

# CARACTERIZAÇÃO MICROCLIMÁTICA DE AMBIENTE PRODUTIVO CAFEEIRO EM NEPOMUCENO-MG

*Microclimatic Characterization of a Coffee Production Environment in Nepomuceno-MG*

## Allan Carlos de Andrade

Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, USP, Brasil

[allan.andrade@usp.br](mailto:allan.andrade@usp.br)

## Emerson Galvani

Professor do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo, USP, Brasil

[egalvani@usp.br](mailto:egalvani@usp.br)

## Paulo Henrique de Souza

Professor do Instituto de Ciências da Natureza da Universidade Federal de Alfenas, UNIFAL-MG, Brasil

[paulohenrique.souza@unifal-mg.edu.br](mailto:paulohenrique.souza@unifal-mg.edu.br)

## Aparecido Ribeiro de Andrade

Professor do Departamento de Geografia da Universidade Estadual do Centro-Oeste, UNICENTRO, Brasil

[apaandrade@gmail.com](mailto:apaandrade@gmail.com)

Recebido: 20/12/2025

Aceito: 05/01/2026

## Resumo

O presente estudo analisa as condições microclimáticas no interior de uma lavoura de *Coffea arabica* L. localizada no município de Nepomuceno–MG, com o objetivo de compreender as variações climáticas em escala local e suas implicações para o cultivo. Foi instalada uma estação meteorológica experimental entre maio e novembro de 2024, registrando variáveis como temperatura do ar (em abrigo e sobre a relva), umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, radiação solar global e precipitação. A análise estatística e comparativa dos dados permitiu identificar diferenças significativas entre as medições em abrigo meteorológico e aquelas obtidas junto ao solo e à planta, evidenciando a influência da cobertura vegetal, do relevo e do manejo agrícola na formação de microclimas. Observou-se déficit hídrico de 187,7mm entre agosto e setembro e variações médias de até 2,6°C entre as temperaturas medidas em abrigo e sobre a relva. Esses resultados reforçam a importância do monitoramento microclimático para o aprimoramento dos zoneamentos agroclimáticos e para o planejamento agrícola, permitindo práticas mais adaptativas e sustentáveis na cafeicultura regional.

**Palavras–chave:** Microclima; café arábica; zoneamento agroclimático; balanço hídrico; clima local.

## Abstract

This study analyzes the microclimatic conditions inside a *Coffea arabica* L. plantation located in Nepomuceno, Minas Gerais, Brazil, aiming to understand local-scale climatic variations and their implications for coffee cultivation. An experimental meteorological station was installed from May to November 2024 to record air temperature (in shelter and at grass level), relative humidity, wind speed and direction, global solar radiation, and

rainfall. Statistical and comparative analyses revealed significant differences between the measurements taken in meteorological shelters and those near the soil and canopy, showing the influence of vegetation cover, topography, and management practices on microclimate formation. A water deficit of 187.7mm was observed between August and September, and average temperature differences reached up to 2.6°C between shelter and grass-level measurements. These results highlight the importance of microclimatic monitoring to improve agroclimatic zoning and agricultural planning, supporting more adaptive and sustainable coffee production practices in the region.

**Keywords:** Microclimate; arabica coffee; agroclimatic zoning; water balance; local climate.

---

## 1. INTRODUÇÃO E REFERENCIAL TEÓRICO

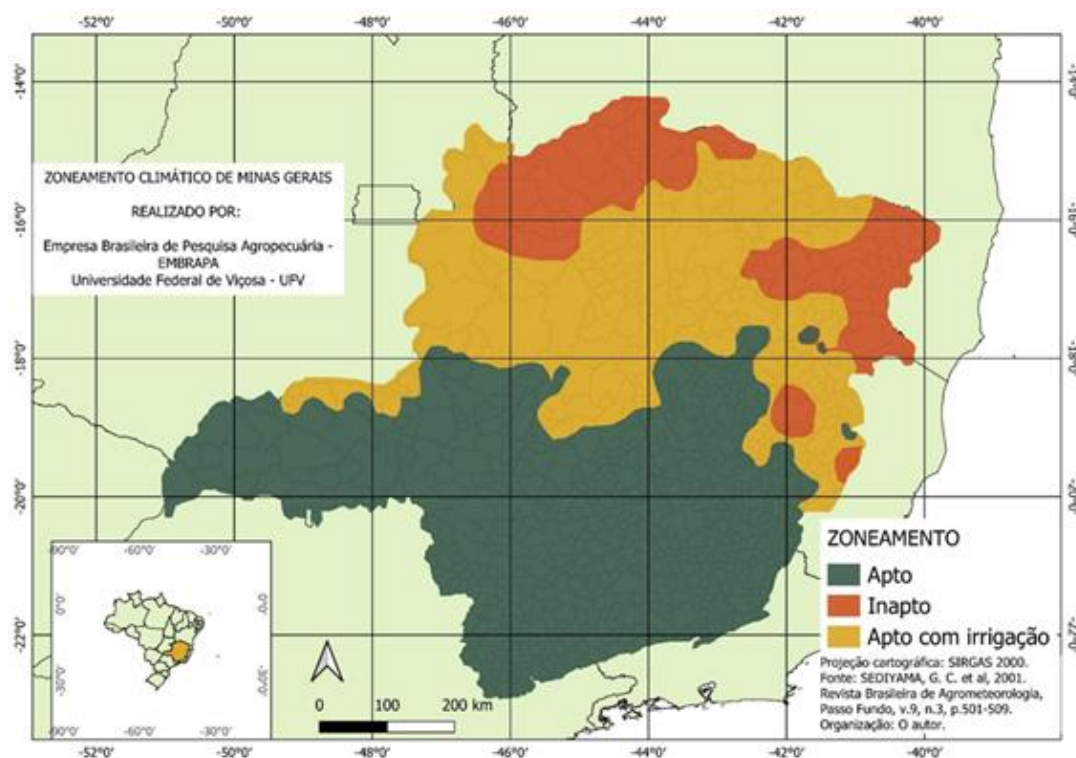
A cafeicultura é uma das principais atividades agrícolas do Brasil, exercendo papel estratégico tanto na economia nacional quanto no desenvolvimento regional. Dentre as espécies cultivadas, o *Coffea arabica* L. se destaca como a mais representativa, responsável por mais de 70% da produção brasileira (IBGE, 2022). Minas Gerais, em particular, lidera esse cenário com aproximadamente 43% da produção nacional, concentrando seus cultivos nas regiões sul, centro e leste do estado, que apresentam condições agroclimáticas propícias ao desenvolvimento da cultura (MAPA, 2023; IBGE, 2022).

O sucesso da produção cafeeira está diretamente ligado a fatores ambientais, em especial ao clima, cuja variabilidade influencia desde o desenvolvimento fisiológico das plantas até a produtividade final. Temperaturas extremas, precipitações irregulares e a ocorrência de geadas são exemplos de fenômenos climáticos que podem comprometer seriamente a viabilidade econômica da lavoura (Camargo *et al.*, 2001; Meireles *et al.*, 2009). Diante desse cenário, torna-se essencial compreender não apenas os aspectos macroclimáticos, mas também os fenômenos em escalas menores, como o microclima, que exerce influência direta sobre os processos biofísicos no interior das plantações.

Estudos sobre o microclima do cafeeiro têm avançado, principalmente diante da intensificação de eventos climáticos extremos e da necessidade de promover uma agricultura mais resiliente. O monitoramento de variáveis como temperatura do ar (em abrigo meteorológico e sobre a relva), temperatura foliar, umidade relativa do ar, radiação solar e direção/velocidade do vento permite avaliar os impactos microclimáticos e criar estratégias de mitigação, como o sombreamento e o manejo do solo (Sentelhas *et al.*, 1995; Bootsma, 1976).

Por outro lado, o zoneamento agroclimático surge como uma ferramenta essencial para o planejamento agrícola, delimitando as regiões aptas para o cultivo com base em

critérios climáticos e edáficos. Em Minas Gerais, Sedyama *et al.* (2001) estabeleceram um zoneamento agroclimático específico para o café arábica (Figura 1), com base na temperatura média anual, deficiência hídrica e probabilidade de geadas. Esse zoneamento orienta políticas públicas, financiamentos agrícolas e o próprio planejamento técnico dos produtores.



**Figura 1:** Zoneamento agroclimático do café arábica para Minas Gerais.

**Fonte:** Sedyama *et al.*, 2001. Organização: autores, 2025.

O zoneamento mostra que as áreas aptas se concentram na porção sul, sudeste, sudoeste e oeste do estado, justamente nas áreas com temperaturas do ar médias mais amenas, favoráveis à produção de café arábica. Já nas áreas inaptas e aptas com irrigação, concentradas no norte, nordeste, noroeste e leste, as temperaturas do ar médias são superiores, prejudicial ao desenvolvimento do cafeeiro e, conseqüentemente, inviável para a produção.

O cafeeiro arábica, como planta originária da Etiópia, exige uma temperatura do ar média variando entre 18°C e 20°C e precipitação anual bem distribuída, entre 1.500mm e 1.800mm (Camargo; Pereira, 1994). No Brasil, a cafeicultura é cultivada em áreas com latitude superior a 4°, inseridas em climas tropicais (Meiros *et al.*, 2009).

Entretanto, apesar da contribuição do zoneamento agroclimático para a organização da produção cafeeira no estado, há lacunas importantes quando se considera a

variabilidade microclimática intrarregional. As diferenças topográficas e os elementos locais (como sombreamento natural ou artificial) podem gerar variações substanciais de temperatura e umidade relativa do ar em escala microclimática, desconsideradas pelos modelos de zoneamento tradicional.

O microclima é caracterizado por variações climáticas em escalas muito reduzidas, geralmente inferiores a 100 metros, sendo determinado pelas interações entre o relevo, a cobertura vegetal, o tipo de solo e a radiação solar local (Geiger, 1966; Ribeiro, 1993). No contexto agrícola, ele modifica as trocas energéticas e hídricas entre a planta e o ambiente, interferindo no metabolismo vegetal, na suscetibilidade a doenças, na eficiência fotossintética e, por conseguinte, na produtividade (Pereira *et al.*, 2002; Dalmago *et al.*, 2014).

Sendo assim, microclima se ocupa com o estudo dos fenômenos que ocorrem na camada de ar junto ao solo ou à cultura (Geiger, 1961), em pequenas escalas de tempo e de espaço, e é nessa camada que se desenvolvem as plantas (Dalmago *et al.*, 2014). De acordo com o desenvolvimento da planta, a condição microclimática é alterada, criando um microclima diferente do anterior, com novas relações se estabelecendo entre os fatores (Geiger, 1961).

Apesar de a microclimatologia/micrometeorologia se concentrar em uma camada bastante fina de ar que envolve o solo e as culturas agrícolas, ela possui grande relevância, pois é justamente nessa faixa que ocorrem a maioria dos fenômenos atmosféricos que afetam diretamente o desenvolvimento das plantas (Marin, 2021).

