



**FLAVIO VANONI DE CARVALHO JUNIOR**

**ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO E DE MECANIZAÇÃO  
PARA CULTURAS DO CAFÉ ARÁBICA E DA  
CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE MINAS GERAIS SOB  
CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

**LAVRAS – MG  
2024**

**FLAVIO VANONI DE CARVALHO JUNIOR**

**ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO E DE MECANIZAÇÃO PARA CULTURAS DO  
CAFÉ ARÁBICA E DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE MINAS GERAIS SOB  
CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Alves  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2024**

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

Carvalho Júnior, Flávio Vanoni de

Zoneamento agroclimático e de mecanização para culturas  
do café arábica e da cana-de-açúcar no estado de Minas  
Gerais sob cenários de mudanças climáticas / Flávio Vanoni de  
Carvalho Júnior. – Lavras : UFLA, 2024.

75 p. : il.

Dissertação (Mestrado acadêmico)–Universidade Federal  
de Lavras, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Alves.

Bibliografia.

1. Climatologia 2. WorldClim. 3. MRI-ESM2-0. I. Alves,  
Marcelo de Carvalho. II. Título.

**FLAVIO VANONI DE CARVALHO JUNIOR**

**ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO E DE MECANIZAÇÃO PARA CULTURAS DO  
CAFÉ ARÁBICA E DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE MINAS GERAIS SOB  
CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

**AGROCLIMATIC AND MECHANIZATION ZONING FOR ARABICA COFFEE AND  
SUGARCANE CROPS IN THE STATE OF MINAS GERAIS VIA CLIMATE CHANGE  
SCENARIOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 19 de agosto de 2024.

Profa. Dra. Mirléia Aparecida de Carvalho UFLA  
Dra. Margarete Marin Lordelo Volpato EPAMIG

Prof. Dr. Marcelo de Carvalho Alves  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2024**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus.

À Universidade Federal de Lavras, ao Departamento de Engenharia Agrícola e ao orientador Prof<sup>o</sup>. Dr. Marcelo de Carvalho Alves.

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

*Aquele que tentou e não conseguiu é superior àquele que nada tentou.  
(Arquimedes de Siracusa)*

## RESUMO

O Brasil é atualmente o maior produtor mundial de café arábica e de cana-de-açúcar. O estado de Minas Gerais figura como maior produtor de café arábica e segundo maior de cana-de-açúcar sendo as duas atividades de grande relevância econômica local. O presente trabalho tem como objetivo a realização de zoneamento agroclimático e de mecanização do café arábica e da cana-de-açúcar no cenário atual e futuro de mudanças climáticas para o estado de Minas Gerais. Foram utilizadas superfícies climáticas reduzidas de escala, mapeamento de CAD do solo e produto de possibilidade de mecanização. Utilizou-se a malha municipal do estado nos mapeamentos e múltiplas classes simultâneas com intuito de facilitar a visualização e localização. Os resultados indicaram boa presença de terras aptas para cana-de-açúcar e café arábica no cenário atual. Com relação à cana-de-açúcar, 8,11 milhões de hectares se apresentaram climaticamente aptos e mecanizáveis. Já para o café arábica, 2,57 milhões de hectares foram classificados como climaticamente aptos e mecanizáveis. Porém em cenários futuros de mudanças climáticas foi verificada redução das zonas aptas afetando mais intensamente a cultura do café arábica. A cultura da cana-de-açúcar apresentou maior vulnerabilidade ao aumento da deficiência hídrica em cenários de mudanças climáticas, já o café arábica foi afetado principalmente pelo aumento da temperatura. Observou-se que o uso de geocomputação em R apresentou grande potencial, podendo ser o estudo replicado para outras regiões e culturas agrícolas. Os resultados podem ser utilizados no contexto do planejamento agrícola estadual, além de fornecer embasamento para produtores no cenário atual e futuro.

**Palavras-chave:** climatologia. WorldClim. MRI-ESM2-0. superfícies climáticas. balanço hídrico.

## ABSTRACT

Brazil is currently the world's largest producer of Arabica coffee and sugarcane. The state of Minas Gerais is the largest producer of Arabica coffee and the second largest producer of sugarcane, both of which are of great local economic relevance. This study aims to perform agroclimatic zoning and mechanization of Arabica coffee and sugarcane in the current and future climate change scenarios for the state of Minas Gerais. Downscaled climatic surfaces, soil AWC mapping, and a mechanization possibility product were used. The state's municipal grid was used in the mappings and multiple simultaneous classes were used to facilitate visualization and location. The results indicated a good presence of land suitable for sugarcane and Arabica coffee in the current scenario. Regarding sugarcane, 8.11 million hectares were climatically suitable and mechanized. For Arabica coffee, 2.57 million hectares were classified as climatically suitable and mechanizable. However, in future climate change scenarios, a reduction in suitable zones was observed, affecting Arabica coffee crops more intensely. Sugarcane crops were more vulnerable to increased water shortages in climate change scenarios, while Arabica coffee was mainly affected by rising temperatures. It was observed that the use of geocomputation in R showed great potential, and the study can be replicated for other regions and agricultural crops. The results can be used in the context of state agricultural planning, in addition to providing support for producers in the current and future scenarios.

