



LORENA JÚLIO GONÇALVES

**EFEITOS CLIMÁTICOS NO DESENVOLVIMENTO
E PRODUÇÃO DA CULTURA DO MILHO E NAS
OPERAÇÕES MECANIZADAS EM UM LATOSSOLO
VERMELHO Distrófico típico**

**LAVRAS-MG
2026**

LORENA JÚLIO GONÇALVES

**EFEITOS CLIMÁTICOS NO DESENVOLVIMENTO E PRODUÇÃO DA
CULTURA DO MILHO E NAS OPERAÇÕES MECANIZADAS EM UM
LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para obtenção do título de Doutora.

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ GONSAGA DE CARVALHO**
Data: 06/08/2026 23:05:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho
Orientador

Profs. Drs. Bruno Montoani, Cristiano Tagliaferre e Felipe Schwerz
Coorientadores

**LAVRAS-MG
2026**

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Gonçalves, Lorena.

Efeitos climáticos no desenvolvimento e produção da cultura do milho e nas operações mecanizadas em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico / Lorena Gonçalves. - 2026.

119 p. : il.

Orientador: Luiz Carvalho

Coorientador: Bruno Montoani

Coorientador: Cristiano Tagliaferre

Coorientador: Felipe Schwerz

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2026.

Bibliografia.

1. AquaCrop. 2. Variabilidade climática. 3. Balanço hídrico. 4. Trabalhabilidade do solo. 5. Cadeia de Markov. I. Carvalho, Luiz. II. Montoani, Bruno. III. Tagliaferre, Cristiano. IV. Schwerz, Felipe. V. Universidade Federal de Lavras. VI. Título.

LORENA JÚLIO GONÇALVES

**EFEITOS CLIMÁTICOS NO DESENVOLVIMENTO E PRODUÇÃO DA
CULTURA DO MILHO E NAS OPERAÇÕES MECANIZADAS EM UM
LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico**

**CLIMATIC EFFECTS ON THE DEVELOPMENT AND YIELD OF MAIZE
AND ON MECHANIZED OPERATIONS IN A TYPICAL DYSTROPHIC RED
LATOSOL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Irrigação e Drenagem, para obtenção do título de Doutora.

Aprovada em 16 de abril de 2026.

Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho (Presidente) – Universidade Federal de Lavras

Dr. Adriano Valentim Diotto (Membro interno) – Universidade Federal de Lavras

Dra. Samara Martins Barbosa (Membra interna) – Universidade Federal de Lavras

Dra. Lorena Lima Ferraz (Membra externa) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Dra. Marília Alves Brito Pinto (Membra externa) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho
Orientador

Profs. Drs. Bruno Montoani, Cristiano Tagliaferre e Felipe Schwerz

Coorientadores

**LAVRAS-MG
2026**

Ao meu amado pai, Aluísio (in memoriam), minha maior referência na Terra.

Um homem alegre, inteligente e afetuoso, que encheu minha infância de música e cuidado. Você, que construía instrumentos e me ensinou as primeiras notas no piano aos quatro anos, sempre me enxergou com respeito e me amou de verdade. Quando você partiu tão precocemente, aos 35 anos, uma parte de mim se foi com você. Ainda assim, o legado do seu amor inabalável continuou guiando os meus passos até aqui. Hoje, transformo essa imensa saudade em conquista ao encerrar este ciclo. Com amor eterno, da sua picurruxa.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, de todo o meu coração, aos Orixás e a todas as Entidades de luz. A vocês, a minha gratidão por me sustentarem, por renovarem a minha fé e por me concederem a sanidade, a paciência e a persistência necessárias para atravessar e sobreviver a esta jornada.

Às minhas ancestrais e a todas as mulheres que vieram antes de mim, o meu mais profundo e reverente agradecimento. A cada mulher preta que precisou correr, resistir e desbravar caminhos para que hoje eu pudesse apenas andar e ocupar este espaço acadêmico. Nós sabemos que as estruturas não foram desenhadas para nos acolher, e a travessia exige uma força incomensurável quando se carrega no corpo e na história o peso, mas também a imensa potência, da interseccionalidade: ser mulher, preta, de origem humilde e mãe solo. Cada página desta tese e cada passo dado até o título de Doutora são atos de resistência e de amor. Este título não é apenas meu; é a materialização dos sonhos daquelas que tiveram suas vozes silenciadas. Honro o suor das que pavimentaram esta estrada árdua, pois é sobre os ombros de gigantes que hoje me ergo: “eu sou porque nós somos”. E é fortalecida por esse legado imortal de resistência que sigo lutando e abrindo portas, para que amanhã João e Lis possam não apenas andar, mas voar em um mundo onde nossos corpos, nossas mentes e as nossas produções sejam plenamente celebrados e respeitados.

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, pela vivência enriquecedora e por todo o aprendizado acadêmico.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida, fomento fundamental para a viabilização desta pesquisa.

Ao meu orientador, professor Luiz Gonsaga, por abrir as portas para uma oportunidade maravilhosa na docência voluntária, pela imensa partilha de aprendizado e, sobretudo, pelo cuidado humano e sensível nos momentos em que a minha própria mente se voltou contra mim.

Aos meus coorientadores, Bruno Montoani, Cristiano Tagliaferre e Felipe Schwerz, pelas contribuições valiosas e significativas que deram forma e rigor a este estudo.

Ao professor Adriano Valentim Diotto, por todo o conhecimento compartilhado, pela disponibilidade constante, pela atenção e pelo auxílio inestimável ao longo de todo o meu doutorado.

Ao professor Michael Thebaldi, pelo irrestrito apoio profissional e pessoal, e por ser uma das forças que não me deixaram desistir.

À minha querida amiga e competente profissional, Alice Caminha, pelo apoio incondicional em absolutamente todos os aspectos e por nunca soltar a minha mão.

À minha xará, amiga e professora, Lorena Lima Ferraz: quando eu me perdia no emaranhado da tese, você estava lá para me ajudar a me encontrar novamente. Sem você, o caminho teria sido infinitamente mais difícil.

À minha ex-professora e grande amiga, Daíse Cardoso, pelo apoio que sempre chegou em forma de abraço, pela colaboração valiosa com a tese e por não me deixar sentir sozinha na reta final deste processo.

Ao meu amigo Douglas Henrique, por caminhar ao meu lado quando tudo parecia um caos e por ter a imensa paciência de acolher as minhas angústias e ouvir as mesmas reclamações.

À Clarice Maciel, muito mais que uma amiga, uma irmã de alma há quase 38 anos. A distância geográfica nunca foi barreira para a imensidão do nosso laço. Agradeço profundamente pela escuta atenta e sem julgamentos, pela capacidade rara de me compreender até mesmo no silêncio e por ter lutado cada uma das minhas batalhas como se fossem suas. Essa vitória também é fruto da sua força na minha vida.

Às minhas amigas Daniele Pereira e Maria Natália, que me ensinaram a lutar quando tudo estava escuro e me ajudaram a enxergar a luz no fim do túnel.

À Renata Villas Boas, por ser a prova de que a verdadeira amizade não conhece fronteiras. Agradeço o apoio incondicional durante todo esse processo e por me mostrar que, independentemente da distância geográfica ou do tempo, a nossa conexão permanece intacta a cada reencontro, sempre com a mesma leveza, como se nunca tivéssemos nos separado.

À Naira, Raeli, Tatyara, Thaís e Thárcia, mulheres extraordinárias que a vida me deu o privilégio de escolher como família. O meu mais profundo muito obrigada por todo o afeto compartilhado, por serem o meu pronto-socorro nos dias mais difíceis de aflição e, acima de tudo, pela profunda *dororidade* que nos une, acolhe e que me fortaleceu para seguir em frente.

Ao Anderson Lima (Lordcinho), o grande querido da pós-graduação. Gratidão por ser o abraço em forma de conteúdo nas redes sociais, compartilhando informações tão vitais com uma generosidade ímpar. Obrigada por conseguir arrancar sorrisos nos meus momentos mais desesperados e por provar que o afeto e o cuidado atravessam as telas, tornando a solidão da pesquisa muito mais leve.

Ao Coletivo de Mães da UFLA, meu porto seguro, pelo amparo emocional e, muitas vezes, financeiro, que foi o verdadeiro pilar para a minha permanência na universidade.

Aos profissionais do Núcleo de Saúde Mental da UFLA, Elisângela, o psicólogo João Maurício e o psiquiatra Gilbran Salem, pelo acolhimento, pelo tratamento e por cuidarem de mim com tanta dedicação ao longo desses anos difíceis.

À minha tia Andréia Cristina, por sempre ter acreditado em mim, inclusive (e especialmente) naqueles dias em que eu mesma já não acreditava.

E, por último, o meu agradecimento mais profundo: aos meus filhos, João e Lis. Obrigada pelo sacrifício de "perderem" parte da atenção da mãe para que eu pudesse me dedicar a este doutorado. Espero que a vida nos conceda muito tempo para recuperarmos cada instante perdido. Esta vitória é nossa.

Às vezes eu quero aprender, e não tenho como pagar, e quando é com mestres e mestras, os mestres e as mestras não cobram, eles ensinam para manter o conhecimento vivo. Quando você compartilha o saber, o saber só cresce, é como as águas que confluenciam. Quando o rio encontra o outro rio, ele não deixa de ser um rio, ele passa a ser um rio maior. Quanto mais você ensina, mais você aprende, e aprender mesmo, a gente aprende, quando o saber não é mercadoria”

(Nego Bispo)

RESUMO GERAL

A sustentabilidade e a eficiência dos sistemas de produção agrícola dependem da compreensão profunda das interações edafoclimáticas, especialmente frente à crescente variabilidade climática. Esta tese objetivou avaliar os impactos das mudanças climáticas globais nas demandas de irrigação e na produtividade da cultura do milho, bem como dimensionar a probabilidade temporal para a execução de operações mecanizadas em um Latossolo Vermelho Distrófico típico, no município de Lavras, MG. A pesquisa foi estruturada em dois eixos metodológicos complementares. No primeiro eixo, quantificaram-se os impactos das projeções do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6), obtidas por meio do modelo MIROC6 e corrigidas pelo algoritmo *Quantile Delta Mapping* (QDM), na demanda hídrica e na produtividade do milho safra principal e safrinha. As simulações foram conduzidas no software AquaCrop sob o clima histórico de referência e as trajetórias socioeconômicas partilhadas SSP245 (mitigação moderada) e SSP585 (alta emissão) até o ano de 2099, avaliando-se a dinâmica temporal por meio dos testes não paramétricos de Mann-Kendall e Kruskal-Wallis. No segundo eixo, estimou-se a probabilidade de ocorrência de dias trabalháveis a partir de uma série climática histórica de 30 anos (1995 a 2024), integrando o método do balanço hídrico sequencial diário às propriedades físicas do solo e à teoria das probabilidades por meio de Cadeias de Markov de primeira ordem. Os resultados do primeiro artigo evidenciaram respostas ecofisiológicas assimétricas entre as épocas: na safra principal, o forçamento extremo (SSP585) impôs severa supressão pluviométrica e estresse térmico que encurtaram a fenologia e rebaixaram a produtividade mediana a 11.710,0 kg/ha, com tendência de degradação contínua, enquanto a safrinha apresentou alta volatilidade com falhas reprodutivas recorrentes e quebras estruturais, tendo o cenário SSP245 preservado a estabilidade produtiva do sistema. O segundo artigo atestou severa restrição temporal para o tráfego agrícola, onde o excesso pluviométrico de verão elevou o armazenamento relativo de água no solo (ARAS) acima de 90% (estado plástico com risco de compactação), e a estiagem de fim de inverno reduziu o ARAS abaixo de 40% (consistência dura que inviabiliza o preparo), concentrando a janela primária de friabilidade no outono (abril e maio) com alta fragmentação interna. Conclui-se que a conjugação de forçantes climáticas severas e janelas operacionais restritas exige a superação de calendários agrícolas estáticos, demandando a transição compulsória para sistemas de irrigação adaptativa de precisão e o redimensionamento dinâmico de frotas

de máquinas para otimizar os curtos intervalos de trabalhabilidade, subsidiando a formulação de políticas públicas proativas para a adaptação agrícola e a conservação dos recursos naturais.

Palavras-chave: AquaCrop; Variabilidade climática; *Zea mays*; Trabalhabilidade do solo; Balanço hídrico; Cadeia de Markov.

GENERAL ABSTRACT

The sustainability and efficiency of agricultural production systems depend on a deep understanding of edaphoclimatic interactions, especially in the face of increasing climate variability. This thesis aimed to evaluate the impacts of global climate change on irrigation demands and maize crop yield, as well as to determine the temporal probability for executing mechanized operations in a typical Dystrophic Red Latosol in the municipality of Lavras, MG. The research was structured into two complementary methodological axes. In the first axis, the impacts of the *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) projections, obtained through the MIROC6 model and corrected by the *Quantile Delta Mapping* (QDM) algorithm, were quantified on the water balance and yield of both main (safra) and off-season (safrinha) maize crops. Simulations were conducted using the AquaCrop software under the historical reference climate and the shared socioeconomic pathways SSP245 (moderate mitigation) and SSP585 (high emissions) up to the year 2099, evaluating temporal dynamics using Mann-Kendall and Kruskal-Wallis non-parametric tests. In the second axis, the probability of occurrence of workable days was estimated based on a 30-year historical climate series (1995 to 2024), integrating the daily sequential water balance method with soil physical properties and probability theory through first-order Markov chains. The results of the first article evidenced asymmetric ecophysiological responses between seasons: for the main crop, extreme forcing (SSP585) imposed severe rainfall suppression and thermal stress that shortened phenology and lowered median yield to 11,710.0 kg/ha, with a continuous degradation trend, whereas the off-season crop exhibited high volatility with recurrent reproductive failures and structural collapses, while the SSP245 scenario preserved system productivity stability. The second article attested to a severe temporal restriction for agricultural traffic, where summer excess rainfall raised the relative soil water storage (RSWS) above 90% (plastic state with compaction risk), and late-winter drought reduced RSWS below 40% (hard consistency making tillage unfeasible), concentrating the primary friability window in the autumn (April and May) with high internal fragmentation. It is concluded that the combination of severe climatic forcings and restricted operational windows requires overcoming static agricultural calendars, demanding a mandatory transition to precision adaptive irrigation systems and the dynamic resizing of machinery fleets to optimize short workability intervals, supporting

the formulation of proactive public policies for agricultural adaptation and natural resource conservation.

Keywords: AquaCrop; Climate variability; *Zea mays*; Soil workability; Water balance; Markov chain.

INDICADORES DE IMPACTOS

Os resultados obtidos nesta tese geram impactos multidimensionais, conectando a modelagem climática de precisão a demandas socioambientais e operacionais urgentes. Do ponto de vista tecnológico e econômico, a modelagem agrometeorológica comprovou que o planejamento fundamentado em médias climatológicas mensais subestima o risco de colapso da safra, e o mapeamento da instabilidade hídrica na safrinha (principalmente sob o cenário SSP585) permite um manejo mais adequado para evitar que qualquer tipo de estresse gere perda total de produção. A identificação das curtas janelas de friabilidade do solo no outono fornece parâmetros exatos para o redimensionamento da capacidade operacional de máquinas, inclusive reduzindo os custos com combustível e depreciação do maquinário, prevenindo perdas econômicas oriundas da degradação física do solo.

O público beneficiado por esta pesquisa transcende o âmbito estritamente acadêmico. Inicialmente, a pesquisa impacta de forma direta o ensino e a formação de dezenas de estudantes de graduação que cursaram a disciplina de Agrometeorologia na Universidade Federal de Lavras (UFLA), que pode ser utilizado, inclusive transformado e utilizado como material didático, além de fornecer uma base de dados climatológicos calibrada (QDM) de alta precisão que permitirá a outros pesquisadores o aprimoramento contínuo das investigações na área. Contudo, o impacto estende-se de forma concreta ao setor produtivo. Agricultores familiares, médios produtores rurais e operadores de máquinas no município de Lavras e em toda a macrorregião do Sul de Minas Gerais passam a dispor de conhecimento aplicado para o enfrentamento da vulnerabilidade climática. Em uma escala macro, a própria população é beneficiada de forma direta, uma vez que a estruturação de uma cadeia produtiva resiliente e bem manejada é o pilar fundamental para garantir a produção e a entrega contínua de alimentos de qualidade à sociedade.

O caráter extensionista da tese consolida-se na tradução da complexidade dos Modelos de Circulação Global (CMIP6) em respostas agronômicas tangíveis, viabilizando o desenvolvimento de programas de assistência técnica e extensão rural (ATER) muito mais eficientes. Esta abordagem alinha-se a três áreas temáticas prioritárias da Política Nacional de Extensão: Meio Ambiente, por meio da antecipação de cenários para a conservação do solo e da água; Tecnologia e Produção, pela otimização do planejamento mecanizado e de irrigação via *software* AquaCrop; e

Direitos Humanos e Justiça, pelo fornecimento de ferramentas de enfrentamento ao racismo ambiental e agrícola, protegendo populações vulneráveis.

Por fim, os impactos da pesquisa demonstram profundo alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU). O estudo responde diretamente ao ODS 2 (Fome Zero e Agricultura Sustentável), ao projetar soluções para a manutenção da produtividade do milho; ao ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), ao combater o desperdício de recursos por meio do uso eficiente da água e do maquinário; e ao ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), ao quantificar matematicamente os impactos do forçamento radiativo e formular estratégias ativas de adaptação climática regional.

IMPACTOR INDICATORS

The results obtained in this thesis generate multidimensional impacts, connecting precision climate modeling to urgent socio-environmental and operational demands. From a technological and economic perspective, agrometeorological modeling has proven that planning based on monthly climatological averages underestimates the risk of crop failure, and mapping water instability in the off-season crop (primarily under the SSP585 scenario) enables more appropriate management to prevent any type of stress from causing total yield loss. The identification of short soil friability windows in the autumn provides exact parameters for resizing the operational capacity of machinery, thereby reducing fuel costs and machinery depreciation, as well as preventing economic losses arising from physical soil degradation.

The audience benefiting from this research transcends the strictly academic sphere. Initially, the research directly impacts the teaching and training of dozens of undergraduate students who took the Agrometeorology course at the Federal University of Lavras (UFLA), as it can be transformed and utilized as didactic material. Furthermore, it provides a highly accurate calibrated climatological database (QDM) that will enable other researchers to continuously improve investigations in the field. However, the impact concretely extends to the productive sector. Family farmers, medium-sized rural producers, and machine operators in the municipality of Lavras and throughout the macro-region of Southern Minas Gerais now have access to applied knowledge to address climate vulnerability. On a macro scale, the general population benefits directly, since the structuring of a resilient and well-managed production chain is the fundamental pillar for ensuring the continuous production and delivery of quality food to society.

The extensionist nature of the thesis is consolidated by translating the complexity of Global Climate Models (CMIP6) into tangible agronomic responses, facilitating the development of much more efficient technical assistance and rural extension (ATER) programs. This approach aligns with three priority thematic areas of the National Extension Policy: Environment, through the anticipation of scenarios for soil and water conservation; Technology and Production, through the optimization of mechanized and irrigation planning via the AquaCrop software; and Human Rights and Justice, by providing tools to confront environmental and agricultural racism, thereby protecting vulnerable populations.

Finally, the research impacts demonstrate a profound alignment with the United Nations (UN) Sustainable Development Goals (SDGs). The study responds directly to SDG 2 (Zero Hunger), by designing solutions to maintain maize yield; to SDG 12 (Responsible Consumption and Production), by combating resource waste through the efficient use of water and machinery; and to SDG 13 (Climate Action), by mathematically quantifying the impacts of radiative forcing and formulating active strategies for regional climate adaptation.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	17
Artigo 1 - Impactos das mudanças climáticas sobre a ecofisiologia do milho safra e safrinha sob cenários climáticos simulados	20
1. INTRODUÇÃO	22
2. MATERIAL E MÉTODOS	24
2.1 Área de estudo	24
2.2 Obtenção dos dados	25
2.2.1 Dados dos cenários climáticos	25
2.2.2 Correção de viés dos dados históricos e projeções futuras	25
2.2.3 Dados da cultura e Manejo da cultura	29
2.2.4 Simulação no Software	30
2.2.5 Análise estatística	30
3. RESULTADOS	32
3.1 Correção de viés dos dados climáticos futuros	32
3.2 Simulações no software Aquacrop de safra e safrinha para a cultura do milho	37
3.2.1 Simulação do milho safra	37
3.2.1 Simulação do milho safrinha	51
4. DISCUSSÃO	66
4.1 Correção de viés dos dados climáticos futuros	66
4.2 Simulações no software Aquacrop de safra e safrinha para a cultura do milho	67
4.3 Implicações para o manejo de campo	72
4.4 A instabilidade do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e as incertezas na modelagem climática extrema	73
5. CONCLUSÃO	75
6. AGRADECIMENTO	76
7. REFERÊNCIAS	77
Artigo 2 – Influência da precipitação e da disponibilidade hídrica nos dias trabalháveis com máquinas agrícolas em Latossolo Vermelho distrófico	84
1. INTRODUÇÃO	86
2. MATERIAL E MÉTODOS	88
2.1 Área de estudo	88
2.2 Obtenção dos dados climáticos	89

2.3 Obtenção dos dados do solo	90
2.4 Balanço hídrico sequencial diário.....	90
2.5 Caracterização dos períodos de favorabilidade às operações com máquinas agrícolas	91
2.6 Estimativa do número de dias trabalháveis com máquinas agrícolas utilizando a cadeia de MARKOV de primeira ordem.....	92
2.7 Análise estatística para comparação das Normais Climatológicas de 1991 a 2020 (INMET) e do estudo, de 1995 a 2024	94
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	96
3.1 Dias aptos para trabalhabilidade no campo com maquinário agrícola	96
3.2 Comparação das normais climatológicas no INMET (1991 a 2020) e do período do estudo 1995 a 2024	101
3.3 Implicações para o manejo de campo.....	107
3.4 Considerações sobre variabilidade climática, eventos extremos e limitações do ZARC	107
4. CONCLUSÃO.....	109
5. AGRADECIMENTO	110
6. REFERÊNCIAS	111

INTRODUÇÃO GERAL

A agricultura, pilar essencial da economia global e do sustento de incontáveis comunidades, encontra-se atualmente em um ponto de inflexão diante dos desafios impostos pelas alterações climáticas e pela necessidade urgente de otimizar o uso dos recursos naturais (IPCC, 2023; FAO, 2022). Mais do que uma questão meramente ambiental, este cenário complexo e dinâmico impacta diretamente a segurança alimentar e a equidade social, uma vez que a disponibilidade de recursos hídricos e o rendimento das safras tornam-se cada vez mais instáveis (Godfray et al., 2010; Lobell et al., 2011). As modificações nos padrões de temperatura e precipitação, a crescente frequência e intensidade de fenômenos extremos, como estiagens prolongadas e chuvas torrenciais, além da proliferação de pragas e doenças, ameaçam severamente a capacidade produtiva do setor agrícola (WMO, 2023; IPCC, 2023).

A influência humana já afeta diversos extremos climáticos em todas as regiões, resultando em impactos adversos disseminados e perdas à natureza e às pessoas, com as comunidades mais vulneráveis, sendo desproporcionalmente afetadas. De fato, o aquecimento global, causado por ações antrópicas por meio de emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, levou a um aumento médio global da temperatura da superfície, atingindo 1,1°C acima dos níveis pré-industriais entre 2011 e 2020. No setor agrícola, a mudança climática já desacelerou o crescimento da produtividade global, com impactos negativos predominantes em regiões de médias e baixas latitudes (IPCC, 2023). Diante desse panorama, torna-se inegável a urgência em aprofundar a compreensão sobre os efeitos das mudanças climáticas e desenvolver estratégias de adaptação e mitigação eficazes.

Neste contexto, a região de Lavras, Minas Gerais, com sua relevância agrícola, emerge como um microcosmo exemplar da vulnerabilidade das cadeias produtivas frente a essas transformações. A produção agrícola local, vital para a economia lavrense e para a segurança alimentar, enfrenta um duplo desafio: por um lado, o aumento das temperaturas e as irregularidades das chuvas demandarão uma maior necessidade de irrigação para garantir a produtividade das culturas; por outro, a redução da disponibilidade hídrica, somada à crescente competição por esse recurso, dificultará o acesso à água para a irrigação.

A segurança alimentar, intrinsecamente ligada à produção agrícola, vê-se ameaçada por essa conjuntura, com a busca por soluções inovadoras e sustentáveis tornando-se crucial. Neste cenário, o profissional das ciências agrárias assume um papel social de extrema relevância, atuando na linha de frente para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais resilientes, adaptados às novas realidades climáticas e que garantam a soberania alimentar das comunidades.

Nesse panorama, o presente estudo é apresentado como um esforço integrado para abordar a gestão da água e do solo na agricultura, buscando a adaptação às mudanças climáticas e a otimização do manejo mecanizado. A tese se desdobra em dois artigos distintos, mas complementares, que se conectam para fornecer uma visão abrangente e prática para a agricultura contemporânea.

O primeiro artigo desta tese, intitulado "Impactos das mudanças climáticas sobre a ecofisiologia do milho safra e safrinha sob cenários climáticos simulados", foca na vulnerabilidade da cultura do milho cultivado em Lavras, MG, diante da variabilidade climática. O objetivo geral foi empregar ferramentas de modelagem para prever cenários futuros de demanda hídrica e produtividade para o milho, analisando como essas alterações impactarão a produção agrícola, visando a segurança alimentar da população.

A agricultura irrigada, que busca "produzir mais com menos água", emerge como uma estratégia fundamental para estabilizar a produtividade e a oferta de alimentos. Este artigo é impulsionado pela urgência de compreender os desafios específicos que variabilidade climática impõem à irrigação agrícola em Lavras, gerando informações cruciais para a tomada de decisões estratégicas que visem a segurança hídrica e a sustentabilidade da produção.

Em paralelo, o segundo artigo, "Influência da precipitação e da disponibilidade hídrica nos dias trabalháveis com máquinas agrícolas em Latossolo Vermelho distrófico", dedica-se à otimização do uso de maquinário agrícola. O objetivo geral foi identificar as janelas temporais durante o ano para a trabalhabilidade de máquinas agrícolas, com base no regime pluviométrico e no balanço de água no solo, para um Latossolo Vermelho Distrófico típico para o município de Lavras, MG, determinando os períodos mais apropriados para o preparo e manejo do solo.

A umidade do solo exerce uma grande influência na capacidade de operação das máquinas agrícolas: o excesso pode levar ao encharcamento e reduzir a produtividade, enquanto o solo excessivamente seco pode resultar em compactação, prejudicando as

atividades agrícolas e a saúde do solo. O estudo se justifica pela crescente demanda no agronegócio em otimizar o uso de recursos, aumentar a produção, reduzir custos e evitar a degradação do solo, especialmente diante da imprevisibilidade climática que afeta diretamente o cronograma de dias trabalháveis. A pesquisa visou fornecer um conhecimento essencial para o planejamento estratégico das operações de manejo do solo, otimizando o uso da mão de obra e dos recursos, e minimizando os impactos no ambiente do solo.

Ambos os artigos, embora focados em aspectos distintos: a produtividade da cultura e a otimização do manejo do solo com máquinas, convergem na urgência de promover uma agricultura mais resiliente e sustentável. A continuidade das emissões de GEE levará a um aquecimento global crescente, intensificando múltiplos riscos, incluindo a diminuição da produção de alimentos em algumas regiões. Enquanto a agricultura irrigada se destaca como estratégia fundamental para estabilizar a produtividade e a oferta de alimentos, um planejamento adequado das operações mecanizadas, considerando as condições climáticas, é vital para preservar a qualidade estrutural do solo, minimizar impactos de compactação ou desestruturação, e otimizar o uso da mão de obra e dos recursos.

Portanto, o objetivo geral unificado desta tese foi compreender os impactos das mudanças climáticas na agricultura do município de Lavras, MG, tanto na demanda hídrica e produtividade da cultura do milho quanto na viabilidade de operações mecanizadas, propondo soluções e estratégias de manejo da água e do solo para garantir a segurança alimentar e a sustentabilidade agrícola, utilizando-se de dados climáticos históricos e a projeção de cenários futuros e seus possíveis desdobramentos. A relevância intrínseca deste trabalho reside em sua capacidade de gerar informações cruciais para a tomada de decisões estratégicas que visem à segurança hídrica e alimentar, à sustentabilidade da produção agrícola e à resiliência da região de Lavras, frente aos efeitos da variabilidade climática.

Ao integrar a modelagem para a cultura do milho safra e safrinha, com a análise da capacidade de trabalho no campo, esta pesquisa representa um investimento crítico na capacidade do município de Lavras e de outras regiões agrícolas de enfrentarem os desafios climáticos, assegurando a produção de alimentos para as gerações presentes e futuras.

Artigo 1 - Impactos das mudanças climáticas sobre a ecofisiologia do milho safra e safrinha sob cenários climáticos simulados

RESUMO

O presente estudo quantificou os impactos climáticos das projeções do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) sobre a demanda evapotranspirativa e a ecofisiologia e produtividade da cultura do milho (safra principal e safrinha) no município de Lavras, Minas Gerais. Simulações foram executadas no *software* AquaCrop sob o clima histórico de referência e as trajetórias socioeconômicas partilhadas SSP245 (emissão moderada de forçantes radiativas) e SSP585 (alta emissão de forçantes radiativas) até o ano de 2099. As variáveis de resposta, foram submetidas a análises não paramétricas para a detecção de tendências temporais (Mann-Kendall) e avaliação do deslocamento de magnitudes absolutas (Kruskal-Wallis). Os resultados revelaram assimetria ecofisiológica entre as épocas. Na safra, foi observado elevado déficit pluviométrico nas simulações com cenário de forçamento extremo (SSP585); a redução da evapotranspiração da cultura atrelou-se ao estresse térmico severo, que encurtou a fenologia, limitou a biomassa e rebaixou a produtividade mediana para 11.710,0 kg/ha, com tendência unidirecional de degradação contínua. Na safrinha, o cenário SSP585 indicou um regime de alta volatilidade com falhas produtivas recorrentes, culminando em perdas quase totais e quebras estruturais ao longo do século. O cenário SSP245 preservou a estabilidade produtiva do sistema. Conclui-se que a via de alta emissão inviabiliza o milho de sequeiro, exigindo a transição para irrigação adaptativa de precisão, ao passo que o cumprimento de metas de mitigação resguarda a segurança alimentar e a resiliência agrícola regional frente a variabilidade climática.

Palavras-chave: Produtividade; Projeções futuras; Modelagem; Segurança alimentar; Variabilidade climática.

ABSTRACT

The present study quantified the climatic impacts of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) projections on the evapotranspirative demand, ecophysiology, and yield of maize crops (main and off-season) in the municipality of Lavras, Minas Gerais, Brazil. Simulations were performed using the AquaCrop software under the historical reference climate and the Shared Socioeconomic Pathways SSP245 (moderate radiative forcing emissions) and SSP585 (high radiative forcing emissions) up to the year 2099. The response variables were subjected to non-parametric analyses for the detection of temporal trends (Mann-Kendall) and the evaluation of absolute magnitude shifts (Kruskal-Wallis). The results revealed an ecophysiological asymmetry between the cropping seasons. For the main crop, a high rainfall deficit was observed in the simulations under the extreme forcing scenario (SSP585); the reduction in crop evapotranspiration was linked to severe thermal stress, which shortened the phenological cycle, limited biomass, and lowered the median yield to 11,710.0 kg/ha, exhibiting a unidirectional trend of continuous degradation. For the off-season crop, the SSP585 scenario indicated a high-volatility regime with recurrent yield failures, culminating in near-total losses and structural collapses throughout the century. The SSP245 scenario preserved the productive stability of the system. It is concluded that the high-emission pathway renders rainfed maize unfeasible, requiring a transition to precision adaptive irrigation, whereas compliance with mitigation targets safeguards food security and regional agricultural resilience against climate variability.