Os principais fatores que influenciam as condições microclimáticas são a cobertura vegetal e a inclinação do terreno, além das características do solo. A presença de vegetação, em crescimento ou morta, cria microclimas diversos, que diferem na absorção de radiação solar e nas trocas dos fluxos térmicos e hídricos. Ainda, o microclima pode ser afetado pelas características do solo, especialmente pela capacidade em reter mais ou menos água, o que interfere nas trocas térmicas devido ao alto poder calorífico da água. Ademais, diferenças mínimas no declive do solo podem favorecer o deslocamento do ar frio para locais mais baixos do terreno (Pereira *et al.*, 2002).

Os efeitos do microclima criado pela planta e pelo relevo devem ser considerados e relacionados ao macroclima e ao mesoclima, pois eles podem intensificar os efeitos e causar danos às plantas.

Diversos autores trabalharam com o monitoramento do microclima na agricultura, com o objetivo de investigar os efeitos causados por ele na planta e, conseqüentemente, na sua

produtividade. Lulu *et al.* (2005) avaliaram a viabilidade da produção de uva 'Romana' sob cobertura plástica na região de Jundiaí-SP, concluindo que o microclima criado reduziu significativamente a incidência de podridões, melhorando a qualidade dos frutos.

Com o objetivo de avaliar a influência do microclima gerado pela planta *Gliricidia sepium* na cultura do milho no Agreste Paraibano, Marin *et al.* (2006) concluíram que o milho plantado mais próximo às fileiras de *G. sepium* produziu mais grãos e palha, ou seja, o microclima gerado pela planta proporcionou maior produtividade de milho naquela região.

Pezzopane *et al.* (2011) analisaram um cafezal cultivado a pleno sol e outro arborizado com grevêlea, no município de Mococa-SP, evidenciando uma atenuação média de 26% de radiação solar global em café arborizado e redução de 35% nas médias de velocidade do vento, além de promover redução na temperatura máxima do ar e no déficit de saturação de vapor no período diurno.

Portanto, as variáveis atmosféricas interferem diretamente na agricultura, pois influenciam todo o processo produtivo e o estágio fenológico da planta cultivada. Para a cafeicultura, a temperatura do ar é um dos elementos meteorológicos que possuem maior influência sobre a produtividade, pois ela regula a taxa de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo da planta (Camargo, 2010).

A temperatura do ar é um elemento climático que possui um ciclo de variação diária, passando por um mínimo (pouco antes do nascer do sol) e um máximo (entre 14h e 15h) a depender de outros fatores (Vianello *et al.*, 1991). Além da variação temporal, a temperatura do ar também varia verticalmente. Existe uma diferença entre a temperatura registrada em abrigo meteorológico (1,5m de altura) e sobre a relva (0,05m), que ocorre a partir de fatores atmosféricos associados à topografia do terreno e à cobertura vegetal (Rahn *et al.*, 1971).

O estudo da temperatura sobre relva é essencial para analisar fenômenos térmicos, como as geadas, tendo em vista que é a temperatura mínima observada sobre a relva que dá a noção exata dos possíveis danos causados por ela (Bootsma, 1976), que varia de acordo com a planta e seu estágio fenológico (Pinto *et al.*, 1977). De acordo com Caramori *et al.* (1984), temperaturas do ar a partir de 2°C já são suficientes para causar danos no cafeeiro. Isso mostra que é essencial monitorar a temperatura sobre a relva, considerando que temperaturas registradas em abrigo meteorológico são insuficientes para calcular a real intensidade e os possíveis prejuízos causados pelas geadas.

Sentelhas *et al.* (1995) analisaram a diferença entre a temperatura sobre a relva e em abrigo meteorológico em noites de geadas no estado de São Paulo, concluindo que a temperatura na relva é, em média, 4,1°C menor que a temperatura no abrigo meteorológico.

Vieira Junior *et al.* (2018) concluíram que, para o estado do Paraná, existe uma diferença de 5°C entre a temperatura medida em abrigo meteorológico e na relva em noites de geadas.

Além da temperatura do ar, a radiação solar global é uma variável que necessita de atenção, sendo também um dos principais elementos meteorológicos, uma vez que ela determina a disponibilidade de energia para processos como a evapotranspiração, aquecimento do ar e do solo e fotossíntese (Pezzopane *et al.*, 2003).

Sendo assim, a variabilidade climática causa grandes impactos na agricultura, configurando como o principal fator responsável pelas flutuações e oscilações da produção de grãos de café (Camargo, 2010) e o microclima é potencialmente responsável pela intensificação ou redução dos efeitos causados por ela, por isso a necessidade de conhecer a fundo os ambientes gerados pelas plantações.

Dessa forma, esta pesquisa tem como objetivo principal realizar uma análise comparativa entre os dados microclimáticos coletados no interior de uma lavoura de *Coffea arabica* L. e as diretrizes estabelecidas pelo zoneamento agroclimático vigente para o estado de Minas Gerais. A proposta é investigar até que ponto as condições microclimáticas locais confirmam, complementam ou desafiam os critérios definidos em escala regional, contribuindo para a compreensão mais fina dos riscos climáticos e para a elaboração de estratégias mais adaptativas no manejo da cafeicultura.

## 2. METODOLOGIA

Para realizar a caracterização do microclima do cafeeiro, foi instalada uma estação meteorológica experimental no interior de uma lavoura de café arábica, no município de Nepomuceno-MG.

A estação meteorológica foi montada no Laboratório de Climatologia e Biogeografia (LCB-USP), no departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas (FFLCH) da Universidade de São Paulo, medindo as seguintes variáveis: temperatura e umidade relativa do ar em abrigo meteorológico, temperatura e umidade relativa do ar no cafeeiro, temperatura do ar sobre a relva, direção e velocidade do vento, radiação solar global e precipitação. Foram usados os seguintes equipamentos, apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1:** Equipamentos utilizados na montagem da estação meteorológica.

Equipamento	Variável medida	Figura	Especificações
HMP35C	- Temperatura (°C) e umidade (%) relativa do ar em abrigo e do cafeeiro.		- Mede a temperaturas no intervalo de -35°C a +60°C, com erro de ±0,4°C; - Mede a umidade relativa do ar no intervalo de 0% a 100%, com erro de ±3%.
014A-L	- Velocidade do vento (m/s)		- Mede a velocidade do vento de 0m/s a 45m/s, com acurácia de 0,11m/s.
020C-L	- Direção do vento (°).		- Mede a direção do vento de 0 a 359°, com acurácia de ±3°.
T107	- Temperatura sobre a relva (°C)		- Mede a temperatura do ar sobre a relva no intervalo de -35°C a +50°C, com ±0,1°C de erro no intervalo de 0°C a 50°C.
CNR1	- Radiação solar global (W/m²)		- Mede a radiação solar global no intervalo de 0W/m² a 1000W/m², com erro máximo de 25W/m².
TE525-L	- Precipitação (mm).		- Mede o total pluviométrico. Funciona a partir de basculadas, cada uma contabiliza 0,254mm de precipitação.
CR1000	- Dattalogger		- Faz a comunicação com os sensores, lê e armazena os dados.

Fonte: Campbell Scientific. Organização: autores, 2025.

Após a montagem da estação meteorológica, foram feitos os testes dos sensores, mediante a comparação com a estação meteorológica do LCB-USP. As duas estações

foram instaladas no mesmo local por 5 dias, entre 25 e 30 de abril de 2024. A partir dos dados coletados por ambas, foi feita uma análise estatística comparativa (Tabela 2), a fim de avaliar a qualidade dos dados produzidos pela estação meteorológica experimental.

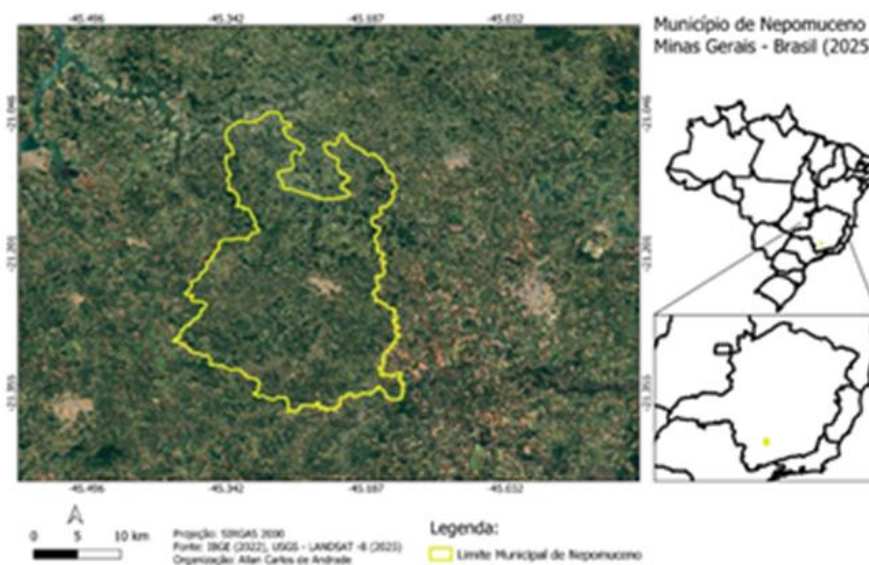
**Tabela 2:** Comparação entre os dados da estação meteorológica do LCB e Experimental.

Sensor	Variável	Coefficiente de determinação (R <sup>2</sup> )
HMP35C (abrigo)	Temperatura do ar	0,99
	Umidade relativa do ar	0,99
HMP35C (café)	Temperatura no cafeeiro	0,99
	Umidade relativa do ar no cafeeiro	0,99
014AL	Velocidade do vento	0,71
T107	Temperatura na relva	0,95
CNR1	Radiação solar	0,89
TE525-L	Precipitação	0,99

**Organização:** o autor, 2025.

De acordo com a tabela, percebe-se que todos os coeficientes de determinação (r<sup>2</sup>) foram calculados próximos de 1, mostrando boa qualidade dos sensores usados na estação meteorológica experimental. Para a velocidade do vento, o sensor 014AL obteve um coeficiente de 0,71, abaixo dos valores calculados para os outros sensores. Esse valor é explicado pela diferença de altura entre ele e o sensor da estação meteorológica do LCB, pois o 014AL esteve instalado a 2m de altura, enquanto o sensor do LCB está a 18m.

