pares anuais, destacando-se PC\_2016 × PE\_2016 ( $r = 0,93$ ), PC\_2020 × PE\_2020 ( $r = 0,87$ ) e PC\_2022 × PE\_2022 ( $r = 0,89$ ). Esses resultados evidenciam a capacidade do TerraClimate em representar adequadamente a variabilidade interanual da precipitação na região de Vitória da Conquista (Figura 2).

A consistência interna observada, tanto nas séries do TerraClimate quanto nos dados da estação meteorológica, reforça a confiabilidade das informações utilizadas. Enquanto o TerraClimate apresenta maior suavização temporal, característica esperada de produtos climáticos interpolados espacialmente, os dados observados refletem com maior sensibilidade a variabilidade local e a ocorrência de eventos extremos. As correlações mais baixas ou negativas observadas em alguns anos são atribuídas principalmente à natureza pontual das medições em estação e à elevada heterogeneidade espacial da precipitação, especialmente em regimes dominados por chuvas convectivas.

O desempenho observado neste estudo é consistente com resultados reportados na literatura. Abatzoglou et al. (2018) destacam que a precipitação do TerraClimate é obtida a partir da integração de dados observacionais de estações meteorológicas com produtos climáticos globais, sendo posteriormente ajustada e validada por meio de comparações estatísticas com registros observados, o que permite a adequada reprodução dos padrões espaciais e temporais da precipitação em diferentes regiões. De forma semelhante, Hanchane

et al. (2023) avaliaram o desempenho da precipitação mensal do TerraClimate por meio da comparação direta com dados de estações meteorológicas, utilizando métricas como correlação, viés e erro médio, e constataram que o produto é capaz de representar satisfatoriamente a sazonalidade e a variabilidade pluviométrica regional, ainda que apresente limitações pontuais associadas às diferenças de escala espacial.

A análise da matriz de correlação de Pearson entre as estimativas de evapotranspiração, provenientes do conjunto de dados TerraClimate (TC) e do método empírico de Thornthwaite (TT), evidenciou elevada concordância entre ambas as abordagens no período de 2014 a 2023. De modo geral, os coeficientes de correlação apresentaram valores positivos elevados e estatisticamente significativos ( $p \leq 0,05$ ), indicando que os dois métodos são capazes de representar, de forma consistente, os padrões temporais da evapotranspiração na área de estudo (Figura 3).

As correlações interanuais internas de cada método revelaram alta estabilidade temporal das estimativas. Na comparação direta entre TC e TT, os coeficientes de correlação foram majoritariamente classificados como fortes a muito fortes, frequentemente superiores a 0,75. Destacam-se correlações elevadas entre pares como TC\_2023 e TT\_2023 ( $r = 0,96$ ), TC\_2019 e TT\_2019 ( $r = 0,91$ ) e TC\_2020 e TT\_2020 ( $r = 0,90$ ), evidenciando elevada coerência entre estimativas derivadas de abordagens metodológicas distintas. Esses resultados indicam que, apesar das diferenças conceituais, com o TerraClimate integrando múltiplas variáveis climáticas e o Thornthwaite baseando-se essencialmente na temperatura, ambos os métodos respondem de maneira semelhante às variações climáticas interanuais observadas na região.

No contexto desta pesquisa, os elevados coeficientes de correlação observados reforçam a confiabilidade do TerraClimate como fonte de dados climáticos para a análise da evapotranspiração, ao mesmo tempo em que validam o uso do método de Thornthwaite como referência empírica comparativa. A concordância entre as abordagens respalda a utilização dos dados do TerraClimate na modelagem da evapotranspiração por meio de redes neurais artificiais, assegurando coerência climática e consistência temporal às estimativas obtidas.

Os resultados obtidos corroboram as conclusões apresentadas por Ongaratto & Bortolin (2021), que destacaram as limitações dos métodos empíricos tradicionais na estimativa da evapotranspiração, particularmente em contextos de elevada variabilidade climática e sazonal. De forma consistente, observa-se que a evapotranspiração apresenta forte dependência de relações não lineares, as quais são mais adequadamente representadas por modelos multivariados. A segmentação sazonal adotada nesta pesquisa evidenciou variações consistentes no desempenho dos modelos e na importância relativa dos índices espectrais, confirmando a influência do regime hídrico sobre a dinâmica da evapotranspiração. Embora o método de Thornthwaite se mostre útil como referência climática, os resultados demonstram que a incorporação de índices espectrais e redes neurais artificiais permite capturar a variabilidade espacial e fisiológica da cultura do cafeeiro de forma mais robusta e detalhada.

## CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo demonstram que a integração de índices espectrais, derivados dos sensores Landsat e Sentinel-2A com Redes Neurais Artificiais, constitui uma abordagem eficiente para a modelagem de variáveis climáticas em áreas cafeeiras. A análise da importância relativa das variáveis evidenciou que os índices associados ao conteúdo hídrico da vegetação, ao vigor do dossel e à estrutura foliar desempenham papel central na estimativa da evapotranspiração e do déficit hídrico, enquanto índices relacionados à eficiência fotossintética e à senescência apresentaram maior relevância na modelagem da precipitação.

O sensor Sentinel-2A destacou-se pela maior precisão na estimativa da evapotranspiração e da precipitação, especialmente nos períodos chuvoso e seco, em função de sua elevada resolução espectral e temporal. Por outro lado, o Landsat apresentou desempenho superior na modelagem do déficit hídrico, sob condições de estresse hídrico mais intenso, evidenciando sua capacidade de captar respostas espectrais associadas à limitação hídrica prolongada.

A elevada correlação observada entre as estimativas de evapotranspiração do TerraClimate e do método de Thornthwaite reforça a confiabilidade dos dados climáticos utilizados e respalda sua aplicação em modelos baseados em aprendizado de máquina. Adicionalmente, a validação da precipitação, por meio da correlação com os dados observados em estação meteorológica, evidenciou concordância consistente entre as estimativas do TerraClimate e as medições de superfície, indicando adequada representação da variabilidade pluviométrica regional.

De forma geral, os resultados indicam que a aplicação de redes neurais associadas a índices espectrais representa uma alternativa promissora para o monitoramento agroclimático da cafeicultura, com potencial de subsidiar estratégias de manejo hídrico, planejamento agrícola e avaliação de impactos das mudanças climáticas em escala regional.

## REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, J.T.; DOBROWSKI, S.Z.; PARKS, S.A.; HEGEWISCH, K.C. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, London, v.5, article 170191, 2018. Available from: <http://dx.doi.org/10.1038/sdata.2017.191>. Accessed: Oct. 15, 2025. doi: 10.1038/sdata.2017.191.
- BANNARI, A.; MORIN, D.; BON, F.; HUETE, A.R. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, London, v.13, n.1-2, p.95-120, 1995. Available from: <http://dx.doi.org/10.1080/02757259509532298>. Accessed: Oct. 18, 2025. doi: 10.1080/02757259509532298.
- CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Bragantia*, Campinas, v.59, n.2, p.125-137, 2000. Available from: <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052000000200002>. Accessed: Oct. 20, 2025. doi: 10.1590/S0006-87052000000200002.
- GARDNER, M.W.; DORLING, S.R. Artificial neural networks (the multilayer perceptron) - a review of applications in the atmospheric sciences. *Atmospheric Environment*, Oxford, v.32, n.14-15, p.2627-2636, 1998. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310\(97\)00447-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1352-2310(97)00447-0). Accessed: Nov. 02, 2025. doi: 10.1016/S1352-2310(97)00447-0.
- GIORDANO, F.; LA ROCCA, M.; PERNA, C. Input variable selection in neural network models. *Communications in Statistics – Theory and Methods*, London, v.43, n.4, p.735-750, 2014. Available from: <http://dx.doi.org/10.1080/03610926.2013.804567>. Accessed: Nov. 05, 2025. doi: 10.1080/03610926.2013.804567.
- HANCHANE, M. et al. Performance evaluation of TerraClimate monthly rainfall data after bias correction in the Fes-Meknes region (Morocco). *Climate*, Basel, v.11, n.6, p.120, 2023. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/cli11060120>. Accessed: Nov. 10, 2025. doi: 10.3390/cli11060120.
- JAYAKUMAR, M.; RAJAVEL, M.; SURENDRAN, U. Climate-based statistical regression models for crop yield forecasting of coffee in humid tropical Kerala, India. *International Journal of Biometeorology*, Berlin, v.60, p.1943-1952, 2016. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s00484-016-1181-4>. Accessed: Nov. 12, 2025. doi: 10.1007/s00484-016-1181-4.
- MACIEL, D.A. et al. Leaf water potential of coffee estimated by Landsat-8 images. *PLOS ONE*, San Francisco, v.15, n.3, e0230013, 2020. Available from: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0230013>. Accessed: Nov. 18, 2025. doi: 10.1371/journal.pone.0230013.
- NUNES, P.H. et al. Predicting coffee water potential from spectral reflectance indices with neural networks. *Smart Agricultural Technology*, Amsterdam, v.4, e100213, 2023.

Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atech.2023.100213>. Accessed: Nov. 22, 2025. doi: 10.1016/j.atech.2023.100213.

ONGARATTO, J.M.; BORTOLIN, T.A. Comparação entre métodos de estimativa de evapotranspiração de referência no município de São José dos Ausentes (RS), Brasil. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v.26, n.5, 2021. Available from: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-415220190196>. Accessed: Nov. 25, 2025. doi: 10.1590/S1413-415220190196.

PAIVA, C.M.S.; PINHEIRO, A.S. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para fins de manejo da irrigação. *Anuário do Instituto de Geociências*, Rio de Janeiro, v.39, n.1, p.42-51, 2016. Available from: [http://dx.doi.org/10.11137/2016\\_1\\_42\\_51](http://dx.doi.org/10.11137/2016_1_42_51). Accessed: Dec. 02, 2025. doi: 10.11137/2016\_1\_42\_51.

ROUSE, J.W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *THIRD EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM*, 1974, Washington, DC. Proceedings... Washington, DC: NASA, 1974. p.309-317. (NASA SP-351).

SANCHES, F.M. et al. Estimativa da evapotranspiração de referência na região norte do Brasil. *Revista de Ciências Agroambientais, Alta Floresta*, v.13, n.2, p.19-31, 2015. Available from: <http://dx.doi.org/10.5327/rcaa.v13i2.1179>. Accessed: Dec. 05, 2025. doi: 10.5327/rcaa.v13i2.1179.

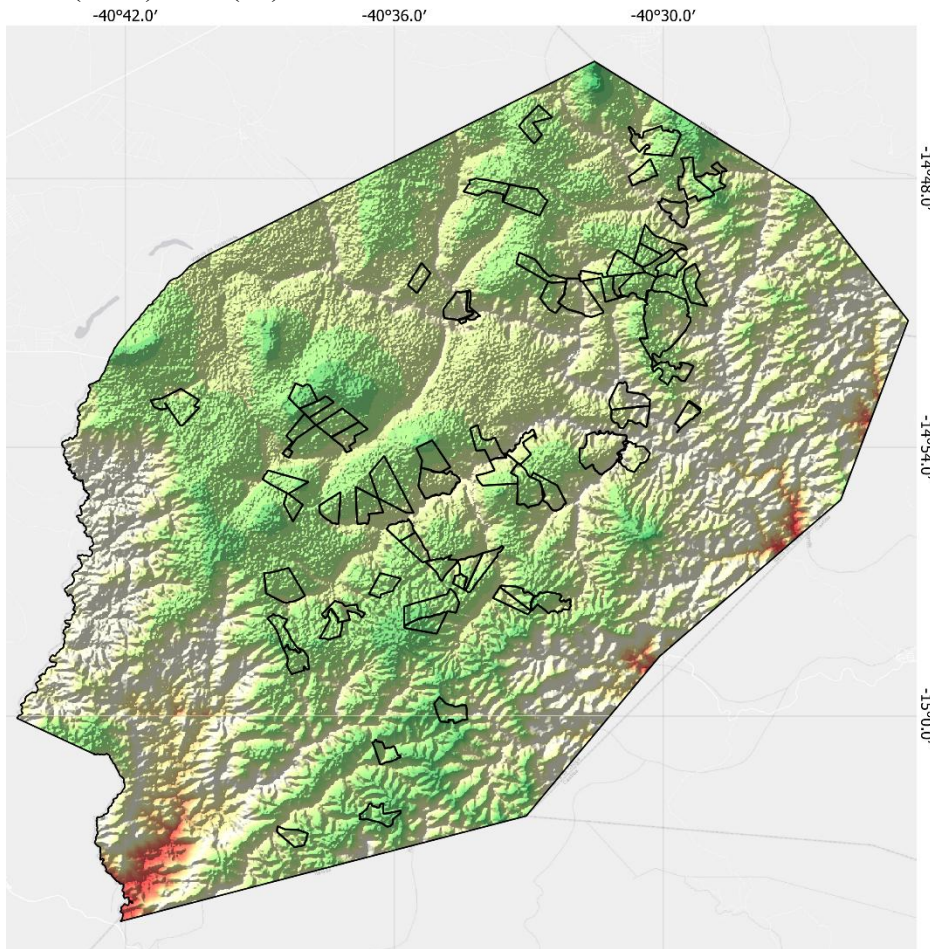
SANTOS, P.A.B. et al. Air temperature estimation techniques in Minas Gerais state, Brazil, Cwa and Cwb climate regions according to the Köppen-Geiger climate classification system. *Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.45, e023920, 2021. Available from: <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202145023920>. Accessed: Dec. 08, 2025. doi: 10.1590/1413-7054202145023920.