Keywords: Productivity; Future projections; Modeling; Food security; Climate variability.

1. INTRODUÇÃO

As projeções climáticas globais, fundamentadas nos cenários do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6), constituem ferramentas cruciais para a antecipação de riscos à segurança alimentar (IPCC, 2023). Estas projeções integram modelos climáticos às Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas (SSPs), que articulam diferentes níveis de emissões de gases de efeito estufa com variáveis socioeconômicas, como crescimento demográfico, desenvolvimento tecnológico e políticas de uso da terra. Dentre as trajetórias, destacam-se o cenário SSP245, que assume uma via de desenvolvimento sustentável com forçamento radiativo estabilizado em 4,5 W/m até 2100, e o cenário SSP585, que projeta um desenvolvimento intensivo em combustíveis fósseis, atingindo um forçamento radiativo de 8,5 W/m (Riahi et al., 2017). A utilização comparativa dos cenários citados é essencial para dimensionar a amplitude dos riscos agrometeorológicos e testar a resiliência dos sistemas agrícolas frente a trajetórias de aquecimento global divergentes.

Dentre os *Modelos de Circulação Global* (GCMs) do CMIP6, o MIROC6 destaca-se pela alta sensibilidade na representação de processos atmosféricos de mesoescala e balanços de energia na superfície, apresentando desempenho superior ao HadGEM3-GC31 e ao MRI-ESM2.0 na reprodução do regime hidrológico e dos extremos de temperatura na América do Sul (Almazroui et al., 2021). Embora a seleção deste modelo ofereça uma representação precisa para a região, reconhecem-se as incertezas inerentes aos GCMs, que derivam tanto da variabilidade interna do sistema climático quanto da representação estocástica das retroalimentações entre atmosfera e superfície (IPCC, 2021).

A escolha de um modelo específico, em detrimento de um conjunto de múltiplas variáveis, é uma estratégia adotada para evitar a compensação de erros entre modelos distintos, que pode atenuar a magnitude de eventos climáticos extremos. Estudos comparativos em regiões tropicais, como os realizados por Hamada et al. (2024) no Cerrado brasileiro e por outros grupos de pesquisa em latitudes tropicais (ex: modelagens na África subsaariana), demonstram que, ao aplicar correções de viés rigorosas, o MIROC6 reduz o erro sistemático em relação a outros modelos globais, tornando-se uma ferramenta robusta para simulações de impacto, desde que reconhecida a incerteza intrínseca à forçante radiativa escolhida.

Entretanto, a aplicação direta de GCMs em escalas regionais é limitada por vieses sistemáticos decorrentes da baixa resolução espacial e da simplificação de processos convectivos (Almazroui et al., 2021). Entre as diversas técnicas de correção de viés, o método *Quantile Delta Mapping* (QDM) sobressai por superar limitações de abordagens tradicionais, como o *Linear Scaling* ou o *Delta Change*. Enquanto métodos simples ajustam apenas a média climatológica, ignorando mudanças na variabilidade ou em eventos extremos, o QDM preserva as projeções de mudança (deltas) para todos os quantis da distribuição, mantendo a integridade da variabilidade interanual e a correção precisa das caudas da distribuição climática (Cannon et al., 2015).

A modelagem de impactos produtivos sob estas condições exige modelos mecanísticos que transcendam correlações puramente empíricas. O modelo AquaCrop destaca-se ao particionar a evapotranspiração em transpiração da planta e evaporação direta do solo, processo crítico em regiões de clima Cwa, onde a partição do fluxo hídrico entre superfície e rizosfera determina a eficiência da água pela cultura (Steduto et al., 2009). Além disso, sua sensibilidade à dinâmica hídrica em solos altamente intemperizados, como os Latossolos, é superior a modelos tabelados, permitindo a parametrização precisa da profundidade efetiva radicular e das curvas de retenção, conferindo maior confiabilidade às estimativas de rendimento em comparação a modelos de base estatística que não captam a "assinatura" física local. Estudos em diferentes regiões tropicais confirmam a eficácia dessa modelagem na predição de respostas fisiológicas ao estresse hídrico em milho e sorgo (Sharafkhane et al., 2024; Alvar-Beltrán et al., 2025).

Nesse contexto, o presente estudo objetivou projetar os impactos das mudanças climáticas globais sobre o desenvolvimento ecofisiológico e a estabilidade produtiva do milho (safrinha) no município de Lavras, MG, sob os cenários histórico, SSP245 e SSP585. Para tanto, utilizou-se o modelo AquaCrop integrado a dados climáticos corrigidos pelo método QDM, visando identificar as limitações hídricas e os riscos fisiológicos que condicionarão a resiliência do sistema produtivo regional até 2099.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo compreendeu o município de Lavras, Minas Gerais, localizado entre as latitudes e longitudes, respectivamente, 21,23° Sul e 45° Oeste, a 914 m de altitude, de acordo com a Figura 1. A classificação climática proposta por Köppen é do tipo Cwa (mesotérmico), com inverno seco e chuvas predominantes no verão, com precipitação total média anual de 1530 mm e temperatura média anual de 19,4 °C (Brasil, 1992, Dantas et al., 2007 e Sá Júnior et al., 2012).

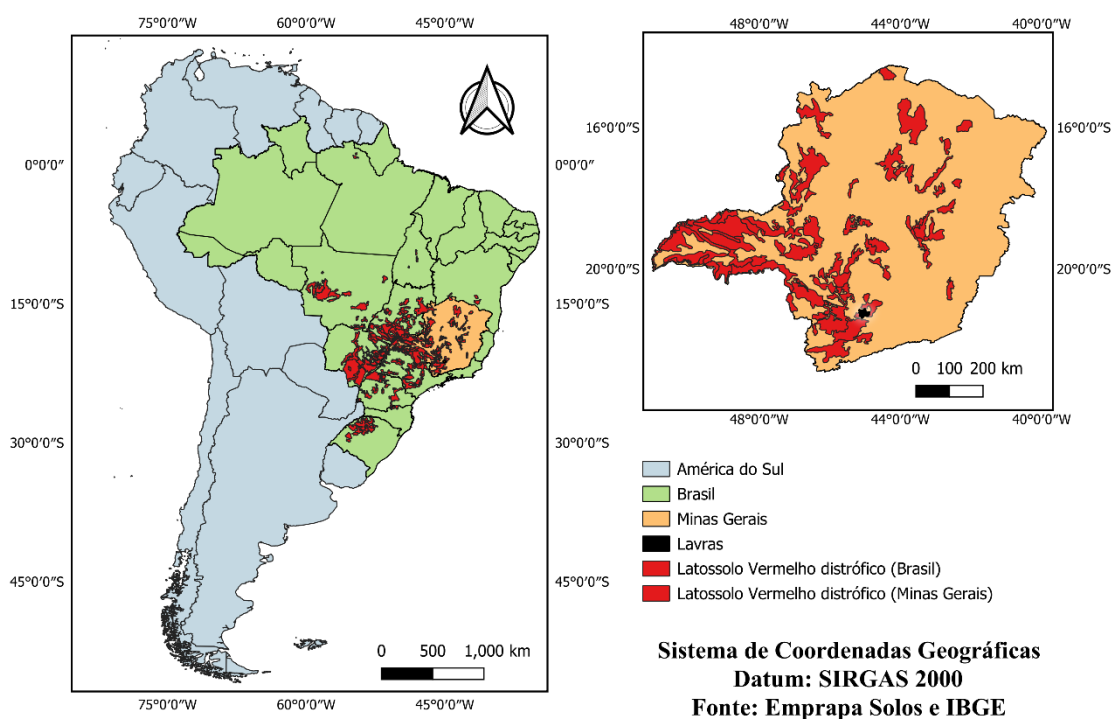


Fig 1. Localização geográfica do município de Lavras, MG, e distribuição espacial de Latossolos Vermelhos distróficos no território brasileiro e no estado de Minas Gerais. O painel à esquerda apresenta a ocorrência da classe de solo em escala nacional; o painel à direita detalha a localização da área de estudo em relação à distribuição regional no estado de Minas Gerais. Fontes: Adaptadas de Embrapa Solos (2018) e IBGE (2023) por Lorena Júlio Gonçalves, 2026.

2.2 Obtenção dos dados

2.2.1 Dados dos cenários climáticos

O acesso aos dados climáticos históricos e de projeções futuras do CMIP6 foi obtido em um único banco de dados na nuvem por meio de linguagem de programação na plataforma Google Earth Engine (<https://code.earthengine.google.com>). Os cenários obtidos foram: históricos que datam de 1950 a 2014, e os futuros: SSP245 e SSP585, que datam de 2015 a 2099; e o GCM escolhido foi o MIROC6.

Foi gerado um código de programação para cada cenário das variáveis precipitação, em $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (pr), temperaturas máxima, mínima e média, em Kelvin (tmax, tmin e tas), umidade relativa do ar, em porcentagem (hurs), velocidade do vento, em m s^{-1} (sfcWind), radiação de ondas longas descendente na superfície (rlds) e radiação de ondas curtas descendente na superfície (rsds), em W m^{-2} .

No código, foram necessários alguns ajustes para correção das unidades que são aceitas pelo software Aquacrop: precipitação de $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para mm d^{-1} ; as temperaturas de Kelvin para $^{\circ}\text{C}$ (graus Celsius) e as radiações de ondas longas e curtas de W m^{-2} para $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Um exemplo de código utilizando o *Python* pode ser consultado clicando no ícone . Os dados foram baixados na nuvem e, posteriormente, foram feitos os downloads e organizados em planilhas separadas por cenários.

2.2.2 Correção de viés dos dados históricos e projeções futuras

A correção de viés climático foi realizada no ponto de interesse de latitude -21.23 e longitude -44.98 (Lavras/Minas Gerais), aplicando o método Quantile Delta Mapping (QDM) às séries diárias do modelo MIROC6, abrangendo o período histórico (1950-2014) e os cenários futuros SSP245 e SSP585 (2015-2099). Os dados do modelo, contendo variáveis como temperatura máxima e mínima, precipitação, umidade relativa, velocidade do vento na superfície, radiação de onda curta e radiação de onda longa, foram comparados com observações locais do conjunto Xavier (Xavier et al., 2022).

As observações locais do conjunto Xavier referem-se ao Brazilian Daily Weather Gridded Data (BR-DWGD), um dataset gridded de variáveis meteorológicas diárias para

o território brasileiro, interpolado a partir de estações de superfície (pluviômetros e estações meteorológicas), com resolução de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ e cobrindo variáveis como precipitação (pr, mm), temperatura máxima e mínima (Tmax/Tmin, °C), radiação solar (Rs, MJ m⁻² dia⁻¹), umidade média relativa (UR, %), velocidade do vento a 2 m (u2, m s⁻¹) e evapotranspiração de referência (ET₀, mm).

O dataset está disponível no site do autor principal: <https://sites.google.com/site/alexandrecandidoxavierufes/brazilian-daily-weather-gridded-data>, incluindo arquivos NetCDF por variável e período, atualizados até março de 2024 (1961 a 2024). Também acessível via Google Earth Engine como imageCollection 'projects/ee-alexandrexavier/assets/BR-DWGD'.

Primeiramente, identificou-se automaticamente a sobreposição temporal entre o histórico do modelo e as observações disponíveis. O período de calibração abrangeu todo o intervalo de sobreposição, exceto os últimos 10 anos, reservados à validação independente, garantindo uma avaliação robusta do desempenho da correção.

O QDM foi então aplicado, treinando o mapeamento quantile nos dados de calibração com 50 quantis e agrupamento por dia do ano, para preservar a variabilidade sazonal. Para variáveis como temperatura máxima e mínima, umidade relativa, vento e saldo de radiação, adotou-se a correção aditiva; para precipitação, a correção foi multiplicativa.

A distinção metodológica entre as abordagens aditiva e multiplicativa no algoritmo *Quantile Delta Mapping* (QDM) fundamenta-se nos limites físicos e na distribuição probabilística inerente a cada variável meteorológica. Para variáveis como temperaturas máximas e mínimas, umidade relativa, velocidade do vento e saldo de radiação, adotou-se a correção aditiva. Este procedimento preserva a magnitude absoluta das mudanças projetadas (deltas) e mostra-se matematicamente adequado para séries temporais que apresentam distribuições mais simétricas, cujos valores absolutos podem ser transladados linearmente. Em contrapartida, para a precipitação pluvial, a correção multiplicativa fez-se estritamente necessária. Por tratar-se de uma variável altamente assimétrica, não negativa e delimitada pelo zero absoluto (presença de muitos dias secos e extremos isolados), a aplicação de correções aditivas poderia resultar na geração de valores diários fisicamente impossíveis, como chuvas negativas. O fator multiplicativo, portanto, adequa-se à natureza de limiar da precipitação, escalonando a distribuição para preservar as mudanças relativas (em porcentagem) projetadas pelos Modelos de

Circulação Global, sem corromper a integridade física do ciclo hidrológico simulado (Cannon et al., 2015).

A validação, restrita ao período reservado, envolveu o cálculo de métricas como viés médio, RMSE e quantis (p01, p05, p50, p95, p99) para todas as variáveis. Esse procedimento resultou em séries corrigidas para o histórico e cenários futuros, além de arquivos com métricas de validação e climatologias mensais médias, permitindo análises confiáveis de impactos climáticos locais. O método QDM baseia-se na formulação original de Cannon et al. (2015), que aprimora o mapeamento quantile tradicional ao preservar as projeções delta de mudança em todos os quantis da distribuição. Um exemplo de código para correção de viés em *Python* pode ser consultado clicando no ícone .

Apesar de no processo de correção de viés, o balanço de ondas longas ser calculado, os dados de saída retornam novamente como radiação de ondas longas (rls) e radiação de ondas curtas (rsds), sendo necessário realizar alguns ajustes para o cálculo do saldo de radiação como dado de entrada no arquivo de clima no Aquacrop. Na ausência de dados de insolação diária (n), estimou-se R_a pela Equação 1 de Hargreaves e Samani (1982):

$$R_a = rsds \div \left(K_s \times \left(\sqrt{T_{máx} - T_{mín}} \right)^{0,5} \right) \quad (1)$$

Em que:

R_a - Radiação total ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);

rsds - Radiação solar incidente à superfície terrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);

$K_s = 0,16$ (constante utilizada para locais distantes do litoral).

Posteriormente, foi calculada a radiação solar para dias totalmente ensolarados (claros), sem interferência de nuvens, de acordo com a Equação 2:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} \times alt) \times R_a \quad (2)$$

Em que:

R_{so} - Radiação solar para dias totalmente ensolarados (claros), sem interferência de nuvens ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), como dito anteriormente;

alt - Altitude do local (m).

Finalmente, para estimar o balanço de ondas longas, para o qual a Equação será demonstrada posteriormente, fez-se necessário calcular a pressão de saturação (máxima) de vapor d'água em kPa (es) e pressão atual de vapor d'água, em kPa (ea), de acordo com as Equações 3 e 4 respectivamente:

$$es = 0,6108 \times 10^{((7,5 \times T_{med}) \div (237,3 + T_{med}))} \quad (3)$$

$$ea = (es \times UR) \div 100 \quad (4)$$

Em que:

ea - Pressão atual de vapor d'água (kPa);

es - Pressão de saturação de vapor d'água (kPa);

UR - Umidade relativa média diária (%).

De posse dos dados, estimou-se o balanço de ondas longas a partir da Equação 5:

$$Rnl = - \left(1,35 \times \frac{Rs}{Rso} + 0,35 \right) \times (0,34 - 0,14 \times \sqrt{ea}) \times \sigma \times (T_{kx}^4 + T_{kn}^4) \times \frac{1}{2} \quad (5)$$

Em que:

Rnl - Balanço de ondas longas ou emissão efetiva terrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);

Rs ou rlds - Radiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

Rso - Radiação solar para dias totalmente ensolarados (claros), sem interferência de nuvens;

ea - Pressão atual do vapor d'água (kPa);

σ - Constante de Stefan–Boltzmann = $4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1} \text{ K}^{-4}$;

T_{kx} - Temperatura máxima absoluta do ar (K);

T_{kn} - Temperatura mínima absoluta do ar (K).

Para o balanço de ondas curtas, haviam dados suficientes para calcular, de acordo com a Equação 6:

$$Rns = rsds \times (1 - r) \quad (6)$$

Em que:

Rns - Balanço de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);

rsds - Radiação de ondas curtas descendente na superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); e

r - Albedo da superfície (0,23).

2.2.3 Dados da cultura e Manejo da cultura

A parametrização da cultura do milho foi baseada no arquivo de calibração padrão (*default*) fornecido pelo próprio banco de dados do modelo AquaCrop, com o desenvolvimento fenológico governado pelo acúmulo de Graus-Dia (GD). A adoção da escala térmica (GDD - *Growing Degree Days*) em detrimento de dias calendários (dias após a semeadura) é uma premissa fundamental em simulações de mudanças climáticas, pois permite que o algoritmo reduza ou alongue as fases de desenvolvimento da planta em resposta direta à variação da temperatura do ar (Raes et al., 2012).

Os limiares ecofisiológicos adotados para o cômputo térmico foram a temperatura basal inferior de 8°C (abaixo da qual o desenvolvimento cessa) e a temperatura superior de corte de 30°C (acima da qual a taxa de desenvolvimento não sofre incremento) (Steduto et al., 2009). A densidade de semeadura foi fixada em 75.000 plantas por hectare. O cultivo foi simulado em condições potenciais de fertilidade, ausência de estresses abióticos associados à salinidade e sem ocorrência de estresses bióticos (pragas, doenças ou plantas daninhas), mantendo-se o clima (cenários pluviométricos e térmicos) como a única variável restritiva e de interesse na formação da produtividade do milho safra (semeadura no dia 20 de setembro) e safrinha em sequeiro (semeadura no dia 22 de março).

2.2.4 Simulação no Software

As simulações frente aos três cenários climáticos distintos (Histórico, SSP245 e SSP585) foram executadas empregando o modelo AquaCrop (Versão 7.1). Os dados climatológicos projetados e corrigidos pelo método QDM (Clima - CLI) foram formatados em arquivos de texto e inseridos no ambiente de simulação.

Para a configuração do perfil edáfico, estabeleceu-se a profundidade total do solo (Z) em 4,0 m. Esta parametrização visou representar com fidelidade a dinâmica do balanço hídrico, a drenagem profunda e a retenção de umidade características de um Latossolo Vermelho distrófico típico. Os atributos hídricos basais foram inseridos com base nas propriedades físicas médias locais (da Silva, 2018): umidade na saturação (SAT) de 46%, capacidade de campo (CC) de 32% e ponto de murcha permanente (PMP) de 23,5%, adequando a Capacidade de Água Disponível (CAD) a 85 mm. A condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) foi ajustada pelo software em 500 mm d⁻¹.

É importante destacar que, embora o perfil de solo tenha sido configurado com 4,0 m de profundidade para a estabilidade da modelagem hidrológica da matriz, o AquaCrop foi parametrizado para restringir a exploração hídrica pela planta. A expansão máxima do sistema radicular do milho foi limitada no algoritmo à profundidade efetiva de 0,60m. Esta premissa metodológica assegura a precisão das estimativas de estresse hídrico e demanda de irrigação, garantindo que a extração de água ocorra exclusivamente na zona útil de raízes. A limitação a 0,60m incorpora ao modelo um caráter ecofisiológico realista, mimetizando a restrição de aprofundamento radicular imposta não apenas pelas características genéticas da cultura, mas também por potenciais impedimentos físico-químicos comuns aos Latossolos (como o adensamento subsuperficial e/ou toxicidade por alumínio), impedindo a superestimativa do rendimento hídrico na simulação (Raes et al., 2012).

2.2.5 Análise estatística

As variáveis agrometeorológicas e ecofisiológicas simuladas pelo modelo AquaCrop foram submetidas a análises estatísticas não paramétricas. Esta abordagem matemática foi adotada devido à natureza assimétrica e à ausência de distribuição normal típica das séries temporais climatológicas e de produtividade extrema. Os procedimentos

analíticos foram executados de forma independente para os dados referentes ao cultivo da safra principal e ao cultivo de safrinha.

A avaliação da trajetória temporal das variáveis dentro de cada cenário climático (Histórico, SSP245 e SSP585) foi realizada por meio do teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975). Este teste quantifica a direção e a significância estatística de tendências ao longo da série de anos avaliada. As trajetórias foram classificadas como crescentes, decrescentes ou não significativas, permitindo a detecção de agravamentos ou ganhos progressivos sob os forçamentos radiativos projetados.

O impacto absoluto das forçantes climáticas sobre a magnitude das variáveis foi aferido pelo teste global de Kruskal-Wallis (Siegel, 2006). O algoritmo avaliou a variância dos postos para determinar a existência de diferenças estatísticas nas medianas entre os três cenários independentes. Os valores de probabilidade (*p-valor*) das comparações múltiplas foram ajustados por meio da correção de Bonferroni (Armstrong, et al., 2014). Este procedimento matemático previne a inflação do erro do Tipo I (falso positivo) inerente ao cruzamento sequencial de cenários.

Em todos os testes estatísticos foi adotado um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). A estruturação das matrizes de dados, a execução dos algoritmos de teste e a elaboração dos painéis gráficos foram desenvolvidas no ambiente de programação *Python* (*PYTHON SOFTWARE FOUNDATION*, 2023), utilizando as bibliotecas *SciPy* para o processamento matemático.

3. RESULTADOS

3.1 Correção de viés dos dados climáticos futuros

A extração de dados brutos dos GCMs pertencentes ao CMIP6 apresenta desvios sistemáticos inerentes à sua baixa resolução espacial original. A mitigação desses erros exigiu o confronto numérico direto das simulações históricas com a base observacional de alta resolução BR-DWGD. Aplicou-se o algoritmo (QDM) para calibrar as projeções climáticas na coordenada geográfica exata de Lavras, MG. Na Tabela 1, observam-se as métricas globais de validação estatística, expondo os valores do Viés Médio e da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) obtidos antes e após o processamento computacional para o conjunto de variáveis meteorológicas.

Tabela 1. Indicadores de validação estatística (Viés Médio e Raiz do Erro Quadrático Médio – RMSE) das variáveis meteorológicas estruturais projetadas pelos modelos do CMIP6, avaliadas antes e após a correção de viés pelo algoritmo *Quantile Delta Mapping* (QDM).

Variável	Viés (Brutos)	Viés (Corrigidos)	RMSE (Brutos)	RMSE (Corrigidos)
Tmax (°C)	0.21	-0.23	4.31	4.36
Tmin (°C)	-0.10	-0.32	2.60	2.84
UR (%)	9.46	1.55	17.96	13.34
Vento (m/s)	0.63	-0.12	0.93	0.68
Precipitação (mm/d)	0.28	0.27	9.30	12.19
Rn (MJ/m ² /d)	-7.88	-0.53	9.25	6.50

Os dados da Tabela 1 indicam a aplicação do algoritmo QDM na mitigação de erros sistemáticos globais, o que se verifica pela redução significativa do viés médio e do erro em variáveis essenciais como a umidade relativa, o vento e o saldo de radiação (Rn). Relativamente à Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE), observou-se uma diminuição dos valores para as séries temporais de umidade relativa (17,96 para 13,34%), vento (0,93 para 0,68 m/s) e saldo de radiação (9,25 para 6,50 MJ/m²/d). Para a variável precipitação pluvial, registrou-se um incremento no RMSE, que passou de 9,30 para 12,19 mm/dia. Para as variáveis térmicas, houve um pequeno incremento no RMSE tanto para Tmax (°C), que foi de 4,31 para 4,36, quanto para Tmin (°C), de 2,60 para 2,84.

Este comportamento estatístico do RMSE, especialmente para a precipitação, é característico da calibração de variáveis estritamente positivas e de distribuição assimétrica. A aplicação da correção multiplicativa para a precipitação manteve o viés

médio praticamente inalterado, passando de 0,28 para 0,27. Esse pequeno ajuste indica que o volume médio global bruto já estava próximo da realidade, mas a correção de seus quantis extremos implicou, em contrapartida, um aumento na variância residual diária (RMSE). As saídas brutas do CMIP6 superestimavam levemente a variável precipitação pluvial para a localidade, e o processamento aproximou a magnitude diária simulada da lâmina precipitada real, parametrizado pela base de Xavier et al. (2022).

Na calibração das variáveis térmicas, observou-se uma alteração dos desvios residuais em vez de sua eliminação completa. O viés da temperatura máxima (Tmax) inverteu de uma superestimativa (0,21) para uma subestimativa (-0,23). Paralelamente, a temperatura mínima (Tmin) teve sua subestimativa acentuada de -0,10 para -0,32. O ajuste matemático calibrou a amplitude térmica diária e procurou adequar as distorções de aquecimento e resfriamento, executando a calibração sem comprometer a integridade do sinal relativo das mudanças climáticas projetadas pelos cenários de emissão originais.

Verificou-se uma adequação estrita das variáveis aerodinâmicas e do saldo de radiação à climatologia local. O algoritmo corrigiu severamente o balanço radiativo (Rn), que era subestimado de forma acentuada (-7,88) nos dados brutos, reduzindo o erro para apenas -0,53. A parametrização corrigiu simultaneamente os valores fortemente superestimados de umidade relativa do ar (de 9,46 para 1,55) e de velocidade do vento à superfície (de 0,63 para -0,12). A eliminação matemática destes vieses médios produziu um conjunto de dados meteorológicos locais de alta fidelidade. O processamento consolidou a estabilidade física da base de dados climática, estabelecendo o rigor necessário para a futura simulação da demanda da evapotranspiração de referência no sistema agrícola.

A análise baseada exclusivamente em médias centrais omite a variabilidade inerente às projeções climáticas diárias. A validação do algoritmo Quantile Delta Mapping (QDM) demandou a avaliação detalhada dos quantis extremos da distribuição estatística. Esse procedimento quantificou o erro sistemático presente na simulação de eventos meteorológicos atípicos. A Tabela 2 apresenta os valores corrigidos e não corrigidos para os quantis de interesse (p01, p05, p50, p95 e p99) das variáveis estruturais. Esta matriz compara a distribuição de probabilidade das simulações históricas do CMIP6 com as observações da base BR-DWGD (Xavier et al., 2022) para as coordenadas geográficas de Lavras, MG

A avaliação de modelos climáticos exige a validação da distribuição estatística completa das variáveis diárias. Definiu-se o percentil p50 como o indicador da mediana estatística, representando as condições climatológicas de ocorrência habitual na região. Estabeleceram-se os percentis inferiores, p01 e p05, como os limiares de extremos mínimos. Estes indicadores quantificam a severidade de eventos deficitários, como a intensidade de ondas de frio ou dias de seca absoluta. Definiram-se os percentis superiores, p95 e p99, como os limiares de extremos máximos. Estas métricas mensuram a magnitude de eventos severos de excesso, como precipitações intensas e ondas de calor. A matriz contrasta estas magnitudes entre as simulações brutas do CMIP6, os dados corrigidos e a base observacional BR-DWGD (Xavier et al., 2022).

Tabela 2. Valores dos quantis extremos (p01, p05, p95 e p99) e da mediana (p50) para as variáveis meteorológicas estruturais simuladas pelos modelos do CMIP6, avaliados antes e após a correção de viés pelo algoritmo *Quantile Delta Mapping* (QDM), em comparação à base observacional.

Variável	Percentil	Observados	Brutos	Corrigidos
Tmax (°C)	p01	19.20	19.66	17.83
	p05	21.69	22.13	20.70
	p50	27.69	27.75	27.48
	p95	32.27	32.76	32.49
	p99	33.90	35.38	34.49
Tmin (°C)	p01	7.39	7.04	5.70
	p05	9.69	9.76	8.94
	p50	16.30	16.34	15.95
	p95	19.59	18.88	19.52
	p99	20.39	19.53	20.58
UR (%)	p01	44.49	43.58	47.60
	p05	53.15	52.37	56.33
	p50	72.83	87.74	73.94
	p95	88.19	96.65	89.29
	p99	92.13	97.81	93.72
Vento (m/s)	p01	0.65	0.89	0.30
	p05	0.83	1.10	0.48
	p50	1.36	1.95	1.19
	p95	2.13	3.14	2.32
	p99	2.54	3.66	2.97
Precipitação (mm/d)	p01	0.00	0.00	0.00
	p05	0.00	0.00	0.00
	p50	0.00	1.16	0.00
	p95	21.01	14.63	22.71
	p99	41.27	22.62	47.17
Rn (MJ/m ² /d)	p01	6.78	5.10	7.10
	p05	9.14	5.82	9.42
	p50	17.46	9.74	16.70
	p95	26.33	14.26	26.28
	p99	28.14	15.29	28.23

A análise da Tabela 2 comprova a eficácia da parametrização estatística na adequação das caudas da distribuição climática, embora revele nuances inerentes ao processo de calibração. Verificou-se uma discrepância acentuada entre as simulações brutas e as observações físicas nos percentis limítrofes. A variável precipitação pluvial, por exemplo, apresentou dados severamente subestimados nos percentis superiores antes da calibração (no p99, o valor bruto era de 22,62 mm/d, contra 41,27 mm/d do observado). A aplicação do método QDM elevou a magnitude destas projeções (passando o p99

corrigido para 47,17 mm/d), adequando a lâmina das precipitações extremas diárias à capacidade hidrológica real da região. Simultaneamente, o algoritmo restaurou a integridade matemática da mediana (p50), corrigindo a leve superestimativa (1,16 mm/d) dos dados brutos para a ocorrência real de dias secos (0,00 mm/d).

Constatou-se uma correção expressiva para as temperaturas do ar máxima e mínima, com comportamentos distintos dependendo do extremo analisado. As séries globais brutas superestimavam a temperatura máxima (Tmax) em todos os limiares; o algoritmo atenuou esses excessos de forma precisa nos percentis superiores, aproximando-os das observações (no p99, reduziu o valor bruto de 35,38 °C para 34,49 °C, ficando muito próximo aos 33,90 °C reais). No entanto, a calibração gerou uma subestimativa nos percentis inferiores (no p01, o valor observado de 19,20 °C foi reduzido para 17,83 °C). Para a temperatura mínima (Tmin), os dados brutos subestimavam os percentis superiores (o p99 apontava 19,53 °C contra 20,39 °C do observado), erro que foi corrigido com excelente precisão pela modelagem (atingindo 20,58 °C). Contudo, nos extremos inferiores de temperatura, o método QDM não conseguiu atenuar a divergência, intensificando a subestimativa em relação aos dias mais frios observados (o p01 caiu de 7,04 °C nos dados brutos para 5,70 °C, distanciando-se dos 7,39 °C reais).

Apesar das variações térmicas residuais, as variáveis radiativas e aerodinâmicas apresentaram melhorias substanciais e adequação proporcional aos seus respectivos percentis empíricos. O maior destaque reside na calibração do saldo de radiação (Rn): o modelo bruto apresentava uma falha grave na simulação de dias com alta radiação (p99 apontava apenas 15,29 MJ/m²/d), erro que foi perfeitamente ajustado pelo algoritmo para 28,23 MJ/m²/d, espelhando a observação real (28,14 MJ/m²/d).