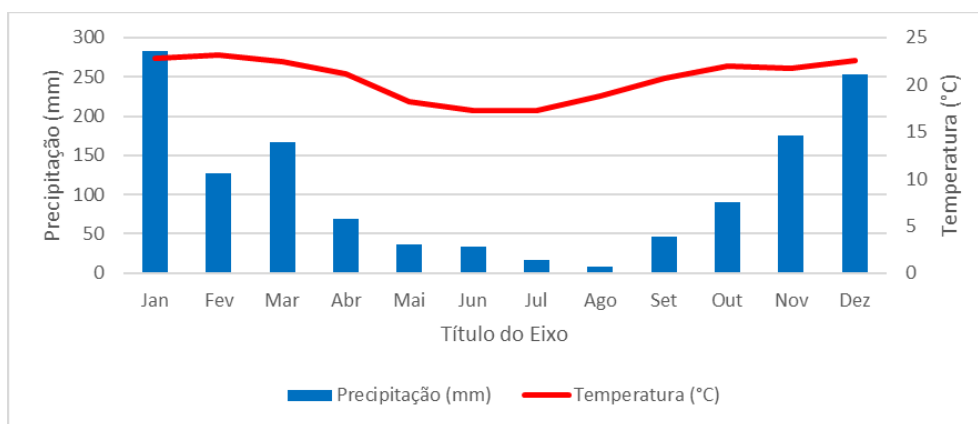
Posteriormente, a estação meteorológica experimental foi instalada no interior de uma lavoura de café arábica, no município de Nepomuceno, localizado na mesorregião do Campo das Vertentes, em Minas Gerais. A Figura 2 apresenta a localização do município.



**Figura 2 -** Localização do município de Nepomuceno - MG.

**Fonte:** IBGE, 2022. **Organização:** autores, 2025.

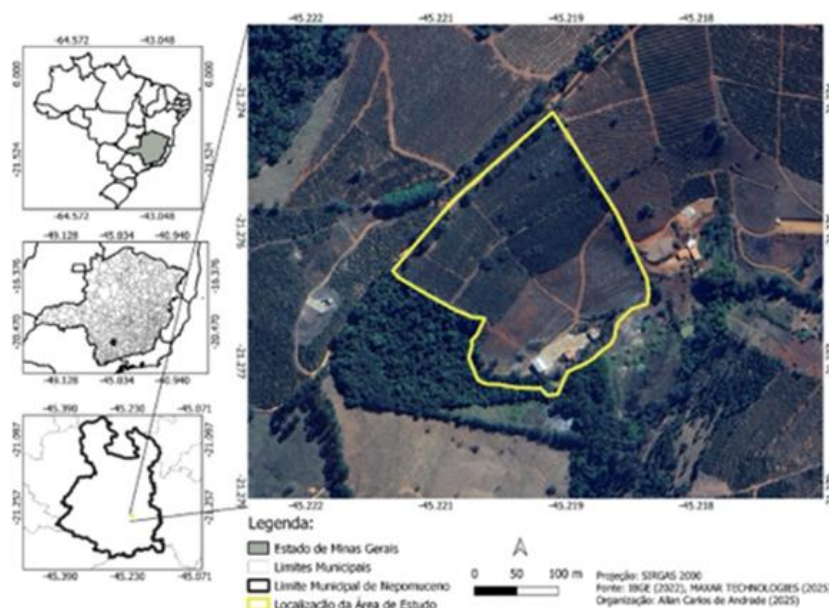
De acordo com Alvares *et al.* (2013), o clima de Nepomuceno é o Cwb, com temperatura do ar média anual de 18,9°C, enquanto a média anual de precipitação é de 1630mm e 76% de umidade relativa do ar média. As temperaturas máximas são registradas entre setembro e março, e as mínimas entre abril e agosto. Os meses mais chuvosos são de outubro a março e os mais secos entre abril e setembro. Portanto, o município possui verões brandos e úmidos e invernos relativamente frios e secos, de acordo o climograma (série histórica 2003-2016) para o município, apresentado no Gráfico 1.



**Gráfico 1** - Climograma do município de Nepomuceno-MG.

**Fonte:** Carvalho et al., 2020. Organização: autores, 2025

A estação meteorológica ficou instalada no período de 18 de maio a 23 de novembro de 2024, nas coordenadas (LAT: -21,2761°, LON: -45,2197°) e altitude de 913m. A Figura 3 apresenta a localização da lavoura, onde a estação meteorológica está instalada (Figura 4).



**Figura 3** - Localização da lavoura.

**Fonte:** IBGE, 2022. Organização: autores, 2025.



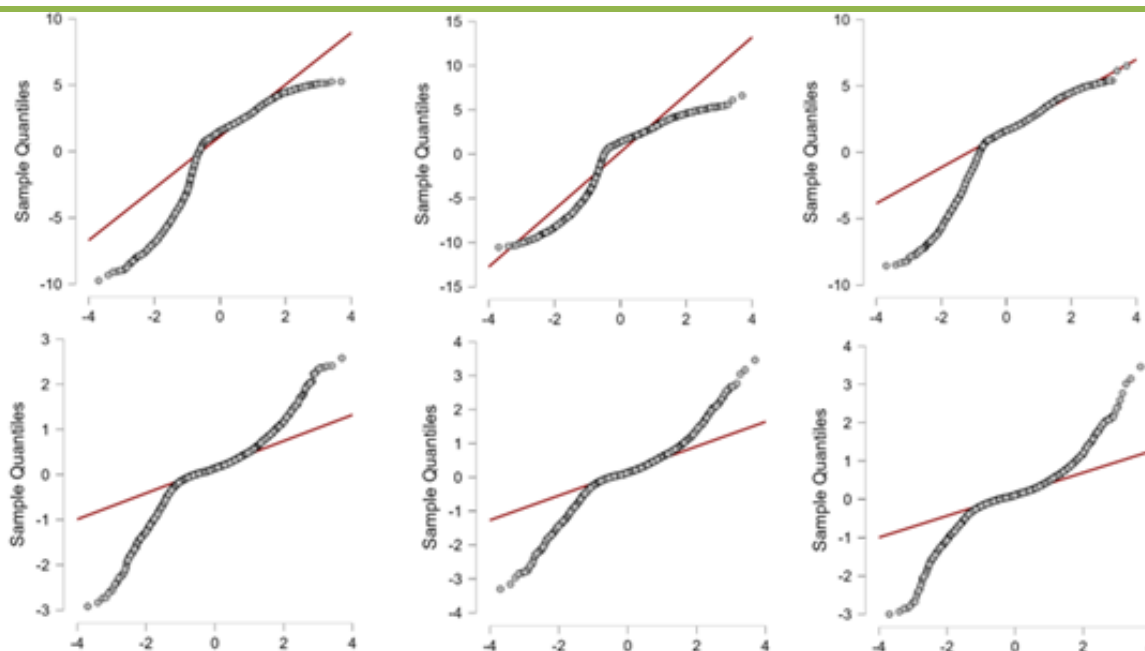
**Figura 2** - Estação meteorológica instalada no interior da lavoura.

**Fonte:** O autor, 2024.

A propriedade possui 12 hectares, sendo 8 deles destinada à cafeicultura, os 4 restantes possuem mata nativa e uma pequena plantação de banana. Nos 8 hectares de área plantada possuem 21 mil pés de café arábica das variedades Catuaí Amarelo e Catuaí Vermelho.

A comparação das temperaturas registradas nos diferentes microclimas (Relva, Cafeeiro e Abrigo) foi realizada utilizando o software estatístico JASP 0.95.4. Primeiramente, a suposição de normalidade das diferenças de temperatura (Média, Máxima e Mínima) para os pares Relva-Abrigo e Cafeeiro-Abrigo foi avaliada pelo Teste de Shapiro-Wilk. Em todas as categorias de temperatura, o resultado do teste foi estatisticamente significativo ( $p < 0,001$ ), indicando que a distribuição das diferenças não era normal, o que foi visualmente confirmado pelos Gráficos Quantil-Quantil (Figura 5).

Devido à violação do pressuposto de normalidade, a comparação entre as temperaturas do Abrigo e da Relva e entre Abrigo e Cafeeiro foi realizada utilizando o Teste de Wilcoxon para amostras pareadas (Wilcoxon Signed-Rank Test), um método não-paramétrico. O nível de significância adotado para todas as análises foi  $\alpha = 0,05$ . O Teste de Wilcoxon permitiu determinar se havia diferenças estatisticamente significativas nas medianas das temperaturas registradas em cada microclima.



**Figura 5** - Gráficos Q-Q indicando a não normalidade entre as temperaturas média, máxima e mínima para a temperatura sobre a relva e no cafeeiro, em comparação à temperatura do ar em abrigo meteorológico.

**Organização:** Autores, 2025

Os dados de velocidade do vento estão registrados em gráficos, mostrando o comportamento desta variável durante o período de medição. Para a direção do vento, os dados foram importados do Excel para o *software* WRPLOT e então gerado o gráfico.

Com os dados de precipitação, além de dimensionar a distribuição pluviométrica no período, foi elaborado o balanço hídrico climatológico, usando os valores de evapotranspiração da cultura (ETc) de 1,79mm/dia no mês de maio, 1,23mm/dia para junho, 1,39mm/dia para julho, 2,09mm/dia para agosto e 4,39mm/dia para setembro, de acordo com Sato *et al.* (2007).

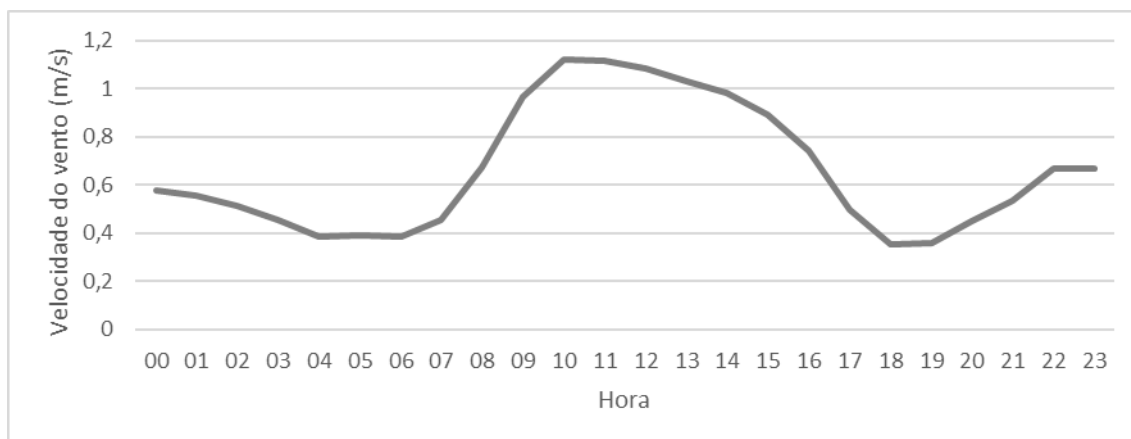
Para os meses de outubro e novembro, usou-se a equação de Penman-Montheit FAO-56, que calcula a ETc de acordo com a ETo (evapotranspiração de referência), a partir de dados médios mensais de temperatura do ar máxima e mínima, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar global, multiplicada pelo Kc (coeficiente da cultura), calculado em 5,5mm/dia e 4,5mm/dia, respectivamente.

Adotou-se uma capacidade de água disponível (CAD) do solo de 100mm, valor recomendado para cálculos padrão em solos com textura média (Pereira *et al.*, 2002), como é o caso da região, e assumiu-se armazenamento hídrico máximo no início do período (maio).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Velocidade e direção do vento

O Gráfico 2 apresenta a média horária da velocidade do vento registrada pela estação meteorológica.