**Keywords:** climatology. WorldClim. MRI-ESM2-0. climate surfaces. water balance.

## **IMPACTOS SOCIAIS, TECNOLÓGICOS, ECONÔMICOS E CULTURAIS**

Diante dos objetivos de elaboração de zoneamentos agroclimáticos e de mecanização para o estado de Minas Gerais considerando duas culturas agrícolas de relevante importância econômica como a cana-de-açúcar e o café arábica em cenário atual e futuro de mudanças climáticas. Considera-se que os resultados apresentam impactos diretos no planejamento agrícola do estado, indicando o potencial de ampliação destes cultivos. Toda sociedade ligada à produção das duas culturas estudadas no estado de Minas Gerais é impactada, principalmente os produtores, que podem obter informações importantes sobre implementação de lavouras. Além disso, obter embasamento sobre as perspectivas em cenários futuros de mudanças climáticas. A metodologia adotada e uso de geocomputação em ambiente livre como o R apresenta potencial para novos estudos serem realizados com maior facilidade, praticidade e de maneira gratuita, contribuindo para ciência aberta. As áreas impactadas da Política Nacional de Extensão são educação, meio ambiente além de tecnologia e produção. Os impactos se alinham aos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) como ODS 13 Ação contra mudança global do clima, conforme demonstrado o potencial efeito negativo das mudanças climáticas na cana-de-açúcar e café arábica afetando a economia do estado. Os resultados alertam para importância da adoção de medidas para mitigação das mudanças climáticas. Também está de acordo com ODS 2 Fome zero e agricultura sustentável. Os resultados permitem o planejamento agrícola e melhor utilização da terra conforme seu potencial produtivo, contribuindo para agricultura sustentável e uso racional dos recursos naturais.

## **SOCIAL, TECHNOLOGICAL, ECONOMIC AND CULTURAL IMPACTS**

Given the objectives of developing agroclimatic zoning and mechanization for the state of Minas Gerais, considering two agricultural crops of significant economic importance, such as sugarcane and Arabica coffee, in the current and future scenarios of climate change. The results are considered to have direct impacts on the state's agricultural planning, indicating the potential for expanding these crops. The entire society linked to the production of the two crops studied in the state of Minas Gerais is impacted, especially producers, who can obtain important information on crop implementation. In addition, they can obtain a basis for perspectives in future climate change scenarios. The adopted methodology and use of geocomputation in a free environment such as R present the potential for new studies to be carried out with greater ease, practicality and free of charge, contributing to open science. The impacted areas of the National Extension Policy are education, environment, as well as technology and production. The impacts are aligned with the 17 Sustainable Development Goals (SDGs) of the United Nations (UN), such as SDG 13, Climate Action, as demonstrated by the potential negative effect of climate change on sugarcane and Arabica coffee, affecting the state's economy. The results highlight the importance of adopting measures to mitigate climate change. It is also in line with SDG 2, Zero Hunger and Sustainable Agriculture. The results allow for agricultural planning and better use of land according to its productive potential, contributing to sustainable agriculture and the rational use of natural resources.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Localização do estado de Minas Gerais sobre mapa de elevação (m). . . . .	29
Figura 3.2 – Capacidade de água disponível (CAD) (mm) para cana-de-açúcar em Minas Gerais, Brasil. . . . .	35
Figura 3.3 – Deficiência hídrica mensal (mm). . . . .	36
Figura 3.4 – Temperatura média anual (°C) (esquerda) e deficiência hídrica anual (mm). . . . .	36
Figura 3.5 – Zoneamento agroclimático para cana-de-açúcar no estado de Minas Gerais. . . . .	37
Figura 3.6 – Áreas das classes de aptidão ( $km^2$ ) ( $1 km^2 = 100 ha$ ). . . . .	38
Figura 3.7 – Classes de mecanização em zonas da classe 1 (esquerda) e em zonas das classes 2 e 3 (direita). A área de classe 3 apresenta-se hachurada de vermelho. . . . .	39
Figura 3.8 – Áreas dos níveis de mecanização por classe de aptidão climática ( $km^2$ ). . . . .	40
Figura 3.9 – Zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar em cenários futuros do modelo MRI-ESM2-0 do CMIP6. . . . .	41
Figura 3.10 – Áreas das classificações em cenários futuros do modelo MRI-ESM2-0 do CMIP6. . . . .	42
Figura 4.1 – Classificação climática de Thornthwaite modificada para Minas Gerais. . . . .	57
Figura 4.2 – Temperatura média anual (°C) (esquerda) e Deficiência hídrica anual (mm) para o café. . . . .	63
Figura 4.3 – Deficiência hídrica mensal (mm). . . . .	63
Figura 4.4 – Zoneamento agroclimático para o café arábica no estado de Minas Gerais. . . . .	64
Figura 4.5 – Áreas das classes de aptidão ( $km^2$ ) ( $1 km^2 = 100 ha$ ). . . . .	65
Figura 4.6 – Níveis de possibilidade de mecanização dentro da classe climaticamente apta (lado esquerdo). Níveis de possibilidade de mecanização nas classes 2, 3, 4, 6 e 8, em que o cultivo irrigado é possível. . . . .	66
Figura 4.7 – Áreas dos níveis de mecanização por classe de aptidão climática ( $km^2$ ). . . . .	66
Figura 4.8 – Zoneamento agroclimático do café arábica em cenários futuros do modelo MRI-ESM2-0 do CMIP6. . . . .	67
Figura 4.9 – Áreas das classificações em cenários futuros do modelo MRI-ESM2-0 do CMIP6. . . . .	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros e classes de aptidão climática para cana-de-açúcar. . . . .	32
Tabela 3.2 – Níveis de possibilidade de mecanização das terras. . . . .	33
Tabela 4.1 – Parâmetros e classes de aptidão climática para café arábica. . . . .	60
Tabela 4.2 – Níveis de possibilidade de mecanização das terras. . . . .	61