SILVA, P.C. et al. Multispectral images for drought stress evaluation of arabica coffee genotypes under different irrigation regimes. *Sensors*, Basel, v.21, n.6, 2021. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/s21062021>. Accessed: Dec. 12, 2025. doi: 10.3390/s21062021.

TUCKER, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, Amsterdam, v.8, n.2, p.127-150, 1979. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](http://dx.doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0). Accessed: Dec. 15, 2025. doi: 10.1016/0034-4257(79)90013-0.

WALLS, S. et al. Prediction of actual evapotranspiration by artificial neural network models using data from a Bowen ratio energy balance station. *Neural Computing and Applications*, London, v.32, p.14001-1418, 2020. Available from: <http://dx.doi.org/10.1007/s00521-020-04749-2>. Accessed: Dec. 18, 2025. doi: 10.1007/s00521-020-04749-2.

ZANETTI, S.S. et al. Estimating evapotranspiration using artificial neural network and minimum climatological data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Reston, v.133, n.2, p.83-89, 2007. Available from: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:2\(83\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:2(83)). Accessed: Dec. 20, 2025. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:2(83).



**Localização**

- Barra do Choça
- Limite estado Bahia

- Fazendas selecionadas
- Limites municipais
- Barra do Choça

**Altitude (m)**

- 971
- 389

Fonte de dados: limites municipais e estaduais (IBGE, 2022).

Datum: SIRGAS 2000, 24S

Elaboração: Ingrid Thalia Prado de Castro

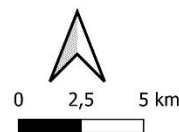


Figura 1- Mapa de localização da área de estudo, destacando as fazendas selecionadas no município de Barra do Choça, situado na região do Planalto da Conquista, estado da Bahia, Brasil.

Tabela 1. Importância relativa (%) dos índices espectrais na modelagem de variáveis climáticas: Evapotranspiração, Precipitação e Déficit Hídrico, por meio de redes neurais artificiais, utilizando imagens do satélite Sentinel-2A, segmentadas por períodos: completo (CTO), seco e chuvoso, para áreas cafeeiras em Barra do Choça (BA), no intervalo de 2019 a 2023.

	SENTINEL								
	EVAPOTRANSPIRAÇÃO			PRECIPITAÇÃO			DÉFICIT HÍDRICO		
	P. CTO	P. Seco	P. Chuvoso	P. CTO	P. Seco	P. Chuvoso	P. CTO	P. Seco	P. Chuvoso
<b>CAI</b>	100	97,2	17,8	27,1	19,1	29,1	85,7	18,0	33,6
<b>EVI</b>	17,4	52,8	100	40,8	67,0	2,4	9,4	100	3,3
<b>NDII</b>	71,2	100	82,3	43,7	100	52,8	59,6	6,3	5,1
<b>NDVI</b>	26,5	40	47,1	40,8	45,6	52,6	39,2	35,3	12,7
<b>PRI</b>	9,6	13,1	5,4	67,4	8,5	100	65,6	87,7	22,9
<b>PSR</b>	15,9	55,0	74,9	100	16,9	83,0	100	6,4	100
<b>RGR</b>	10,7	79,3	65,1	12,9	30,3	57,1	75,9	57,6	31,2
<b>SATVI</b>	80,8	65,5	36,8	38,8	55,0	51,8	23,7	3,5	11,7
<b>WCI</b>	17,4	97,6	41,1	32,8	59,7	73,2	20,6	5,7	8,7

Tabela 2. Importância relativa (%) dos índices espectrais na modelagem de variáveis climáticas: Evapotranspiração, Precipitação e Déficit Hídrico, por meio de redes neurais artificiais, utilizando imagens do satélite Landsat, segmentadas por períodos: completo (CTO), seco e chuvoso, para áreas cafeeiras em Barra do Choça (BA), no intervalo de 2019 a 2023.