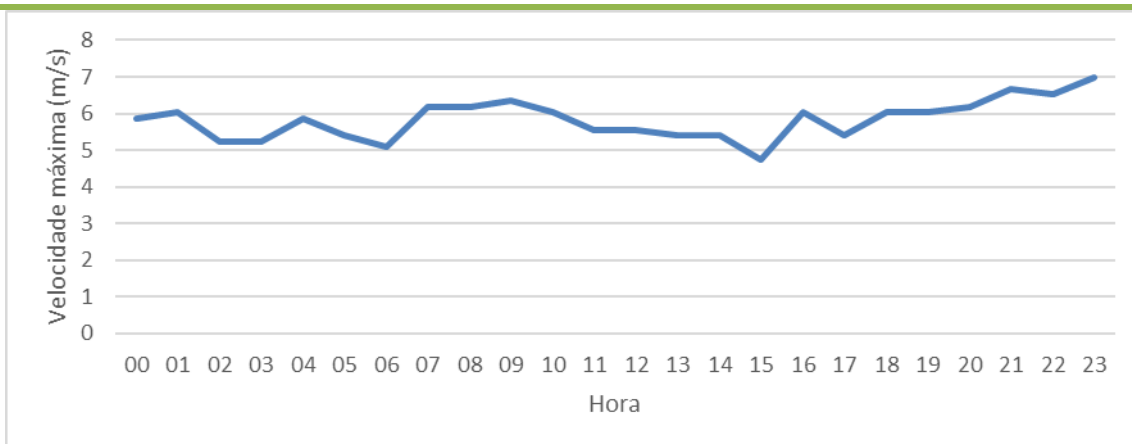


**Gráfico 2** - Média horária da velocidade do vento (m/s) registrada entre 18/05 e 23/11 de 2024.  
**Organização:** Autores, 2025.

A partir do gráfico, percebe-se que a velocidade do vento possui um padrão que acompanha o aquecimento diário da atmosfera. As maiores velocidades foram registradas entre as 9h e 16h, com pico às 10h, com média de 1,1m/s. Já as velocidades inferiores são registradas antes do amanhecer, entre 4h e 5h, e no anoitecer, entre 18h e 19h.

Após as 18h, a velocidade do vento volta a aumentar, causado pela brisa de encosta, devido às condições de relevo locais. Durante o dia, o solo e o ar acima das áreas mais altas aquecem, gerando movimentos ascendentes do ar (correntes de convecção). No entanto, ao entardecer, o solo começa a perder radiação rapidamente por irradiação, principalmente em regiões mais elevadas. Esse resfriamento noturno faz com que o ar nas encostas e topos desça (vento catabático), aumentando a velocidade do vento após o pôr do sol (Geiger *et al.*, 1961).

Embora o zoneamento agroclimático de Sediya *et al.* (2001) não trate diretamente da variável vento, esse elemento influencia diretamente na manutenção da umidade foliar e na termorregulação da planta, fatores cruciais em períodos secos e frios, pois maiores velocidades do vento aumentam a transferência de calor e de massa, intensificando tanto o resfriamento evaporativo quanto as taxas de evapotranspiração (Monteith *et al.*, 2008). O Gráfico 3 apresenta as velocidades máximas horárias do vento em todo o período.



**Gráfico 3** - Rajada máxima (m/s) horária registrada entre 18 de maio e 23 de novembro de 2024.  
**Organização:** Autores, 2025.

A velocidade máxima foi de 6,7m/s, registrada às 23h do dia 17 de setembro, enquanto o menor registro foi de 4,7m/s, às 15h do dia 26 de maio. O Gráfico 4 apresenta a direção do vento predominante na lavoura.



**Gráfico 4** – Direção do vento registrada na lavoura entre 18 de maio e 23 de novembro de 2024.  
**Organização:** Autores, 2025.

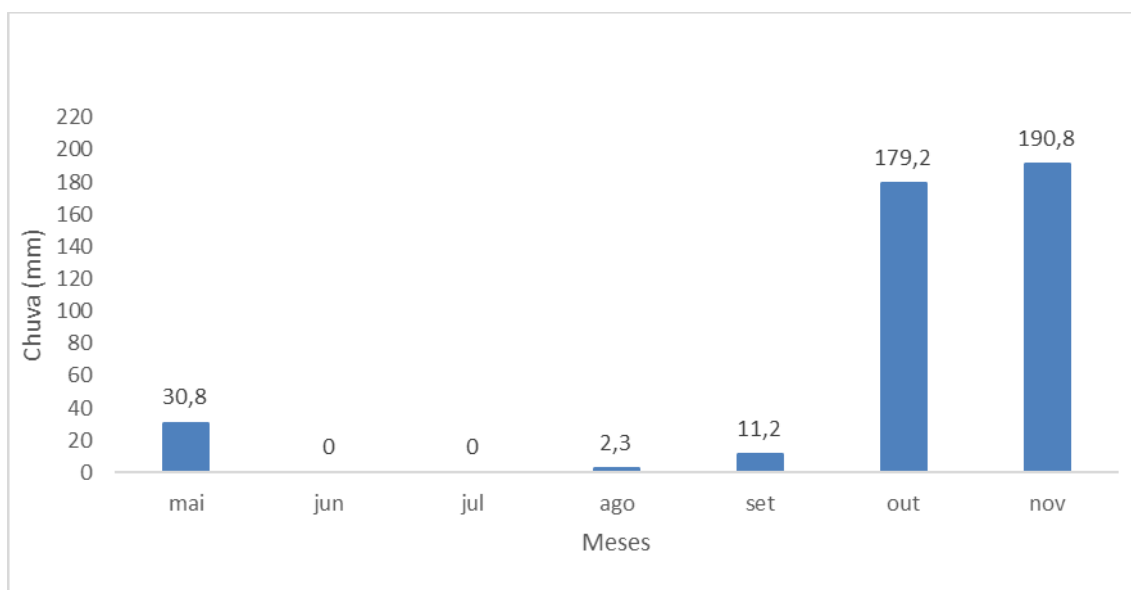
Percebe-se que os ventos predominantes na lavoura vêm do Norte (15,6%), Nordeste (13,8%) e, em menor grau, Noroeste (8,1%). As demais direções somaram baixa ocorrência (Leste: 5,3%; Oeste: 4,2%; Sudoeste: 3,2%; Sudeste: 2,5%; Sul: 1,6%), com 45,7% do tempo sem registro de vento. A predominância de ventos de Norte e Nordeste é explicada pela Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que se intensifica no Brasil central, influenciando a circulação no Sudeste e favorecendo a entrada desses ventos, sobretudo no inverno (Niemer, 1989).

### 3.2. Precipitação

O Gráfico 5 apresenta o total pluviométrico registrado pela estação meteorológica entre o período de análise.

O gráfico mostra a precipitação pluviométrica para a toda a série. Os meses de inverno (junho a agosto) registraram apenas 2,3mm de chuva, muito abaixo da média para esse período, que é de 124mm, ou seja, o inverno na região em 2024 foi mais seco que o habitual. Já na primavera houve um grande aumento na precipitação, 179,2mm no mês de outubro, acima da média de 115mm, e 190,8mm no mês de novembro, próximo da média de 197mm.

Em todo o período foram registrados 414,3mm, um pouco abaixo da média de 479mm, porém, é válido considerar que o conjunto de dados não aborda todos os dias dos meses de maio, iniciando os registros no dia 18, e em novembro, mês que finaliza a série, no dia 23, portanto, 27 dias não foram considerados para a precipitação total dos meses de maio a novembro, o que indica normalidade na precipitação para o período analisado.



**Gráfico 5** - Total pluviométrico mensal registrado na lavoura entre 18 de maio e 23 de novembro de 2024.  
**Organização:** Autores, 2025.

### 3.3. Balanço hídrico climatológico

Os resultados indicam que, apesar de uma precipitação total de 414,3 no período, o padrão de distribuição foi bastante irregular, com chuvas concentradas em outubro e novembro. Nos meses de inverno e início da primavera (maio a setembro), os volumes pluviométricos foram baixos ou inexistentes (junho e julho), não suprimindo as necessidades

da cultura. Essa irregularidade resultou em um período de deficiência hídrica efetiva em julho (4,7mm), agosto (62,5mm) e setembro (120,5mm), totalizando 187,7mm de déficit.

Nos meses de maio, junho e julho, o armazenamento de água no solo foi sendo consumido, atingindo nível zero em julho. A recuperação do armazenamento ocorreu apenas em outubro, quando as chuvas foram superiores a evapotranspiração potencial, ocasionando um excedente hídrico de 8,7mm, seguido por um novo excedente em novembro (61,8mm), indicando possibilidade de escoamento superficial e perda de água útil. O resumo do balanço hídrico está apresentado na Tabela 3.

De modo geral, o balanço hídrico climatológico mostra que, embora o total de precipitação (414,3 mm) no período de maio a novembro não tenha sido suficiente para suprir a demanda hídrica da cultura (ETc total de 631,5mm), o principal entrave ao desenvolvimento pleno do cafeeiro não está apenas na quantidade total de chuva, mas na acentuada irregularidade de sua distribuição temporal.

**Tabela 3:** Resumo do balanço hídrico climatológico (maio a novembro) de 2024.

Mês	Precipitação (mm)	ETc (mm)	P – ETc (mm)	Armazenamento	Deficiência	Excedente
Mai	30,8	55,5	-24,7	75,3	0,0	0,0
Jun	0	36,9	-36,9	38,4	0,0	0,0
Jul	0	43,1	-43,1	0,0	4,7	0,0
Ago	2,3	64,8	-62,5	0,0	62,5	0,0
Set	11,2	131,7	-120,5	0,0	120,5	0,0
Out	179,2	170,5	+8,7	100	0,0	8,7
Nov	190,8	129,0	+61,8	100	0,0	61,8
<b>Total</b>	<b>414,3</b>	<b>631,5</b>			<b>187,7</b>	<b>70,5</b>

**Organização:** Autores, 2025.

Durante cinco meses consecutivos (de maio a setembro), o solo entrou em progressivo esgotamento hídrico, culminando em um déficit total de 187,7mm, valor significativamente acima do limite de 150mm estabelecido por Sedyama *et al.* (2001) para a classificação de áreas como "aptas ao cultivo do café arábica sem restrições". Apenas em outubro e novembro houve reposição suficiente para restaurar a capacidade de água no solo e gerar excedente.