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Cana-de-açúcar</b>	<b>16</b>
<b>2.2</b>	<b>Café arábica</b>	<b>17</b>
<b>2.3</b>	<b>Modelos de sistemas terrestres</b>	<b>19</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>ARTIGO 1 – ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO E DE MECANIZAÇÃO PARA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE MINAS GERAIS SOB CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS</b>	<b>24</b>
<b>3.1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
<b>3.2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>29</b>
<b>3.2.1</b>	<b>Caracterização da área de estudo</b>	<b>29</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Superfícies interpoladas de temperatura e precipitação</b>	<b>30</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Balanco hídrico mensal</b>	<b>30</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Zoneamento agroclimático e de mecanização</b>	<b>31</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Cenários futuros de mudanças climáticas</b>	<b>33</b>
<b>3.3</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>34</b>
<b>3.3.1</b>	<b>Balanco hídrico mensal</b>	<b>34</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Zoneamento agroclimático e de mecanização</b>	<b>35</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Cenários futuros de mudanças climáticas</b>	<b>40</b>
<b>3.4</b>	<b>DISCUSSÃO</b>	<b>42</b>
<b>3.4.1</b>	<b>Dados climáticos e balanço hídrico</b>	<b>42</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Zoneamento agroclimático</b>	<b>43</b>
<b>3.4.3</b>	<b>Cenários futuros de mudanças climáticas</b>	<b>44</b>
<b>3.5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>45</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>46</b>
<b>4</b>	<b>ARTIGO 2 – ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO E DE MECANIZAÇÃO DO CAFÉ ARÁBICA NO ESTADO DE MINAS GERAIS SOB CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS</b>	<b>52</b>
<b>4.1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>55</b>
<b>4.2</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>56</b>

<b>4.2.1</b>	<b>Caracterização da área de estudo . . . . .</b>	<b>56</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Superfícies interpoladas de temperatura e precipitação . . . . .</b>	<b>57</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Balanco hídrico mensal . . . . .</b>	<b>58</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Zoneamento agroclimático e de mecanização . . . . .</b>	<b>59</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Cenários futuros de mudanças climáticas . . . . .</b>	<b>61</b>
<b>4.3</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>62</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Balanco hídrico mensal . . . . .</b>	<b>62</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Zoneamento agroclimático e de mecanização . . . . .</b>	<b>64</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Cenários futuros de mudanças climáticas . . . . .</b>	<b>65</b>
<b>4.4</b>	<b>DISCUSSÃO . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>4.4.1</b>	<b>Dados climáticos e balanço hídrico . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Zoneamento agroclimático . . . . .</b>	<b>69</b>
<b>4.4.3</b>	<b>Cenários futuros de mudanças climáticas . . . . .</b>	<b>69</b>
<b>4.5</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>70</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>71</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>75</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é atualmente o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com produção crescente no contexto de suprimento da demanda global por biocombustíveis. Conforme boletim de safra 2023/24 da Companhia Nacional de Abastecimento, a produção brasileira atingiu o patamar recorde de 713 milhões de toneladas, com o estado de Minas Gerais produzindo 81 milhões de toneladas, sendo 99.5% da colheita mecanizada e segunda maior produção após o estado de São Paulo. A principal destinação da cana-de-açúcar é a produção de etanol e açúcar, sendo este setor de relevante importância econômica no Brasil. No estado de Minas Gerais, cerca de 63% de toda cana esmagada foi destinada à produção de açúcar na última safra. A cana-de-açúcar também é utilizada como silagem para alimentação animal, na produção de cachaça e produtos secundários como rapadura e açúcar mascavo.

O café arábica possui grande importância econômica para o estado de Minas Gerais, representando cerca de 84% do valor de produção das culturas perenes no estado e 55% do café arábica produzido no Brasil conforme produção agrícola municipal de 2021, destacando-se as regiões do Sul/Sudoeste e Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba pela alta produção e produtividade. As espécies de café de maior relevância são o arábica (*Coffea arabica* L.) e canéfora (*Coffea canephora* P.). Entre 60 e 70% do café comercializado mundialmente é da espécie arábica devido a suas bebidas de sabores apreciados, sendo o Brasil, maior produtor e exportador mundial.

O zoneamento agroclimático é um procedimento adotado para avaliar a aptidão climática para cultivo de uma determinada espécie sendo uma importante ferramenta para o planejamento agrícola e econômico de uma região. Devido à grande presença de colheita mecanizada da cana-de-açúcar decorrente principalmente do maior desempenho operacional obtido neste sistema e eliminação da queima, como também ao amplo uso na colheita do café, se torna relevante a inclusão do critério possibilidade de mecanização nos zoneamentos. Em muitos casos, estudos de zoneamento agroclimático têm sido executados em softwares de interface GUI (Graphical User Interface). O uso de ambientes livres por linha de comando como o R permite acesso à metodologia adotada e maior reprodutibilidade, além de apresentar inúmeros pacotes com importantes ferramentas para geoprocessamento e análise de dados.

As mudanças climáticas cada vez mais vêm sendo alvo de debates públicos. Alterações no regime de chuvas, na sua quantidade, intensidade e distribuição espacial, bem como o aumento da temperatura média do ar e ocorrência mais frequente de eventos extremos podem causar sérias consequências para a agricultura, provocando alterações nos zoneamentos agrocli-

máticos das culturas. A análise por meio de técnicas de geoprocessamento abre possibilidades de investigar se grandes extensões de terra podem se tornar inaptas ao cultivo do café ou pouco produtivas para cana-de-açúcar em sequeiro. Cabe avaliar se as alterações são suficientes para inviabilizar grandes áreas de cultivo, causando prejuízo econômico. Analisar o estado como um todo, possibilita verificar as áreas aptas remanescentes que possibilitem uma possível migração das lavouras de uma região para outra ou mudanças referentes à cultura cultivada no local. Tais fatos tornam de grande relevância a inclusão de cenários futuros de mudanças climáticas neste estudo.