	LANDSAT								
	EVAPOTRANSPIRAÇÃO			PRECIPITAÇÃO			DÉFICIT HÍDRICO		
	P. CTO	P. Seco	P. Chuvoso	P. CTO	P. Seco	P. Chuvoso	P. CTO	P. Seco	P. Chuvoso
<b>CAI</b>	26,8	97,9	12,2	21,5	35,8	25,4	24,4	64,0	53,9

<b>EVI</b>	100	60,0	100	31,8	52,0	51,0	38,1	34,7	46,6
<b>NDII</b>	34,6	100	40,9	26,5	69,4	11,9	26,5	100	5,1
<b>NDVI</b>	60,3	39,8	43,3	89,6	59,2	67,8	100	59,1	41,9
<b>PRI</b>	23,2	60,7	7,4	30,3	100	100	27,6	65,6	100
<b>PSR</b>	37,9	75,7	99,6	100	90,8	31,3	96,5	90,7	30,2
<b>RGR</b>	10,7	56,5	16,5	43,4	53,2	20,4	38,0	43,9	35,7
<b>SATVI</b>	24,6	29,8	88,6	16,6	55,3	26,4	47,9	40,9	32,8
<b>WCI</b>	49,0	29,4	99,5	48,8	94,5	15,1	51,9	45,8	10,9

Tabela 3. Importância relativa (%) dos índices espectrais na modelagem de variáveis climáticas: Evapotranspiração, Precipitação e Déficit Hídrico, por meio de redes neurais artificiais, utilizando imagens do satélite Landsat, segmentadas por períodos: completo (CTO), seco e chuvoso, para áreas cafeeiras em Barra do Choça (BA), no intervalo de 2019 a 2023.

		MÉTRICAS REDE NEURAL					
			C. Willmott	RSME	NASH	MAE	R <sup>2</sup>
LANDSAT	Evapotranspiração	P. Chuvoso	0,85	72,69	0,60	58,95	0,61
		P. Seco	0,87	72,50	0,60	59,79	0,61
		P. Completo	0,79	156,45	0,48	127,90	0,49
	Precipitação	P. Chuvoso	0,76	13,15	0,45	10,77	0,46
		P. Seco	0,81	12,32	0,52	10,11	0,53
		P. Completo	0,68	52,65	0,31	35,96	0,31
	DH	P. Chuvoso	0,77	162,73	0,43	130,49	0,43
		P. Seco	0,93	95,83	0,80	81,22	0,83
		P. Completo	0,65	286,36	0,26	235,03	0,27
SENTINEL	Evapotranspiração	P. Chuvoso	0,93	69,79	0,78	50,63	0,78
		P. Seco	0,93	56,41	0,76	45,10	0,76
		P. Completo	0,80	156,64	0,48	130,32	0,48
	Precipitação	P. Chuvoso	0,93	38,56	0,77	29,70	0,78
		P. Seco	0,46	16,29	0,16	12,12	0,16
		P. Completo	0,90	35,17	0,69	24,61	0,69
	DH	P. Chuvoso	0,81	303,28	0,47	252,88	0,47
		P. Seco	0,75	159,66	0,45	128,83	0,47
		P. Completo	0,79	242,23	0,47	200,22	0,47