Para a umidade relativa do ar e a velocidade do vento, a parametrização reduziu de forma contundente a superestimativa presente nos dados originais. Na umidade relativa (UR), a mediana (p50) bruta de 87,74% foi corrigida para 73,94%, alinhando-se aos 72,83% observados. Na velocidade do vento, o limite superior (p99) que superestimava os dados com 3,66 m/s foi ajustado para 2,97 m/s, aproximando-se do valor real de 2,54 m/s. A supressão matemática destes erros nas margens da distribuição estruturou uma base de dados climatológicos sólida e condizente com a realidade física local. A consistência geral alcançada nos percentis extremos, especialmente no balanço hídrico e radiativo, é o que garante o rigor científico necessário para viabilizar a futura modelagem de impactos agrônômicos sob condições de estresse ambiental severo.

3.2 Simulações no software Aquacrop de safra e safrinha para a cultura do milho

3.2.1 Simulação do milho safra

A avaliação da trajetória temporal das variáveis agrometeorológicas e produtivas do milho safra exigiu a aplicação do teste não paramétrico de Mann-Kendall. A Tabela 3 consolida a direção e a significância estatística das tendências climáticas simuladas ao longo do período histórico e dos cenários de emissão projetados para o município.

Tabela 3. Análise de tendência temporal de Mann-Kendall para as variáveis agrometeorológicas e produtivas do milho safra sob cenários climáticos histórico e projetados (SSP245 e SSP585).

Variável	Cenário	Mediana	Tau	P-valor	Tendência
Precipitação pluvial (mm/ciclo)	Histórico	881.0	-0.1571	0.0671	Não Significativa
Precipitação pluvial (mm/ciclo)	SSP245	804.0	-0.0496	0.5017	Não Significativa
Precipitação pluvial (mm/ciclo)	SSP585	739.0	-0.2399	0.0012	Decrescente
ETc (mm/ciclo)	Histórico	617.5	-0.1620	0.0596	Não Significativa
ETc (mm/ciclo)	SSP245	578.0	-0.1045	0.1589	Não Significativa
ETc (mm/ciclo)	SSP585	554.0	-0.2921	0.0001	Decrescente
Graus Dia (GD)	Histórico	1706.5	0.0159	0.8569	Não Significativa
Graus Dia (GD)	SSP245	1707.0	0.1003	0.1863	Não Significativa
Graus Dia (GD)	SSP585	1709.0	-0.0776	0.3058	Não Significativa
CO ₂ (ppm)	Histórico	341.6	1.0000	0.0000	Crescente
CO ₂ (ppm)	SSP245	487.6	1.0000	0.0000	Crescente
CO ₂ (ppm)	SSP585	487.6	1.0000	0.0000	Crescente
Ciclo (dias)	Histórico	116.0	-0.3601	0.0001	Decrescente
Ciclo (dias)	SSP245	108.0	-0.4854	0.0000	Decrescente
Ciclo (dias)	SSP585	104.0	-0.7600	0.0000	Decrescente
Estresse médio por Temperatura (%)	Histórico	0.0	-0.1663	0.1088	Não Significativa
Estresse médio por Temperatura (%)	SSP245	0.0	-0.2063	0.0213	Decrescente
Estresse médio por Temperatura (%)	SSP585	0.0	-0.2220	0.0133	Decrescente
Estresse médio por Expansão foliar (%)	Histórico	7.5	0.1555	0.0771	Não Significativa
Estresse médio por Expansão foliar (%)	SSP245	9.0	0.0734	0.3301	Não Significativa
Estresse médio por Expansão foliar (%)	SSP585	12.0	0.1043	0.1641	Não Significativa
Estresse médio Estomático (%)	Histórico	0.0	0.0321	0.7547	Não Significativa
Estresse médio Estomático (%)	SSP245	0.0	0.1075	0.2208	Não Significativa
Estresse médio Estomático (%)	SSP585	0.0	0.0836	0.3392	Não Significativa
Biomassa (kg/ha)	Histórico	26.2	0.1835	0.0321	Crescente
Biomassa (kg/ha)	SSP245	25.6	-0.1445	0.0502	Não Significativa
Biomassa (kg/ha)	SSP585	24.4	-0.3994	0.0000	Decrescente
Índice de Colheita HI (%)	Histórico	48.0	0.1355	0.1792	Não Significativa
Índice de Colheita HI (%)	SSP245	48.0	0.0534	0.5321	Não Significativa
Índice de Colheita HI (%)	SSP585	48.0	0.0787	0.3535	Não Significativa
Produtividade Seca (kg/ha)	Histórico	12.6	0.1861	0.0298	Crescente
Produtividade Seca (kg/ha)	SSP245	12.3	-0.1412	0.0558	Não Significativa
Produtividade Seca (kg/ha)	SSP585	11.7	-0.4011	0.0000	Decrescente
Produtividade Fresca (kg/ha)	Histórico	14.0	0.1862	0.0298	Crescente
Produtividade Fresca (kg/ha)	SSP245	13.7	-0.1412	0.0558	Não Significativa
Produtividade Fresca (kg/ha)	SSP585	13.0	-0.4011	0.0000	Decrescente
Produtividade da água (kg/m ³)	Histórico	2.0	0.3231	0.0002	Crescente
Produtividade da água (kg/m ³)	SSP245	2.1	-0.0655	0.3802	Não Significativa
Produtividade da água (kg/m ³)	SSP585	2.1	-0.1655	0.0263	Decrescente

*A estatística Mann-Kendall quantificou a magnitude e a direção da tendência consistente da série temporal. Valores de $p < 0,05$ indicam significância estatística para tendências crescentes ou decrescentes ao longo do período analisado. Dados simulados pelo modelo AquaCrop.

A análise de tendência temporal quantificou a direção das alterações nas variáveis físicas e biológicas ao longo das séries anuais do cultivo de safra. A precipitação pluvial não apresentou tendência significativa no período histórico, com mediana de 881,0 mm/ciclo, nem no cenário moderado SSP245, que obteve mediana de 804,0 mm/ciclo. No entanto, sob o cenário de alta emissão (SSP585), observou-se uma tendência

decrecente, com a mediana caindo para 739,0 mm/ciclo. A evapotranspiração da cultura (ETc) seguiu um padrão semelhante, mantendo-se estável no período histórico (617,5 mm/ciclo) e no cenário SSP245 (578,0 mm/ciclo), mas exibindo tendência de redução contínua no cenário SSP585, com mediana de 554,0 mm/ciclo. A soma de graus-dia (GD) não apresentou tendência de variação significativa em nenhum dos períodos avaliados, mantendo medianas próximas a 1700 em todos os cenários. A concentração de CO₂ atmosférico registrou tendência crescente em todos os recortes temporais, passando de uma mediana de 341,6 ppm no período histórico para 487,6 ppm nas projeções futuras, refletindo diretamente a parametrização dos modelos de emissão.

Em relação à fenologia e aos indicadores de estresse fisiológico, o ciclo da cultura apresentou tendência decrescente (encurtamento) em todos os cenários simulados. O ciclo reduziu de uma mediana de 116,0 dias no período histórico para 108,0 dias no SSP245 e 104,0 dias no SSP585. O estresse médio por temperatura demonstrou estabilidade no cenário histórico, mas apresentou tendência decrescente para as projeções futuras, embora com medianas iguais a zero em todos os cenários. Os estresses de expansão foliar e de fechamento estomático não indicaram tendências significativas em nenhuma das projeções.

A resposta produtiva da cultura refletiu essas alterações edafoclimáticas. A biomassa e as produtividades seca e fresca registraram tendência de crescimento durante a série histórica. A projeção SSP245 apontou estabilidade temporal (tendência não significativa) para esses indicadores. Em contraste, o cenário SSP585 impôs uma tendência de redução contínua tanto para o acúmulo de biomassa, caindo de uma mediana histórica de 26,2 kg/ha para 24,4 kg/ha, quanto para as produtividades seca (de 12,6 kg/ha para 11,7 kg/ha) e fresca (de 14,0 kg/ha para 13,0 kg/ha). A produtividade da água acompanhou essa dinâmica, apresentando tendência crescente no histórico (mediana de 2,0 kg/m³) e decrescente no cenário de alta emissão SSP585 (mediana de 2,1 kg/m³), mantendo-se sem tendência significativa na projeção SSP245. O Índice de Colheita (HI) não apresentou tendência de variação ao longo do tempo, mantendo a mediana estável em 48,0% em todos os cenários. A Tabela 4 apresenta o contraste das variáveis de resposta da cultura por meio do teste global de Kruskal-Wallis.

Tabela 4. Comparação das medianas das variáveis agrometeorológicas e produtivas do milho safra entre o clima histórico de referência e as projeções futuras (SSP245 e SSP585).

Variável	P-valor	Significância
Precipitação pluvial (mm/ciclo)	0.0000	Significativo
ETc (mm/ciclo)	0.0000	Significativo
Graus Dia (GD)	0.0999	Não Significativo
CO ₂ (ppm)	0.0000	Significativo
Ciclo (dias)	0.0000	Significativo
Estresse médio por Temperatura (%)	0.0000	Significativo
Estresse médio por Expansão foliar (%)	0.0004	Significativo
Estresse médio Estomático (%)	0.4588	Não Significativo
Biomassa (kg/ha)	0.0000	Significativo
Índice de Colheita HI (%)	0.0172	Significativo
Produtividade Seca (kg/ha)	0.0000	Significativo
Produtividade Fresca (kg/ha)	0.0000	Significativo
Produtividade da água (kg/m ³)	0.0000	Significativo

* O teste de Kruskal-Wallis avaliou a variância global dos postos entre os três cenários. Valores de p ajustado < 0,05 indicam diferença estatística significativa entre os pares avaliados.

O teste global de Kruskal-Wallis evidenciou alteração significativa na magnitude absoluta das principais variáveis agrometeorológicas e produtivas entre os recortes climáticos. A lâmina mediana de precipitação pluvial sofreu queda estatisticamente significativa, reduzindo de 881,0 mm/ciclo no período histórico para 739,0 mm/ciclo na projeção de alta emissão (SSP585). A ETc acompanhou esse padrão restritivo, apresentando diferença estatística global com a redução da mediana histórica de 617,5 mm/ciclo para 554,0 mm/ciclo no cenário SSP585. A concentração de CO₂ atmosférico diferiu de forma significativa entre os cenários, refletindo as forçantes dos modelos, enquanto a soma térmica em graus-dia manteve-se estável, não apresentando diferença estatística global.

Em relação aos aspectos fenológicos e de estresse, o ciclo vegetativo da cultura (dias) apresentou diferença mediana estatisticamente significativa entre os cenários analisados. Observou-se um encurtamento progressivo do ciclo, que passou de 116,0 dias no referencial histórico para 108,0 dias na projeção SSP245 e 104,0 dias na SSP585. A severidade dos estresses fisiológicos refletiu as novas condições do balanço hídrico e térmico: os estresses médios por temperatura e por expansão foliar registraram alterações significativas em nível global, com a mediana de expansão foliar elevando-se de 7,5% no

histórico para 12,0% no SSP585. Por outro lado, o estresse estomático manteve estabilidade absoluta e não apresentou diferença estatística entre as simulações.

A produção de biomassa e o rendimento comercial responderam de forma direta à limitação ambiental imposta. Ocorreu diferença estatística global para a produtividade seca, com retração da mediana histórica para os cenários futuros, atingindo seu menor patamar (11,7 kg/ha) na projeção SSP585. Comportamento estatístico análogo foi atestado para a biomassa e para a produtividade fresca, cujas magnitudes globais também sofreram quedas significativas sob o forçamento extremo. Com relação ao índice de colheita, houve alteração estatisticamente significativa em sua distribuição global entre os recortes avaliados. Por fim, a produtividade da água exibiu diferença significativa, registrando um incremento na eficiência hídrica da mediana de 2,0 kg/m³ no histórico para 2,1 kg/m³ nos cenários projetados.

A dinâmica temporal das restrições hídricas e seus impactos diretos sobre o desempenho da cultura do milho cultivado na safra principal podem ser observados ao longo da série projetada até o final do século. A Figura 2 ilustra a evolução interanual e as linhas de tendência para a precipitação pluvial, a evapotranspiração da cultura (ET_c), a produtividade da água e a produtividade final sob o clima histórico de referência e os cenários de emissão avaliados (SSP245 e SSP585).

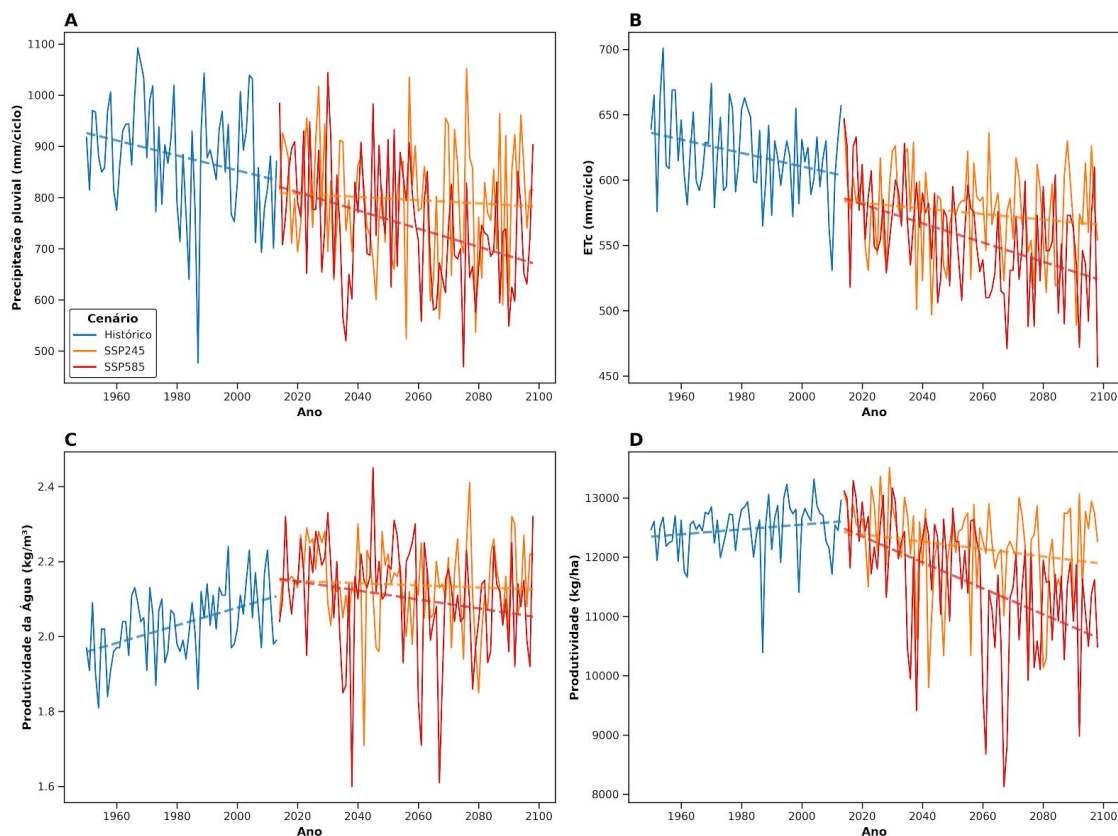


Fig. 2 – Distribuição temporal da Precipitação pluvial (A), Evapotranspiração da cultura (B), Produtividade da água (C) e Produtividade (D) simulada para o milho safra, abrangendo o período histórico e os cenários projetados (SSP245 e SSP585). As linhas tracejadas indicam a tendência linear das variáveis entre os cenários ao longo dos anos avaliados. Fonte: Lorena Júlio Gonçalves, Lavras, 2026.

A distribuição da precipitação pluvial (Figura 2A) exhibe a manutenção da estabilidade do volume hídrico no cenário de emissão moderada (SSP245), cuja linha de regressão apresenta pouca inclinação em relação ao período histórico. Em contrapartida, sob o forçamento radiativo extremo (SSP585), a trajetória visual confirma o decréscimo pluviométrico contínuo e a intensificação de anos com déficit hídrico acentuado. Consequentemente, o consumo de água pelo dossel vegetativo refletiu essa restrição ambiental. A ET_c (Figura 2B) registrou um declínio progressivo e acentuado no cenário SSP585, distanciando-se do padrão de estabilidade observado na projeção SSP245 e evidenciando a supressão do balanço evapotranspirativo da cultura sob condições de alto aquecimento.

A resposta da planta a esse estresse atmosférico consolidou-se na sua eficiência de conversão e no rendimento final. A eficiência no uso hídrico (Figura 2C), representada pela produtividade da água, demonstra uma elevação gradual na série histórica; contudo,

a linha de tendência para a projeção SSP585 apresenta uma inversão de comportamento, exibindo inclinação negativa devido à severidade da perda de rendimento proporcional à água transpirada. Este impacto culmina na degradação da produtividade seca (Figura 2D). Enquanto o cenário SSP245 garante a estabilidade temporal do teto produtivo do milho, a linha de tendência fortemente declinante do cenário SSP585 ilustra um colapso progressivo do rendimento. A ampliação da volatilidade interanual no cenário pessimista, com quedas de produtividade atingindo patamares inferiores a 9.000 kg/ha, materializa visualmente o severo risco agrônomo imposto pelas alterações climáticas.

A mensuração absoluta do impacto imposto pelas diferentes forçantes climáticas foi consolidada por meio da análise de dispersão dos dados simulados. A Figura 3 apresenta a distribuição das medianas e das amplitudes interquartílicas para a precipitação pluvial, a evapotranspiração da cultura (ETc), a produtividade da água e a produtividade final do milho na safra principal, contrastando o clima histórico com as projeções futuras.

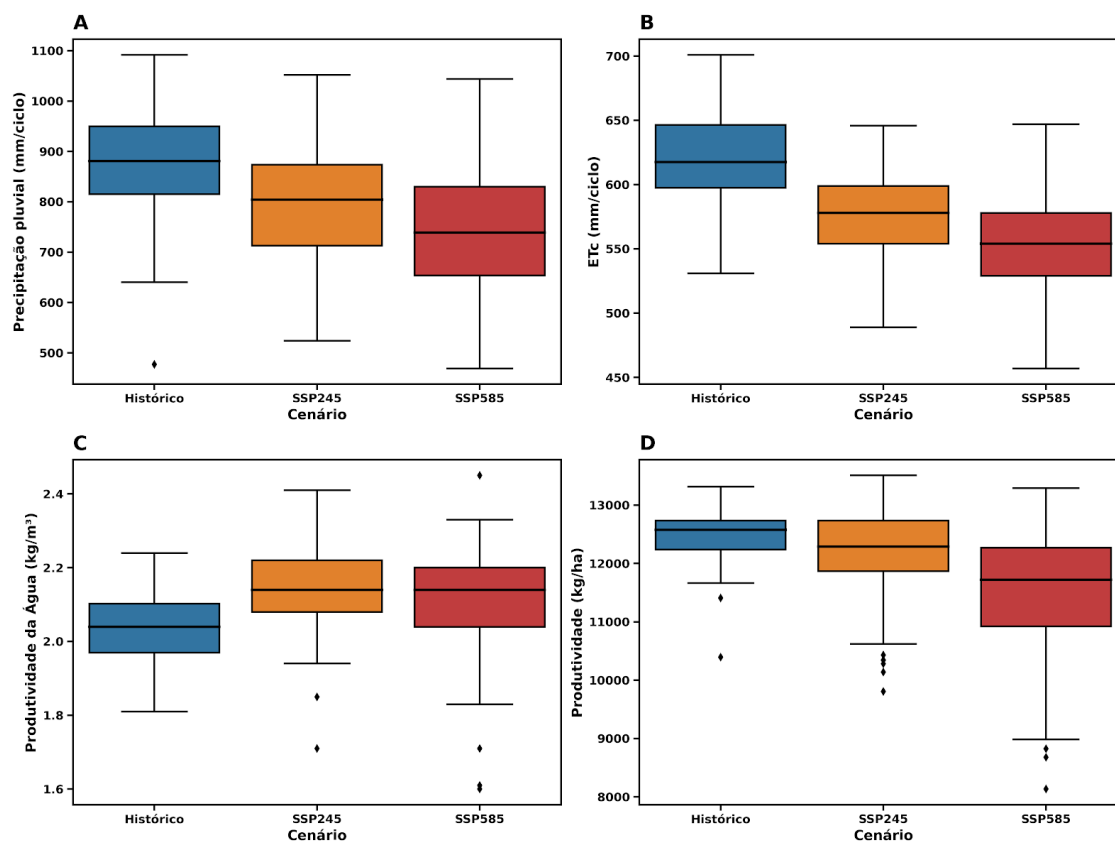


Fig. 3 – Comparação das medianas da Precipitação pluvial (A), Evapotranspiração da cultura (B), Produtividade da água (C) e Produtividade (D) para a cultura do milho safra. As séries temporais compreendem o clima histórico de referência e as projeções futuras sob os cenários SSP245 e SSP585. As caixas delimitam o intervalo interquartil, a linha horizontal interna indica a mediana e as hastes representam a amplitude dos dados não discrepantes. Fonte: Lorena Júlio Gonçalves, Lavras, 2026.

A distribuição da precipitação pluvial (Figura 3A) evidencia uma contração do volume hídrico disponível para a cultura à medida que o forçamento radiativo se intensifica. O recorte histórico registrou a maior magnitude mediana, a qual sofreu leve decréscimo no cenário SSP245 e uma retração estatisticamente significativa e absoluta no cenário SSP585. A dinâmica da ETc (Figura 3B) espelhou esse padrão. A demanda atmosférica atestou uma mediana de 617,5 mm/ciclo na condição climatológica do período histórico. Nos cenários de mudanças climáticas, observou-se uma redução global da ETc, cujos valores medianos caíram para 578,0 mm/ciclo na projeção de emissão moderada (SSP245) e atingiram o menor patamar de 554,0 mm/ciclo sob a condição de emissão extrema (SSP585).

Essa alteração na disponibilidade hídrica refletiu-se nos indicadores de eficiência e conversão do sistema agrícola. A produtividade da água (Figura 3C) apresentou incremento na sua distribuição. A eficiência hídrica mediana aumentou do registro

histórico para o cenário SSP245, mantendo estabilidade de magnitude no cenário SSP585, indicando que a cultura utilizou a água retida de forma mais restrita, embora submetida a alto estresse.

Consequentemente, a produtividade final do milho (Figura 3D) acompanhou essa tendência limitante. A cultura alcançou produtividade mediana de 12.624,0 kg/ha no período histórico. O cenário SSP245 manteve a equivalência estatística global, não alterando de forma severa esse rendimento, com mediana de 12.300,0 kg/ha. O cenário de alta emissão (SSP585), por sua vez, impôs uma restrição produtiva severa, reduzindo a produtividade mediana para 11.700,0 kg/ha, configurando uma diferença estatística absoluta em relação ao passado. A contração visível do limite superior do gráfico no cenário extremo na Figura 3D reflete graficamente o rebaixamento do teto produtivo máximo da cultura sob alta emissão.

Para compreender a dinâmica de longo prazo do cultivo de verão, a evolução temporal das variáveis climáticas e agrônômicas revela o grau de resiliência deste sistema frente ao aquecimento global. A Figura 4 ilustra a variabilidade interanual e as trajetórias de tendência, permitindo avaliar a estabilidade produtiva da cultura ao longo das décadas.

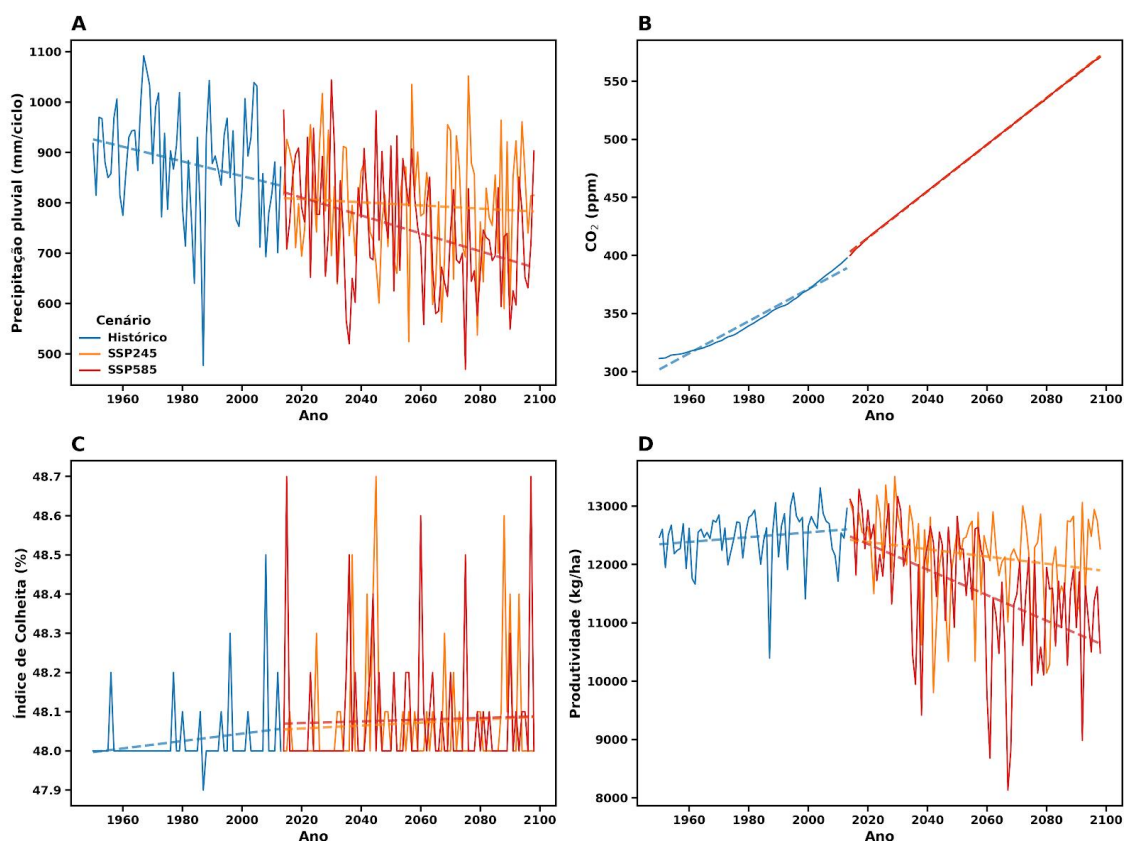


Fig 4. Distribuição temporal e linhas de tendência para a Precipitação pluvial (A), Concentração de CO₂ (B), Índice de Colheita (C) e Produtividade (D) simuladas para o

milho safra, abrangendo o período histórico e as projeções SSP245 e SSP585. As linhas tracejadas indicam a tendência linear das variáveis entre os cenários ao longo dos anos avaliados. Fonte: Lorena Júlio Gonçalves, Lavras, 2026.

A série temporal da precipitação pluvial na safra principal (Figura 4A) exibe uma tendência de declínio temporal. No período histórico, a mediana registrada é de 881,0 mm/ciclo. Nas projeções futuras, observa-se uma redução contínua do volume hídrico, que atinge a mediana de 739,0 mm/ciclo no cenário SSP585. Em contraposição, a concentração de CO₂ (Figura 4B) apresenta tendência de incremento linear ao longo do período analisado para os dois cenários de emissão projetados.

Quanto à resposta da cultura, o índice de colheita (Figura 4C) apresenta estabilidade temporal, mantendo-se na faixa entre 48,0% e 48,7%, sem alterações na partição de biomassa para os grãos entre os cenários. A produtividade final (Figura 4D), no entanto, exibe uma tendência de declínio que acompanha a redução pluviométrica. A mediana de produtividade, situada em 12.624,0 kg/ha no referencial histórico, sofre redução nas projeções futuras. Sob o cenário SSP585, a amplitude interanual aumenta e a série temporal registra quedas de rendimento com valores pontuais inferiores a 9.000,0 kg/ha. A avaliação conjunta das variáveis demonstra que o incremento na concentração de CO₂ não suprime a perda de rendimento ocasionada pelo declínio da precipitação no cultivo de verão.

A análise de dispersão das variáveis simuladas para o cultivo de safra consolida as alterações estruturais do sistema ao longo do período avaliado. A Figura 5 apresenta a distribuição das medianas e a amplitude interquartilica sob os diferentes forçamentos radiativos.

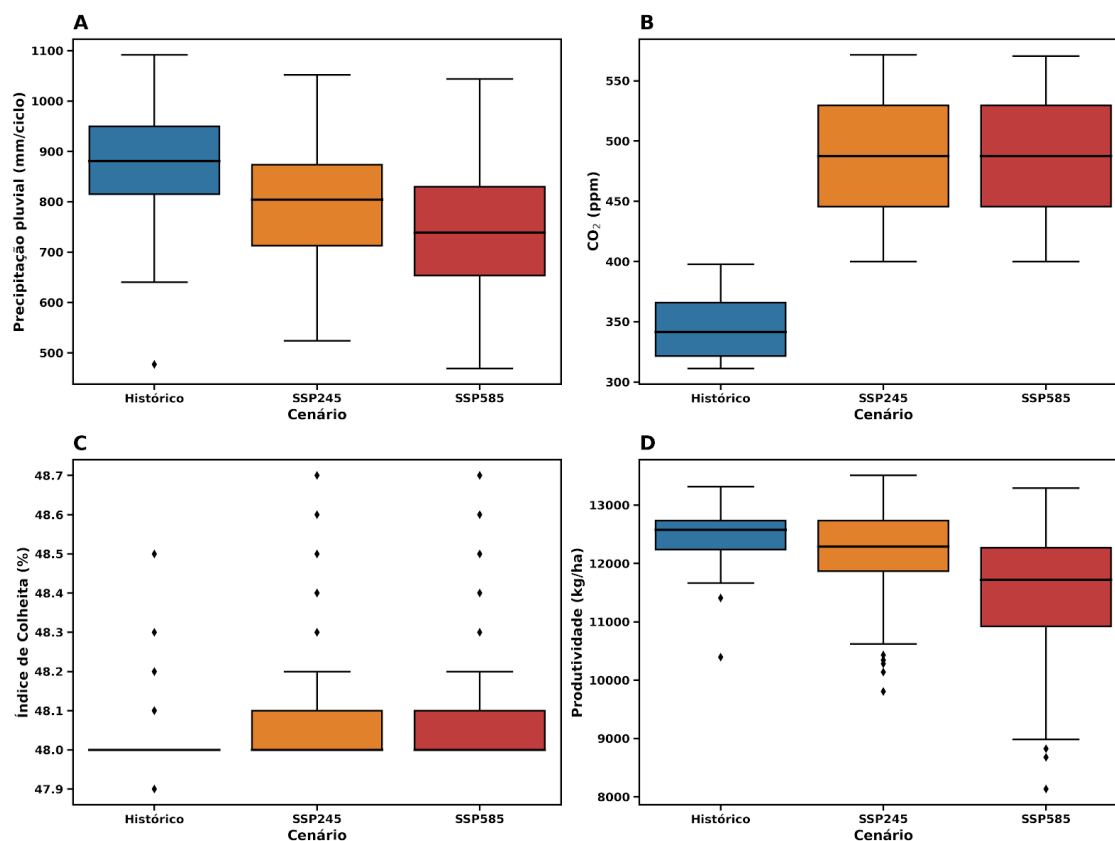


Fig 5. Comparação das medianas da Precipitação pluvial (A), Concentração de CO₂ (B), Índice de Colheita (C) e Produtividade final (D) simuladas para o milho safra, abrangendo o período histórico e as projeções SSP245 e SSP585. As caixas delimitam o intervalo interquartil, a linha horizontal interna indica a mediana e as hastes representam a amplitude dos dados não discrepantes. Fonte: Lorena Júlio Gonçalves, Lavras, 2026.