Esse comportamento reforça os critérios do zoneamento agroclimático, segundo os quais áreas com má distribuição das chuvas podem ser classificadas como "aptas com restrições". Os efeitos da seca prolongada, mesmo com bons volumes nos meses finais,

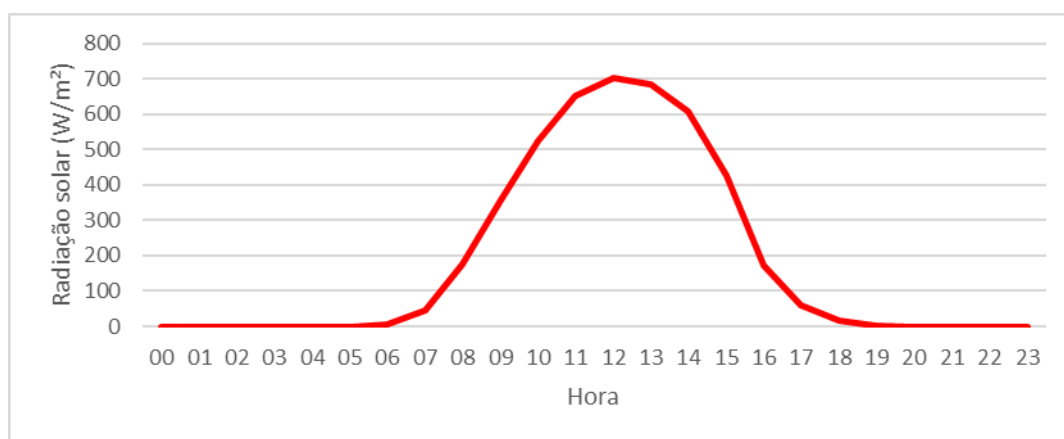
representam um risco ao pleno desenvolvimento do cafeeiro em fases sensíveis da fenologia, como granação e maturação inicial.

Portanto, a análise confirma que, mesmo regiões classificadas como aptas segundo o zoneamento agroclimático, podem enfrentar períodos críticos de estresse hídrico, exigindo a adoção de estratégias de manejo da água, como irrigação suplementar, conservação da umidade no solo e escalonamento do plantio, para garantir a sustentabilidade da cultura ao longo do ciclo.

### 3.4. Radiação solar global

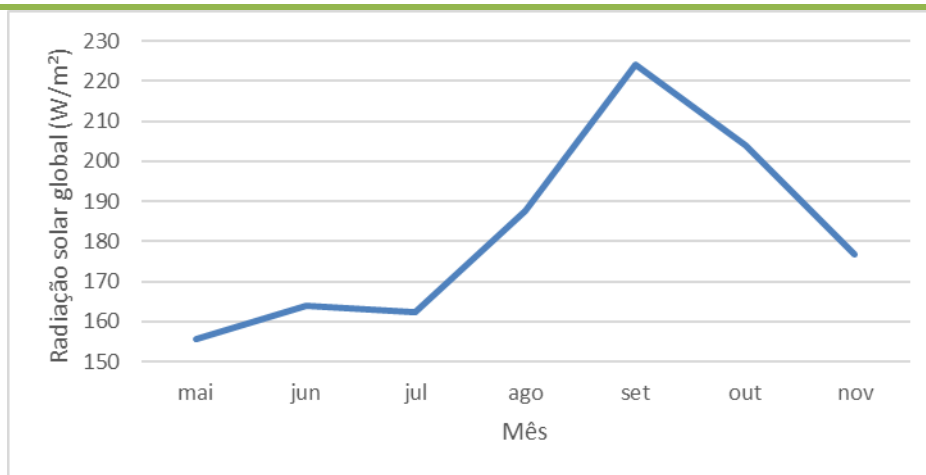
O Gráfico 6 apresenta os dados de radiação solar global horária registrados na lavoura para o período analisado.

Como esperado, o período diário de mais intensa radiação solar é no meio do dia, entre 10h (523W/m<sup>2</sup>) e 15h (427W/m<sup>2</sup>), com pico às 12h, de 703W/m<sup>2</sup> de média. Embora a radiação solar global não seja um parâmetro usado no zoneamento, é uma variável importante que influencia, principalmente, a temperatura sobre a relva, já que as medições são feitas por um sensor que está instalado a apenas 5cm do solo exposto. O Gráfico 7 aponta as médias mensais de radiação solar global entre maio e novembro.



**Gráfico 6** - Média horária de radiação solar global registrada na lavoura entre 18 de maio e 23 de novembro de 2024.

**Organização:** Autores, 2025.



**Gráfico 7** - Média mensal de radiação solar global (W/m<sup>2</sup>) entre maio e novembro de 2024.  
**Organização:** Autores, 2025.

O gráfico mostra que o mês de setembro obteve a maior média de radiação solar global (223,9W/m<sup>2</sup>), havendo decréscimo em outubro (203,9W/m<sup>2</sup>) e novembro (176,9W/m<sup>2</sup>), foram meses chuvosos na região e com alta nebulosidade, podendo ser este o fator crucial para a diminuição da radiação. Os meses com menor média foram maio (155,5W/m<sup>2</sup>), junho (164,0W/m<sup>2</sup>) e julho (162,2W/m<sup>2</sup>), o que corresponde aos meses de outono e inverno, em que é natural a queda de radiação solar global na região.

Para a radiação diária global, os valores foram convertidos para MJ/m<sup>2</sup>/dia, adequando à literatura, considerando o intervalo das 6h às 18h. A Tabela 4 apresenta os dados convertidos.

**Tabela 4:** Valores médios mensais de radiação solar global (W/m<sup>2</sup>) convertidos em radiação diária (MJ/m<sup>2</sup>/dia).

Mês	W/m <sup>2</sup>	MJ/m <sup>2</sup> /dia
Maio	285,5	24,7
Junho	302,7	26,1
Julho	299,4	25,9
Agosto	346,4	29,9
Setembro	413,4	35,7
Outubro	376,5	32,5
Novembro	328,0	28,3

**Organização:** Autores, 2025.

Para a cultura do cafeeiro arábica, é considera a faixa de platô da fotossíntese entre 15 MJ/m<sup>2</sup>/dia e 25MJ/m<sup>2</sup>/dia, enquanto a saturação ocorre entre 34 MJ/m<sup>2</sup>/dia e 52MJ/m<sup>2</sup>/dia (Damatta, 2007). A tabela mostra que de maio a julho a radiação variou de 24MJ/m<sup>2</sup>/dia a 25,9MJ/m<sup>2</sup>/dia, ótima para o desenvolvimento do cafeeiro, especialmente considerando que são meses com menor demanda fisiológica da planta. Entre agosto e setembro os valores sobem para 29,9MJ/m<sup>2</sup>/dia e 35,7MJ/m<sup>2</sup>/dia, voltando a diminuir em outubro (32,5

MJ/m<sup>2</sup>/dia) e novembro (28,3 MJ/m<sup>2</sup>/dia), indicando excelente disponibilidade de radiação, mas também maior risco de estresse hídrico se não houver água disponível suficiente.

### 3.5. Temperatura do ar em abrigo meteorológico e sobre a relva

A Tabela 5 apresenta os valores de temperatura média do ar, temperatura máxima média do ar e temperatura mínima média do ar, além do máximo e mínimo absolutos, considerando a série total para o abrigo meteorológico e sobre a relva.

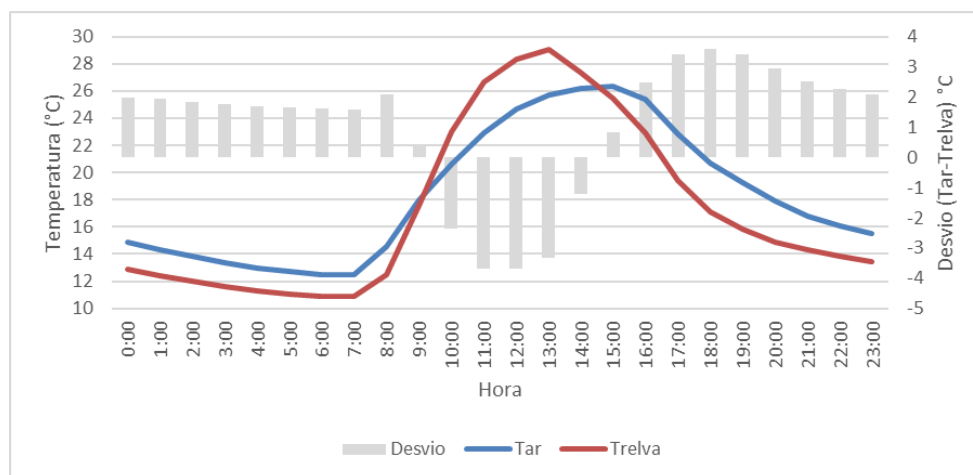
**Tabela 5:** Valores médios e absolutos das temperaturas do ar em abrigo e sobre a relva.

Temperaturas	Abrigo (°C)	Relva (°C)	Desvio (°C)
Temperatura média	18,4	17,3	1,1
Temperatura máxima média	19,2	18,5	0,7
Temperatura mínima média	17,5	16,1	1,4
Temperatura máxima absoluta	31,8	35,4	3,6
Temperatura mínima absoluta	6,5	4,6	1,6

Organização: Autores, 2025.

Observa-se que existe um desvio de 1,1°C para a temperatura do ar média entre os dois ambientes (abrigo e relva), para as temperaturas médias máximas a diferença é de 0,7°C e de 1,4°C para as temperaturas médias mínimas. A diferença é maior para as temperaturas absolutas, de 3,6°C para a máxima e 1,6°C para a mínima. Percebe-se que para os valores médios a temperatura sobre a relva é inferior, mas superior para a máxima absoluta.

O Gráfico 8 apresenta as médias horárias para ambas temperaturas, onde é possível perceber que nos horários mais quentes do dia, a temperatura sobre a relva é maior, o que explica o valor da máxima absoluta também ter sido superior.



**Gráfico 8** - Média horária da temperatura do ar (abrigo) e sobre a relva registrada na lavoura entre 18 de maio e 23 de novembro de 2024.

**Organização:** Autores, 2025.

Nota-se que entre às 00h e 9h a temperatura sobre a relva é inferior à registrada em abrigo meteorológico, o mesmo ocorre após às 15h. Entre 10h e 15h, horários mais quentes do dia, ocorre o inverso, a temperatura sobre a relva passa a ser superior à temperatura no abrigo. Isso ocorre devido a combinação entre solo exposto e máxima radiação solar (Gráfico 6), fazendo com que a camada de ar junta ao solo seja mais aquecida.

Os desvios médios entre temperatura média (Tmed), temperatura mínima média (Tmin), temperatura máxima média (Tmax) e os maiores desvios entre a temperatura do ar nos dois ambientes estão demonstrados na Tabela 6.

Percebe-se que há um desvio de 2,3°C entre a temperatura média do ar registrada em abrigo meteorológico e sobre a relva, com um desvio máximo observado de 6,1°C. Para as médias mínimas, a média do desvio é de 2,1°C, enquanto o desvio máximo é de 5,4°C. Já para as médias máximas o desvio médio foi calculado em 2,6°C, com maior valor observado de 8,1°C, mostrando que a maior variação entre as temperaturas registradas nos dois ambientes ocorre nos horários mais quentes do dia, como visto anteriormente, ou seja, para as temperaturas médias e mínimas horárias, a temperatura registrada na relva é inferior à registrada em abrigo, ocorrendo o contrário para as temperaturas máximas, em que a temperatura observada sobre a relva é superior à registrada em abrigo meteorológico.