Neste contexto, objetivou-se realizar o zoneamento agroclimático e de mecanização da cultura da cana-de-açúcar e do café arábica no estado de Minas Gerais no cenário atual e futuro de mudanças climáticas, avaliando as áreas aptas e inaptas, bem como os impactos futuros na produção. O estudo é apresentado em dois artigos, o primeiro intitulado *Zoneamento agroclimático e de mecanização para cultura da cana-de-açúcar no estado de Minas Gerais sob cenários de mudanças climáticas* e o segundo *Zoneamento agroclimático e de mecanização do café arábica no estado de Minas Gerais sob cenários de mudanças climáticas*.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Cana-de-açúcar

O Brasil é atualmente o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com produção crescente no contexto de suprimento da demanda global por biocombustíveis (ZHENG et al., 2022; BORDONAL et al., 2018). Conforme boletim da safra 2023/24 da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024), a produção brasileira atingiu o patamar recorde de 713 milhões de toneladas, com o estado de Minas Gerais produzindo 81 milhões de toneladas, sendo 99.5% da colheita mecanizada e segunda maior produção após o estado de São Paulo. Em relação à safra anterior a área plantada no estado aumentou 3.7%, atingindo 929 mil hectares, enquanto a produção teve incremento de 15.4%, com previsão de área plantada 8% maior na próxima safra. Os fatos evidenciam a valorização do setor sucroenergético na região. A principal destinação da cana-de-açúcar é a produção de etanol e açúcar, sendo este setor de relevante importância econômica no Brasil (SILVA et al., 2021; MATOS; SANTOS; EICHLER, 2020). No estado de Minas Gerais, cerca de 63% de toda cana esmagada foi destinada à produção de açúcar na última safra (CONAB, 2024). A cana-de-açúcar também é utilizada como silagem para alimentação animal, na produção de cachaça e produtos secundários como rapadura e açúcar mascavo (DIAS, 2021; PEREIRA, D. S. et al., 2018; BORTOLETTO; ALCARDE, 2015).

A cana-de-açúcar é uma planta C4 muito cultivada em condições de ambiente ensolarado e quente em que a seca, geadas e alagamento atuam como fatores limitantes da produtividade (LI, 2022; SALES et al., 2018). Além do período quente e úmido, uma segunda estação fresca e seca é importante para a maturação e acúmulo de sacarose nos colmos (CARNEIRO; CASAROLI, 2015). A temperatura mínima em que ocorre crescimento vegetativo é em torno de 19-20°C, sendo lento abaixo de 25°C, máximo entre 30 e 34°C, lento acima de 35°C e nulo acima de 38°C (AUDE, 1993). Na fase de maturação, temperaturas entre 10 e 20°C e/ou deficiência hídrica induzem o repouso fisiológico, contribuindo para concentração de sacarose (CARNEIRO; CASAROLI, 2015; ANDRADE; ANDRADE, 2007).

Os parâmetros utilizados no zoneamento agroclimático para a cana-de-açúcar são a temperatura média anual ( $T_a$ ), deficiência hídrica anual ( $D_a$ ), excedente hídrico anual ( $E_a$ ). Diversos estudos se basearam nestes parâmetros para realização de zoneamentos para cana-de-açúcar como Brunini et al. (2008), Manzatto et al. (2009), Carneiro e Casaroli (2015), Collicchio et al.

(2015) e Castro et al. (2020). De maneira geral a temperatura média anual considerada como favorável é acima de 21°C. Já para a deficiência hídrica anual, os valores considerados favoráveis variam geralmente entre 200 e 300 mm.

## 2.2 Café arábica

De acordo com dados da Produção Agrícola Municipal de 2020, o estado de Minas Gerais produziu um total de aproximadamente 2,04 milhões de toneladas de grãos de café arábica (*Coffea arabica*), equivalentes a 16,6 bilhões de reais e 84% do valor de produção das culturas perenes no estado. Os resultados evidenciam a importância da cultura em Minas Gerais, respondendo por aproximadamente 55% do café produzido no Brasil (IBGE, 2020), com destaque para a elevada produção e produtividade das mesorregiões Sul/Sudoeste e Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba. (VALE; CALDERARO; FAGUNDES, 2014). A cafeicultura de Minas Gerais é marcada pela presença de regiões produtoras com características distintas. Enquanto a região sudoeste do estado utiliza de produção convencional, a cafeicultura do cerrado mineiro se utiliza de modernas tecnologias de adubação e mecanização, além de maior presença de irrigação, contribuindo com maiores produtividades (ORTEGA; JESUS, 2011; FERNANDES et al., 2012; PEREIRA, V. et al., 2010; EMATER, 2018).