A precipitação pluvial (Figura 5A) exibe um declínio progressivo na distribuição dos dados. A mediana, situada em 881,0 mm/ciclo no período histórico, apresenta redução para patamares próximos a 804,5 mm/ciclo no cenário SSP245 e 739,0 mm/ciclo no cenário SSP585. A posição das caixas interquartílicas acompanha este rebaixamento, atestando a diminuição da disponibilidade hídrica nas projeções futuras. Em oposição, a concentração de CO₂ (Figura 5B) registra incremento estrutural em suas medianas e no limite de sua dispersão sob as projeções SSP245 e SSP585, quando comparadas ao referencial histórico.

Nos parâmetros de resposta da cultura, o índice de colheita (Figura 5C) demonstra estabilidade estrutural. A mediana mantém-se ancorada em 48,0% nos três cenários climáticos, com variações pontuais restritas ao teto de 48,7%, indicando a ausência de alteração significativa na partição de biomassa para os grãos.

A produtividade final (Figura 5D), por sua vez, exibe declínio de suas medianas. O rendimento de grãos reduz-se do patamar de 12.624,0 kg/ha no histórico para medianas em torno de 12.285,0 kg/ha no SSP245 e 11.710,0 kg/ha no SSP585. Adicionalmente, a projeção SSP585 apresenta um alongamento da haste inferior e a presença de valores extremos, com registros que atingem patamares próximos a 8.100,0 kg/ha. A distribuição dos dados evidencia que o cultivo de safra, embora mantenha a estabilidade fisiológica de partição, sofre redução no rendimento mediano e aumento no risco de perdas em resposta ao declínio pluviométrico.

A continuidade da avaliação do cultivo de safra requer a análise das respostas ecofisiológicas da cultura frente às projeções climáticas. A Figura 6 apresenta a evolução temporal e as linhas de tendência para a demanda evaporativa, a fenologia e a partição de biomassa do sistema produtivo.

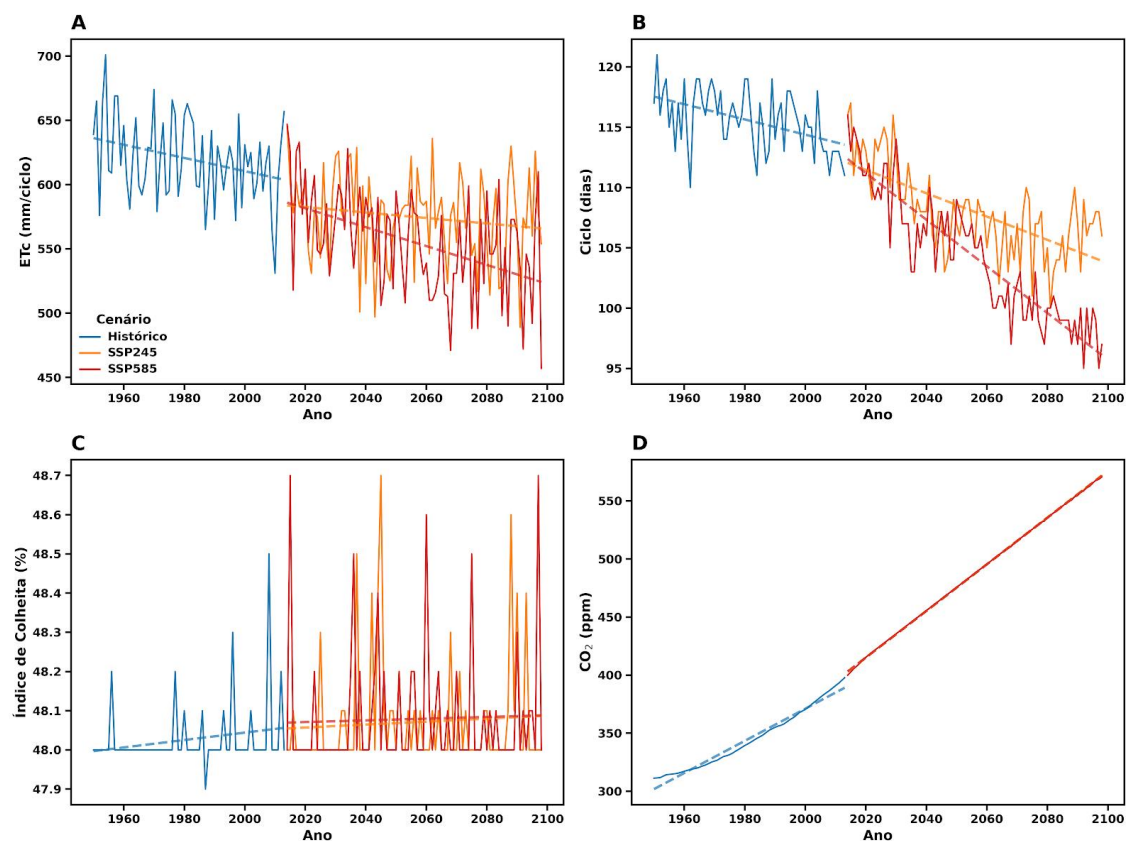


Fig 6. Evolução temporal e linhas de tendência para a Evapotranspiração da cultura (A), Duração do ciclo (B), Índice de Colheita (C) e Concentração de CO₂ (D) simuladas para o milho safra, abrangendo o período histórico e as projeções SSP245 e SSP585. As linhas tracejadas indicam a tendência linear das variáveis entre os cenários ao longo dos anos avaliados. Fonte: Lorena Júlio Gonçalves, Lavras, 2026.

A evapotranspiração da cultura (Figura 6A) exhibe tendência de declínio ao longo do século XXI. No período histórico, a ETc concentra-se em valores superiores a 600 mm/ciclo, ao passo que a projeção SSP585 acentua a redução desta variável, deslocando a série temporal para patamares frequentemente inferiores a 550 mm/ciclo. Este decréscimo na lâmina evapotranspirada acumulada é uma resposta direta ao encurtamento da fenologia da planta.

A duração do ciclo (Figura 6B) demonstra uma expressiva trajetória de redução. No referencial histórico, o ciclo oscila majoritariamente na faixa de 115 a 120 dias. As projeções futuras, contudo, indicam uma aceleração severa do desenvolvimento fenológico. Sob o forçamento radiativo extremo (SSP585), a linha de tendência decai abruptamente, registrando durações de ciclo inferiores a 100 dias nas décadas finais do século.

O índice de colheita (Figura 6C) ratifica a estabilidade da partição fisiológica de biomassa no cultivo de verão. Os valores mantêm-se estritamente ancorados no intervalo de 48,0% a 48,7% ao longo de toda a série simulada, sem alterações nas trajetórias de tendência, independentemente do cenário climático. A concentração de CO₂ (Figura 6D) exhibe o incremento linear estabelecido pelas projeções de emissão.

A avaliação integrada destas variáveis demonstra que a aceleração fenológica encurta o tempo de permanência da cultura no campo. Este encurtamento reduz a ETc total acumulada e limita o período hábil para a formação e enchimento de grãos, impondo restrições ao potencial produtivo da safra de verão que não são compensadas pelo aumento do CO₂ atmosférico ou pela manutenção da eficiência de partição (índice de colheita).

A análise de dispersão das respostas ecofisiológicas da safra consolida as alterações estruturais impostas pelos cenários climáticos ao desenvolvimento da cultura. A Figura 7 ilustra a distribuição das medianas e das amplitudes interquartílicas para a demanda evaporativa, a fenologia e a partição de biomassa do sistema produtivo.

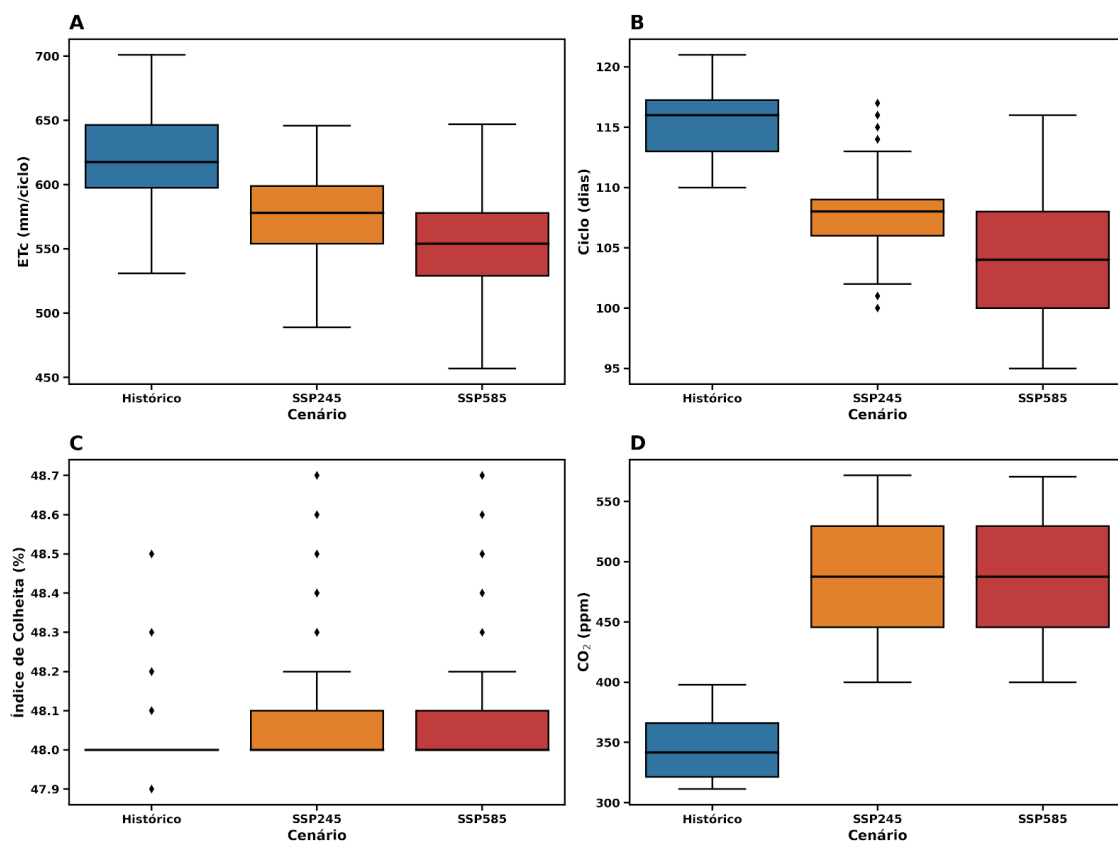


Fig 7. Comparação das medianas da Evapotranspiração da cultura (A), Duração do ciclo (B), Índice de Colheita (C) e Concentração de CO₂ (D) simuladas para o milho safra, abrangendo o período histórico e as projeções SSP245 e SSP585. As caixas delimitam o intervalo interquartil, a linha horizontal interna indica a mediana e as hastes representam a amplitude dos dados não discrepantes. Fonte: Lorena Júlio Gonçalves, Lavras, 2026.

A ETc (Figura 7A) exibe redução estrutural nas projeções futuras. A mediana da lâmina evapotranspirada, situada em 617,5 mm/ciclo no período histórico, decai para patamares em torno de 578,0 mm/ciclo no cenário SSP245 e atinge 554,0 mm/ciclo no cenário SSP585. O rebaixamento das caixas interquartílicas, evidencia que a restrição na demanda total acumulada é uma resposta consolidada.

Este declínio na ETc está diretamente atrelado à severa redução da fenologia da planta. A duração do ciclo (Figura 7B) apresenta um encurtamento expressivo em sua distribuição. O ciclo mediano recua de 116 dias no referencial histórico para 108 dias na projeção SSP245 e 104 dias no cenário de alta emissão (SSP585), evidenciando a aceleração do desenvolvimento da cultura em resposta ao forçamento radiativo.

O índice de colheita (Figura 7C), por sua vez, ratifica a estabilidade da partição fisiológica de biomassa. A mediana mantém-se estritamente ancorada em 48,0% em todos os cenários avaliados, com a presença de valores discrepantes limitados ao teto de 48,7%.

A concentração de CO₂ (Figura 7D) atesta o deslocamento vertical de seus níveis medianos e amplitudes interquartílicas nas projeções futuras em relação ao período histórico.

A distribuição conjunta dos dados comprova que o encurtamento do ciclo restringe o período de acúmulo hídrico (ETc), impondo um limite temporal ao desenvolvimento da cultura na safra principal, fator que restringe o potencial do sistema independentemente da manutenção da eficiência de partição (índice de colheita) da planta.

3.2.1 Simulação do milho safrinha

A avaliação das trajetórias temporais das variáveis ecofisiológicas e agrometeorológicas na safrinha exigiu a aplicação do teste não paramétrico de Mann-Kendall. A Tabela 5 consolida a direção (Tau) e a significância estatística (*p-valor*) destas tendências simuladas ao longo da linha de base histórica e dos cenários projetados (SSP245 e SSP585) até o final do século XXI.

Tabela 5. Análise de tendência temporal de Mann-Kendall para as variáveis agrometeorológicas e produtivas do milho safrinha sob cenários climáticos histórico e projetados (SSP245 e SSP585).

Variável	Cenário	Mediana	Tau	P-valor	Tendência
Precipitação pluvial (mm/ciclo)	Histórico	186.0	0.0005	0.9955	Não Significativa
Precipitação pluvial (mm/ciclo)	SSP245	194.0	0.0719	0.3284	Não Significativa
Precipitação pluvial (mm/ciclo)	SSP585	196.5	0.1480	0.0440	Crescente
ETc (mm/ciclo)	Histórico	317.0	-0.0747	0.3801	Não Significativa
ETc (mm/ciclo)	SSP245	317.0	0.1140	0.1207	Não Significativa
ETc (mm/ciclo)	SSP585	313.5	0.1112	0.1299	Não Significativa
Graus Dia (GD)	Histórico	1706.0	0.0165	0.8511	Não Significativa
Graus Dia (GD)	SSP245	1705.0	0.0945	0.2134	Não Significativa
Graus Dia (GD)	SSP585	1706.0	0.0383	0.6151	Não Significativa
CO ₂ (ppm)	Histórico	341.5	1.0000	0.0000	Crescente
CO ₂ (ppm)	SSP245	487.6	1.0000	0.0000	Crescente
CO ₂ (ppm)	SSP585	487.6	1.0000	0.0000	Crescente
Ciclo (dias)	Histórico	91.0	-0.0605	0.4789	Não Significativa
Ciclo (dias)	SSP245	89.0	0.0248	0.7370	Não Significativa
Ciclo (dias)	SSP585	92.5	-0.0008	0.9911	Não Significativa
Estresse médio por Temperatura (%)	Histórico	4.0	-0.0547	0.5376	Não Significativa
Estresse médio por Temperatura (%)	SSP245	2.0	-0.2357	0.0028	Decrescente
Estresse médio por Temperatura (%)	SSP585	1.0	-0.2525	0.0014	Decrescente
Estresse médio por Expansão foliar (%)	Histórico	51.0	0.0201	0.8160	Não Significativa
Estresse médio por Expansão foliar (%)	SSP245	50.0	-0.1773	0.0172	Decrescente
Estresse médio por Expansão foliar (%)	SSP585	48.0	-0.0389	0.6011	Não Significativa
Estresse médio Estomático (%)	Histórico	26.0	-0.0923	0.2942	Não Significativa
Estresse médio Estomático (%)	SSP245	24.0	-0.1338	0.0770	Não Significativa
Estresse médio Estomático (%)	SSP585	23.0	-0.3111	0.0000	Decrescente
Biomassa (kg/ha)	Histórico	9.0	-0.0014	0.9864	Não Significativa
Biomassa (kg/ha)	SSP245	9.5	0.1644	0.0250	Crescente
Biomassa (kg/ha)	SSP585	9.3	0.0739	0.3139	Não Significativa
Índice de Colheita HI (%)	Histórico	3.9	-0.0626	0.4753	Não Significativa
Índice de Colheita HI (%)	SSP245	7.2	0.1757	0.0185	Crescente
Índice de Colheita HI (%)	SSP585	5.0	0.1847	0.0133	Crescente
Produtividade Seca (kg/ha)	Histórico	0.4	-0.0498	0.5649	Não Significativa
Produtividade Seca (kg/ha)	SSP245	0.8	0.1740	0.0183	Crescente
Produtividade Seca (kg/ha)	SSP585	0.5	0.1522	0.0387	Crescente
Produtividade Fresca (kg/ha)	Histórico	0.4	-0.0498	0.5649	Não Significativa
Produtividade Fresca (kg/ha)	SSP245	0.9	0.1740	0.0183	Crescente
Produtividade Fresca (kg/ha)	SSP585	0.6	0.1524	0.0384	Crescente
Produtividade da água (kg/m ³)	Histórico	0.1	-0.0438	0.6157	Não Significativa
Produtividade da água (kg/m ³)	SSP245	0.3	0.1841	0.0133	Crescente
Produtividade da água (kg/m ³)	SSP585	0.2	0.1626	0.0281	Crescente

*A estatística Mann-Kendall quantificou a magnitude e a direção da tendência consistente da série temporal. Valores de $p < 0,05$ indicam significância estatística para tendências crescentes ou decrescentes ao longo do período analisado. Dados simulados pelo modelo AquaCrop.

A aplicação do teste de Mann-Kendall quantificou a direção das alterações nas variáveis físicas e fisiológicas nas séries temporais da safrinha. A precipitação pluvial manteve estabilidade temporal (tendência não significativa) no período histórico (mediana de 186,0 mm/ciclo) e no cenário SSP245 (194,0 mm/ciclo). Sob a projeção de

alta emissão (SSP585), contudo, a variável apresentou tendência crescente, com a mediana atingindo 196,5 mm/ciclo. A ETc não indicou tendência significativa em nenhum dos recortes temporais, mantendo-se estável com medianas de 317,0 mm/ciclo no histórico e no SSP245, e 313,5 mm/ciclo no cenário SSP585. Em relação ao regime térmico, a soma dos graus-dia também demonstrou estabilidade temporal e ausência de tendências de alteração, com medianas próximas a 1706 em todos os períodos avaliados. A concentração de CO₂ atmosférico registrou incremento consistente, refletindo diretamente a parametrização das forçantes radiativas em cada cenário.

Os indicadores fenológicos e de estresse acompanharam essa dinâmica. O ciclo da cultura não apresentou tendência de variação temporal significativa, registrando medianas entre 89,0 e 92,5 dias nos diferentes recortes. Para os estresses biológicos, o estresse médio por temperatura exibiu estabilidade no referencial histórico, mas indicou tendência decrescente nas projeções futuras (SSP245 e SSP585). O estresse médio por expansão foliar apresentou tendência de redução exclusiva no cenário moderado (SSP245), mantendo-se estável nos demais, enquanto o fechamento estomático registrou decréscimo isolado no cenário extremo (SSP585).

A resposta produtiva da safrinha não indicou tendências de alteração ao longo do período histórico. Contudo, sob o forçamento do cenário SSP245, observou-se uma tendência de ganho contínuo (crescente) para a biomassa (mediana de 9,5 kg/ha) e para as produtividades seca (0,8 kg/ha) e fresca (0,9 kg/ha). A projeção de alta emissão (SSP585) apontou estabilidade temporal para o acúmulo de biomassa (sem tendência significativa), mas também exibiu tendências crescentes para as produtividades seca e fresca, cujas medianas situaram-se em 0,5 kg/ha e 0,6 kg/ha, respectivamente. O índice de colheita registrou tendência crescente em ambas as projeções climáticas futuras. Por fim, a produtividade da água acompanhou essa trajetória de ganhos, evidenciando tendências crescentes sob os cenários SSP245 e SSP585, enquanto o período histórico manteve-se sem tendência significativa.

Para mensurar o impacto absoluto das alterações climáticas sobre o desenvolvimento da cultura na safrinha, procedeu-se à comparação estática das magnitudes das variáveis entre os diferentes cenários. A Tabela 6 apresenta a estatística do teste não paramétrico global de Kruskal-Wallis.

Tabela 6. Comparação das medianas das variáveis agrometeorológicas e produtivas do milho safrinha entre o clima histórico de referência e as projeções futuras (SSP245 e SSP585).

Variável	P-valor	Significância
Precipitação pluvial (mm/ciclo)	0.5165	Não Significativo
ETc (mm/ciclo)	0.7364	Não Significativo
Graus Dia (GD)	0.1521	Não Significativo
CO ₂ (ppm)	0.0000	Significativo
Ciclo (dias)	0.5991	Não Significativo
Estresse médio por Temperatura (%)	0.0000	Significativo
Estresse médio por Expansão foliar (%)	0.2419	Não Significativo
Estresse médio Estomático (%)	0.0001	Significativo
Biomassa (kg/ha)	0.3176	Não Significativo
Índice de Colheita HI (%)	0.0390	Significativo
Produtividade Seca (kg/ha)	0.0539	Não Significativo
Produtividade Fresca (kg/ha)	0.0543	Não Significativo
Produtividade da água (kg/m ³)	0.0292	Significativo

* O teste de Kruskal-Wallis avaliou a variância global dos postos entre os três cenários. Valores de p ajustado < 0,05 indicam diferença estatística significativa entre os pares avaliados.

O teste global de Kruskal-Wallis confirmou a alteração estatística na magnitude absoluta da maioria das variáveis agrometeorológicas e produtivas da safrinha entre os recortes climáticos. A precipitação pluvial apresentou diferença significativa global, registrando um incremento da mediana histórica de 186,0 mm/ciclo para 194,0 mm/ciclo no cenário SSP245 e 196,5 mm/ciclo na projeção de alta emissão (SSP585). A ETc também demonstrou variação estatisticamente significativa, mantendo a mediana de 317,0 mm/ciclo no referencial histórico e no cenário SSP245, com leve recuo para 313,5 mm/ciclo no cenário SSP585. A concentração de CO₂ diferiu de forma significativa entre os cenários, enquanto a soma térmica em graus-dia não apresentou alteração estatística global.

A magnitude das variáveis ecofisiológicas respondeu às novas condições de contorno. O ciclo da cultura indicou diferença estatística significativa, variando de uma mediana de 91,0 dias no período histórico para 89,0 dias (SSP245) e 92,5 dias (SSP585). A intensidade dos estresses biológicos refletiu parcialmente o rigor do ambiente: os estresses médios por temperatura e por expansão foliar sofreram alterações estatísticas globais, com a mediana de expansão foliar reduzindo de 51,0% no histórico para 48,0% no SSP585. O estresse estomático, contudo, não apresentou diferença estatística

significativa entre as simulações. O índice de colheita exibiu alteração significativa em sua distribuição global, com a mediana elevando-se de 3,9% (histórico) para 7,2% na projeção SSP245 e 5,0% no SSP585.

A eficiência e o rendimento final refletiram o balanço ambiental imposto ao cultivo de safrinha, evidenciando diferenças estatísticas significativas, embora em patamares absolutos severamente restritivos. A produtividade da água obteve variação global significativa, evoluindo de uma mediana histórica de 0,1 kg/m³ para 0,3 kg/m³ no cenário SSP245 e 0,2 kg/m³ no SSP585. A produtividade seca consolidou este comportamento: o clima histórico limitou o rendimento mediano a apenas 0,4 kg/ha, ao passo que a projeção SSP245 deslocou a marca para 0,8 kg/ha e o cenário SSP585 para 0,5 kg/ha, configurando distanciamento estatístico significativo. A biomassa e a produtividade fresca confirmaram diferenças globais, acompanhando a resposta ecofisiológica da cultura sob os novos forçamentos climáticos.

A evolução temporal das variáveis agrometeorológicas e produtivas na safrinha materializa as alterações estruturais do balanço hídrico simuladas sob os diferentes forçamentos radiativos até o final do século. A Figura 8 ilustra a variabilidade interanual e as linhas de tendência para a precipitação pluvial, a evapotranspiração da cultura (ETc), a produtividade da água e a produtividade final do milho.

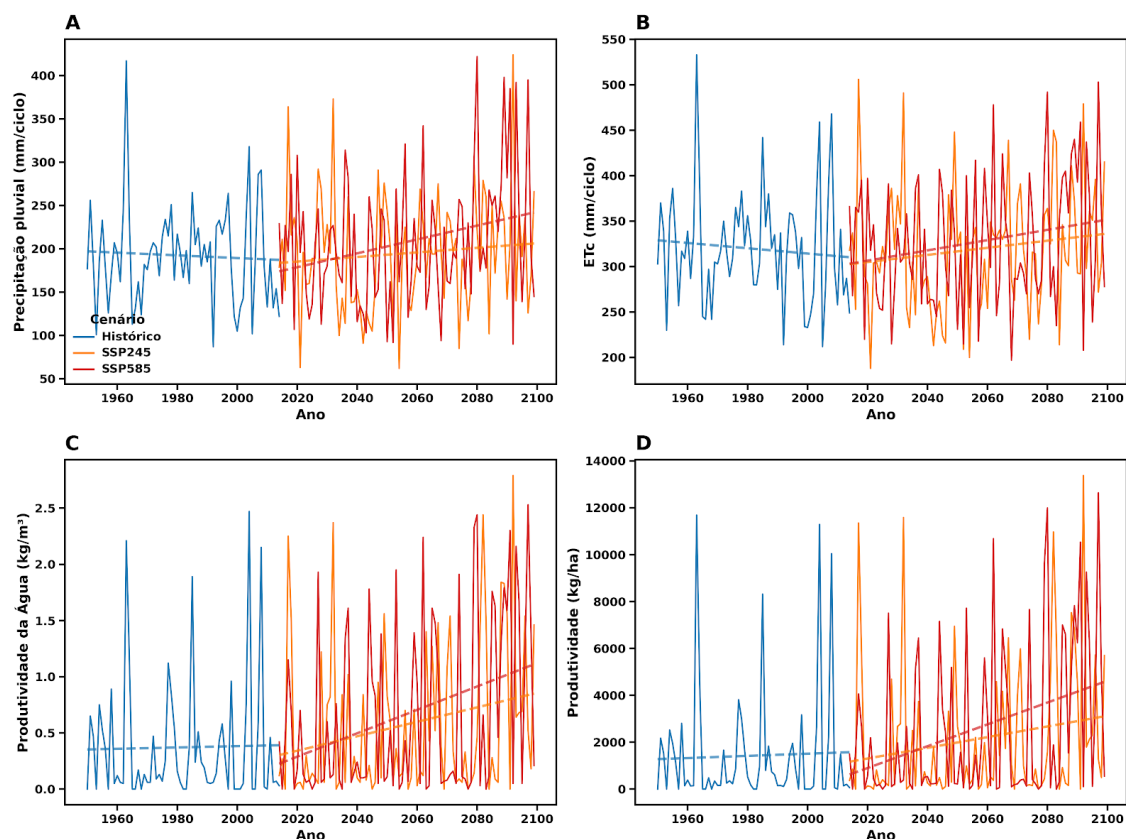


Fig. 8 - Distribuição temporal da Precipitação pluvial (A), Evapotranspiração da cultura (B), Produtividade da água (C) e Produtividade (D) simulada para o milho safrinha, abrangendo o período histórico e os cenários projetados (SSP245 e SSP585). As linhas tracejadas indicam a tendência linear das variáveis entre os cenários ao longo dos anos avaliados. Fonte: Lorena Júlio Gonçalves, Lavras, 2026.

A precipitação pluvial (Figura 8A) demonstra uma alteração de padrão, com o cenário de alta emissão (SSP585) exibindo uma tendência crescente ao longo das décadas. Contudo, a análise conjunta deste cenário evidencia um forte desequilíbrio no balanço hídrico quando comparado ao cultivo de verão. O volume pluviométrico absoluto da safrinha permanece drasticamente inferior: enquanto a safra principal recebe medianas entre 739,0 e 881,0 mm/ciclo, a safrinha restringe-se a volumes marginais entre 186,0 e 196,5 mm/ciclo. A demanda atmosférica, representada pela ETc (Figura 8B), reflete essa restrição. Na safrinha, a ETc mantém-se na faixa de 313,5 a 317,0 mm/ciclo, valor que representa praticamente a metade da demanda observada na safra (554,0 a 617,5 mm/ciclo). Esse cenário configura um ambiente de déficit hídrico severo e crônico, em que o volume de chuva injetado no sistema é persistentemente insuficiente para suprir o metabolismo pleno da cultura.

O impacto fisiológico desse déficit agudo expressa-se de forma direta na eficiência hídrica (Figura 8C) e no rendimento comercial (Figura 8D). Embora as linhas de tendência visual e a análise estatística apontem trajetórias crescentes para a produtividade da água e para a produtividade final da safrinha nas projeções futuras, a magnitude absoluta destes índices revela um abismo produtivo. A produtividade seca mediana na safrinha oscila precariamente entre 0,4 e 0,8 kg/ha, configurando uma redução drástica e perdas quase totais em diversos anos, contrastando com o teto produtivo robusto de 11,7 a 12,6 kg/ha garantido na safra principal. De forma análoga, a produtividade da água despenca de patamares de 2,0 a 2,1 kg/m³ na safra para apenas 0,1 a 0,3 kg/m³ na safrinha.

Esse comportamento evidencia que o ligeiro ganho pluviométrico projetado para a safrinha é fundamentalmente insuficiente para reverter o estresse da planta. Consequentemente, apesar da inclinação positiva nas linhas de regressão, o cultivo de safrinha consolida-se como uma operação de altíssimo risco agrônomo, caracterizada por uma acentuada volatilidade interanual e um teto produtivo severamente deprimido em relação ao cultivo de verão.

A Figura 9 ilustra a comparação das medianas destas variáveis, integrando a distribuição global da precipitação pluvial (A), da ETc (B), da produtividade da água (C) e da produtividade final (D) entre os anos de 1950 e 2099.

.

.

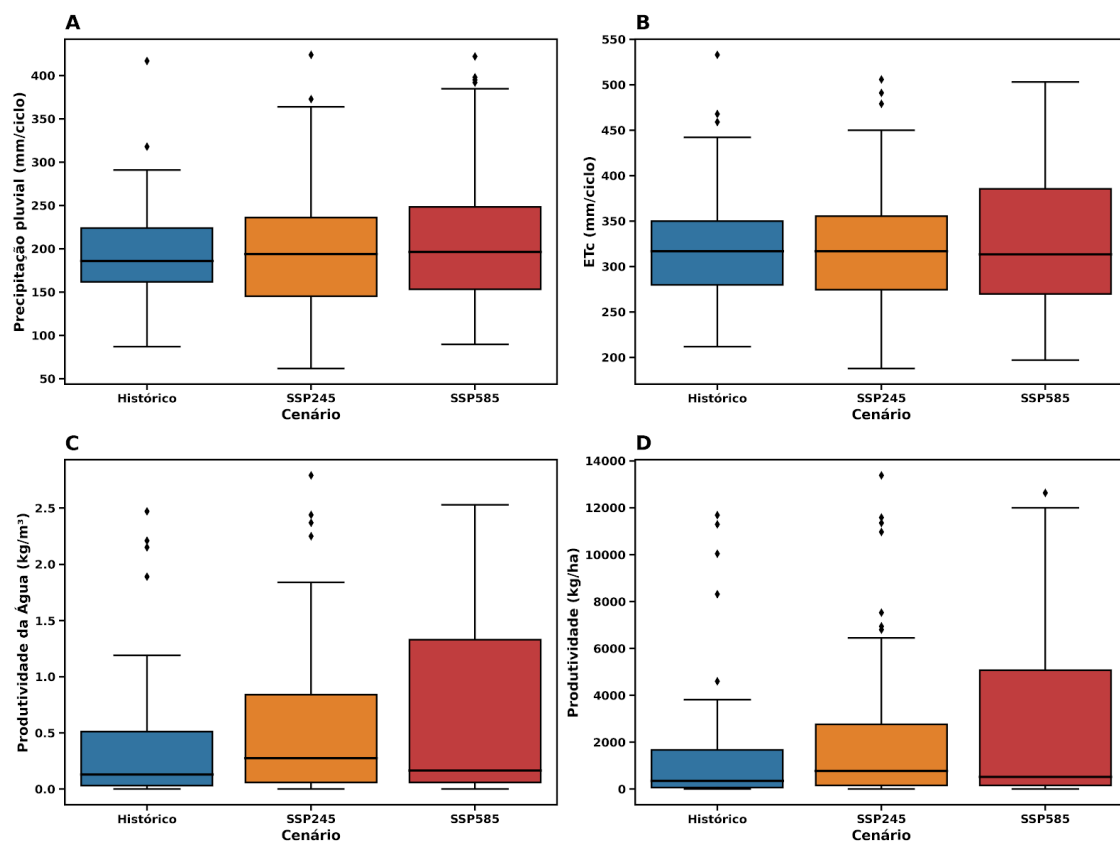


Fig. 9 - Comparação das medianas da Precipitação pluvial (A), Evapotranspiração da cultura (B), Produtividade da água (C) e Produtividade (D) para a cultura do milho safrinha. As séries temporais compreendem o clima histórico de referência e as projeções futuras sob os cenários SSP245 e SSP585. As caixas delimitam o intervalo interquartil, a linha horizontal interna indica a mediana e as hastes representam a amplitude dos dados não discrepantes. Fonte: Lorena Júlio Gonçalves, Lavras, 2026.