**Tabela 6:** Desvios entre as temperaturas em abrigo e sobre a relva.

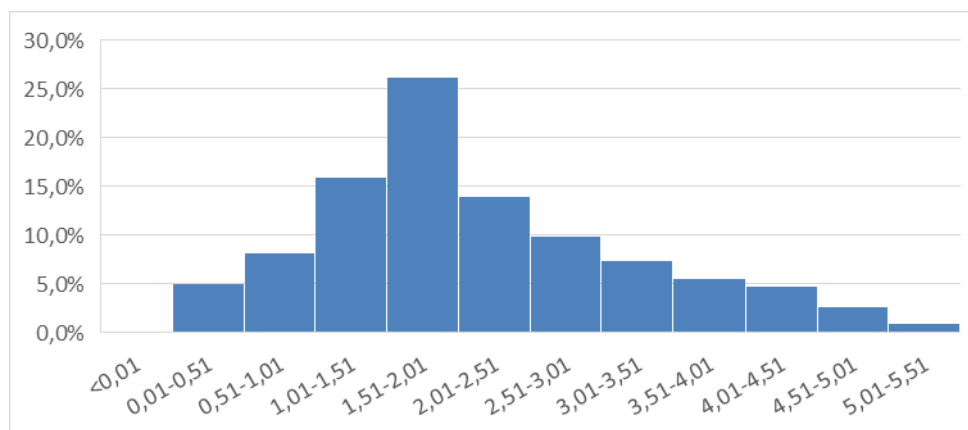
Variável	Desvio (°C)
Tmed	2,3
Maior desvio Tmed	6,1
Tmin	2,1
Maior desvio Tmin	5,4
Tmax	2,6
Maior desvio Tmax	8,1

**Organização:** Autores, 2025.

O Gráfico 9 mostra a frequência de ocorrência das diferenças entre as temperaturas mínimas médias registradas nos dois ambientes.

À partir do gráfico, entende-se que a diferença entre as temperaturas mínimas médias observadas em abrigo meteorológico e sobre a relva variam, em sua maioria (66%), entre 1°C e 3°C. Acima de 3°C, ocorre 21% das diferenças observadas, enquanto abaixo de 1°C ocorre apenas 13% das diferenças.

Portanto, conclui-se que a temperatura mínima sobre a relva é, em média, 2,1°C inferior à temperatura do ar registrada em abrigo meteorológico, enquanto a temperatura máxima é, em média, 2,6°C superior.



**Gráfico 9** - Frequência de ocorrência das diferenças entre as temperaturas em abrigo e sobre a relva.  
**Organização:** Autores, 2025.

Os resultados do Teste de Wilcoxon (Tabela 7) demonstram que a mediana da temperatura registrada na relva difere significativamente da mediana da temperatura registrada no abrigo meteorológico, tanto para a temperatura média, quanto para os valores extremos (máximos e mínimos). Ou seja, a temperatura sobre a relva é estatisticamente distinta da temperatura do ar registrada em abrigo meteorológico em todas as categorias de temperatura avaliadas, confirmando o que as estatísticas descritivas apontaram.

**Tabela 7:** Teste de Wilcoxon para as temperaturas média, máxima e mínima registradas sobre a relva em comparação com a registrada em abrigo meteorológico.

Temperatura	Teste de Wilcoxon (W)	P-value	Decisão ( $\alpha = 0,05$ )
Média	$3.484 \times 10^{+6}$	< 0,001	Diferença significativa
Máxima	$4.415 \times 10^{+6}$	< 0,001	Diferença significativa
Mínima	$2.359 \times 10^{+6}$	< 0,001	Diferença significativa

**Organização:** Autores, 2025.

Nos trabalhos de Vieira Junior *et al.* (2018) e Sentelhas *et al.* (1995), que encontraram diferenças de 5°C e 4,1°C, respectivamente, as estações meteorológicas usadas estavam instaladas de acordo com as normas da Organização Mundial Meteorológica (OMM, 2008), em um terreno plano e gramado e sem a presença de obstáculos próximos, já a estação meteorológica usada neste trabalho foi instalada no interior de uma lavoura de café, cercada por cafeeiros, além de solo exposto, que aumenta a intensidade da radiação solar e conseqüente aumento da temperatura próxima ao solo, sendo este o motivo para a diferença encontrada.

Sendo assim, a análise da temperatura sobre a relva reforça a classificação da área como apta ao cultivo, de acordo com os critérios do zoneamento. Porém, a continuidade do

monitoramento é fundamental, considerando a variabilidade interanual do clima e a possibilidade de eventos extremos em anos atípicos, como já ocorridos anteriormente.

### 3.6. Temperatura do cafeeiro

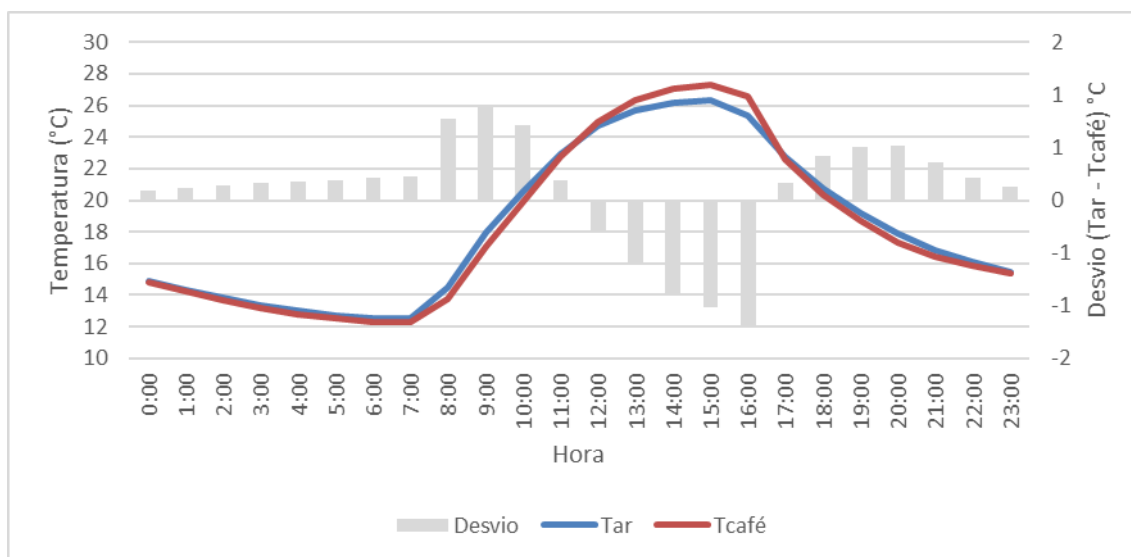
Para analisar a temperatura do cafeeiro, foram medidas temperaturas médias, máximas e mínimas horárias, a partir do sensor HMP35C, instalado no tronco do cafeeiro (Figura 3).



**Figura 3** - Sensor instalado em abrigo meteorológico na copa do cafeeiro.

**Fonte:** Autores, 2025.

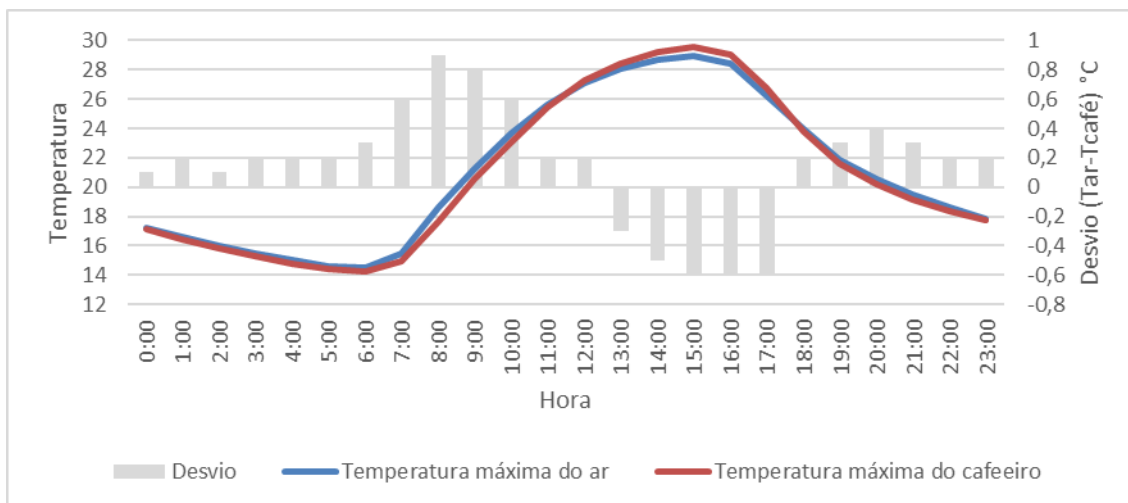
O Gráfico 10 mostra a comparação entre a temperatura do cafeeiro e a temperatura do ar em abrigo meteorológico.



**Gráfico 10** - Temperatura do ar média horária (abrigo) e do cafeeiro registrada na lavoura entre 18 de maio e 23 de novembro de 2024.

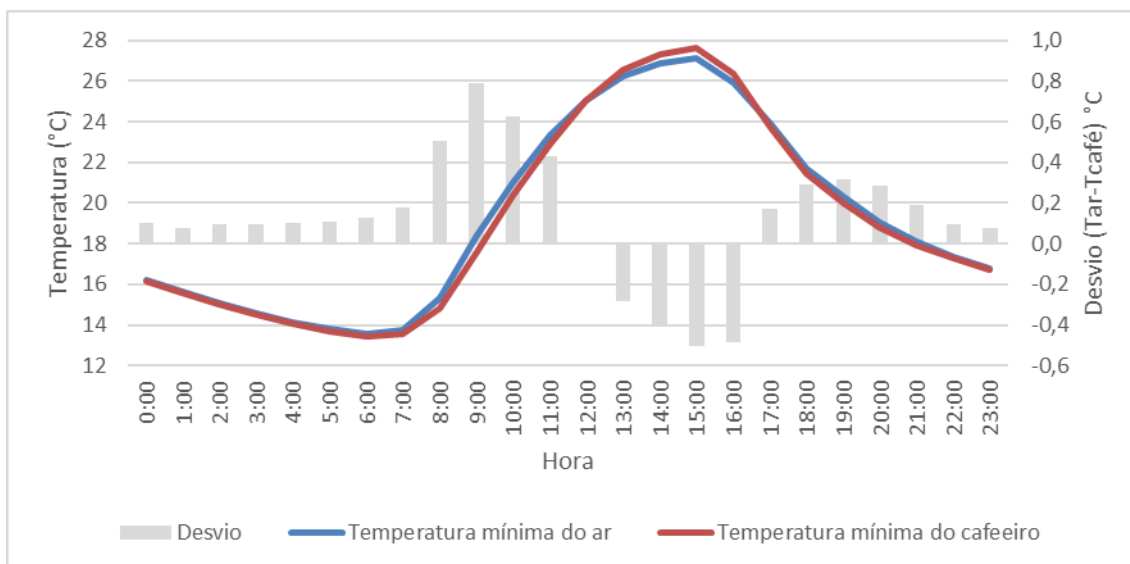
**Organização:** Autores, 2025.