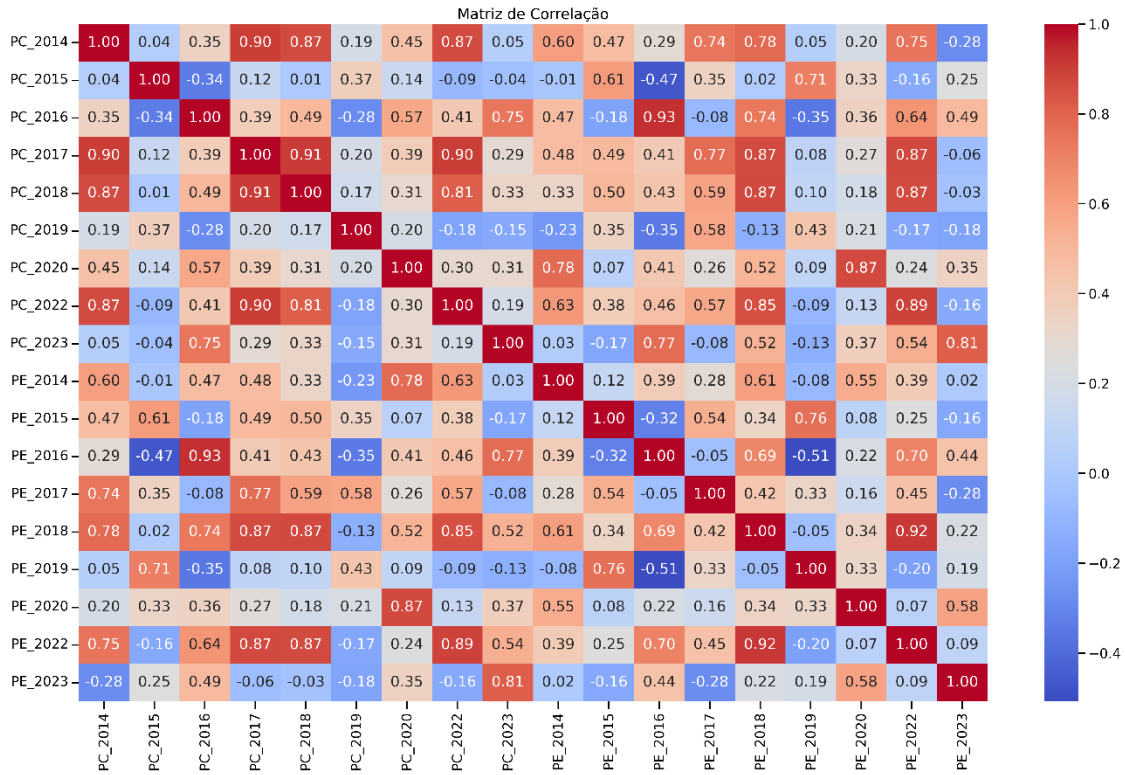


Figura 2- Matriz de correlação de Pearson entre as estimativas anuais de precipitação obtidas a partir dos dados do TerraClimate (PC) e da estação meteorológica (PE), no período de 2014 a 2023.