A análise de dispersão das respostas agrometeorológicas e produtivas da safrinha (Figura 9) ganha contornos mais nítidos quando contrastada diretamente com as magnitudes observadas na safra principal (Figura 3).

Na avaliação do balanço hídrico, a precipitação pluvial da safrinha (Figura 9A) exibe medianas restritas à faixa de 186,0 a 196,5 mm/ciclo. Embora a projeção SSP585 apresente um pequeno alargamento de sua amplitude interquartilica, este volume é expressivamente inferior aos 739,0 a 881,0 mm/ciclo assegurados durante o verão (Figura 3A). Simultaneamente, a distribuição da ETc na safrinha (Figura 9B) atesta uma demanda atmosférica rigorosamente elevada, com medianas entre 313,5 e 317,0 mm/ciclo. O contraste visual e numérico entre a oferta hídrica e a demanda evapotranspirativa na safrinha confirma uma condição de déficit crônico, divergindo do padrão da safra principal, em que o volume precipitado frequentemente supera com folga a demanda da cultura (554,0 a 617,5 mm/ciclo, Figura 3B).

O impacto fisiológico e comercial desse severo desbalanço reflete-se de maneira contundente na dispersão da produtividade da água (Figura 9C) e da produtividade final (Figura 9D). Diferentemente do padrão estruturado e elevado garantido na safra de verão, cujas caixas interquartílicas sustentam medianas produtivas de 11.700,0 a 12.624,0 kg/ha (Figura 3D), as medianas da safrinha encontram-se fortemente achatadas em valores marginais, oscilando precariamente entre 0,4 e 0,8 kg/ha. A produtividade da água acompanha esse colapso, despencando de patamares consolidados de 2,0 a 2,1 kg/m³ na safra (Figura 3C) para índices ínfimos de 0,1 a 0,3 kg/m³ na safrinha.

Embora os cenários futuros (SSP245 e SSP585) na Figura 9D apresentem um alongamento visível do limite do terceiro quartil e das hastes superiores, refletindo a ocorrência de anos isolados em que chuvas atípicas impulsionaram algum rendimento, a densidade da distribuição na extrema base do gráfico ratifica a altíssima frequência de perdas quase totais. Essa representação visual consolida a análise estatística: a injeção hídrica episódica amplia a variabilidade interanual, mas não reverte a inviabilidade estrutural do cultivo de sequeiro no outono/inverno, escancarando o abismo produtivo irreversível em relação à safra principal.

A avaliação da dinâmica temporal do cultivo de safrinha evidencia a instabilidade do sistema ao longo do século XXI, apresentando um contraste marcante quando comparada à estabilidade da safra principal. A Figura 10 apresenta a variabilidade interanual e as linhas de tendência para o cultivo de outono/inverno.

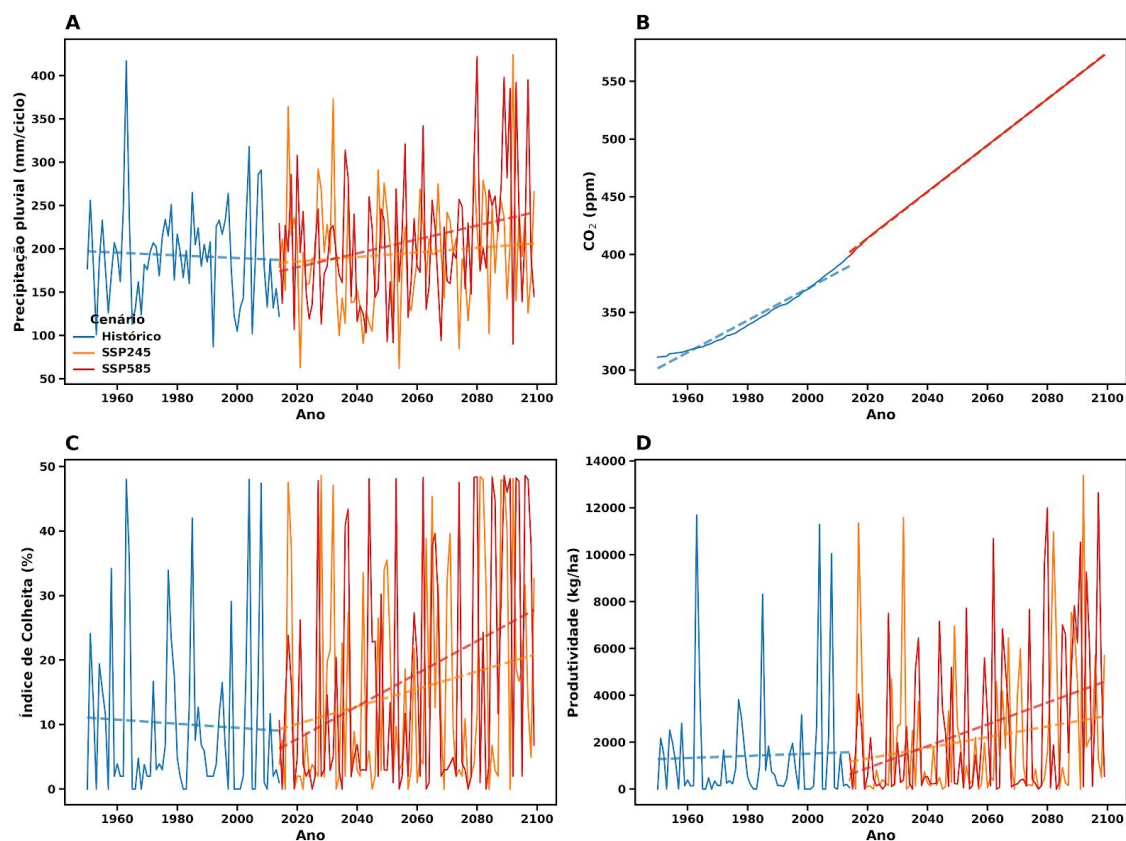


Fig 10. Distribuição temporal e linhas de tendência para a Precipitação pluvial (A), Concentração de CO₂ (B), Índice de Colheita (C) e Produtividade (D) simuladas para o milho safrinha, abrangendo o período histórico e as projeções SSP245 e SSP585. As linhas tracejadas indicam a tendência linear das variáveis entre os cenários ao longo dos anos avaliados. Fonte: Lorena Júlio Gonçalves, Lavras, 2026.

A série temporal da precipitação pluvial na safrinha (Figura 10A) exibe tendência de incremento nas projeções futuras (SSP245 e SSP585), comportamento oposto ao declínio progressivo registrado na safra principal (Figura 4A). Contudo, a análise dos valores absolutos demonstra a persistência da limitação hídrica: enquanto a safra de verão garante volumes com medianas entre 739,0 e 881,0 mm/ciclo, a safrinha opera com volumes residuais cujas medianas limitam-se à faixa de 186,0 a 196,5 mm/ciclo. A concentração de CO₂ (Figura 10B) mantém a trajetória de incremento linear estabelecida pelas projeções de emissão, idêntica à observada no período de verão.

As variáveis de resposta da cultura atestam a inviabilidade estrutural da safrinha. O índice de colheita (Figura 10C) apresenta extrema volatilidade interanual. Diferentemente do cultivo de safra, que mantém partição estável em torno de 48,0% a 48,7% (Figura 4C), a safrinha exibe quedas frequentes a valores nulos (0%), atestando

falhas reprodutivas recorrentes que impedem a formação de grãos, mesmo com a linha de tendência matemática apresentando inclinação positiva nos cenários futuros.

A produtividade final (Figura 10D) reflete este colapso. Embora a análise de tendência indique inclinação crescente para as projeções SSP245 e SSP585, a variabilidade interanual extrema domina a série temporal, com o rendimento retornando constantemente a zero. Este comportamento diverge da safra principal (Figura 4D), que, mesmo apresentando tendência de declínio temporal, sustenta um rendimento robusto com medianas variando de 11.710,0 a 12.624,0 kg/ha. Na safrinha, o incremento estatístico tracionado por picos esporádicos de produtividade não altera a realidade de um teto produtivo severamente deprimido, cujas medianas oscilam precariamente entre 0,4 e 0,8 kg/ha, configurando perda quase total na maior parte da série simulada.

A análise de dispersão das variáveis simuladas para o cultivo de safrinha consolida o comportamento de extrema variabilidade do sistema ao longo do período avaliado, marcando um distanciamento estrutural absoluto em relação à estabilidade da safra de verão. A Figura 11 apresenta a distribuição das medianas e a amplitude interquartílica sob os diferentes forçamentos radiativos.

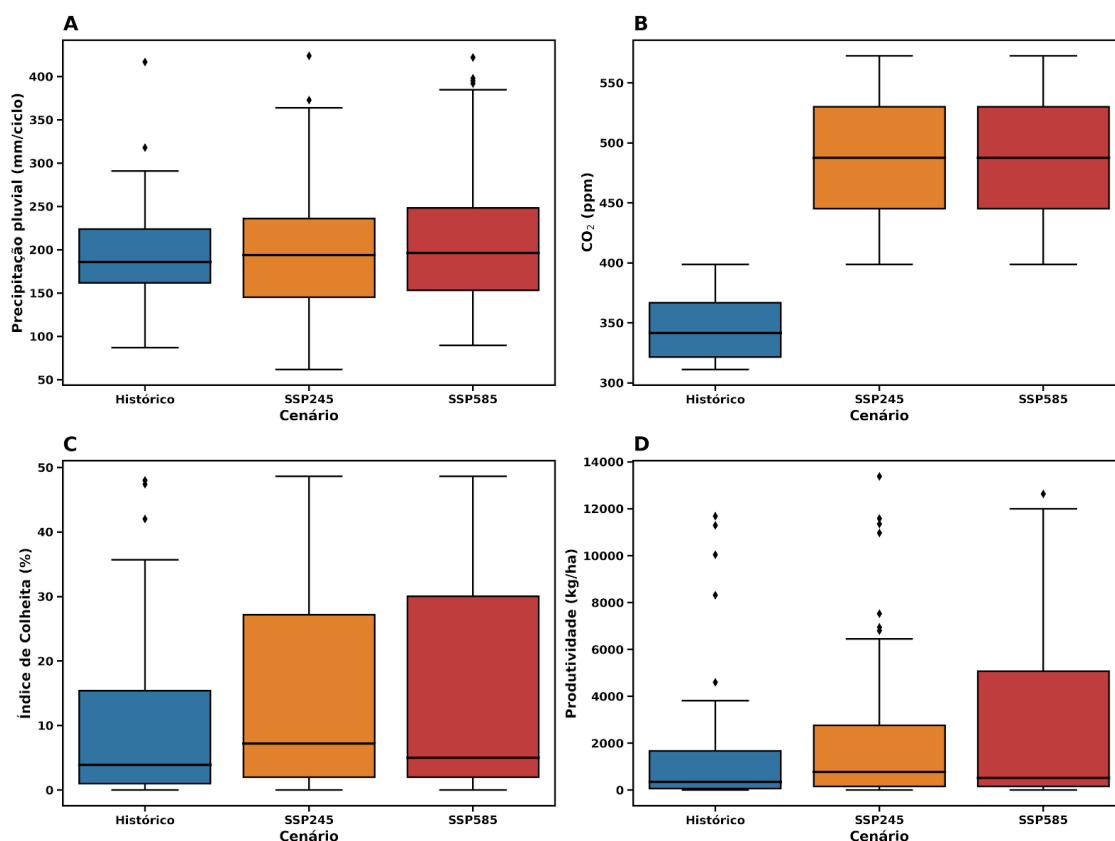


Fig 11. Comparação das medianas da Precipitação pluvial (A), Concentração de CO₂ (B), Índice de Colheita (C) e Produtividade (D) simuladas para o milho safrinha, abrangendo

o período histórico e as projeções SSP245 e SSP585. As caixas delimitam o intervalo interquartil, a linha horizontal interna indica a mediana e as hastes representam a amplitude dos dados não discrepantes. Fonte: Lorena Júlio Gonçalves, Lavras, 2026.

A precipitação pluvial da safrinha (Figura 11A) exibe um ligeiro alargamento da amplitude interquartílica e um discreto incremento em suas medianas nas projeções futuras (SSP245 e SSP585). No entanto, os volumes absolutos permanecem restritos à faixa de 186,0 a 196,5 mm/ciclo. Este aporte hídrico é estruturalmente inferior ao registrado na safra principal (Figura 5A), cujas medianas, mesmo em trajetória de declínio nos cenários futuros, oscilam em patamares significativamente superiores, variando de 739,0 a 881,0 mm/ciclo. A concentração de CO₂ na safrinha (Figura 11B) reproduz o deslocamento vertical e o incremento estabelecido pelas projeções de emissão, de forma idêntica à observada no cultivo de verão (Figura 5B).

As variáveis de resposta agrônômica evidenciam a limitação fisiológica imposta ao cultivo de outono/inverno. O índice de colheita da safrinha (Figura 11C) apresenta extrema dispersão assimétrica, com o limite inferior das caixas interquartílicas atingindo frequentemente o valor zero e medianas deprimidas. Este comportamento diverge frontalmente da safra de verão (Figura 5C), que sustenta estabilidade estrutural com medianas fortemente ancoradas em 48,0%. A elevada densidade de valores nulos ou próximos a zero na safrinha atesta a ocorrência recorrente de falhas reprodutivas totais, indicando a incapacidade da cultura em realizar a partição de biomassa para os grãos na maior parte dos anos simulados.

A produtividade final da safrinha (Figura 11D) consolida o impacto desta restrição edafoclimática. A distribuição dos dados exibe uma severa compressão na base do painel, com medianas achatadas em patamares marginais que oscilam entre 0,4 e 0,8 kg/ha. A presença de hastes superiores alongadas e valores extremos discrepantes reflete a ocorrência de anos pontuais com algum rendimento induzido por precipitações atípicas, contudo, a concentração da distribuição em níveis nulos valida a instabilidade do sistema. O contraste com a safra principal (Figura 5D) demonstra o distanciamento produtivo entre as épocas de semeadura: enquanto o cultivo de verão garante um teto robusto com medianas variando de 11.710,0 a 12.624,0 kg/ha, a safrinha mantém-se em um estado crônico de quebras de safra e inviabilidade produtiva.

A avaliação da dinâmica temporal das variáveis ecofisiológicas no cultivo de safrinha evidencia comportamentos divergentes quando contrastada ao cultivo da safra

principal (Figura 6). A Figura 12 apresenta a evolução interanual e as linhas de tendência para a cultura de outono/inverno.

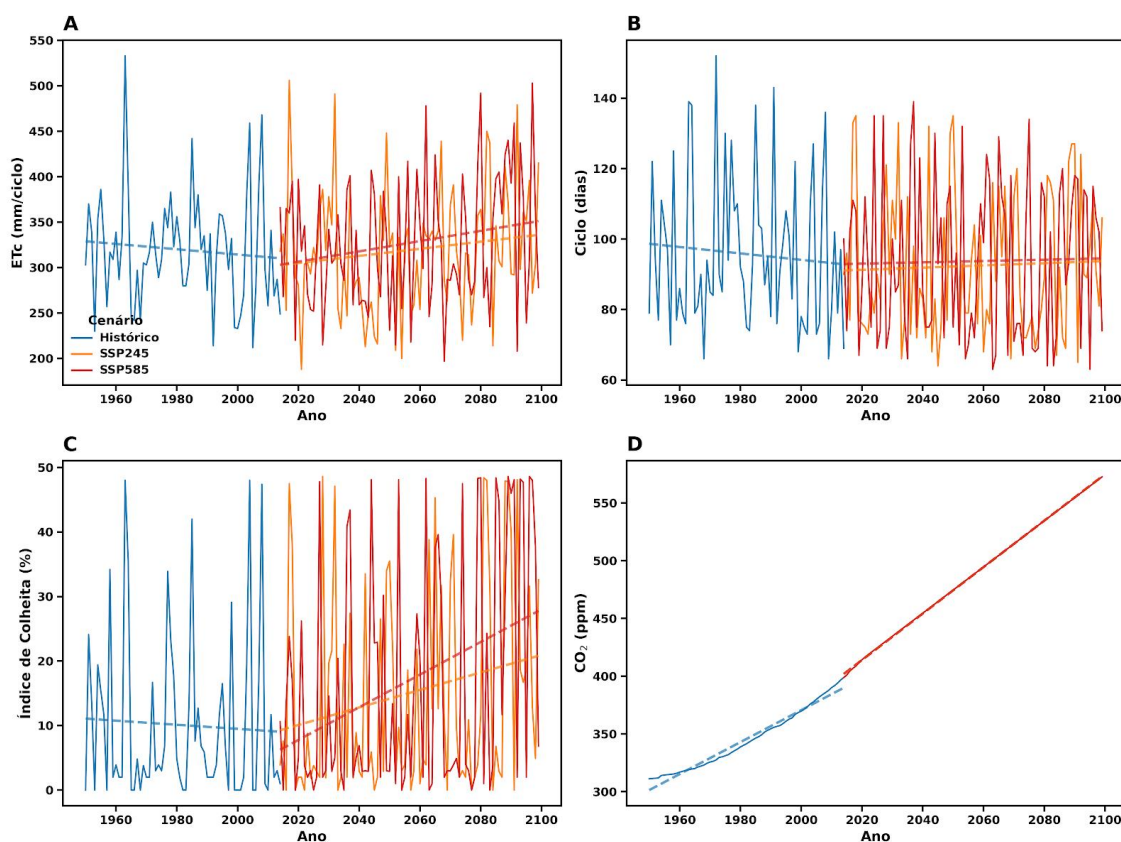


Fig 12. Distribuição temporal e linhas de tendência para a Evapotranspiração da cultura (A), Duração do ciclo (B), Índice de Colheita (C) e Concentração de CO_2 (D) simuladas para o milho safrinha, abrangendo o período histórico e as projeções SSP245 e SSP585. As linhas tracejadas indicam a tendência linear das variáveis entre os cenários ao longo dos anos avaliados. Fonte: Lorena Júlio Gonçalves, Lavras, 2026.

A evapotranspiração da cultura na safrinha (Figura 12A) exibe tendência matemática de incremento nas projeções futuras (SSP245 e SSP585), em oposição à linha de tendência de declínio observada na safra principal (Figura 6A). A comparação quantitativa demonstra que a ETc da safrinha opera com medianas na faixa de 313,5 a 317,0 mm/ciclo, valores inferiores aos registrados no cultivo de safra, cujas medianas situam-se entre 554,0 e 617,5 mm/ciclo. A concentração de CO_2 (Figura 12D) segue a mesma taxa de incremento linear em ambas as épocas de semeadura.

A duração do ciclo na safrinha (Figura 12B) apresenta linhas de tendência com inclinação próxima a zero ao longo do século XXI, acompanhadas de alta amplitude interanual (oscilando entre 60 e 140 dias). Este comportamento difere estruturalmente da

safrã principal (Figura 6B), que registra uma trajetória contínua de encurtamento fenológico temporal.

O índice de colheita da safrinha (Figura 12C) exibe linhas de tendência com inclinação positiva nos cenários futuros; no entanto, a distribuição anual atesta oscilações que atingem frequentemente o valor de 0%. Na safrã principal (Figura 6C), esta variável apresenta constância temporal, com os valores e medianas fixados estritamente na faixa de 48,0% a 48,7% ao longo de todo o período simulado. A incidência repetida de índices nulos na série da safrinha indica a ausência de partição de biomassa para os grãos, diferenciando-se da estabilidade observada no cultivo de verão.

A análise de dispersão das variáveis ecofisiológicas da safrinha consolida o comportamento de elevada variabilidade do sistema, estabelecendo um contraponto quantitativo direto ao desempenho estruturado da safrã principal. A Figura 13 apresenta a distribuição das medianas e das amplitudes interquartílicas para a cultura de outono/inverno.

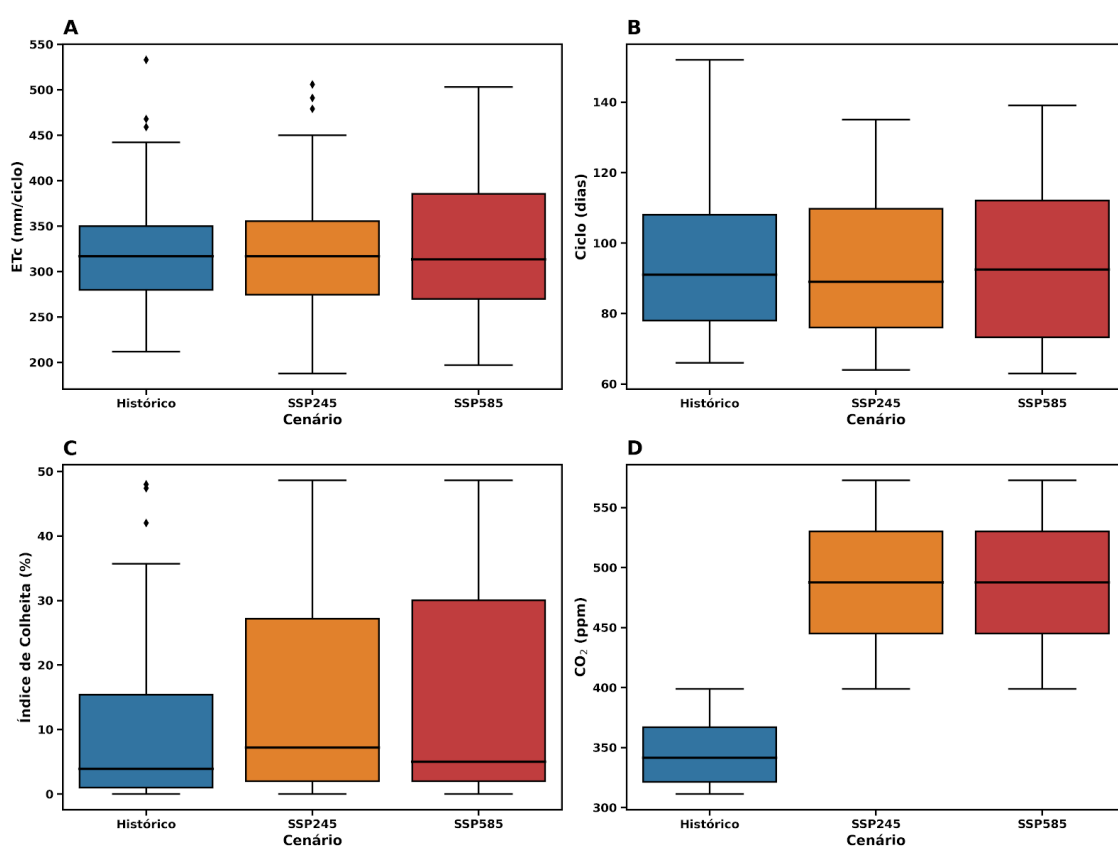


Fig 13. Comparação das medianas da Evapotranspiração da cultura (A), Duração do ciclo (B), Índice de Colheita (C) e Concentração de CO₂ (D) simuladas para o milho safrinha, abrangendo o período histórico e as projeções SSP245 e SSP585. As caixas delimitam o intervalo interquartil, a linha horizontal interna indica a mediana e as hastes representam a amplitude dos dados não discrepantes. Fonte: Lorena Júlio Gonçalves, Lavras, 2026.

A ETc na safrinha (Figura 13A) não exhibe o rebaixamento estrutural interquartilico observado na safra de verão. Enquanto a safra principal (Figura 7A) registra declínio nas medianas de 617,5 mm/ciclo (histórico) para 554,0 mm/ciclo (SSP585), as medianas da safrinha mantêm-se estáveis na faixa de 313,5 a 317,0 mm/ciclo entre os cenários. Apesar desta estabilidade nas projeções, o volume absoluto evapotranspirado na safrinha representa aproximadamente a metade da demanda atendida no cultivo de verão.

A duração do ciclo da safrinha (Figura 13B) caracteriza-se por elevada dispersão dos dados, com caixas interquartílicas alongadas e limites que oscilam entre 60 e mais de 140 dias. As medianas flutuam entre 89 e 92 dias, sem apresentar o encurtamento direcional imposto pelas mudanças climáticas no cultivo de safra. Na época principal (Figura 7B), o ciclo é progressivamente reduzido, com as medianas recuando de 116 para 104 dias, acompanhadas de menor dispersão interanual.

O índice de colheita (Figura 13C) materializa a discrepância na partição fisiológica de biomassa entre as duas épocas de semeadura. No cultivo de safra (Figura 7C), a mediana é fixada em 48,0% em todos os cenários, com os dados estritamente concentrados neste patamar. Na safrinha, a distribuição exhibe caixas interquartílicas cujo limite inferior toca a marca de 0%, operando com medianas deprimidas na faixa de 4,0% a 7,0%. A alta frequência de valores nulos e a ampla dispersão na safrinha comprovam a ausência de partição efetiva de fotoassimilados para os grãos na maior parte da série, em oposição à constância estrutural da safra.

A concentração de CO₂ (Figura 13D) exhibe o deslocamento de seus níveis medianos conforme as projeções de emissão, reproduzindo a mesma distribuição já registrada na época de verão. O conjunto de gráficos ratifica que a safrinha opera fora das zonas de conforto ecofisiológico da cultura, resultando em conversão nula ou marginal de biomassa em componentes de rendimento.

4. DISCUSSÃO

4.1 Correção de viés dos dados climáticos futuros

A divergência estatística inicial aferida nas projeções brutas do CMIP6 quantifica a limitação estrutural dos Modelos de Circulação Global (GCMs). A baixa resolução espacial das grades numéricas impede a captura exata de feições topográficas locais e a resolução explícita de sistemas convectivos de mesoescala. Esse déficit de parametrização física resulta na superestimativa da precipitação pluviométrica diária e na distorção do balanço térmico na superfície. Almazroui et al. (2021) documentaram esse padrão de erro sistemático para o continente sul-americano. Os autores comprovaram que as simulações globais falham na representação da magnitude dos extremos hidrometeorológicos regionais. Essa imprecisão térmica impõe a execução mandatória de rotinas de *downscaling* e correção de viés para viabilizar simulações de impacto pontuais.

A supressão do Viés Médio e a readequação dos percentis limítrofes confirmam a superioridade algorítmica do método *Quantile Delta Mapping* (QDM). Métodos tradicionais de mapeamento empírico frequentemente supercorrigem a série temporal diária. Essa supercorreção corrompe a tendência climática de longo prazo projetada originalmente pelos cenários de emissão do painel intergovernamental. O algoritmo QDM suprime esse problema estrutural ao isolar preliminarmente o sinal relativo às mudanças climáticas (Cannon et al., 2015). O processamento computacional transfere estritamente a diferença térmica do GCM para a função de distribuição acumulada local. Esse método preserva a física climática global e calibra simultaneamente as magnitudes diárias irreais nos quantis extremos. A transposição do desvio climático acentuado ocorre sem a diluição da variação interanual de temperatura e chuva.

A calibração definitiva dos limiares climatológicos dependeu irrestritamente da confiabilidade da base observacional de referência. A utilização do conjunto BR-DWGD (Xavier et al., 2022) forneceu a densidade temporal exigida para o ajuste paramétrico exato na coordenada de Lavras. O alinhamento das variáveis radiativas e aerodinâmicas aos dados da grade observacional suprimiu a ocorrência de valores diários fisicamente inconsistentes. Essa eliminação de distorções nos extremos da distribuição probabilística constitui um pré-requisito indispensável para a engenharia agrícola. A propagação de vieses pluviométricos e radiativos em equações de balanço hídrico inviabiliza a simulação

precisa da evapotranspiração. A consolidação destas séries temporais ajustadas garante a estabilidade numérica estrita para a posterior determinação da demanda evaporativa atmosférica e do estresse hídrico na cultura do milho.

4.2 Simulações no software Aquacrop de safra e safrinha para a cultura do milho

As projeções climáticas estabelecem impactos divergentes sobre a cultura do milho nas diferentes épocas de semeadura em Lavras, MG. A validação da modelagem histórica encontra respaldo nos levantamentos oficiais de campo. Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025) indicam que a produtividade atual da safra na região varia entre 5.500 e 6.000 kg/ha, consolidando o período de verão como o estrato temporal mais propício ao desenvolvimento fenológico da cultura. A simulação do cenário histórico pelo AquaCrop reflete esta favorabilidade hídrica e térmica estrutural, projetando um teto produtivo que expressa o potencial máximo da planta quando livre de estresses bióticos e restrições de fertilidade. A articulação entre os testes estatísticos evidencia, contudo, que a forçante radiativa extrema (SSP585) desestrutura integralmente este padrão climático de referência.

Observou-se no cultivo da safra, a degradação produtiva progressiva sob o cenário de alta emissão. A precipitação pluviométrica decresceu ao longo do século, restringindo o desenvolvimento do dossel e diminuindo a interceptação de radiação solar. Simultaneamente, observou-se uma supressão da ETc acumulada. Inicialmente, a redução desta demanda nos cenários futuros poderia sugerir um abrandamento nas exigências hídricas de contorno. No entanto, este decréscimo está estritamente atrelado ao encurtamento do ciclo fenológico. Sob o forçamento térmico severo projetado pelo SSP585, o rápido acúmulo de graus-dia acelerou a ontogenia da planta. Com um menor período de permanência no campo, a cultura intercepta menos radiação fotossinteticamente ativa ao longo da safra, limitando drasticamente a síntese e o acúmulo de biomassa. A planta não dispõe de tempo hábil para o pleno enchimento de grãos, resultando em senescência precoce e quebra sistêmica de rendimento.

Essa resposta produtiva sob os cenários de mudanças climáticas é intrinsecamente governada pelo metabolismo fotossintético da cultura. Conforme elucidado por Taiz et al. (2017) e Kerbauy (2019), o milho, por apresentar metabolismo C4, possui um mecanismo anatômico e bioquímico de concentração de carbono mediado pela enzima

PEP-carboxilase, mantendo-se próximo à saturação fotossintética sob os níveis atmosféricos atuais de CO₂.

Diferentemente das plantas C4 (como o milho e a cana-de-açúcar), que contam com um sistema anatômico e bioquímico concentrador de carbono na bainha do feixe, as plantas C3 (como a soja e o feijão) operam sob concentrações de CO₂ atmosférico que não saturam totalmente a enzima Rubisco (Ainsworth e Rogers, 2007). Por essa razão, quando essas espécies são submetidas a uma atmosfera enriquecida com CO₂, a Rubisco aumenta significativamente a sua taxa de carboxilação, evento amplamente conhecido como o "efeito fertilizante do CO₂" (Ainsworth e Rogers, 2007).