Em condições tropicais do Brasil, Camargo e Camargo (2001) definiram seis fases fenológicas do cafeeiro arábica, com duração de dois anos. A primeira ocorrendo de setembro a março, vegetativa. A segunda, de abril a agosto e também vegetativa. A terceira fase, com floração e expansão dos frutos, de setembro a dezembro. A quarta fase, de granagem dos frutos, de janeiro a março. Na quinta fase ocorrendo a maturação dos frutos ao completar cerca de 700 mm de somatório de ETp (Evapotranspiração potencial), após a floração principal. A sexta fase, de senescência e morte dos ramos produtivos, não primários, em julho e agosto. Destaca-se que a disponibilidade hídrica provocada pela chuva ou irrigação após o período seco é o principal fator que induz a floração (CAMARGO; CAMARGO, 2001). A ocorrência de precipitação pluvial em algumas dessas fases fenológicas pode determinar efeitos na produtividade da cultura. Tosello e Arruda (1962) considerando a produção e precipitação pluvial em municípios cafeeiros no estado de São Paulo, observaram correlação altamente significativa entre as chuvas e a produção ao analisar meses específicos do ano na modelagem por regressão linear. O estresse hídrico afeta principalmente a fase reprodutiva da cultura, onde ocorre a máxima floração e maturação, apresentando grande demanda hídrica (CARVALHO et al., 2013). Havendo estiagem

forte na terceira fase, o estresse hídrico pode prejudicar o crescimento dos frutos e resultar na ocorrência de grãos miúdos. O excesso hídrico nesse período também pode afetar a florada (CAMARGO; CAMARGO, 2001). Favarin et al. (2002) afirmaram que a produtividade do cafeeiro é diminuída pela limitação de água, elevando a ocorrência de grãos chochos em 45% quando a deficiência coincide com a fase de granação dos frutos. Segundo Bernardo (2002), o café apresenta demanda hídrica de 800 a 1200 mm por ciclo de produção sem que haja estresse hídrico. O requerimento de volume de chuvas depende das condições de retenção do solo, umidade atmosférica, cobertura de nuvens e práticas de cultivo (DAMATTA et al., 2007). Para o café arábica, os valores ótimos de precipitação pluvial anual estão entre 1200 e 1800 mm (ALÈGRE, 1959). A deficiência hídrica no período anterior a antese (abertura das flores), de julho a agosto, pode ser benéfica, favorecendo a uniformidade da florada quando iniciadas as chuvas (MEIRELES, 2009). É de amplo conhecimento a ocorrência de uma oscilação anual na produção do cafeeiro em um ano com maior produção seguido de menor produção no ano posterior (TOSELLO; ARRUDA, 1962; BEAUMONT, 1939). Esse fenômeno da bienalidade do café ocorre devido às funções de formação da produção e o crescimento vegetativo do cafeeiro para o próximo ano ocorrem simultaneamente. Com isso há a necessidade de um balanceamento na divisão dos fotossintetizados para realização de ambas as funções. Como resultado da frutificação no ano de alta produção, há grande redução da taxa de crescimento vegetativo, reduzindo a capacidade de produção do ano seguinte. (BARROS, 2018; GATHAARA, 1996). Diversos modelos agrometeorológicos foram estudados para estimativa de produtividade do cafeeiro, entre eles Camargo, Junior et al. (1984), Picini et al. (1999) e Camargo, Santos et al. (2003), sendo o último baseado em penalizações por fatores hídricos e térmicos nas fases fenológicas do cafeeiro se utilizando de dados climatológicos decenais. Segundo Santos e Camargo (2006), a maior penalização considerada para o fator déficit hídrico é a do período de outubro a janeiro.

Os parâmetros para o zoneamento agroclimático do café arábica são a temperatura média anual (Temp) e deficiência hídrica anual (DH). Com relação à temperatura, Santinato, Fernandes e Fernandes (1996) apresentam a faixa de 18-23°C como apta, sendo 19-22°C o ideal. Valores similares são apresentados por Matiello et al. (2020), sendo as faixas de 18-19°C e 22-23°C consideradas marginais. Ainda de acordo com os autores, temperaturas médias anuais acima de 22-23°C prejudicam a frutificação com abortamento de flores e ocorrência de estrelinhas. Tal efeito pode reduzir drasticamente a produtividade. De acordo com Thomaziello et al. (1996) a faixa ideal está entre 19 e 21°C. Em relação à deficiência hídrica anual Santinato, Fer-

Andrade e Fernandes (1996) apresentam como aptas sem irrigação as regiões onde a deficiência é inferior a 100 mm. Necessidade ocasional de irrigação para faixa 100-150 mm, necessidade de irrigação complementar para faixa 150-200 mm e irrigação obrigatória para deficiência acima de 200 mm. De acordo com Matiello et al. (2020), deficiência anual entre 100 e 200 mm é considerada faixa marginal necessitando de irrigação ocasional e obrigatória acima de 200 mm. Já Thomaziello et al. (1996) apresentam como aptas regiões até 150 mm de deficiência anual. Estudos têm demonstrado que o café arábica tolera até 150 mm de deficiência anual. Regiões com deficiência anual de 100 a 150 mm podem apresentar anos com deficiência acima de 150 mm sendo prejudicial ao cafeeiro (SANTINATO; FERNANDES; FERNANDES, 1996).