Percebe-se que existe pouca ou quase nenhuma diferença entre as duas temperaturas, com erro médio absoluto (MAE) de apenas 0,4°C. Os dois sensores estão instalados a mesma altura, 1,5m em relação ao solo, o sensor do abrigo está a apenas 1m de distância do sensor do cafeeiro e envolto pela planta, por isso a pequena diferença encontrada. O mesmo ocorre para as temperaturas máximas e mínimas horárias, com erro médio absoluto de 0,4°C e 0,3°C, respectivamente, como apresentam os Gráficos 11 e 12.



**Gráfico 11** - Temperatura do ar máxima horária (abrigo) e do cafeeiro registradas na lavoura entre 18 de maio e 23 de novembro de 2024.

**Organização:** Autores, 2025.



**Gráfico 12** - Temperatura do ar mínima horária (abrigo) e do cafeeiro registradas na lavoura entre 18 de maio e 23 de novembro de 2024.

**Organização:** Autores, 2025.

O Teste Wilcoxon indicou uma diferença significativa nas medianas de temperaturas para as categorias média, máxima e mínima, como mostra a Tabela 8.

Entretanto, ao analisar a magnitude dessa diferença, observou-se que a variação entre as medianas das temperaturas do cafeeiro e do abrigo foi de apenas 0,3°C para a temperatura média, 0,4°C para a máxima e de 0,3°C para a temperatura mínima. Esta diferença está abaixo da margem do erro instrumental dos sensores ( $\pm 0,4^\circ\text{C}$ ). Portanto, embora a diferença seja estatisticamente significativa devido ao grande número de medições, ela carece de relevância prática. Não é possível afirmar, com confiança instrumental, que o cafeeiro induziu uma alteração real e mensurável de temperatura diferente do abrigo. Para fins práticos, o efeito de sombreamento do cafeeiro e a leitura do abrigo são considerados equivalentes.

**Tabela 8:** Teste de Wilcoxon para as temperaturas média, máxima e mínima registradas no cafeeiro em comparação com a registrada em abrigo meteorológico.

Temperatura	Teste de Wilcoxon (W)	P-value	Decisão ( $\alpha = 0,05$ )
Média	$3.484 \times 10^{+6}$	< 0,001	Diferença significativa
Máxima	$4.415 \times 10^{+6}$	< 0,001	Diferença significativa
Mínima	$2.359 \times 10^{+6}$	< 0,001	Diferença significativa

**Organização:** Autores, 2025.

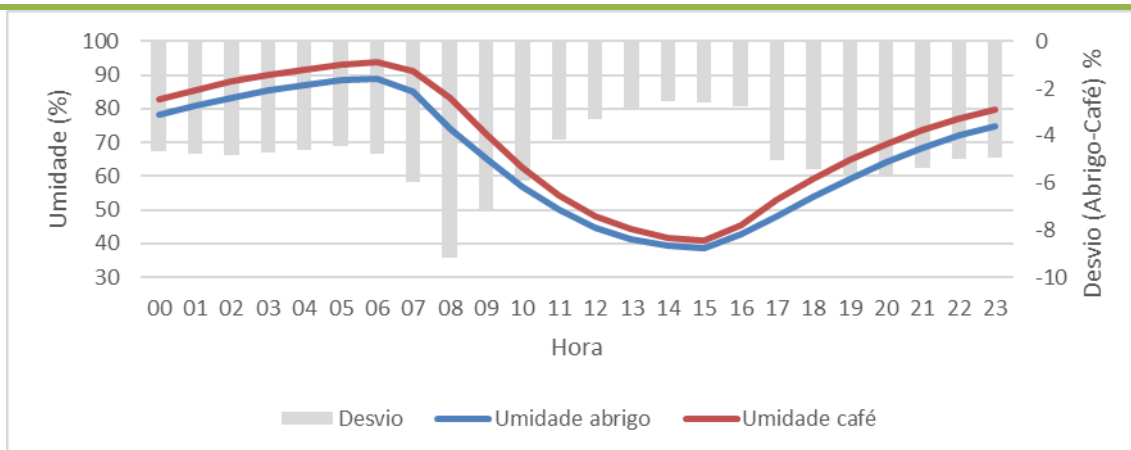
Portanto, conclui-se que tanto para a temperatura média, quanto para as temperaturas extremas, a diferença entre os registros em abrigo meteorológico e no cafeeiro são praticamente inexistentes, estando dentro do erro instrumental dos sensores. Isso prova que o abrigo meteorológico possui uma boa inércia térmica, atuando como se fosse, de fato, uma copa de árvore.

### 3.7. Umidade relativa do ar e do cafeeiro

Assim como a temperatura medida no cafeeiro, a umidade relativa do ar também foi medida pelo sensor HMP35, instalado no tronco da planta (Figura 3). A análise foi feita a partir da comparação com a umidade relativa do ar medida em abrigo meteorológico, apresentada no Gráfico 13.

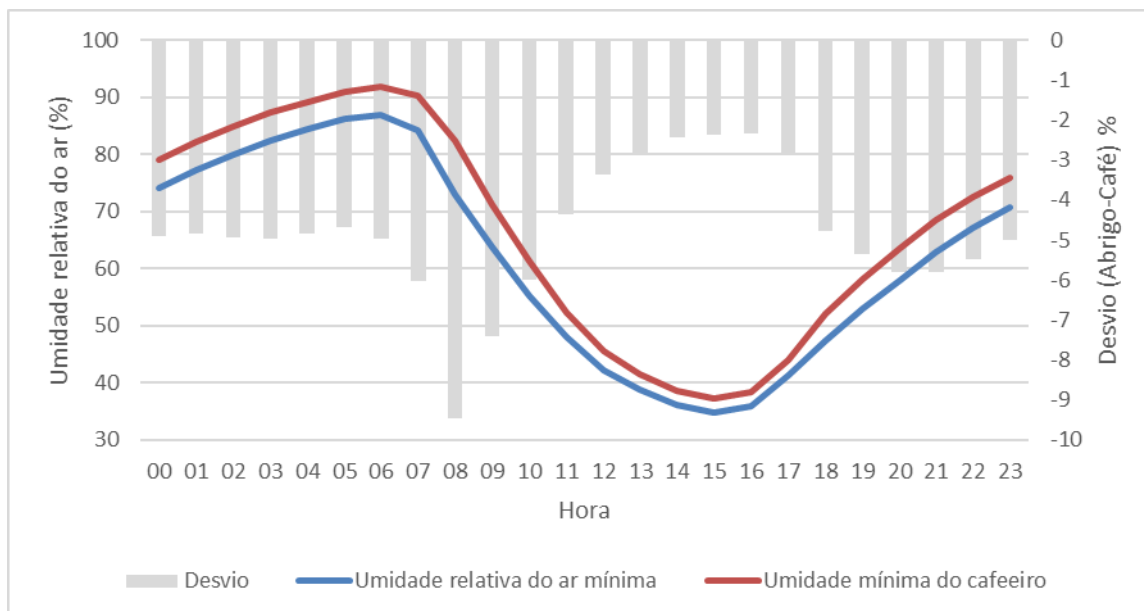
A umidade relativa do ar média horária registrada no cafeeiro é levemente superior à umidade relativa do ar registrada em abrigo meteorológico, com MAE de 4,9%. Isso ocorre devido à proximidade do sensor com a área foliar da planta, fazendo com que este ambiente seja levemente mais úmido que aquele fora da área foliar.

O mesmo comportamento foi observado para os valores máximos e mínimos horários, com MAE de 4,1% e 4,9%, respectivamente, pouco superior ao erro instrumental ( $\pm 3\%$ ). Os Gráficos 14 e 15 mostram o comportamento das duas variáveis.



**Gráfico 13** – Umidade relativa do ar média horária do ar (abrigo) e do cafeeiro registradas na lavoura entre 18 de maio e 23 de novembro de 2024.

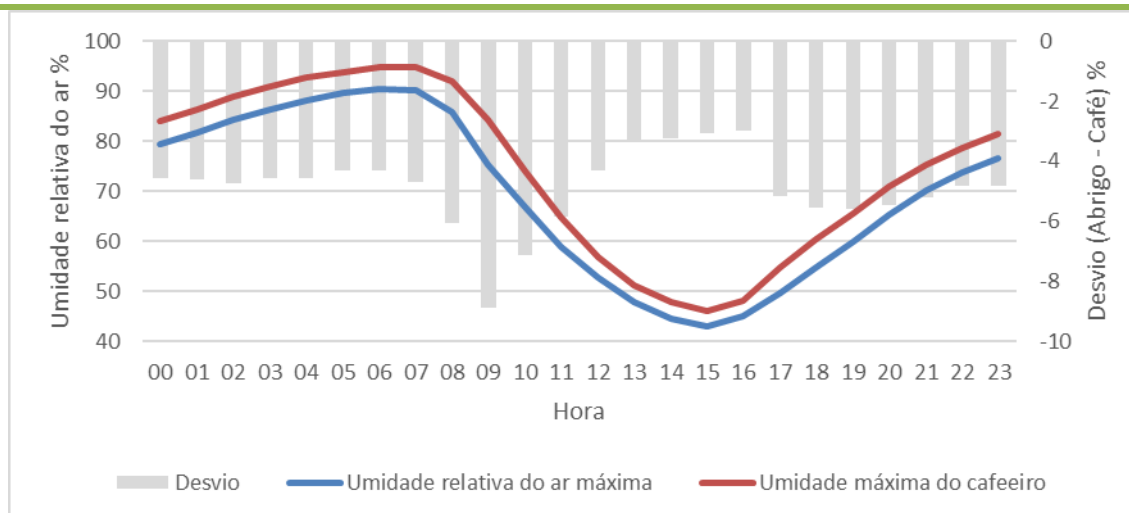
**Organização:** Autores, 2025.



**Gráfico 14** – Umidade relativa do ar mínima horária (abrigo) e do cafeeiro registradas na lavoura entre 18 de maio e 23 de novembro de 2024.

**Organização:** Autores, 2025.

Portanto, conclui-se que a umidade relativa do ar no cafeeiro é levemente superior comparada à umidade relativa do ar registrada em abrigo meteorológico, devido a proximidade do sensor com a área foliar da planta.



**Gráfico 15** – Umidade relativa do ar máxima horária (abrigo) e do cafeeiro registradas na lavoura entre 18 de maio e 23 de novembro de 2024.