Entretanto, as plantas C3 apresentam expressiva sensibilidade ao estresse térmico e à escassez hídrica. Em cenários de altas temperaturas, a planta promove o fechamento estomático preventivo para conter a perda transpiratória de água, o que reduz drasticamente a concentração interna de CO₂ nas células do mesófilo (Peterhansel et al., 2010; Pimentel, 2023). Diante da escassez de CO₂ e da perda de afinidade da Rubisco pelo carbono sob calor elevado, a enzima passa a utilizar o oxigênio (O₂) gerado na etapa fotoquímica da fotossíntese como substrato ativo (Peterhansel et al., 2010; Pimentel, 2023). Essa atividade oxigenásica desencadeia a rota da fotorrespiração para reciclar o fosfoglicolato gerado (Peterhansel et al., 2010; Pimentel, 2023).

Durante a rota fotorrespiratória, especificamente no interior dos peroxissomos, ocorre a conversão do glicolato em glioxilato, reação que produz quantidades expressivas de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e outras Espécies Reativas de Oxigênio (EROs) (Peterhansel et al., 2010; Pimentel, 2023). Se a taxa de formação de EROs superar a capacidade do sistema antioxidante celular (como o ciclo ascorbato-glutationa), estabelece-se o estresse oxidativo (Pimentel, 2023). Esse processo leva à peroxidação dos lipídios das membranas celulares, dano estrutural aos fotossistemas e degradação progressiva do maquinário celular e das proteínas fotossintéticas (Peterhansel et al., 2010).

Em contrapartida, embora as plantas C4 possuam maior eficiência no uso da água e suprimam a fotorrespiração graças ao mecanismo concentrador de carbono na anatomia Kranz, o estresse térmico severo também impõe severas limitações ao seu desempenho fotossintético (Crafts-Brandner e Salvucci, 2002; Sage e Kubien, 2007). Sob temperaturas extremamente elevadas (frequentemente acima de 40 °C), ocorre a inativação térmica e a limitação funcional da enzima Rubisco Activase (RCA), responsável pela manutenção do

estado ativo da Rubisco, além da desestabilização da fosfoenolpiruvato carboxilase (PEP-carboxilase) e do Fotossistema II (PSII) (Crafts-Brandner e Salvucci, 2002; Sage e Kubien, 2007).

Essa interrupção no fluxo do ciclo de redução de carbono desacopla a fase fotoquímica da fase bioquímica da fotossíntese, gerando uma sobre-excitação na cadeia transportadora de elétrons dos cloroplastos. Como consequência, elétrons em excesso são transferidos diretamente ao oxigênio molecular no complexo do Fotossistema I (reação do tipo Mehler), disparando a produção exacerbada de superóxido ($O_2^{\cdot-}$) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2) (Crafts-Brandner e Salvucci, 2002). Assim, mesmo evitando a via fotorrespiratória convencional dos peroxissomos, as plantas C4 sob calor severo entram em estresse foto-oxidativo cloroplástico, resultando no colapso funcional da membrana dos tilacoides, inibição da assimilação líquida de carbono e acelerada senescência foliar (Crafts-Brandner e Salvucci, 2002; Sage e Kubien, 2007)

Trabalhos de modelagem agrometeorológica em regiões tropicais, como os conduzidos por Karunaratne et al. (2020) e Ouedraogo et al. (2024) utilizando o AquaCrop, confirmam que a compressão fenológica induzida pelo estresse térmico em genótipos C4 anula os discretos ganhos na produtividade da água, estabelecendo o calor extremo como o limitante universal do rendimento nestas latitudes.

O cultivo de safrinha, historicamente limitado pelo déficit hídrico e térmico de outono/inverno, exibe um comportamento anômalo e de extrema sensibilidade sob a mesma forçante radiativa. A precipitação apresenta um leve incremento estatístico nas projeções do cenário SSP585; no entanto, esse volume hídrico é residual quando confrontado com a evapotranspiração exigida pela atmosfera, que opera de forma severamente desbalanceada. Esta limitação hídrica crônica bloqueia o metabolismo vegetal nas fases de florescimento e enchimento de grãos. O índice de colheita simulado colapsa frequentemente a zero, atestando falhas reprodutivas totais ao longo da série histórica e futura.

A produtividade final da safrinha reflete este colapso fisiológico. A variabilidade interanual extrema domina a série temporal, operando em patamares marginais que configuram perda quase total. O incremento estatístico tracionado por picos episódicos de precipitação não altera a realidade de inviabilidade fisiológica crônica do sistema. Esta degradação reflete uma alteração estrutural na variabilidade interanual do clima, em que a translação de eventos extremos para fora da estação úmida tradicional é acompanhada

de imprevisibilidade aguda dentro de uma década, um padrão corroborado pelas simulações do Sistema de Monções da América do Sul sob o CMIP6 (Reboita et al., 2022).

A dualidade metodológica dos testes não paramétricos aplicados desmistifica aparentes vantagens agronômicas apontadas por leituras isoladas das projeções climáticas. A análise estatística de tendências complementa o estudo das medianas absolutas e atesta a degradação contínua do agroecossistema sob alta emissão em ambas as épocas de plantio. O dimensionamento de políticas de segurança alimentar embasado exclusivamente em médias climatológicas estáticas torna-se obsoleto frente à volatilidade do cenário SSP585.

A desestruturação do sistema produtivo, evidencia que táticas passivas, como a simples translocação do calendário de semeadura, são insuficientes (IPCC, 2023). A sustentabilidade demandará políticas ativas de mitigação e adoção de práticas de irrigação otimizadas. A modelagem por meio do AquaCrop tem demonstrado que a implementação de estratégias de irrigação deficitária regulada (RDI) pode atenuar a pressão sobre os recursos hídricos sem penalizar drasticamente o índice de colheita, desde que o estresse não seja imposto em fases críticas como a antese e a emissão de estilo-estigmas (Barrera et al., 2024; Sharafkhane et al., 2024). No entanto, déficits prolongados que atingem 50% da necessidade hídrica da cultura induzem grandes flutuações interanuais e prejudicam o acúmulo basal de biomassa (Adeboye et al., 2019; Hu et al., 2025). Portanto, o dimensionamento de sistemas de irrigação suplementar para a região de Lavras deverá considerar rigorosamente os limites ecofisiológicos demonstrados, priorizando a reposição hídrica nos momentos em que o estresse por expansão foliar restrinja o desenvolvimento do dossel inicial.

Ressaltam-se as limitações inerentes à modelagem mecanística. Nas simulações realizadas no AquaCrop, assumiram-se condições edáficas homogêneas, controle ideal de fertilidade e não se contabilizaram estresses bióticos como pragas, doenças ou competição com plantas daninhas, fatores que tendem a ser exacerbados sob cenários de mudanças climáticas (Nyambo e Wakindiki, 2015; Puig et al., 2025). Consequentemente, as tendências de produtividade e os déficits hídricos quantificados representam o limite superior do potencial adaptativo do milho na região, reforçando a urgência na adoção de políticas embasadas no cenário de mitigação moderada (SSP245), o qual conferiu maior

estabilidade fisiológica e produtiva ao sistema, mantendo a produtividade em equivalência com a linha de base histórica.

O aprofundamento da resposta do milho exige a análise das Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas (SSPs). Para além das forçantes radiativas, os cenários avaliados embutem narrativas globais de desenvolvimento que se materializam em impactos econômicos locais (IPCC, 2023). A disparidade agronômica atestada nesta modelagem tangibiliza o custo socioeconômico da inação climática para o agronegócio de Lavras. O cenário SSP585, fundamentado no crescimento intensivo em combustíveis fósseis, traduz fisicamente a vulnerabilidade da produção de sequeiro tradicional. A frustração sequencial de safras, impulsionada pelo estresse térmico e pelo encurtamento ontogênico, atua como um agente de descapitalização do produtor rural, elevando o risco de inadimplência no crédito agrícola e ameaçando a segurança alimentar regional.

Em contrapartida, a via SSP245 pressupõe a transição gradual para padrões de sustentabilidade. A manutenção da janela fisiológica da cultura sob este cenário garante a estabilidade de rendimento necessária para a preservação das cadeias de suprimento, funcionando como um verdadeiro seguro agronômico. Os dados evidenciam que a mitigação de emissões globais possui rebatimento direto na sustentação da rentabilidade e na fixação do trabalhador no campo.

O ambiente de incerteza hidrológica projetado na via de alta emissão transfere o ônus da adaptação para a adoção compulsória de tecnologias de alto capital agregado. A viabilidade da cultura passará a depender da expansão de sistemas de irrigação de precisão e da substituição de cultivares comerciais por genótipos de alta termotolerância. A formulação de políticas públicas em recursos hídricos deve incorporar o risco climático nas matrizes de planejamento do município, subsidiando a conversão tecnológica das propriedades como salvaguarda econômica frente à desestruturação pluviométrica.

A arquitetura metodológica validada neste estudo transcende os contornos geográficos da área de avaliação. O acoplamento de projeções climáticas do CMIP6 à modelagem física do AquaCrop, precedido por técnicas rigorosas de correção de viés (QDM), constitui uma estrutura de escalabilidade global. Mais do que registrar a vulnerabilidade de um município, a projeção antecipada do estresse hídrico e térmico funciona como um sistema de alerta precoce, fornecendo a base empírica para fundamentar a rejeição de trajetórias de alta emissão por tomadores de decisão institucionais.

A expansão territorial e a internacionalização de diagnósticos quantitativos dessa natureza são imperativos na atual conjuntura climática. Mais do que registrar passivamente a vulnerabilidade de um município, a projeção antecipada do estresse hídrico agudo e da quebra de safra atua como um sistema de alerta precoce. Tais simulações fornecem a base empírica e irrefutável para a rejeição global de trajetórias de alta emissão (SSP585). Ao dimensionar o colapso físico e socioeconômico iminente, estes estudos instrumentalizam formuladores de políticas em escala internacional para a adoção de metas rigorosas de descarbonização e para o direcionamento estratégico de fundos de adaptação climática, resguardando, em última instância, a segurança alimentar global.

4.3 Implicações para o manejo de campo

No âmbito tático e operacional, a mitigação destes impactos exige que os produtores de milho da região transitem para um manejo agrônomo proativo e tecnificado. Para a safra principal, a viabilidade produtiva dependerá da implantação de sistemas de irrigação suplementar de precisão, acionados com base no monitoramento ecofisiológico em tempo real para evitar a senescência precoce, associados à adoção de genótipos com comprovada tolerância térmica, principalmente no cenário SSP585.

Em relação à safrinha, frente à extrema instabilidade pluviométrica atestada sob cenários de alta emissão, o manejo de sequeiro tradicional torna-se uma operação de elevado risco financeiro. Recomenda-se a adoção rigorosa de práticas de conservação de solo e água, com ênfase no Sistema de Plantio Direto (SPD) e na manutenção de palhada, visando maximizar a infiltração, a retenção hídrica profunda e o tamponamento da amplitude térmica na rizosfera, exceto na eminência de geada, pois a palhada irá manter a temperatura microclimática mais baixa, e em períodos de geada, pode ocasionar sérios danos para as plantas, entretanto, existem práticas de manejo para mitigar os efeitos da geada como o molhamento ininterrupto da cultura, utilizando a irrigação por aspersão por exemplo.

Neste contexto, o dimensionamento das janelas de semeadura deve abandonar a dependência de calendários estáticos em favor do acompanhamento contínuo de previsões agrometeorológicas e sistemas de alerta precoce. A integração destas estratégias: genética adaptada, irrigação inteligente e manejo conservacionista estrutural, constitui o pacote

tecnológico viável para blindar o produtor rural contra a descapitalização e assegurar a rentabilidade das safras no novo regime climático.

4.4 A instabilidade do El Niño-Oscilação Sul (ENOS) e as incertezas na modelagem climática extrema

A variabilidade climática interanual no Brasil, especialmente no tocante ao regime pluviométrico e térmico, é fortemente modulada pelo fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS). No entanto, a incorporação determinística de episódios de El Niño e La Niña na modelagem agrometeorológica histórica esbarra na profunda instabilidade espaço-temporal e de intensidade destes eventos. Historicamente, a ocorrência do ENOS apresenta uma variabilidade natural que dificulta o isolamento de sua "assinatura" exata nos dados em simulações contínuas, uma vez que a duração, a intensidade e os impactos regionais de cada evento diferem drasticamente entre si, mascarando as tendências de longo prazo.

Essa limitação torna-se ainda mais restritiva ao analisarmos as projeções futuras sob o painel CMIP6 e as Trajetórias Socioeconômicas Compartilhadas (SSPs). A previsão exata e de longo prazo para a ocorrência e magnitude do ENOS é inviável com a tecnologia atual de modelagem global. Modelos de Circulação Global (GCMs) apresentam alta divergência na simulação de mudanças na variabilidade do fenômeno sob forçamentos radiativos (Brown et al., 2020). Na prática operacional da climatologia, a previsão confiável de um episódio de El Niño ou La Niña ocorre apenas meses antes de sua consolidação. Essa natureza caótica e imprevisível impede a parametrização cronológica precisa do fenômeno em simulações decadais que se estendem até o ano de 2099.

A omissão forçada destes extremos estocásticos na modelagem de longo prazo aponta que os impactos ecofisiológicos sobre a cultura do milho podem ser pontualmente muito mais severos do que os capturados pelas linhas de tendência da pesquisa. O ENOS altera diretamente o balanço de energia e a circulação atmosférica regional. Durante um El Niño de categoria forte, grande parte do Sudeste e do Centro-Oeste do Brasil experimenta bloqueios atmosféricos que induzem ondas de calor severas e prolongam o déficit hídrico. Se essas anomalias episódicas de alta intensidade fossem sobrepostas às restrições hídricas já estruturais do cenário de alta emissão (SSP585) simulado no

AquaCrop, o metabolismo da planta de milho colapsaria de forma ainda mais abrupta. O estresse térmico exacerbado acionaria a senescência foliar antes mesmo da antese, antecipando o colapso produtivo apontado para o final do século e zerando o rendimento da safra naqueles anos específicos de ocorrência do fenômeno.

A urgência imposta por essa limitação metodológica ganha materialidade frente às recentes anomalias climáticas globais. Dados de monitoramento oceânico e previsões de agências internacionais, como a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e a MetSul Meteorologia, indicam a formação de um evento anômalo em 2026 com probabilidade de se consolidar como um "Super El Niño". Modelagens meteorológicas apontam anomalias na temperatura da superfície do Pacífico equatorial que podem superar a marca de +3 °C a +4 °C. Pesquisadores e análises climatológicas indicam que este evento tem forte probabilidade de se configurar como o El Niño mais intenso dos últimos 150 anos (Correio Braziliense, 2026; Veja, 2026). A ocorrência iminente de um evento extremo dessa magnitude inverte a dinâmica hidrológica local, evidenciando que a variabilidade não linear do clima tem o potencial de materializar de forma repentina e imediata o estresse ecofisiológico e o risco de descapitalização projetados a longo prazo para o produtor rural no Brasil e no mundo.

5. CONCLUSÃO

As simulações ecofisiológicas de longo prazo demonstram que a sustentabilidade do cultivo de milho em Lavras, MG, está estritamente condicionada à trajetória global de emissões, com o cenário de alta forçante (SSP585) impondo uma degradação produtiva unidirecional e irreversível na safra de verão, mediada pelo encurtamento térmico do ciclo fenológico e uma instabilidade crônica com falhas reprodutivas totais na safrinha, enquanto a via de mitigação moderada (SSP245) preserva a estabilidade produtiva do sistema.

6. AGRADECIMENTO

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

7. REFERÊNCIAS

ADEBOYE, O. B. A.; SCHULTZ, B.; ADEKALU, K. O.; PRASAD, K. Crop water productivity and economic evaluation of fall-season maize (*Zea mays* L.) subjected to deficit irrigation in a tropical climate. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 574-585, 2019. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.11.006.

AINSWORTH, Elizabeth A.; ROGERS, Alistair. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising CO₂: conceptual progress and known unknowns. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 30, n. 3, p. 258-270, 2007.

DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01641.x>.

ALMAZROUI, M.; ISLAM, M. N.; SAEED, F. et al. Projected changes in temperature and precipitation over South America from CMIP6. **Earth Systems and Environment**, Cham, v. 5, p. 333-360, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>.

ALVAR-BELTRÁN, J.; SETTI, A.; MUGO, J.; BUCOR, N.; BEJENARU, G.; GIALLETTI, A.; DRUTA, A. Assessing climate change impacts and adaptation strategies for key crops in the Republic of Moldova using the AquaCrop model. **European Journal of Agronomy**, v. 164, p. 127530, 2025.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127530>

ARMSTRONG, R. A. When to use the Bonferroni correction. **Ophthalmic and Physiological Optics**, Oxford, v. 34, n. 5, p. 502-508, 2014.

DOI: <https://doi.org/10.1111/opo.12131>.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO JUNIOR, J. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agrícola de risco climático no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, n. 12, p. 1871-1879, 2008.

DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008001200020>.

BARRERA JR., W.; MORBIDINI, F.; ZAMMARCHI, L.; GHINASSI, G.; MAUCIERI, C.; BORIN, M.; DALLA MARTA, A.; VERDI, L. Assessing the impacts of regulated

deficit irrigation on soybean using AquaCrop. **Italian Journal of Agronomy**, v. 19, p. 100023, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijagro.2024.100023>.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas (1961-1990)**. Brasília, DF: SPI/EMBRAPA, 1992. 84 p.

BROWN, J. R.; BRIERLEY, C. M.; AN, S. I.; GUARINO, M. V.; STEVENSON, S.; WILLIAMS, C. J. R.; ZHANG, Q.; ZHAO, A.; BRACONNOT, P. Comparison of past and future simulations of ENSO in CMIP5/PMIP3 and CMIP6/PMIP4 models. **Climate of the Past**, v. 16, n. 5, p. 1777-1805, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5194/cp-2019-155>.

CANNON, A. J.; SOBIE, S. R.; MURDOCK, T. Q. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes? **Journal of Climate**, Boston, v. 28, n. 17, p. 6938-6959, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>.

CORREIO BRAZILIENSE. El Niño pode atingir maior intensidade em 150 anos. **Eco Braziliense**, Brasília, 29 jul. 2026. Disponível em: <https://newblogs.correiobraziliense.com.br/ecobraziliense/el-nino-pode-atingir-maior-intensidade-em-150-anos/>. Acesso em: 3 ago. 2026.

CRAFTS-BRANDNER, Steven J.; SALVUCCI, Michael E. Sensitivity of photosynthesis in a C4 plant, *Zea mays* L., to heat stress. **Plant Physiology**, Rockville, v. 129, n. 4, p. 1773-1780, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.002170>.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G. de; FERREIRA, E. Classificação e tendência climática em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000600039>.

HAMADA, E. et al. Avaliação da performance das projeções de precipitação e umidade relativa de modelos do CMIP6 no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE

AGROMETEOROLOGIA, 24., 2024. Anais... Embrapa Meio Ambiente, 2024. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1176682>.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v. 108, n. 3, p. 225-230, 1982.

DOI: <https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001390>.

HU, S.; DING, Y.; CUI, S.; LI, Y.; ZHAO, J. Assessing economic and hydrological effects of water-saving irrigation using a coupled SWAT–MODFLOW–AquaCrop model. **Agricultural Water Management**, v. 314, p. 109516, 2025.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109516>.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Levantamento **Sistemático da Produção Agrícola**. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 12 mar. 2026.

IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. **Cambridge University Press**, 2021.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2023. DOI: <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>.

KARUNARATNE, A. S.; AZAM-ALI, S. N.; IZUMI, Y.; et al. Impacts of climate change on maize (*Zea mays* L.) yields in tropical environments: A modeling approach using AquaCrop. **Field Crops Research**, v. 254, p. 107845, 2020. DOI: [10.1016/j.fcr.2020.107845](https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107845).

KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2019. 431 p.

LEAKEY, A. D. B.; AINSWORTH, E. A.; BERNACCHI, C. J. et al. Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 60, n. 10, p. 2859-2876, 2009.

DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/erp096>.

LI, M. et al. Climate-smart irrigation strategy can mitigate agricultural water consumption while ensuring food security under a changing climate. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 292, p. 108663, 2024.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108663>.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. Charles Griffin, London. 1975

MANN, H.B. **Nonparametric tests against trend**. *Econometrica*, v. 3, p. 245-259. 1945

MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; GRIMM, A. M. et al. Recent developments on the South American monsoon system. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 32, n. 1, p. 1-21, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.2254>.

NYAMBO, P.; WAKINDIKI, I. I. C. Water productivity of field crops under different soil management practices using the FAO AquaCrop model. **Agricultural Water Management**, v. 152, p. 308-316, 2015. DOI: [10.1016/j.agwat.2015.01.026](https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.01.026).

O'NEILL, B. C. et al. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. **Global Environmental Change**, Amsterdam, v. 42, p. 169-180, 2016.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004>.

OUEDRAOGO, I.; KABORE, J. N. T.; TRAORE, S.; SANFO, S. Assessing the Impacts of Climate Change on Rainfed Maize Production in Burkina Faso, West Africa. **Atmosphere**, v. 15, n. 11, p. 1438, 2024. DOI: [10.3390/atmos15111438](https://doi.org/10.3390/atmos15111438).

PÉREZ-GARCÍA, A.; ARRIAGA-JORDÁN, C. M.; VALVERDE, A. L.; REYES-VÁZQUEZ, N. Assessment of the Effect of Climate Change on the Productivity of Rainfed Maize (*Zea mays* L.) Using Crop Growth Model AquaCrop in Central Mexico. **Water**, v. 17, n. 13, p. 1867, 2025. DOI: 10.3390/w17131867.

PETERHANSEL, Christoph; HORST, Ina; NIESSEN, Markus; BLUME, Christian; KEBEISH, Rashad; KÜRKÇÜOĞLU, Sophia; KREUZALER, Fritz. Photorespiration. **The Arabidopsis Book**, Rockville, v. 8, p. e0130, 2010.

DOI: <https://doi.org/10.1199/tab.0130>.

PUIG, F.; GARCIA-VILA, M.; SORIANO, M. A.; RODRÍGUEZ-DÍAZ, J. A. AquaCrop-IoT: a smart irrigation platform integrating real-time images and weather forecasting. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S. l.], v. 235, p. 110372, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110372>.

PIMENTEL, Carlos. Photorespiration: a Multipurpose Process. **Environmental Sciences and Ecology: Current Research**, Wilmington, v. 4, n. 4, p. 1-2, 2023. DOI: <https://doi.org/10.54026/esecr/1098>.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python Language Reference**. Versão 3.11.4. Python Software Foundation, 2023. Disponível em: <https://www.python.org>. Acesso em: 15 mar. 2026.

QGIS Development Team, <2024>. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.

RAES, D.; STEDUTO, P.; HSIAO, T. C.; FERERES, E. Reference Manual AquaCrop. Rome: FAO, 2012. Disponível em: <https://www.fao.org/aquacrop/resources/referencemanuals/en>. Acesso em: 7 jul. 2026.

REBOITA, M. S.; REQUENA-SUÁREZ, D.; PORFÍRIO DA ROCHA, R. et al. South American Monsoon System in CMIP6 models: present climate and future projections. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 42, n. 4, p. 2539-2562, 2022.

DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.7380>.

RIAH, K. et al. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. **Global Environmental Change**, Amsterdam, v. 42, p. 153-168, 2017.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.

SAGE, Rowan F.; KUBIEN, David S. The temperature response of C_3 and C_4 photosynthesis. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 30, n. 9, p. 1086-1106, 2007.

DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01682.x>.

SÁ JÚNIOR, A.; CARVALHO, L. G.; SILVA, F. F.; ALVES, M. C. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, [S. l.], v. 108, n. 1-2, p. 1-7, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0507-8>.

SIEGEL, S.; CASTELLAN JR., N. J. **Estatística não-paramétrica para ciências do comportamento**. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 448 p.

SILVA, E. D. **Mapeamento de solos e uso de algoritmos de aprendizagem em Lavras (MG)**. 2018. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/28826>. Acesso em: 3 mar. 2026.

SHARAFKHANE, M. G.; ZIAEI, A. N.; NAGHEDIFAR, S. M.; AKBARI, A.; VERDI, A. AquaCrop Plug-in-PSO: A novel irrigation scheduling optimization framework for maize to maximize crop water productivity using in-season weather forecast and crop yield estimation. **Agricultural Water Management**, v. 306, p. 109153, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.109153>.

STEDUTO, P. et al. AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, n. 3, p. 426-437, 2009. DOI: <https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858 p.

VEJA. Super El Niño deste ano pode ser o mais forte dos últimos 150 anos. **Revista Veja**, São Paulo, 10 jul. 2026. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/agenda-verde/super-el-nino-deste-ano-pode-ser-o-mais-forte-dos-ultimos-150-anos/>. Acesso em: 3 ago. 2026.

XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390-8404, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.7731>.

Artigo 2 – Influência da precipitação e da disponibilidade hídrica nos dias trabalháveis com máquinas agrícolas em Latossolo Vermelho distrófico

RESUMO

A otimização do uso de máquinas agrícolas está diretamente condicionada aos atributos do solo e clima locais. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo estimar a probabilidade de ocorrência de dias trabalháveis e identificou os períodos aptos ao preparo mecanizado em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, no município de Lavras, MG, com base em dados diários de precipitação e temperatura do ar referentes a uma série histórica de 30 anos (1995–2024). O armazenamento de água no solo foi determinado por meio do balanço hídrico sequencial, e o tempo útil estimado a partir da capacidade de água disponível e dos limites físicos de tráfego, possibilitando o cálculo de probabilidades decendiais simples, condicionais de dias consecutivos favoráveis e da frequência de meses com condições de trabalhabilidade. Os resultados evidenciaram acentuada restrição temporal ao longo do ano, decorrente da elevada variabilidade hídrica. No verão, o excesso de precipitação elevou o armazenamento relativo de água no solo (ARAS), favorecendo o estado plástico e ampliando o risco de compactação estrutural; por outro lado, a estiagem no final do inverno intensificou a coesão entre partículas, resultando em consistência dura e limitando o preparo mecânico. A janela de friabilidade concentrou-se no outono, especialmente entre abril e maio, embora com elevada fragmentação temporal interna. Conclui-se que o planejamento operacional fundamentado em médias mensais climatológicas tende a subestimar o risco de degradação do solo, sendo necessária a readequação da capacidade operacional para assegurar a execução das operações nas curtas e intermitentes janelas de trabalhabilidade, com vistas à preservação da qualidade física do solo.

Palavras-chave: Mecanização agrícola; Balanço hídrico sequencial; Consistência do solo; Probabilidade climática; Compactação do solo.

ABSTRACT

The optimization of agricultural machinery use is directly conditioned by local soil and climate attributes. In this context, the present study aimed to estimate the probability of the occurrence of workable days and identified the periods suitable for mechanized tillage in a typical Dystrophic Red Latosol in the municipality of Lavras, MG, based on daily precipitation and air temperature data from a 30-year historical series (1995–2024). Soil water storage was determined through a sequential water balance, and the useful time was estimated based on the available water capacity and the physical traffic limits, enabling the calculation of simple decadal probabilities, conditional probabilities of consecutive favorable days, and the frequency of months with workable conditions. The results evidenced a marked temporal restriction throughout the year, resulting from high water variability. In the summer, excess precipitation increased the relative soil water storage (RSWS), favoring the plastic state and expanding the risk of structural compaction; on the other hand, the drought at the end of the winter intensified particle cohesion, resulting in a hard consistency and limiting mechanical tillage. The friability window was concentrated in the autumn, especially between April and May, although with high internal temporal fragmentation. It is concluded that operational planning based on monthly climatological averages tends to underestimate the risk of soil degradation, making it necessary to readjust operational capacity to ensure the execution of operations within the short and intermittent workability windows, aiming to preserve soil physical quality.

Keywords: Agricultural mechanization; Sequential water balance; Soil consistency; Climate probability; Soil compaction.

1. INTRODUÇÃO

A intensificação dos sistemas de produção agrícola nas últimas décadas tem imposto a necessidade de modelos de gestão orientados à máxima eficiência operacional, especialmente no que se refere ao planejamento do uso de máquinas agrícolas (Peloia et al., 2010). O agronegócio contemporâneo caracteriza-se pela elevada dependência de conjuntos motomecanizados, cujo dimensionamento técnico e operacional influencia diretamente os custos de produção e a rentabilidade das safras (Milan et al., 2004). Nesse contexto, a disponibilidade de tempo hábil para a execução das operações mecanizadas constitui um dos principais fatores limitantes da eficiência produtiva (Cunha et al., 2021), sendo fortemente condicionada pelas variáveis meteorológicas, particularmente pela precipitação pluvial e sua interação temporal com os atributos físicos do solo (Monteiro et al., 2014).

A precipitação exerce papel determinante na dinâmica do balanço hídrico, regulando o armazenamento de água no perfil do solo e, conseqüentemente, a capacidade de suporte de carga do terreno. Estudos em física do solo demonstram que a resistência à deformação está intrinsecamente associada ao teor de água e ao arranjo estrutural do solo (Hillel, 1998; Dexter, 2004). Em condições de umidade elevada, quando o solo transita para o estado plástico, a aplicação de cargas externas pelo maquinário promove o rearranjo das partículas minerais e a expulsão da água e do ar dos macroporos. A pressão exercida supera a resistência ao cisalhamento da matriz, resultando em uma redução drástica do volume de poros e aumento da densidade aparente. Esse processo de compactação é agravado quando o tráfego ocorre em condições de umidade acima do limite de friabilidade, resultando em deformações plásticas irreversíveis que limitam a infiltração e a aeração, comprometendo o crescimento radicular (Keller et al., 2019; Silva et al., 2022).

Por outro lado, em situações de déficit hídrico acentuado, o processo de secamento eleva exponencialmente as forças de coesão e adesão entre as partículas minerais. Este aumento da resistência à penetração demanda um esforço de tração crítico dos equipamentos de preparo, implicando desgaste prematuro de hastes e discos, elevado consumo de combustível fóssil e redução da eficiência de campo (ASABE, 2011; Oliveira et al., 2020).

A determinação do intervalo ótimo de umidade para a trabalhabilidade, que garanta a mobilização segura do solo na zona de friabilidade, tem sido amplamente investigada em estudos de capacidade de campo operacional (Dexter e Bird, 2001; Silva et al., 2006). Contudo, o planejamento logístico baseado exclusivamente em valores médios históricos de precipitação mostra-se metodologicamente insuficiente frente à crescente variabilidade climática (IPCC, 2021). As alterações nos padrões de circulação atmosférica têm intensificado a irregularidade pluviométrica, concentrando chuvas e prolongando estiagens em regiões tropicais (Marengo et al., 2012), tornando obsoletos os calendários empíricos de preparo de solo.

Para contornar essa imprevisibilidade, abordagens estocásticas como a Cadeia de Markov têm sido empregadas na estimativa de dias trabalháveis a partir da persistência meteorológica (Gabriel e Neumann, 1962; Erthal e Sentelhas, 1995; Monteiro et al., 2014). Apesar dos avanços destes modelos preditivos em diversas regiões produtoras, observa-se uma carência crítica de estudos que integrem a probabilidade climática contínua à dinâmica hídrica específica de solos altamente intemperizados. A maioria das simulações operacionais utiliza parâmetros pedológicos médios, ignorando as peculiaridades estruturais e de retenção de água inerentes aos Latossolos Vermelhos, predominantes no Sudeste brasileiro e fundamentais para a estabilidade agrícola nacional.