### 2.3 Modelos de sistemas terrestres

Com a necessidade de melhor compreender-se as mudanças no clima passado, presente e futuro, sejam decorrentes de causas naturais ou por um forçamento radioativo em diversos modelos, surge o “Coupled Model Intercomparison Project” (CMIP). O CMIP atualmente se encontra na sua sexta fase, sob supervisão do WCRP Working Group on Coupled Modelling (WGCM) (EYRING et al., 2016). Diversos modelos de sistemas terrestres (ESMs) desenvolvidos por grupos de modelagem alimentam o CMIP6, dentre eles o MRI-ESM2-0 (YUKIMOTO et al., 2019). Este modelo tem um bom desempenho em estudos disponíveis para regiões que abrangem Minas Gerais. No estudo de Firpo et al. (2022), o modelo MRI-ESM2-0 esteve entre os três com maior habilidade para simular a precipitação em cinco regiões de estudo dentro do Brasil. Dentre essas regiões, nas duas que abrangem partes do estado de Minas Gerais, o modelo também esteve entre os que apresentaram maior correlação entre a simulação e a base de referência. Boa concordância entre modelo MRI-ESM2-0 e produtos de referência para temperatura e precipitação foi obtido por Almazroui et al. (2021), em regiões de estudo que abrangem Minas Gerais. As simulações dos modelos CMIP6 consideram cenários socioeconômicos (SSPs) de emissão de gases de efeito estufa entre os quais o ‘SSP1-2.6’ (desenvolvimento sustentável, com  $2.6 W m^2$  de forçamento radioativo em 2100), ‘SSP2-4.5’ (meio do caminho,  $4.5 W m^2$  de forçamento radioativo), ‘SSP3-7.0’ (rivalidade regional) e ‘SSP5-8.5’ (desenvolvimento baseado em alto uso de combustíveis fósseis) são considerados os cinco cenários prioritários (MEINSHAUSEN et al., 2020).

## REFERÊNCIAS

- ALÈGRE, C. Climates et caféiers d'Arabie. **Agronomie Tropicale**, V. 14, N. 1, p. 23–58, 1959.
- ALMAZROUI, M. et al. Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. **Earth Systems and Environment**, V. 5, N. 2, p. 155–183, 2021. DOI: 10.1007/s41748-021-00233-6.
- ANDRADE, L. A. B.; ANDRADE, P. P. Implantação e condução de canaviais. In: EPAMIG. **Informe Agropecuário: cana-de-açúcar**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2007. V. 28, p. 44–54.
- AUDE, M. I. S. Growth stages of sugarcane and its effects on productivity. **Ciência Rural**, V. 23, N. 2, p. 241–248, 1993. DOI: 10.1590/S0103-84781993000200022.
- BARROS, I. de. **Seed yields of coffee varieties Caturra and Mundo Novo as affected by spacings; number of plants per hole and pruning systems**. 2018. F. 82. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba. DOI: 10.11606/D.11.2018.tde-20181127-160055. Disponível em:  
<<http://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11136/tde-20181127-160055/>>.
- BEAUMONT, J. H. An analysis of growth and yield relationships of coffee trees in the Kona district, Hawaii. **Journal of Agricultural Research**, US Government Printing Office, V. 59, p. 223–235, 1939.
- BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2002. 656 p.
- BORDONAL, R. O. et al. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, V. 38, N. 2, p. 1–23, 2018. DOI: 10.1007/s13593-018-0490-x.
- BORTOLETTO, A. M.; ALCARDE, A. R. Assessment of chemical quality of Brazilian sugar cane spirits and cachaças. **Food Control**, V. 54, p. 1–6, 2015. DOI: 10.1016/j.foodcont.2015.01.030.
- BRUNINI, O. et al. **Zoneamento de culturas bioenergéticas no Estado de São Paulo: aptidão edafoclimática da cultura da cana-de-açúcar**. Campinas: IAC, 2008. 31 p.
- CAMARGO, Â. P.; CAMARGO, M. B. P. Definition and outline for the phenological phases of arabic coffee under Brazilian tropical conditions. **Bragantia**, V. 60, p. 65–68, 2001. DOI: 10.1590/S0006-87052001000100008. Disponível em:  
<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0006-87052001000100008&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052001000100008&lng=pt&tlng=pt)>.
- CAMARGO, M. B. P.; JUNIOR, M. J. P. et al. Relações entre a precipitação pluviométrica e a produtividade do cafeeiro. **Ecossistema**, Espírito Santo do Pinhal, V. 9, N. 1, p. 166–171, 1984.
- CAMARGO, M. B. P.; SANTOS, M. A. et al. Modelo agrometeorológico de monitoramento e de estimativa de quebra de produtividade como subsidio à previsão de safra de café (*Coffea arabica* L.) In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 3., 2003, PORTO SEGURO. RESUMOS..., p. 75–76.

CARNEIRO, V. A.; CASAROLI, D. Sugar Cane: A Climatic Approach. **Revista Mirante**, V. 8, N. 3, p. 33–47, 2015.

CARVALHO, I. R. et al. Water demand of crop agronomic interest. **Enciclopédia Biosfera**, V. 9, N. 17, p. 969, 2013.

CASTRO, F. S. et al. Impact of IPCC global climate change projections on agroclimatic zoning of sugarcane crops in South America. **Brazilian Journal of Development**, V. 6, N. 5, p. 28410–28427, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n5-331.

COLLICCHIO, E. et al. Implications of climatic changes on agroclimatic sugarcane zoning for Tocantins State, considering the GFDL model. **Revista Brasileira de Geografia Física**, V. 8, N. 6, p. 1730–1747, 2015. DOI: 10.26848/rbgf.v8i6.233686.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**. 1. ed. Brasília: Conab, 2024. V. 11. 52 p.

DAMATTA, F. M. et al. Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, V. 19, N. 4, p. 485–510, 2007. ISSN 1677-0420. DOI: 10.1590/S1677-04202007000400014. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1677-04202007000400014&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1677-04202007000400014&lng=en&tlng=en)>.

DIAS, F. M. F. Alguns elementos sobre a cadeia produtiva da cana-de-açúcar no Brasil. **Geosul**, V. 36, N. 79, p. 116–142, 2021. DOI: 10.5007/2177-5230.2021.e73805.