**Organização:** Autores, 2025.

### 3.8. A produção de café local em 2024

Em 2024 foram produzidas 62 sacas (60kg) de café. Em anos anteriores a produção foi consideravelmente maior, como 180 sacas em 2023. Esse baixo número em 2024 é explicado pelo esqueletamento de grande parte da lavoura, com o objetivo de renová-la. Dos 21 mil pés plantados na propriedade, apenas 12 mil produziram, sendo 5 mil deles o primeiro ano de colheita, que naturalmente tem baixa produção. Os produtores estimam colher mais de 200 sacas em 2025.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização do microclima do cafeeiro arábica realizada neste estudo evidenciou a relevância do monitoramento climático em escala local para o entendimento das condições ambientais que influenciam diretamente no desenvolvimento da cultura. A instalação da estação meteorológica no interior da lavoura, permitiu a coleta contínua de dados das principais variáveis meteorológicas entre os meses de maio e novembro de 2024, fornecendo subsídios importantes para a análise microclimática do ambiente cultivado.

Os resultados demonstraram que as condições microclimáticas dentro da lavoura diferem substancialmente das medições convencionais feitas em abrigos meteorológicos padronizados. Especificamente, a temperatura sobre a relva, avaliada pelo Teste de Wilcoxon, apresentou valores estatisticamente diferentes ( $p < 0,001$  para média, máxima e mínima) do abrigo, com valores significativamente inferiores nos períodos mais frios e

superiores nos horários de máxima radiação solar, ressaltando o papel da exposição do solo e da cobertura vegetal no comportamento térmico próximo à superfície.

Houve períodos de excesso de radiação solar global nos meses entre agosto e novembro, mas minimizados pelo total pluviométrico nos meses de outubro e novembro, não causando prejuízos na produtividade. Porém, em anos de deficiência hídrica acentuada, a alta radiação pode reduzir a fotossíntese e gerar grandes prejuízos.

O balanço hídrico climatológico revelou períodos críticos de deficiência hídrica entre os meses de junho e setembro, o que pode comprometer o desenvolvimento da cultura em anos de precipitação irregular, mesmo em áreas classificadas como aptas segundo o zoneamento agroclimático. Esse resultado reforça a importância do monitoramento contínuo das condições locais e do manejo adequado da água, seja por meio de irrigação suplementar, cobertura do solo ou planejamento do calendário agrícola.

As análises das temperaturas sob o cafeeiro e da umidade relativa do ar próxima à planta indicaram diferenças sutis em relação aos dados obtidos em abrigo meteorológico. Embora o Teste de Wilcoxon tenha detectado diferenças estatisticamente significativas ( $p < 0,001$ ) entre as medianas de temperatura, a magnitude dessa variação foi baixa (ex:  $0,4^{\circ}\text{C}$  na média). Como esta diferença está dentro do erro instrumental dos sensores ( $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ ), conclui-se que, para fins práticos de manejo, o microclima termicamente amortecido pelo cafeeiro e as leituras do abrigo podem ser considerados equivalentes. Isso evidencia que a estrutura morfológica do cafeeiro contribui para a criação de um microambiente próprio, mais úmido e termicamente amortecido, que pode influenciar diretamente no metabolismo vegetal, na ocorrência de pragas e doenças, e no potencial produtivo da cultura.

Ao comparar os dados locais com os critérios do zoneamento agroclimático proposto por Sediya *et al.* (2001), constatou-se que a área estudada apresentou, em geral, condições compatíveis com as exigências climáticas da cultura, como temperatura mínima acima do limiar crítico de  $2^{\circ}\text{C}$  em abrigo meteorológico e baixos déficits hídricos no período de maior exigência fisiológica da planta no período analisado. Contudo, observou-se que a distribuição irregular das chuvas, especialmente nos meses de inverno, impôs limitações hídricas pontuais, o que reforça a importância de práticas de manejo adaptativas, como irrigação suplementar e cobertura do solo.

A caracterização do microclima evidenciou a importância de considerar as variáveis em escala local para um planejamento agrícola mais eficiente. A comparação entre os dados locais e o zoneamento regional revelou que, embora o modelo macroclimático ofereça diretrizes importantes, ele não contempla as variações impostas por elementos

locais como topografia, tipo de solo, cobertura vegetal e práticas de manejo. A análise da temperatura sobre a relva mostrou-se fundamental para avaliar o risco real de geadas, cujos efeitos podem não ser percebidos em medições convencionais em abrigo meteorológico.

Dessa forma, conclui-se que o estudo do microclima no interior da lavoura de café não apenas contribui para um melhor entendimento dos fatores que afetam o cafeeiro, mas também oferece dados fundamentais para a adoção de práticas agrícolas mais eficientes, sustentáveis e adaptadas às condições locais. A continuidade do monitoramento, a replicação da metodologia em diferentes regiões e o uso dos dados em modelos de previsão agrônômica podem ampliar significativamente a eficiência do planejamento agrícola e a mitigação de riscos climáticos.

Portanto, a análise microclimática é uma ferramenta essencial para complementar e, em alguns casos, aprimorar os critérios estabelecidos em modelos regionais de zoneamento. A integração entre escalas regional e local permite uma visão mais precisa dos riscos climáticos e da aptidão agrícola, contribuindo para a construção de uma cafeicultura mais resiliente, produtiva e sustentável.

Recomenda-se, por fim, a ampliação de estudos similares em outras regiões produtoras, com diferentes altitudes e características edafoclimáticas, bem como a incorporação de dados microclimáticos nos sistemas de zoneamento agroclimático, de modo a fortalecer as políticas públicas, a gestão de risco climático e a tomada de decisão por parte dos produtores rurais.

## **AGRADECIMENTOS**

O primeiro autor agradece à CAPES pela bolsa de mestrado concedida durante o período de 24 meses, que possibilitou o desenvolvimento da pesquisa. O segundo autor agradece o apoio do CNPq por meio da concessão da bolsa de pesquisa e produtividade (PQ1D).

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6. p. 711-728, 2013.

BOOTSMA, A. Estimating grass minimum temperatures from screen minimum values and other climatological parameters. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v.16, n.1, p.103-113, 1976.

---

CAMARGO, A. P.; PEREIRA, A. R. Agrometeorology of the coffee crop. **WMO**, Geneva, 1994. 43p.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. N. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001.

CAMARGO, M. B. P. The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in Brazil. **Bragantia**, Campinas, v. 69, p. 239-247, 2010.

CARAMORI, P. H. CHAVES, J. C. D. Proteção de cafeeiros jovens contra os efeitos de geadas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 6, p. 665-668, 1984.

DAMALGO, G. A.; CUNHA, G. R.; PIRES, J. L. F.; SANTI, A.; FOCHESSATTO, E. Potencial de aplicação da agrometeorologia em agricultura de precisão para produção de grãos. In: BERNARDI, A. C. C.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Eds.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília: Embrapa, 2014. cap. 31, p.331-337.

DAMATTA, F. M.; RONCHI, C. P.; MAESTRI, M.; BARROS, R. S. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Brasília, v. 19, n. 4, p. 485-510, 2007.

GEIGER, R. **Manual de micrometeorologia: o clima da camada de ar junto ao solo**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1961.

GEIGER, R. **The climate near the ground**. Cambridge: Harvard University Press, 1966.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Produção Agrícola Municipal, Brasil, 2022*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>. Acesso em: 16 out. 2025.

LULU, J.; CASTRO, J. V.; PEDRO JÚNIOR, M. J. Efeito do microclima na qualidade da uva de mesa 'Romana' (A 1105) cultivada sob cobertura plástica. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p. 422-425, 2005.

MARIN, A. M. P.; MENESES, R. S. C.; SILVA, E. D.; SAMPAIO, E. V. S. B. Efeito da *Gliricidia sepium* sobre nutrientes do solo, microclima e produtividade do milho em sistema agroflorestal no Agreste Paraibano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.30, n.3, p.555-564, 2006.

MEIRELES, E. J. L.; CAMARGO, M. B. P. de; PEZZOPANE, J. R. M.; THOMAZIELLO, R. A.; FAHL, J. I.; BARDIN, L.; SANTOS, J. C. F.; JAPIASSÚ, L. B.; GARCIA, A. W. R.; MIGUEL, A. E.; FERREIRA, R. A. **Fenologia do cafeeiro: condições agrometeorológicas e balanço hídrico do ano agrícola 2004-2005**. Brasília: Embrapa, 2009. 128p.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. *Sumário Executivo – Café*. Agosto–2023. Disponível em: [http://www.consorciopesquisacafe.com.br/images/stories/noticias/2021/2023/Agosto/Sumario\\_Cafe\\_agosto\\_2023.pdf](http://www.consorciopesquisacafe.com.br/images/stories/noticias/2021/2023/Agosto/Sumario_Cafe_agosto_2023.pdf) Acesso em: 16 out. 2025.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. Principles of Environmental Physics. 3rd ed. Amsterdam: **Elsevier/Academic Press**, 2008.

NIEMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 421p.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia**: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: **Ed. Agropecuária**, 2002. 478p.

PEZZOPANE, J. R. M. PEDRO JÚNIOR, M. J.; THOMAZIELLO, R. A.; CAMARGO, M. B. P. Escala para avaliação de estádios fenológicos do cafeeiro arábica. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 3, p. 501-505, 2003.

PEZZOPANE, J. R. M.; SOUZA, P. S.; ROLIM, G. S.; GALLO, P. B. Microclimate in coffee plantation grown under grevillea trees shading. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 33, n. 2, p. 201–206, 2011.

PINTO, H. S. *et al.* Estimation of frost damage in coffee trees in the State of São Paulo, Brazil. In: CONFERENCE ON AGRICULTURE AND FOREST METEOROLOGY, 13., 1977, Boston. **Proceedings...** Boston: American Meteorological Society, 1977. p.37-38.

RAHN, J. J.; BROWN, D. M. Estimating corn canopy extreme temperatures from shelter values. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 8, n. 1, p. 129-138, 1971.

RIBEIRO, A. G. As escalas do clima. **Boletim de Geografia Teorética**, Brasil, v. 23, n. 46, p. 288-294, 1993.

SATO, F. A.; SILVA, A. M.; COELHO, G.; SILVA, A. C.; CARVALHO, L. G. Coeficiente de cultura (Kc) do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) no período de outono-inverno na região de Lavras – MG. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 383–391, 2007.

SEDIYAMA, G. C. *et al.* Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v. 9, n. 3, 2001.

SENTELHAS, P. C.; ORTOLAN, A. A.; PEZZOPANE, J. R. M. Estimativa da temperatura mínima de relva e da diferença de temperatura entre o abrigo e a relva em noites de geada. **Bragantia**, Campinas, v. 54, n. 2, p. 437-445, 1995.

VIANELLO, R. L. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 1991. p.113-122.

VIEIRA JUNIOR, N. A. *et al.* Diferenças de temperatura mínima entre o abrigo meteorológico e a relva em noites com geadas. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 39, n. 6, p. 2337–2350, 2018.

Recebido: 20/12/2025

Aceito: 05/01/2026