Diante desta lacuna científica e logística, este estudo objetivou estimar as probabilidades de ocorrência de dias aptos ao preparo mecanizado em um Latossolo Vermelho Distrófico típico no município de Lavras, MG. A pesquisa integra a modelagem do balanço hídrico sequencial às propriedades físicas específicas da matriz do solo, associada à teoria das probabilidades (Cadeia de Markov de primeira ordem), visando fornecer uma estrutura estocástica exata para o redimensionamento da frota de máquinas e preservação da estrutura do solo perante a variabilidade climática regional.

A metodologia estocástica aqui empregada possui caráter universal, sendo perfeitamente replicável em qualquer unidade de paisagem agrícola, bastando a substituição dos parâmetros locais de retenção de água e dos dados meteorológicos regionais. A integração desta abordagem probabilística em cenários climáticos futuros permite antecipar gargalos operacionais e refinar a estratégia de manejo mecanizado, constituindo uma ferramenta de suporte à decisão essencial para otimizar o uso da frota, reduzir o consumo de insumos fósseis e garantir a preservação da estrutura física do solo através da mitigação do tráfego em condições de inadequabilidade hídrica.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

Este estudo visou investigar a viabilidade de operações com maquinário agrícola em um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico no município de Lavras, Minas Gerais, localizado segundo as coordenadas 21,23° Sul e 45° Oeste, a 914 m de altitude, de acordo com a Figura 2. A classificação climática proposta por Köppen é do tipo Cwa (mesotérmico), com inverno seco e chuvas predominantes no verão, com precipitação total média anual de 1530 mm e temperatura média anual de 19,4 °C (Brasil, 1992; Dantas et. al., 2007 e Sá Júnior et al., 2012).

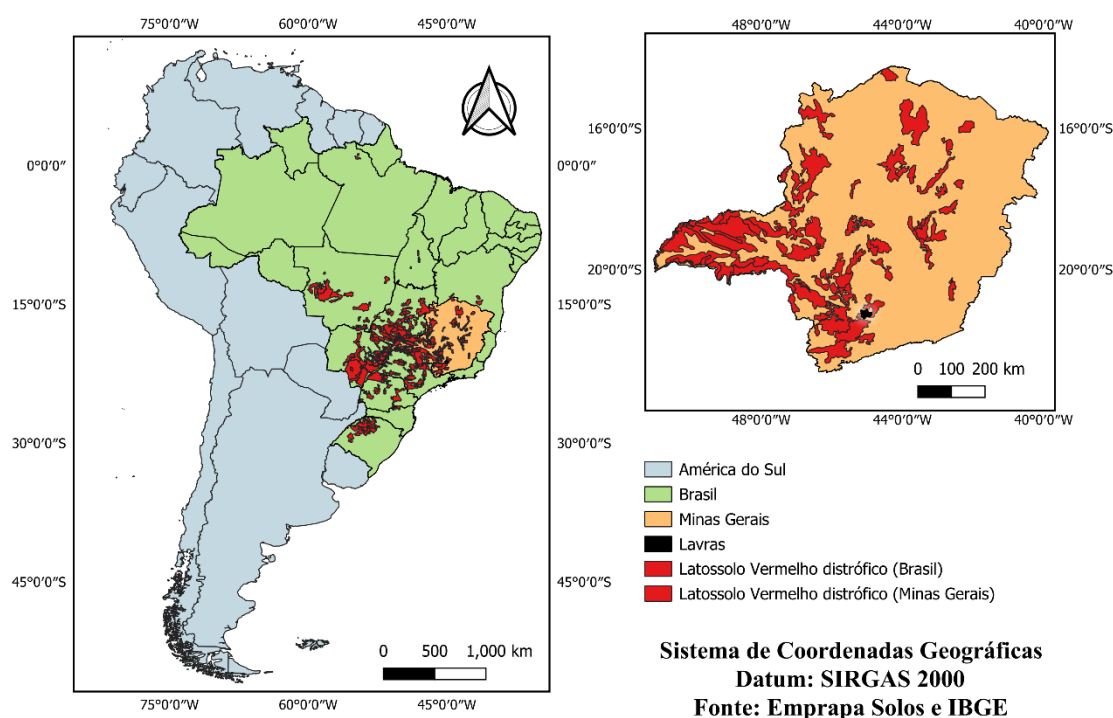


Figura 1. Localização geográfica do município de Lavras, MG, e distribuição espacial de Latossolos Vermelhos Distróficos no território brasileiro e no estado de Minas Gerais. O painel à esquerda apresenta a ocorrência da classe de solo em escala nacional; o painel à direita detalha a localização da área de estudo em relação à distribuição regional no estado de Minas Gerais. Fontes: Adaptadas de Embrapa Solos (2018) e IBGE (2023) por Lorena Júlio Gonçalves, 2026.

2.2 Obtenção dos dados climáticos

Os dados meteorológicos diários de precipitação e temperatura média foram obtidos do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) confrontados com o arquivo de dados do Setor de Agrometeorologia e Climatologia do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Escola de Engenharia (EENG) da Universidade Federal de Lavras (UFLA), cujo arquivo é o mesmo do BDMEP. Este confronto foi realizado para avaliação de possíveis inconsistências ou falhas de dados. Esses dados cobrem o período de 1995 a 2024, totalizando 30 anos de registros contínuos.

Embora a série de 30 anos (1995-2024) atenda ao critério normativo da Organização Meteorológica Mundial para a caracterização das normais climatológicas (WMO, 2017), reconhece-se que o período abarca uma fase de acentuada variabilidade interanual na região de Lavras. Estudos de risco climático demonstram que médias aritméticas tendem a atenuar a frequência de ocorrência de eventos extremos, falhando em representar os riscos reais para o planejamento operacional (Katz, 1996). Nesse cenário, a abordagem probabilística via Cadeia de Markov torna-se mais robusta, pois captura a dependência sequencial dos estados hídricos, fornecendo um diagnóstico mais preciso da disponibilidade operacional do solo do que índices baseados estritamente na tendência central (Wilks, 2011; Monteiro et al., 2014).

O processamento inicial envolveu a agregação das séries diárias em médias mensais para todos os meses de cada ano nesse intervalo. Foram calculadas as médias, garantindo a exclusão de dias com dados ausentes, conforme critérios de qualidade do INMET (ausência superior a 10% nos dias úmidos ou secos por mês). Posteriormente, as médias mensais foram separadas, compondo o ano climático com base no período de estudo, 1995 a 2024, permitindo o cálculo dos parâmetros "I" (índice térmico anual) e "a" (coeficiente de ajuste) da equação de Thornthwaite (1948), adaptada para estimativa da evapotranspiração potencial (ETp), com base nas temperaturas médias mensais (T_i) segundo as equações:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514} \quad (1)$$

$$a = 67,5 \times 10^{-7} \times I^3 - 77,1 \times 10^{-5} \times I^2 + 0,01792 \times I + 0,49239 \quad (2)$$

Os resultados serviram de base para as simulações subsequentes de ETp e análise de tendências climáticas na região de estudo.

2.3 Obtenção dos dados do solo

O solo selecionado para este estudo foi um LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico, cuja descrição morfológica segue os padrões requeridos pelo Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (Embrapa, 2018), com base nos perfis observados por da Silva (2018), e por ser o segundo solo predominante na região de estudo, muito utilizado no cultivo do milho e do café. No horizonte superficial Ap, de 0 a 20 cm de profundidade, o solo apresenta coloração vermelho-escuro (2,5YR 3/6 em condições úmidas e 10R 3/6 em condições secas), estrutura granular e textura muito argilosa. Já no horizonte Bw, a partir de 70 a 90 cm de profundidade, observa-se coloração vermelho-escuro (2,5YR 3/6 úmida), estrutura forte de grânulos muito pequenos e textura predominantemente muito argilosa. A caracterização física e química detalhada do solo está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização física e química do solo estudado.

Horizonte		Composição granulométrica da terra fina						Relação silte/argila	C Orgânico			
Símbolo	Prof.	Areia total	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila						
g Kg ⁻¹												
Ap	0 - 20	160	50	110	50	790	0,06	1,53				
Bw	70 - 90+	160	60	100	50	790	0,06	1,25				
Complexo sortivo												
Hor.	pH água	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Valor S	Al ³⁺	H ⁺	Valor T	Valor V	Valor m	P disp.	P-rem
cmolc Kg ⁻¹					%							
mg Kg ⁻¹												
Ap	5,40	0,95	0,29	0,30	1,54	0,20	3,26	5,00	30,80	11,49	14,10	14,65
Bw	5,50	1,07	0,25	0,09	1,41	0,10	2,86	4,37	32,16	6,62	0,79	13,23

Fonte: da Silva, 2018.

2.4 Balanço hídrico sequencial diário

O cálculo sequencial diário do Balanço Hídrico Climático (BHC) seguiu o modelo analítico de Thornthwaite e Mather (1955). Determinou-se a ETp na escala mensal, desagregaram-se esses totais mensais em frações diárias proporcionais para compor o

fluxo contínuo do balanço. A formulação original de Thornthwaite apresenta uma restrição paramétrica bem documentada. Camargo et al. (1999) propuseram a temperatura efetiva (T_{ef}) para refinar o cálculo da ETp pelo método original de Thornthwaite. A equação clássica frequentemente subestima a demanda evaporativa em climas tropicais. A T_{ef} substitui a temperatura média simples por uma variável ponderada pela amplitude térmica diária. Esse ajuste matemático insere o peso do aquecimento diurno extremo e da advecção de calor sensível no balanço final de energia.

A formulação de Thornthwaite possui uma limitação estrutural calibrada na marca de 26,5 °C. A equação cessa a utilização do índice térmico regional (I) sempre que a temperatura do ar ultrapassa esse patamar. O modelo passa a adotar uma relação polinomial empírica fixa sob condições de extremo calor. A introdução da T_{ef} atua justamente para contornar essa falha paramétrica em localidades de alta incidência solar.

A climatologia específica da área de estudo, contudo, inviabilizou a necessidade metodológica desse ajuste. A varredura dos dados históricos revelou que apenas 0,57% das temperaturas máximas diárias superaram os 26,5 °C. O registro das temperaturas médias mensais manteve-se integralmente abaixo desse teto, o regime térmico regional não atingiu a limitação da equação original. Consequentemente, a adoção da T_{ef} não promoveria ganho estatístico de acurácia, justificando o uso exclusivo da temperatura média convencional para a modelagem do balanço hídrico.

Ademais, o clima de Lavras enquadra-se na classe úmida, segundo a classificação climática de Thornthwaite (1948) (Texto Acadêmico UFLA 66 - Agrometeorologia), o que reforça a adequação da abordagem padrão do autor. Nesse procedimento, calcularam-se os valores diários de armazenamento de água no solo (ARM), com base na variação entre evapotranspiração e precipitação, considerando a capacidade de água disponível (CAD) limite de 85 mm para o Latossolo Vermelho Distrófico típico da região. O valor da CAD para o solo utilizado foi estimado por meio de funções de pedotransferência aplicadas sobre as frações granulométricas (Teixeira et al., 2021), determinadas por da Silva (2018).

2.5 Caracterização dos períodos de favorabilidade às operações com máquinas agrícolas

O estudo categorizou os meses do ano em três níveis de adequação operacional. A favorabilidade alta (A) correspondeu aos períodos com mais de 20 dias trabalháveis; a

média (M) representou os intervalos contendo entre 11 e 20 dias aptos, e baixa (B) indicou os meses com 10 ou menos dias disponíveis. Esse agrupamento permitiu identificar cronologicamente as condições de clima e solo ideais para a intervenção da utilização de máquinas agrícolas no campo. Simultaneamente, o método evidenciou os períodos inaptos para o tráfego das mesmas. A inviabilidade nestas épocas resulta de severas restrições hídricas, expressas pelo excesso de chuvas, encharcamento ou ressecamento extremo do solo.

2.6 Estimativa do número de dias trabalháveis com máquinas agrícolas utilizando a cadeia de MARKOV de primeira ordem

De posse dos valores diários de precipitação e do armazenamento de água no solo (período de 1995 a 2024), efetuou-se a metodologia das probabilidades simples e condicionais, por meio da cadeia de MARKOV de primeira ordem.

Para determinar os dias favoráveis para a operação com máquinas agrícolas, foram considerados dois critérios: ocorrências em dias sequenciais de precipitação inferior ou igual a 5 mm e Armazenamento de Água no Solo (ARM) entre 40% e 90% da CAD, conforme sugerido por Erthal e Sentelhas (1995) e Aviad et al. (2009).

Por meio do método da Cadeia de Markov (Assis et al., 1989), foram calculadas e analisadas as probabilidades de ocorrência de dias favoráveis (F) e não favoráveis (NF) para as atividades agrícolas. Isso permitiu uma avaliação da viabilidade das operações com maquinário ao longo do tempo, considerando as condições climáticas e de balanço de água no solo no município. As equações utilizadas para o cálculo das probabilidades simples e condicionais são apresentadas abaixo (Eq. 3 a 8) para cada decêndio do ano, com base nos dados diários.

$$P(F) = \frac{F}{N} \times 100 \quad (3)$$

$$P(NF) = 100 - P(F) \quad (4)$$

$$P(F/F) = \frac{F/F}{F} \times 100 \quad (5)$$

$$P(NF/F) = 100 - P(F/F) \quad (6)$$

$$P(NF/NF) = \frac{NF/NF}{NF} \times 100 \quad (7)$$

$$P(F/NF) = 100 - P(NF/NF) \quad (8)$$

Em que,

N é o número total de dias de cada decêndio (o terceiro decêndio dos meses de 31 dias foram computados como sendo de 11 dias; para o terceiro decêndio do mês de fevereiro, este foi computado como sendo de 8 dias, à exceção dos anos bissextos que, no caso, o terceiro decêndio do mês de fevereiro foi computado como sendo de 9 dias). Este critério foi adotado desde a geração das médias decendiais no arquivo original das médias mensais de temperaturas e totais mensais de chuvas, em que:

F - Número de dias favoráveis;

NF - Número de dias não favoráveis;

P(F) - Probabilidade de ocorrência de dias favoráveis, (%);

P(F/F) - Probabilidade de ocorrência de um dia ser favorável dado que o dia anterior foi favorável, (%). Obteve-se esta probabilidade para cada decêndio de todos os meses de todos os anos e em seguida a P(F/F) média do mesmo decêndio dentro dos 30 anos (por exemplo: P(F/F), jan1 é a média dos 30 decêndios equivalentes a primeiro decêndio de janeiro). Este procedimento foi atribuído para as demais variáveis (probabilidades simples e condicionais);

P(NF/F) - Probabilidade de um dia não ser favorável dado que o dia anterior foi favorável, (%);

P(F/NF) - Probabilidade de ocorrência de um dia favorável dado que o dia anterior não foi favorável, (%);

P(NF/NF) - Probabilidade de ocorrência de um dia ser não favorável dado que o dia anterior não foi favorável, (%).

E, por fim, determinou-se as probabilidades de dias consecutivos trabalháveis com máquinas agrícolas no campo aplicando a eq. 9:

$$P(n) = \frac{P(F)}{100} \times \left(\frac{P(F/F)}{100} \right)^{n-1} \quad (9)$$

Em que:

$P(n)$ - Probabilidade de ocorrência de “n” dias consecutivos favoráveis ao manejo do solo com maquinário;

$P(F)$ - Probabilidade de ocorrência de dias favoráveis, (%);

$P(F/F)$ - Probabilidade de ocorrência de um dia ser favorável dado que o dia anterior foi favorável (%).

A aplicação da Cadeia de Markov de primeira ordem baseia-se na premissa de que a probabilidade de transição entre estados de trabalhabilidade (favorável ou não favorável) no dia atual é condicionada exclusivamente pelo estado do dia imediatamente anterior, uma simplificação estatística que se mostra eficaz para representar a persistência da umidade do solo em regiões de clima Cwa, onde a dinâmica pluviométrica apresenta autocorrelação temporal significativa (Gabriel e Neumann, 1962; Monteiro et al., 2014).

2.7 Análise estatística para comparação das Normais Climatológicas de 1991 a 2020 (INMET) e do estudo, de 1995 a 2024

A avaliação da significância estatística entre os períodos das Normais Climatológicas foi realizada sob a estruturação de amostras pareadas (comparação entre os meses) e precedida pela verificação das premissas de distribuição paramétrica. A adequação à curva normal das diferenças entre os pares foi avaliada pelo algoritmo de Shapiro-Wilk, enquanto a homogeneidade das variâncias (homocedasticidade) foi atestada pelo teste de Levene. Para a variável temperatura, cujos pressupostos de normalidade das diferenças e homocedasticidade foram rigorosamente atendidos, aplicou-se o teste paramétrico t de Student Pareado. Em contrapartida, a precipitação pluvial constitui uma variável de natureza estritamente positiva e distribuição inerentemente assimétrica. Consequentemente, para preservar o rigor da inferência estatística sobre o balanço hídrico, a comparação entre as normais pluviométricas foi executada por meio do teste não paramétrico de Wilcoxon (Teste dos Postos Assinalados). Este método constitui a alternativa analítica exata ao teste t pareado, sendo o mais apropriado para a comparação de amostras dependentes cujas características

físicas recomendem a dispensa da obrigatoriedade do cumprimento paramétrico de normalidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Dias aptos para trabalhabilidade no campo com maquinário agrícola

A quantificação do tempo útil para operações com máquinas e implementos agrícolas no campo, demanda o cruzamento direto de séries climatológicas e propriedades físicas do solo. A execução do balanço hídrico sequencial viabilizou a simulação diária do Armazenamento Relativo de Água no Solo (ARAS) ao longo do período histórico analisado. A determinação da trabalhabilidade mecânica exigiu, contudo, o estabelecimento de limites de consistência estrutural estritos. Delimitou-se a janela de operabilidade agrometeorológica entre os patamares de 40% e 90% do ARAS indicando a permanência do perfil do solo no estado de friabilidade.

A esta exigência de suporte de carga associou-se à restrição pluviométrica de precipitações diárias máximas de 5 mm. A adoção do limiar de 5 mm diários para interrupção das operações mecanizadas fundamenta-se na capacidade de saturação da camada arável e na rápida redução da resistência ao cisalhamento do solo em Latossolos sob condições de umidade prévia elevada, sendo este um limiar conservador amplamente adotado em estudos de trafegabilidade para evitar a transição prematura para o estado plástico (Monteiro et al., 2014; Oliveira et al., 2020).

O atendimento simultâneo destes requisitos físicos e atmosféricos atesta a viabilidade do tráfego seguro e previne a degradação estrutural do Latossolo. A Fig. 2 consolida a variação sazonal destas matrizes de dados, ilustrando a interdependência temporal entre a distribuição das precipitações médias, a flutuação da reserva hídrica e a probabilidade absoluta de ocorrência de dias aptos.

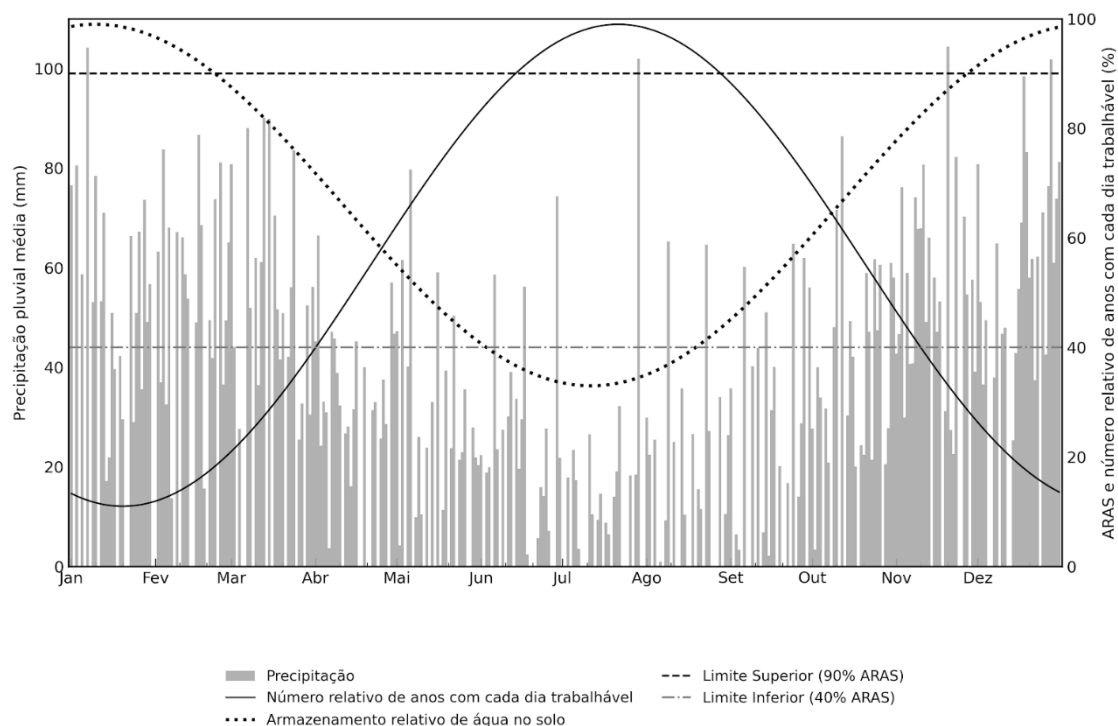


Figura 2. Variação sazonal da precipitação pluvial (mm), do Armazenamento Relativo de Água no Solo (ARAS, %) e da probabilidade de ocorrência de dias trabalháveis (%). As linhas horizontais tracejada e traço-ponto delimitam a faixa agrometeorológica de trabalhabilidade. Esta faixa restringe-se entre o limite superior de tráfego (90% do ARAS) e o limite inferior de preparo (40% do ARAS), associada a precipitações diárias ≤ 5 mm. Fonte: Lorena Júlio Gonçalves, Lavras, 2026.

A quantificação do tempo útil para operações mecanizadas exige o cruzamento de séries climatológicas com a dinâmica físico-hídrica do solo. A Fig. 2 ilustra a forte dependência sazonal da trabalhabilidade em função da precipitação pluvial e do Armazenamento Relativo de Água no Solo (ARAS). Observa-se que, durante a estação estival (novembro a março), os picos pluviométricos elevam o ARAS para níveis que frequentemente superam o limite crítico de 90%. Sob essa condição hídrica, a matriz edáfica ultrapassa o Limite de Plasticidade (LP) preconizado pelos Limites de Atterberg, assumindo um estado plástico. O tráfego de maquinário pesado neste cenário eleva a tensão mecânica além da pressão de preconsolidação do solo, resultando em deformações plásticas irreversíveis, compactação estrutural profunda e elevação do risco de patinagem dos rodados (Silva et al., 2022; Dias Junior et al., 2022).

A Tabela 2 explicita a severidade deste estrangulamento operacional, evidenciando que os meses de verão concentram uma elevada frequência de anos classificados com "baixa" favorabilidade (<11 dias úteis). O bloqueio logístico repete-se, contudo, por razões físicas opostas durante o auge da estiagem (agosto e setembro). A

supressão das chuvas promove a depleção severa do ARAS para níveis inferiores a 40% da capacidade disponível. Este secamento extremo do Latossolo Vermelho incrementa exponencialmente as forças de coesão entre as partículas minerais, conferindo ao perfil uma consistência dura. A mobilização mecânica nesta condição exige um esforço de tração crítico, elevando expressivamente o consumo de combustível e promovendo um fracionamento deficiente, com a formação de grandes torrões que prejudicam a qualidade do leito de semeadura (Dexter, 2004).

Tabela 2. Número de anos com “alta” (> 20 dias), “média” (11 a 20 dias) e “baixa” (< 11 dias) favorabilidade de dias trabalháveis em cada mês do ano na localidade de Lavras, MG.

Meses	Baixa	Média	Alta
Jan	14	14	2
Fev	13	12	5
Mar	4	15	11
Abr	1	9	20
Mai	5	5	20
Jun	7	9	14
Jul	16	4	10
Ago	23	1	6
Set	23	2	5
Out	12	13	5
Nov	12	18	0
Dez	19	10	1

Contudo, a análise baseada estritamente em frequências mensais, conforme demonstrado na Tabela 2, embora forneça uma visão macroscópica da sazonalidade, carece de resolução temporal necessária para o planejamento operacional detalhado. A logística de preparo mecanizado não se limita a somatórios mensais, pois a ocorrência de uma única precipitação intensa em um período crítico pode inviabilizar o trabalho por dias subsequentes, devido à persistência da umidade no perfil ou à necessidade de secagem do solo. A interpretação de médias mensais tende, portanto, a mascarar a intermitência dos fenômenos climáticos ao longo de uma mesma época do ano e a subestimar os riscos operacionais.

Para mitigar estas incertezas, torna-se imperativa a transição de modelos determinísticos para abordagens estocásticas, capazes de quantificar a probabilidade de ocorrência de janelas de trabalho contínuas. A utilização da Cadeia de Markov de

primeira ordem permite modelar a dependência temporal do clima, em que o estado do solo hoje está condicionado ao estado de ontem. Esta metodologia possibilita a transposição da variabilidade diária em parâmetros probabilísticos de tomada de decisão (Stern e Coe, 1984), fornecendo um diagnóstico refinado das chances reais de sucesso operacional frente à imprevisibilidade meteorológica. Os resultados desta modelagem probabilística, discriminados por decêndios, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Probabilidades simples, probabilidades condicionais e probabilidades de dias consecutivos favoráveis ao preparo mecanizado do solo e suas respectivas probabilidades médias e desvios-padrão (DP, em %) em cada decêndio do ano em Lavras, MG.

Decêndios	Probabilidades simples e condicionais (%)						Probabilidades de dias consecutivos favoráveis (%)									
	P(F)	P(NF)	P(F/F)	P(NF/F)	P(NF/NF)	P(F/NF)	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	P(5)	P(6)	P(8)	P(8)	P(9)	P(10)
Jan_1	28,67	71,33	39,16	62,50	80,33	19,67	28,67	11,23	4,40	1,72	0,67	0,26	0,10	0,04	0,02	0,01
Jan_2	36,00	64,00	46,56	26,25	73,17	26,83	36,00	16,76	7,81	3,63	1,69	0,79	0,37	0,17	0,08	0,04
Jan_3	40,00	60,00	51,87	19,29	67,15	32,85	40,00	20,75	10,76	5,58	2,90	1,50	0,78	0,40	0,21	0,11
Fev_1	38,00	62,00	50,33	50,00	75,43	24,57	38,00	19,12	9,62	4,84	2,44	1,23	0,62	0,31	0,16	0,08
Fev_2	47,00	53,00	59,14	62,50	65,28	34,72	47,00	27,79	16,44	9,72	5,75	3,40	2,01	1,19	0,70	0,42
Fev_3	49,68	50,32	61,43	28,33	59,21	40,79	49,68	30,52	18,75	11,51	7,07	4,35	2,67	1,64	1,01	0,62
Mar_1	51,00	49,00	61,65	20,00	56,75	43,25	51,00	31,44	19,38	11,95	7,37	4,54	2,80	1,73	1,06	0,66
Mar_2	50,67	49,33	62,34	55,56	55,68	44,32	50,67	31,59	19,69	12,28	7,65	4,77	2,97	1,85	1,16	0,72
Mar_3	66,53	33,47	82,45	33,33	47,42	52,58	66,53	54,85	45,22	37,29	30,74	25,35	20,90	17,23	14,20	11,71
Abr_1	64,33	35,67	75,61	33,33	52,40	47,60	64,33	48,64	36,78	27,81	21,03	15,90	12,02	9,09	6,87	5,20
Abr_2	74,00	26,00	81,87	25,56	35,32	64,68	74,00	60,58	49,60	40,60	33,24	27,21	22,28	18,24	14,93	12,22
Abr_3	77,33	22,67	83,72	0,00	24,29	75,71	77,33	64,75	54,21	45,39	38,00	31,82	26,64	22,30	18,67	15,63
Mai_1	77,33	22,67	81,17	6,25	27,78	72,22	77,33	62,77	50,95	41,36	33,57	27,25	22,12	17,96	14,58	11,83
Mai_2	63,00	37,00	72,49	12,50	37,69	62,31	63,00	45,67	33,11	24,00	17,40	12,61	9,14	6,63	4,80	3,48
Mai_3	58,79	41,21	68,69	31,25	50,85	49,15	58,79	40,38	27,74	19,05	13,09	8,99	6,18	4,24	2,91	2,00
Jun_1	60,67	39,33	65,29	0,00	41,71	58,29	60,67	39,61	25,86	16,88	11,02	7,20	4,70	3,07	2,00	1,31
Jun_2	59,67	40,33	72,38	0,00	48,41	51,59	59,67	43,19	31,26	22,63	16,38	11,86	8,58	6,21	4,50	3,26
Jun_3	47,33	52,67	57,44	5,56	58,38	41,62	47,33	27,19	15,62	8,97	5,15	2,96	1,70	0,98	0,56	0,32
Jul_1	47,33	52,67	49,63	0,00	54,00	46,00	47,33	23,49	11,66	5,79	2,87	1,43	0,71	0,35	0,17	0,09
Jul_2	43,00	57,00	47,66	0,00	59,63	40,37	43,00	20,49	9,77	4,66	2,22	1,06	0,50	0,24	0,11	0,05
Jul_3	31,82	68,18	38,22	50,00	69,77	30,23	31,82	12,16	4,65	1,78	0,68	0,26	0,10	0,04	0,01	0,01
Ago_1	25,33	74,67	32,00	50,00	78,89	21,11	25,33	8,11	2,59	0,83	0,27	0,09	0,03	0,01	0,00	0,00
Ago_2	21,33	78,67	21,96	60,00	79,33	20,67	21,33	4,69	1,03	0,23	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Ago_3	18,18	81,82	30,44	50,00	88,68	11,32	18,18	5,54	1,69	0,51	0,16	0,05	0,01	0,00	0,00	0,00
Set_1	22,67	77,33	26,19	100,00	77,68	22,32	22,67	5,94	1,56	0,41	0,11	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00
Set_2	16,67	83,33	20,88	100,00	85,21	14,79	16,67	3,48	0,73	0,15	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Set_3	30,67	69,33	38,38	31,25	72,46	27,54	30,67	11,77	4,52	1,73	0,67	0,26	0,10	0,04	0,01	0,01
Out_1	35,00	65,00	44,94	71,43	66,96	33,04	35,00	15,73	7,07	3,18	1,43	0,64	0,29	0,13	0,06	0,03
Out_2	36,00	64,00	43,00	55,00	72,08	27,92	36,00	15,48	6,66	2,86	1,23	0,53	0,23	0,10	0,04	0,02
Out_3	43,94	56,06	49,52	19,44	66,16	33,84	43,94	21,76	10,78	5,34	2,64	1,31	0,65	0,32	0,16	0,08
Nov_1	41,00	59,00	55,85	37,50	67,82	32,18	41,00	22,90	12,79	7,14	3,99	2,23	1,24	0,70	0,39	0,22
Nov_2	32,00	68,00	54,31	0,00	75,42	24,58	32,00	17,38	9,44	5,13	2,78	1,51	0,82	0,45	0,24	0,13
Nov_3	37,67	62,33	54,24	60,00	79,12	20,88	37,67	20,43	11,08	6,01	3,26	1,77	0,96	0,52	0,28	0,15
Dez_1	28,33	71,67	45,41	22,50	75,13	24,87	28,33	12,87	5,84	2,65	1,20	0,55	0,25	0,11	0,05	0,02
Dez_2	24,52	72,26	39,72	0,00	85,37	11,40	24,52	9,74	3,87	1,54	0,61	0,24	0,10	0,04	0,02	0,01
Dez_3	35,76	64,24	44,69	100,00	76,53	23,47	35,76	15,98	7,14	3,19	1,43	0,64	0,28	0,13	0,06	0,03
MÉDIA	43,4	56,5	53,1	35,5	63,5	36,4	43,4	25,7	16,4	11,1	7,8	5,7	4,2	3,2	2,5	2,0
DP	16,7	16,6	17,1	29,5	16,5	16,6	16,7	17,2	15,2	12,9	10,7	8,9	7,3	6,0	5,0	4,1

A intersecção destas restrições hídricas estabelece a janela operacional primária no outono (abril e maio), momento em que o declínio progressivo da chuva posiciona o solo na zona de friabilidade (Intervalo Hídrico Ótimo). Contudo, a análise da Tabela 3, ancorada nas probabilidades da Cadeia de Markov, desmistifica a aparente disponibilidade de tempo nestes meses. Os dados comprovam uma acentuada fragmentação das janelas operacionais. A título de exemplo, no primeiro decêndio de maio, embora a probabilidade simples P(F) seja elevada (77,33%), a chance probabilística do produtor dispor de uma janela contínua de dez dias P(10) despenca para 11,83%.