EMATER. **Projeto Observatório da Agricultura de Minas Gerais**. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em:

<[https://www.emater.mg.gov.br/portal.do?flagweb=novosite\\_geoportal\\_sobre](https://www.emater.mg.gov.br/portal.do?flagweb=novosite_geoportal_sobre)>.

EYRING, V. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, V. 9, p. 1937–1958, 2016. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016. Disponível em: <<https://gmd.copernicus.org/articles/9/1937/2016/>>.

FAVARIN, J. L. et al. Estimating of coffee plant water consumption as function as climatic parameters. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, V. 9, N. 2, p. 235–240, 2002.

FERNANDES, A. L. T. et al. The modern coffee planting in the Brazilian savannah. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, V. 42, p. 231–240, 2012. DOI: 10.1590/S1983-40632012000200015. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1983-40632012000200015&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1983-40632012000200015&lng=pt&tlng=pt)>.

FIRPO, M. A. F. et al. Assessment of CMIP6 models' performance in simulating present-day climate in Brazil. **Frontiers in Climate**, V. 4, p. 1–27, 2022. DOI: 10.3389/fclim.2022.948499.

GATHAARA, M. P. H. Pruning Arabica Coffee: some physiological aspects to consider. **Kenya Coffee-The Coffee Board of Kenya Monthly Bulletin (Kenya)**, V. 61, N. 717, p. 2261–2262, 1996.

- LI, Y.-R. Growth and Development of Sugarcane (*Saccharum* spp. Hybrid) and Its Relationship with Environmental Factors. In: AGRO-INDUSTRIAL Perspectives on Sugarcane Production under Environmental Stress. [S.l.]: Springer Nature Singapore, 2022. P. 1–11. DOI: 10.1007/978-981-19-3955-6\_1.
- MANZATTO, C. V. et al. **Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar: expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro**. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55 p.
- MATIELLO, J. B. et al. **Cultura do café no Brasil - Manual de Recomendações**. 1. ed. Varginha: Fundação Procafé, 2020. 716 p.
- MATOS, M. de; SANTOS, F.; EICHLER, P. Chapter 1 - Sugarcane world scenario. In: SUGARCANE Biorefinery, Technology and Perspectives. [S.l.]: Elsevier, 2020. P. 1–19. DOI: 10.1016/b978-0-12-814236-3.00001-9.
- MEINSHAUSEN, M. et al. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. **Geoscientific Model Development**, V. 13, N. 8, p. 3571–3605, 2020. DOI: 10.5194/gmd-13-3571-2020.
- MEIRELES, E. J. L. **Fenologia do Cafeeiro: condições agrometeorológicas e balanço hídrico do ano agrícola 2004–2005**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 128 p.
- ORTEGA, A. C.; JESUS, C. M. Território café do Cerrado: transformações na estrutura produtiva e seus impactos sobre o pessoal ocupado. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, V. 49, p. 771–800, 2011. DOI: 10.1590/S0103-20032011000300010. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-20032011000300010&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-20032011000300010&lng=pt&tlng=pt)>.
- PEREIRA, D. S. et al. Production of forage of sugarcane and pigeon pea grown in monoculture and consortium. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, V. 7, N. 4, p. 80–87, 2018. DOI: 10.21206/bjsa.v7i4.421.
- PEREIRA, V. et al. Riscos e Retornos da Cafeicultura em Minas Gerais: uma análise de custos e diferenciação. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, V. 48, p. 657–678, 2010. DOI: 10.1590/S0103-20032010000300008.
- PICINI, A. G. et al. Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para a estimativa de produtividade do cafeeiro. **Bragantia**, Instituto Agronômico de Campinas, V. 58, N. 1, p. 157–170, 1999. ISSN 0006-8705. DOI: 10.1590/S0006-87051999000100015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0006-87051999000100015>>.
- SALES, C. R. G. et al. Flexibility of C4 decarboxylation and photosynthetic. **Environmental and Experimental Botany**, V. 149, p. 34–42, 2018. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2017.10.027.
- SANTINATO, R.; FERNANDES, A. L. T.; FERNANDES, D. R. **Irrigação na cultura do café**. 1. ed. Campinas: Arbore Agrícola e Comércio, 1996. 146 p.

SANTOS, M. A. d.; CAMARGO, M. B. P. d. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro nas condições do estado de São Paulo. **Bragantia**, V. 65, N. 1, p. 173–183, 2006. DOI: 10.1590/S0006-87052006000100022.

SILVA, D. L. G. et al. Sugarcane: Economic, social, environmental, by-products and sustainability. **Research, Society and Development**, V. 10, N. 7, e44410714163, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i7.14163.

THOMAZIELLO, R. A. et al. **Cultura do café**. 1. ed. Campinas: Coordenadoria de Assistência Técnica Integral, 1996. 68 p.

TOSELLO, R. N.; ARRUDA, H. V. de. Correlation between official estimates of coffee yields and rainfall distribution in the state of São Paulo. **Bragantia**, V. 21, p. 449–465, 1962. ISSN 0006-8705. DOI: 10.1590/S0006-87051962000100027. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0006-87051962000100027&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87051962000100027&lng=pt&tlng=pt)>.

VALE, A. R.; CALDERARO, R. A. P.; FAGUNDES, F. N. The coffee production in Minas Gerais: comparative study between regions Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba and South/Southwest. **Campo Território: Revista de Geografia Agrária**, V. 9, p. 1–23, 2014. DOI: 10.14393/RCT91826933.