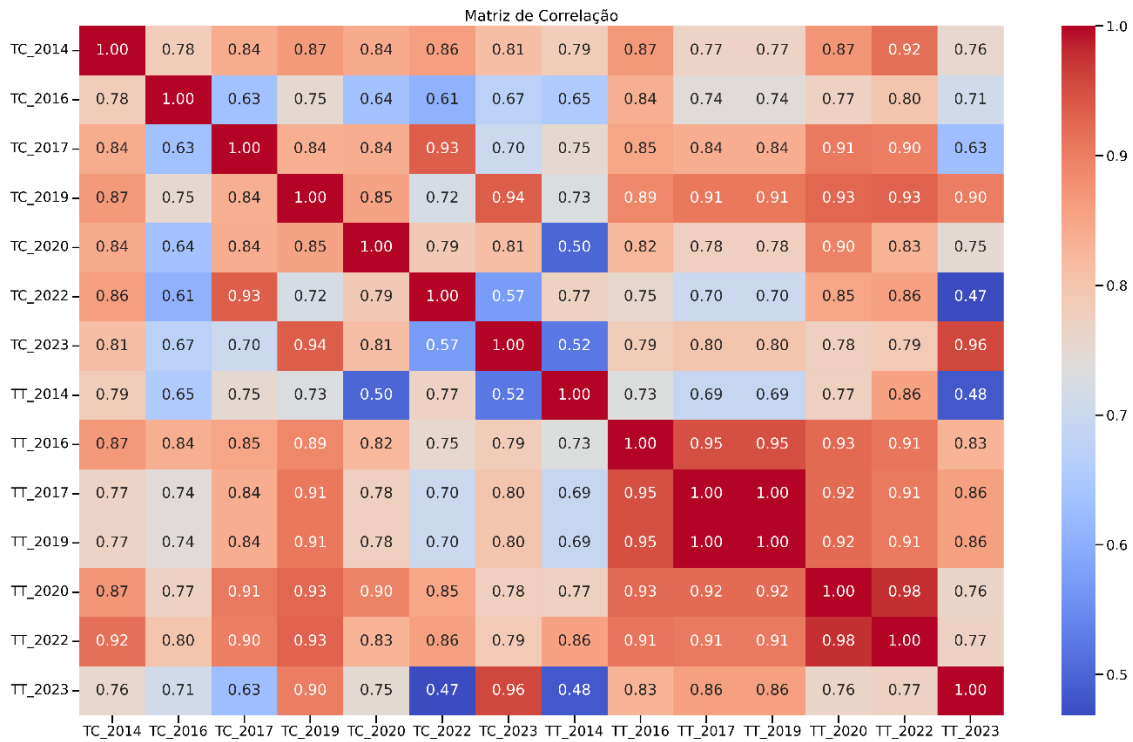


Figura 3- Matriz de correlação de Pearson entre as estimativas anuais de evapotranspiração obtidas a partir dos dados do TerraClimate (TC) e do método empírico de Thornthwaite (TT), no período de 2014 a 2023.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos ao longo dos dois artigos que compõem esta tese demonstram que o uso combinado de dados orbitais, produtos climáticos e técnicas de aprendizado de máquina é uma abordagem eficaz para a análise de variáveis agroclimáticas em escala local. A análise da série histórica de precipitação evidenciou mudanças nos padrões pluviométricos ao longo do tempo, ressaltando a crescente variabilidade climática e seus potenciais impactos sobre sistemas produtivos dependentes de regimes hídricos regulares, como a cafeicultura de sequeiro predominante na região de estudo.

No que se refere à modelagem de evapotranspiração, precipitação e déficit hídrico, os resultados indicaram elevado potencial dos índices espectrais derivados dos sensores Landsat e Sentinel-2A, quando associados a redes neurais artificiais do tipo MLP. A segmentação sazonal em períodos seco, chuvoso e completo revelou respostas distintas dos índices espectrais e dos modelos neurais, evidenciando que a sensibilidade biofísica do cafeeiro às variáveis climáticas varia conforme o regime hídrico. De modo geral, índices relacionados ao conteúdo de água e ao estresse hídrico apresentaram maior relevância no período seco, enquanto índices associados ao vigor vegetativo e à estrutura do dossel destacaram-se no período chuvoso, refletindo coerentemente os processos fisiológicos da cultura.

A comparação entre os sensores Landsat e Sentinel-2A mostrou que ambos são adequados para aplicações agroclimáticas, embora apresentem diferenças quanto à resolução espacial, temporal e sensibilidade espectral, influenciando o desempenho dos modelos conforme a variável estimada e o período analisado. Esses resultados reforçam a importância da escolha criteriosa do sensor e do conjunto de índices espectrais em estudos de modelagem climática aplicada à agricultura.

Adicionalmente, a validação das estimativas de evapotranspiração, por meio da correlação entre os dados do TerraClimate e o método empírico de Thornthwaite, evidenciou elevada coerência temporal entre as abordagens, conferindo maior confiabilidade ao uso de produtos climáticos de reanálise como fonte de dados em regiões com limitações de cobertura por estações meteorológicas. Ao mesmo tempo, as diferenças observadas entre os métodos ressaltam a relevância de abordagens multivariadas e não lineares para representar, de forma mais realista, os processos do sistema solo-planta-atmosfera.

De forma integrada, os resultados desta tese demonstram que o sensoriamento remoto espectral, aliado a redes neurais artificiais, constitui uma ferramenta poderosa para o

monitoramento agroclimático e para a avaliação de alterações biofísicas em sistemas cafeeiros sob influência de mudanças climáticas. As metodologias empregadas apresentam elevado potencial de aplicação em outras regiões produtoras e em diferentes culturas agrícolas, contribuindo para o planejamento agrícola, para a gestão dos recursos hídricos e para a adaptação dos sistemas produtivos, frente à crescente variabilidade climática.

Por fim, destaca-se que os avanços obtidos nesta pesquisa fornecem uma base científica sólida para etapas futuras, incluindo a integração dessas informações em modelos de simulação de produtividade e cenários de impacto climático.