Esta descontinuidade temporal atinge níveis críticos nos extremos climáticos, como no primeiro decêndio de janeiro, onde a chance de uma operação contínua de cinco

dias P(5) é virtualmente nula (0,67%). Estes indicadores estocásticos evidenciam que o planejamento logístico empírico, baseado em médias mensais, incorpora um risco inaceitável. A fragmentação exige o sobredimensionamento da capacidade de campo efetiva das frotas, garantindo que o sistema mecanizado opere em altas taxas diárias de hectares para suprir a demanda estritamente durante os curtos intervalos de favorabilidade (Monteiro et al., 2014; Oliveira et al., 2020).

3.2 Comparação das normais climatológicas no INMET (1991 a 2020) e do período do estudo 1995 a 2024

A quantificação temporal das janelas operacionais agrícolas exige a validação do cenário climatológico vigente. Para aferir a estabilidade do clima local, contrastaram-se as normais climatológicas oficiais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 1991 a 2020) com a série histórica compilada neste estudo (1995 a 2024). A Tabela 4 apresenta as médias mensais e anuais de temperatura do ar e precipitação pluvial de ambos os períodos para o município. Esta matriz comparativa consolida os dados climatológicos brutos de precipitação e fornece a base empírica necessária para discutir a evolução climática recente e seus impactos diretos na trafegabilidade das máquinas agrícolas.

Tabela 4. Comparação das Normais Climatológicas de 1991 a 2020 (INMET) com a série histórica do estudo de 1995 a 2024.

1991-2020													
Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
T (°C)	22,8	23,0	22,4	21,1	18,3	17,2	17,2	18,7	20,5	21,9	21,8	22,5	20,6
Precipitação (mm)	292,4	178,2	162,2	54,6	43,3	19,8	9,5	15,1	55,1	101,0	192,4	259,8	1383,4

1995-2024													
Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
T (°C)	22,9	23,1	22,7	21,3	18,4	17,3	17,3	18,9	20,9	22,0	21,8	22,6	20,8
Precipitação (mm)	311,3	190,7	151,3	51,7	33,0	18,3	8,4	16,0	50,5	107,0	201,2	256,8	1396,3

A comparação das normais climatológicas evidencia a alteração do padrão climatológico na localidade de Lavras, MG. A análise da série do INMET (1991 a 2020) em relação à série recente do estudo (1995 a 2024) indica o aquecimento geral e a redistribuição temporal da precipitação. A temperatura média anual apresentou elevação no período recente. A precipitação pluvial registrou incrementos nos meses de verão,

especificamente em janeiro e fevereiro. Simultaneamente, ocorreu a redução do regime pluviométrico nos meses de transição para o outono, como março e maio. Este padrão reflete as projeções regionalizadas de mudanças climáticas para o Sudeste brasileiro, caracterizadas pela concentração de chuvas intensas e pelo prolongamento de estiagens (Marengo et al., 2012).

Essa alteração climática agrava as restrições temporais evidenciadas nas Tabelas 2 e 3. O incremento pluviométrico no verão eleva drasticamente o (ARAS). A matriz do solo ultrapassa o limite de plasticidade com maior frequência e severidade. A polarização das chuvas intensifica o risco operacional apontado na Tabela 2, elevando o número provável de anos classificados como de "baixa" favorabilidade durante o período chuvoso.

O impacto estende-se também para o período seco do ano. A elevação térmica observada na série de 1995 a 2024 amplia a demanda atmosférica por água. A taxa de evapotranspiração aumenta e acelera o deplecionamento do ARAS a partir do outono. O secamento severo eleva a coesão entre as partículas e confere consistência dura ao perfil do solo de forma prematura. A resistência mecânica à penetração atinge níveis restritivos ao fracionamento do mesmo. O preparo de máquinas e implementos agrícolas exige tração excessiva e gera fragmentação indesejável (Dexter, 2004). O encrostamento resultante prejudica o estabelecimento inicial das culturas e agrava os prejuízos da seca (Silva et al., 2022).

O cenário climático atual estreita a duração da janela operacional ótima. A Tabela 3 indicou a dependência logística dos meses de abril e maio para a ocorrência de dias consecutivos favoráveis. O declínio precipitado das chuvas nesses meses de transição ameaça a persistência do estado de friabilidade do solo. A manutenção do Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) torna-se efêmera frente ao aumento das temperaturas (Tormena et al., 1998; Assad et al., 2008). O produtor agrícola enfrenta o encurtamento do tempo hábil para a operação segura das máquinas.

A viabilidade da produção agrícola requer a adaptação do dimensionamento das máquinas agrícolas e dos implementos. As mudanças climáticas comprovadas pelas normais recentes impedem a manutenção do ritmo operacional clássico. A redução de tempo exige conjuntos trator-implemento com elevada capacidade de carga efetiva. A aquisição de frota sobredimensionada garante o cumprimento das operações nas estreitas janelas disponíveis. A engenharia do sistema deve priorizar taxas operacionais capazes

de executar o preparo rapidamente, evitando a entrada de máquinas sob condições de plasticidade extrema no verão ou dureza excessiva no inverno (Oliveira et al., 2020).

A Tabela 5 sintetiza os resultados da avaliação estatística pareada. A verificação prévia pelo teste de Shapiro-Wilk confirmou a normalidade das diferenças mensais para ambas as variáveis climatológicas. Alicerçada neste pressuposto, a análise via Teste *t* de Student indicou um aquecimento generalizado no período recente, atestando que a elevação da temperatura média entre as normais é estatisticamente significativa. Em contrapartida, para a precipitação pluvial, a aplicação do teste não paramétrico de Wilcoxon, adotado para resguardar o rigor analítico frente à natureza estritamente positiva e assimétrica da variável, atestou a equivalência estatística das distribuições.

Isso indica que o regime pluviométrico não apresentou alteração matemática significativa no seu montante anual. Embora a análise visual identifique rearranjos no regime de chuvas durante os meses de verão e outono, a precipitação distribuída ao longo dos 12 meses manteve estabilidade estatística. Adicionalmente, o Teste de Levene confirmou a homocedasticidade das amostras, comprovando que a variabilidade entre os meses (a amplitude entre o auge do verão e o rigor da seca) não sofreu expansão estatisticamente significativa no agregado da nova normal.

Tabela 5. Síntese dos testes estatísticos aplicados na comparação das Normais Climatológicas mensais de temperatura do ar e precipitação pluvial de 1991 a 2020 (INMET) vs. 1995 a 2024.

Variável Climática	Teste Estatístico	Hipótese Avaliada	Estatística do Teste	Valor-p	Conclusão ($\alpha = 5\%$)
Temperatura (°C)	Shapiro-Wilk	Normalidade das diferenças	W = 0,8654	0,0572	Distribuição Normal (Aceita H0)
Precipitação (mm)	Shapiro-Wilk	Normalidade das diferenças	W = 0,9437	0,5477	Distribuição Normal (Aceita H0)
Temperatura (°C)	Teste t Pareado	Igualdade de médias	t = 5,0342	0,0004	Diferença Significativa (Rejeita H0)
Precipitação (mm)	Teste de Wilcoxon	Igualdade de distribuições	W = 39,0000	1.0000	Sem diferença significativa (Aceita H0)
Precipitação (mm)	Teste de Levene	Igualdade de variâncias	W = 0,0281	0,8683	Variâncias iguais (Aceita H0)

A divergência estatística comprovada entre as normais climatológicas (1991–2020 e 1995–2024) evidencia uma transição térmica assimétrica na região de estudo. Enquanto o balanço pluviométrico global se manteve quantitativamente inalterado ao longo das últimas três décadas, atestando a conservação da magnitude das chuvas, o sistema local sofreu um desvio estrutural impulsionado pelo aquecimento atmosférico progressivo. Contudo, a estabilidade matemática da lâmina hídrica anual não exime o agroecossistema de novas vulnerabilidades, uma vez que a elevação térmica atua diretamente sobre a demanda evaporativa e sobre o esgotamento da umidade do solo.

Contudo, a compreensão integral das restrições operacionais exige a análise do comportamento climatológico na escala mensal. Neste contexto, as Fig. 3 e 4 detalham a distribuição temporal da temperatura e da precipitação pluvial, respectivamente, contrapondo os recortes temporais de referência e atuais. Estas representações gráficas materializam os desvios intra-sazonais ocultos nas médias anuais, dando embasamento a discussão subsequente sobre o impacto da variabilidade climática recente na dinâmica da umidade do solo, na restrição à trafegabilidade agrícola e no redimensionamento estratégico das janelas de operação mecanizada.

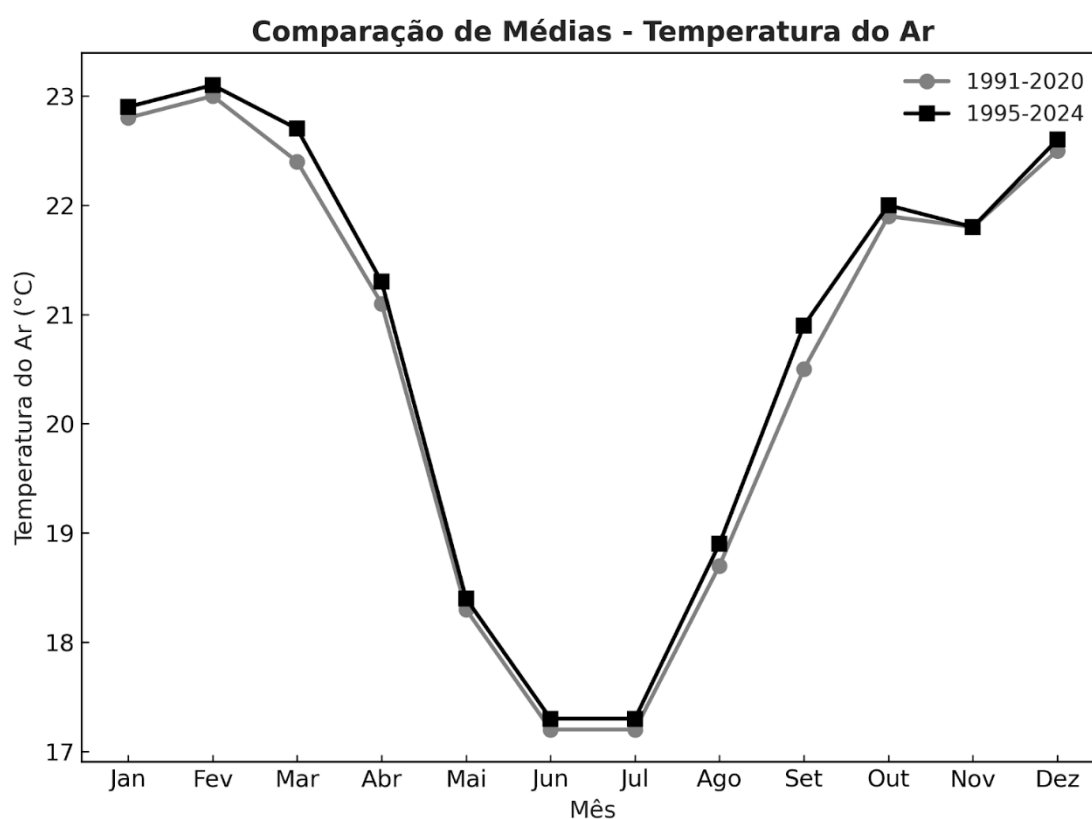


Figura 3. Comparação da temperatura média compensada mensal (°C) entre as normais climatológicas de referência segundo INMET (1991 a 2020) e a série histórica estudada (1995 a 2024). Fonte: Lorena Júlio Gonçalves, Lavras, 2026.

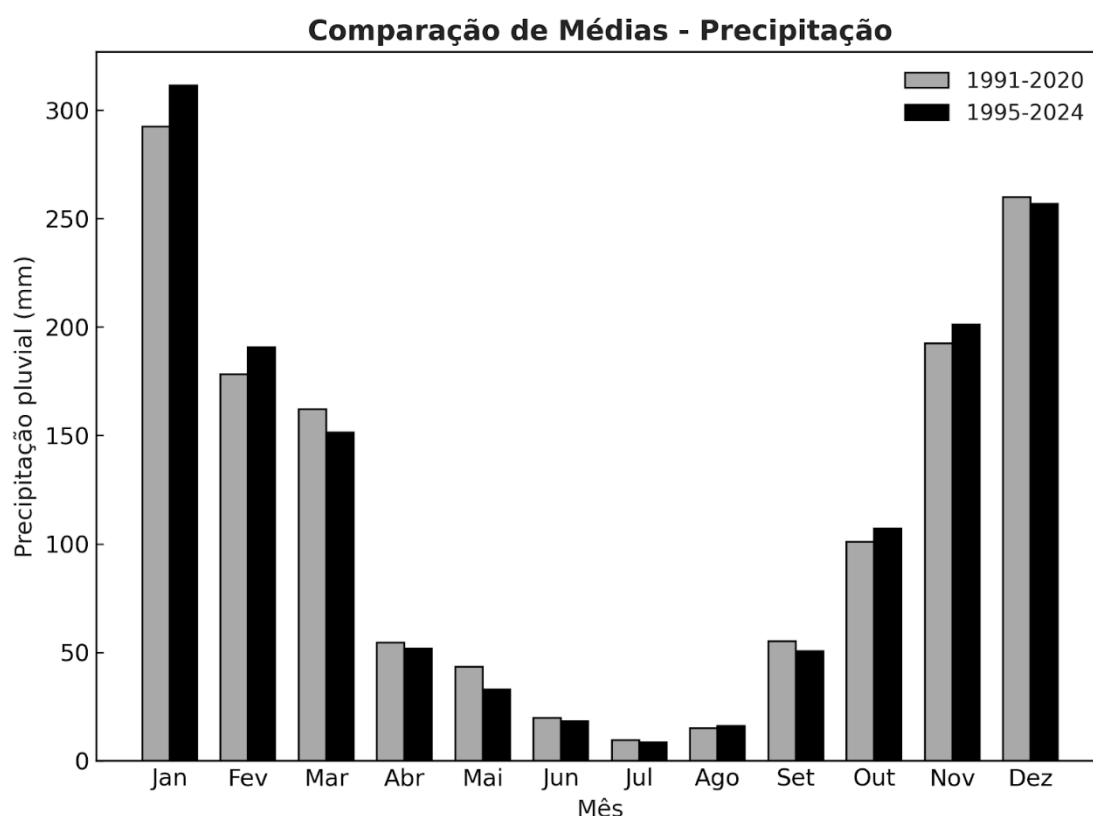


Figura 4. Comparação das médias mensais de precipitação pluvial acumulada (mm) entre as normais climatológicas de referência segundo o INMET (1991 a 2020) e a série histórica estudada (1995 a 2024). Fonte: Lorena Júlio Gonçalves, Lavras, 2026.

A interpretação da dinâmica hídrica regional exige a distinção das escalas de integração temporal aplicadas aos dados climatológicos de temperatura e precipitação. A Fig. 4 apresenta a precipitação pluvial acumulada mensalmente, totalizando volumes próximos a 300 mm no verão. A Fig. 2, em contrapartida, exibe a distribuição pluviométrica em resolução temporal menor. Dessa forma, a estimativa probabilística de dias trabalháveis exige a captura matemática dos intervalos secos diários, onde a aglutinação das chuvas em médias mensais unificadas mascararia a disponibilidade real de tempo útil para o tráfego. Os picos pluviométricos saturam rapidamente a macroporosidade do Latossolo e o ARAS ultrapassa o limite de plasticidade e suprime imediatamente a capacidade de suporte de carga do terreno, independentemente da média decenal.

O agravamento dessa restrição logística decorre da alteração do balanço térmico regional. A Fig. 3 evidencia a elevação consistente da temperatura média compensada ao longo do ano, materializando o aquecimento do ambiente atmosférico. Essa variável, controla diretamente a demanda evaporativa local, em que o aumento térmico pode

acelerar a taxa de evapotranspiração e intensificar a depleção do ARAS a partir do outono. O secamento severo e prematuro eleva a coesão entre as partículas minerais e o solo atinge o estado de consistência dura e impõe alta resistência mecânica ao fracionamento mecanizado.

O comportamento geométrico da curva do ARAS sintetiza essa interação entre o aquecimento atmosférico e a mecânica dos solos. A função harmônica senoidal expressa a recarga hídrica extrema no verão e o esgotamento acelerado no inverno. A sobreposição da elevação térmica (Figura 3) aos extremos pluviométricos concentra e estreita a janela de friabilidade ideal. O tráfego de máquinas agrícolas no campo sofre paralisações abruptas causadas pela plasticidade no período chuvoso e pela dureza excessiva na estiagem. A supressão matemática de qualquer um desses extremos climáticos subestima o risco crônico de degradação estrutural. O dimensionamento logístico da frota exige a consideração estrita dessa imprevisibilidade meteorológica para viabilizar as operações de preparo do solo.

Ao integrar as probabilidades decendiais com as normais climatológicas de Lavras, evidenciou-se a severa fragmentação do tempo útil para as operações mecanizadas no Latossolo Vermelho Distrópico típico. O excesso pluviométrico durante o verão posiciona o solo repetidamente em estado plástico. Inversamente, o déficit hídrico acentuado na estiagem confere consistência dura ao perfil do solo. Ambas as condições inviabilizam o tráfego seguro e o preparo eficiente das áreas agrícolas. A dinâmica hídrica local restringe a janela de friabilidade ideal a curtos e intermitentes períodos, concentrados majoritariamente nos meses de outono.

Diante dessa fragmentação imposta pela interação do clima e solo, o dimensionamento empírico de frotas baseado em médias históricas torna-se um risco para a viabilidade do agronegócio. O planejamento logístico exige a adoção de maquinário com maior capacidade de carga efetiva para suprir a demanda nos raros dias favoráveis consecutivos. Esses resultados corroboram os achados de Monteiro et al. (2014). Os autores comprovaram que a precipitação e a disponibilidade hídrica ditam rigorosamente as épocas adequadas para o preparo do solo em Piracicaba, SP; Londrina, PR; e Dourados, MS, Brasil. Portanto, o recálculo do dimensionamento do uso de máquinas agrícolas no campo é uma adaptação que se faz necessária para mitigar a degradação física do solo e garantir a rentabilidade agrícola frente à variabilidade climática.

3.3 Implicações para o manejo de campo

A compreensão da fragmentação temporal das janelas operacionais, evidenciada pelos parâmetros estocásticos deste estudo, fornece subsídios para uma gestão mecanizada mais resiliente. Embora a avaliação experimental direta de práticas de manejo não tenha sido o escopo desta pesquisa, os dados obtidos permitem inferir que a mitigação dos gargalos identificados pode ser potencializada pela adoção de tecnologias de conservação estrutural. Estratégias como a utilização de sistemas de rodados de alta flutuação (baixa pressão), que reduzem a tensão sobre a superfície do solo, associadas à transição para o Sistema de Plantio Direto (SPD), podem conferir maior resiliência ao tráfego em condições de friabilidade limítrofe. Tais práticas, ao maximizarem a capacidade de suporte de carga e minimizarem o consumo energético durante o preparo em condições de dureza, emergem como recomendações fundamentais para a preservação da qualidade física do Latossolo, sendo sugerida a validação destas práticas em ensaios de campo futuros para quantificação dos ganhos operacionais sob o regime climático regional.

3.4 Considerações sobre variabilidade climática, eventos extremos e limitações do ZARC

A análise da trabalhabilidade do solo neste estudo baseou-se em uma série histórica de 30 anos (1995-2024), período que, embora atenda às recomendações da Organização Meteorológica Mundial para a definição de normais climatológicas, é marcado por uma acentuada variabilidade interanual. Essa instabilidade é frequentemente modulada por eventos de grande escala, como a Oscilação Sul-El Niño (ENOS). Na região Sudeste, o *El Niño* tende a elevar as temperaturas e alterar os padrões de precipitação, enquanto a *La Niña* apresenta comportamentos distintos, muitas vezes intensificando irregularidades hídricas (Pezzopane et al., 2019; Reboita et al., 2022).

A decisão metodológica de não isolar nem incluir o ENOS como variável determinística nesta análise deve-se à natureza caótica desses eventos. Como fenômenos de acoplamento oceano-atmosfera, os eventos ENOS apresentam heterogeneidade extrema em termos de duração, intensidade e impactos locais, o que torna sua representação em estudos de longa duração uma tarefa de alta incerteza (IPCC, 2021). A

inclusão de tais eventos como forçantes fixas introduziria um viés especulativo, uma vez que a capacidade dos modelos climáticos atuais de prever a frequência e a amplitude de eventos futuros de El Niño ou La Niña, inclusive episódios recentes de intensidade recorde, ainda é limitada (Almazroui et al., 2021). Portanto, optou-se por uma abordagem probabilística via Cadeia de Markov, que captura a variabilidade climática de forma agregada, tratando o risco climático como um componente inerente à série histórica.

Neste cenário de instabilidade, a utilização exclusiva de calendários agrícolas estáticos, como os preconizados pelo Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), deve ser feita com cautela. O ZARC é uma ferramenta baseada em normais climatológicas passadas que, embora imprescindíveis para o planejamento de longo prazo, não acompanham a dinâmica acelerada das mudanças no padrão das chuvas (Assad et al., 2008). A utilização de calendários agrícolas estáticos do ZARC, sem o monitoramento em tempo real do ARAS, ignora que as janelas de trabalhabilidade se tornaram mais fragmentadas e imprevisíveis. Portanto, pautar o manejo do solo exclusivamente pelo ZARC em um período de instabilidade climática acentuada aumenta a probabilidade de tráfego mecanizado em condições de plasticidade ou dureza excessiva, o que, conforme demonstrado, compromete a qualidade física do Latossolo a longo prazo. A transição para um manejo proativo, via sensoriamento remoto e monitoramento *in situ* da umidade do solo, é a medida de mitigação necessária para superar a rigidez dos calendários tradicionais.

Para trabalhos futuros, sugere-se a integração das projeções climáticas (cenários SSPs) à modelagem de trabalhabilidade, permitindo antecipar como o forçamento radiativo extremo poderá alterar a frequência desses dias aptos ao longo do século XXI, reduzindo a incerteza para o planejamento de frotas e a preservação do solo.

4. CONCLUSÃO

Conclui-se que a disponibilidade de dias trabalháveis para operações mecanizadas em Lavras, MG, apresenta severa fragmentação temporal, limitada por restrições hídricas antagônicas que inviabilizam o tráfego contínuo ao longo do ano: o excesso pluviométrico de verão induz o estado plástico e maximiza o risco de compactação, enquanto o déficit hídrico de agosto e setembro confere consistência dura ao solo, impedindo o fracionamento adequado e exigindo esforço crítico de tração. Com a janela ótima de friabilidade restrita à transição outonal (abril e maio), o planejamento logístico fundamentado em médias climatológicas mensais revela-se insuficiente, pois mascara a intermitência operacional e subestima os riscos de degradação física do solo. Portanto, a viabilidade das operações agrícolas na região demanda a readequação estratégica e o redimensionamento das frotas, incorporando conjuntos motomecanizados de elevada capacidade efetiva para assegurar a rigorosa execução do preparo do solo nas curtas janelas de trabalhabilidade, aliando a eficiência produtiva à conservação do agroecossistema.

5. AGRADECIMENTO

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

6. REFERÊNCIAS

ALMAZROUI, M. et al. Projected changes in temperature and precipitation over South America from CMIP6. **Earth Systems and Environment**, Cham, v. 5, p. 333-360, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>.

ARAUJO JUNIOR, C. F.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALCÂNTARA, E. N. Capacidade de suporte de carga e umidade crítica de um Latossolo induzida por diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 115-131, jan./fev. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000100011>.

ASABE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS. ASABE D497.7: **Agricultural machinery management data**. St. Joseph: ASABE, 2011.

ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; ZULLO JUNIOR, J. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agrícola de risco climático no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, n. 12, p. 1871-1879, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2008001200020>.

ASSIS, S. V.; SEDIYAMA, G. C.; VIANELLO, R. L.; MARTYN, P. J. Probabilidade de ocorrência de dias trabalháveis com tratores agrícolas em Uberaba, Minas Gerais. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 36, n. 205, p. 299-316, 1989.

AVIAD, Y.; KUTIEL, H.; LAVEE, H. Variation of dry days since last rain as a measure of dryness along a Mediterranean–Arid transect. **Journal of Arid Environments**, Amsterdam, v. 73, n. 6-7, p. 658-665, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.01.008>.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Irrigação. Departamento Nacional de Meteorologia. **Normais climatológicas (1961-1990)**. Brasília, DF: SPI/EMBRAPA, 1992. 84 p.

CAMARGO, A. P. de; MARIN, F. R.; SENTELHAS, P. C.; PICINI, A. G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 2, p. 251-257, 1999.

CARVALHO, L. G. de; DANTAS, A. A. A.; CASTRO NETO, P. C. **Agrometeorologia**. Lavras: UFLA, 2010. 171 p. (Texto Acadêmico, 66).

CUNHA, J. P. B.; SILVA, F. M.; DIAS, R. E. B. A. Eficiência operacional e conservação do solo na colheita mecanizada do café. **Coffee Science**, Lavras, v. 16, e161879, 2021. DOI: <https://doi.org/10.25186/cs.v16i.1879>.

CUNHA, J. P. A. R. da; VOLTARELLI, M. A.; CASSIA, M. T. Agricultural mechanization in Brazil: current status and future perspectives. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 41, n. 4, p. 490-496, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v41n4p490-496/2021>.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G. de; FERREIRA, E. Classificação e tendência climática em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542007000600039>.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 79, n. 1, p. 9-28, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.07.014>.

DEXTER, A. R.; BIRD, N. R. A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 57, n. 4, p. 227-236, jan. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00175-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00175-9).

DIAS JUNIOR, M. S.; PIRES, B. S.; PEIXOTO, D. S. Soil compaction in no-tillage system: diagnosis, monitoring and alleviation. In: TEIXEIRA, W. G. et al. (Ed.). **Soil**

Physical Quality. Cham: Springer, 2023. p. 1-25. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-15064-1_1.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. revisada e ampliada. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

ERTHAL, L. C.; SENTELHAS, P. C. Probabilidade da sequência de dias secos em Campinas-SP como subsídio ao planejamento do uso de máquinas agrícolas. In: **Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, Campina Grande. Anais, Sociedade Brasileira de Agrometeorologia. 1995. p. 409-411.

ERTHAL, L. R.; SENTELHAS, P. C. Análise da duração dos períodos secos através das cadeias de Markov. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 3, n. 1, p. 97-101, 1995.

GABRIEL, K. R.; NEUMANN, J. A Markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel Aviv. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, London, v. 88, n. 375, p. 90-95, 1962. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.49708837511>.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, n. 2, p. 121-145, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations**. San Diego: Academic Press, 1998. 771 p.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)**. Brasília, DF: INMET, 2024. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 3 mar. 2026.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.

KATZ, R. W. Use of conditional probabilities for climate risk assessment. **Climate Research**, v. 7, p. 113-120, 1996. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr007113>.

KELLER, T.; SANDIN, M.; COLOMBI, T.; HORN, R.; OR, D. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 194, p. 104293, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G. et al. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. **Climate Dynamics**, Berlin, v. 41, n. 3-4, p. 933-952, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1155-5>.

MONTEIRO, L. A.; SENTELHAS, P. C.; PIEDADE, S. M. S. Dias trabalháveis para o manejo do solo em função da chuva e da disponibilidade hídrica do solo em diferentes regiões brasileiras. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 9, n. 3, p. 459-475, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1389>.

OLIVEIRA, L. F. C.; SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M. S. Influence of soil water content on the trafficability of agricultural machinery. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 40, n. 2, p. 210-218, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v40n2p210-218/2020>.

OLIVEIRA, F. L.; SILVA, A. P.; ARAÚJO, S. E.; TORMENA, C. A. Water infiltration and soil water content under different tillage systems and crop rotations. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 25, n. 1, p. 18-24, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n1p18-24>

PELOIA, P. R.; MILAN, M. Proposta de um sistema de medição de desempenho aplicado à mecanização agrícola. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p. 681-691, jul./ago. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000400012>.

PEZZOPANE, J. R. M. et al. Climate variability and water availability in the Cerrado: impacts on agricultural production. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 23, n. 5, p. 336-342, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n5p336-342>.

QGIS Development Team, <2024>. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>

REBOITA, M. S. et al. South American Monsoon System in CMIP6 models: present climate and future projections. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 42, n. 4, p. 2539-2562, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.7380>.

SÁ JÚNIOR, A.; CARVALHO, L. G. de; SILVA, F. F. da; ALVES, M. C. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Vienna, v. 108, n. 1-2, p. 1-7, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0507-8>.

SCHAFER, R. L.; JOHNSON, C. E.; KOOLEN, A. J.; KUIPERS, H.; BATEMAN, H. P. Trafficability and soil compaction. Em: ASAE (Ed.). **Engineering Systems for Forest Regeneration**. St. Joseph: ASAE, 1981.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variação na resistência à penetração de um Latossolo Vermelho-Escuro submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 11-19, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000100002>.

SILVA, E. D. **Mapeamento de solos e uso de algoritmos de aprendizagem em Lavras (MG)**. 2018. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras,

Lavras, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/28826>. Acesso em: 3 mar. 2026.

SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; SANTOS, G. A. et al. Soil load bearing capacity and traffic effect on the soil physical quality in coffee production. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 46, e0210103, 2022.

DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210103>.

STERN, R. D.; COE, R. A model fitting analysis of daily rainfall data. **Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)**, London, v. 147, n. 1, p. 1-34, 1984. DOI: <https://doi.org/10.2307/2981736>.

TEIXEIRA, W. G.; VICTORIA, D. de C.; BARROS, A. H. C.; LUMBRERAS, J. F.; ARAÚJO FILHO, J. C. de; SILVA, F. A. M. da; LIMA, E. de P. Planilha-calculo-de-AD-Teixeira-et-al-2021-e-Classe-de-AD. Versão 1.3. Rio de Janeiro: **Embrapa Solos**, 2021. 1 arquivo .xlsx.

Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1131095>. Acesso em: 31 mar. 2026.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. da; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998.

DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000400002>.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. Centerton: **Drexel Institute of Technology**, 1955. 104 p. (Publications in Climatology, v. 8, n. 1).

WILKS, D. S. **Statistical Methods in Atmospheric Sciences**. 3. ed. Amsterdam: Academic Press, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-17684-6>.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). Guidelines on the Definition and Monitoring of Extreme Weather and Climate Events. Geneva: WMO, 2017.