YUKIMOTO, S. et al. The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, V. 97, N. 5, p. 931–965, 2019. DOI: 10.2151/jmsj.2019-051.

ZHENG, Y. et al. High-resolution map of sugarcane cultivation in Brazil using a phenology-based method. **Earth System Science Data**, V. 14, N. 4, p. 2065–2080, 2022. DOI: 10.5194/essd-14-2065-2022.

**3 ARTIGO 1 – ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO E DE MECANIZAÇÃO PARA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE MINAS GERAIS SOB CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

## RESUMO

O Brasil atingiu produção recorde de cana-de-açúcar na última safra com o estado de Minas Gerais apresentando a segunda maior colheita no país, amplamente mecanizada. O principal destino desta produção são as usinas de açúcar e etanol. Neste contexto o zoneamento agroclimático é indispensável no planejamento agrícola e avaliação do potencial produtivo no cenário atual e futuro de mudanças climáticas. Portanto teve-se por objetivo a realização do zoneamento agroclimático atual e futuro, além da possibilidade de mecanização para cultura da cana-de-açúcar no estado de Minas Gerais utilizando geocomputação no ambiente livre R. Utilizaram-se superfícies climáticas no período 1991-2020 e em cenários futuros de mudanças climáticas para cálculo do balanço hídrico. Foi possível utilizar mapeamento da capacidade de água disponível (CAD) dos solos no cálculo, considerando a sua variabilidade espacial. Os resultados indicaram 36,9% de terras climaticamente aptas no estado, sendo 37,3% delas mecanizáveis, o equivalente a 8,11 milhões de hectares. Porém houve tendência de aumento da deficiência hídrica em cenários futuros, apontando para uma necessidade cada vez mais frequente do uso de irrigação. Boa concordância foi observada entre os resultados e dados da produção agrícola municipal. A metodologia demonstrou potencial para aplicação em outras regiões.

**Palavras-chave:** Climatologia. WorldClim. MRI-ESM2-0. Superfícies climáticas. Balanço hídrico.

## ABSTRACT

Brazil achieved record sugarcane production in the 2023 harvest, with Minas Gerais responsible for the second largest harvest in the country, completely mechanized. The main destination of this production is the sugar and ethanol mills. In this context, agroclimatic zoning is indispensable for agricultural planning and assessing production potential in the current and future climate change scenarios. The aim was to perform current and future agroclimatic zoning, as well as to assess the possibility of mechanization for sugarcane cultivation in the state of Minas Gerais using geocomputing in the free R environment. Climate surfaces for the period 1991-2020 and future climate change scenarios were used to calculate the water balance. Mapping of the available water capacity of soils was used in the calculation, taking into account its spatial variability. The results indicated that 36.9% of the state's land is climatically suitable, 37.3% of which is mechanizable, equivalent to 8.11 million hectares. However, there was a tendency for water deficit to increase in future scenarios, pointing to an increasingly frequent need to use irrigation. There was good agreement between the results and municipal agricultural production data. The methodology showed potential for application in other regions.

**Keywords:** Climatology. WorldClim. MRI-ESM2-0. Climate surfaces. Water balance.

### 3.1 INTRODUÇÃO

O Brasil é atualmente o maior produtor mundial de cana-de-açúcar com produção crescente no contexto de suprimento da demanda global por biocombustíveis (ZHENG et al., 2022; BORDONAL et al., 2018). Conforme boletim da safra 2023/24 da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024), a produção brasileira atingiu o patamar recorde de 713 milhões de toneladas, com o estado de Minas Gerais produzindo 81 milhões de toneladas, sendo 99.5% da colheita mecanizada e segunda maior produção após o estado de São Paulo. Em relação à safra anterior a área plantada no estado aumentou 3.7%, atingindo 929 mil hectares, enquanto a produção teve incremento de 15.4%, com previsão de área plantada 8% maior na próxima safra. Os fatos evidenciam a valorização do setor sucroenergético na região. A principal destinação da cana-de-açúcar é a produção de etanol e açúcar, sendo este setor de relevante importância econômica no Brasil (SILVA; BATISTI et al., 2021; MATOS; SANTOS; EICHLER, 2020). No estado de Minas Gerais, cerca de 63% de toda cana esmagada foi destinada à produção de açúcar na última safra (CONAB, 2024). A cana-de-açúcar também é utilizada como silagem para alimentação animal, na produção de cachaça e produtos secundários como rapadura e açúcar mascavo (DIAS, 2021; PEREIRA et al., 2018; BORTOLETTO; ALCARDE, 2015).

O zoneamento agroclimático é uma importante ferramenta para o planejamento agrícola e econômico de uma região (MINGALEV, 2021; MATOS; SILVA et al., 2018; WOLLMANN; GALVANI, 2013). Devido à grande presença de colheita mecanizada da cana-de-açúcar decorrente principalmente do maior desempenho operacional obtido neste sistema e eliminação da queima (ALVES; COSTA ESCARELA et al., 2022; TORCATO; SANTOS FACHINELLI FERRARINI, 2015), se torna relevante a inclusão do critério possibilidade de mecanização nos zoneamentos. Alguns estudos envolvendo zoneamento climático para cana-de-açúcar no Brasil e para estado de Minas Gerais foram desenvolvidos nos últimos anos (OLIVEIRA APARECIDO et al., 2021; CASTRO et al., 2020; REIS et al., 2017; COLLICCHIO et al., 2015; ALMEIDA; CALIJURI; PINTO, 2013; MANZATTO et al., 2009; BRUNINI et al., 2008; WALDHEIM et al., 2006). De maneira geral são considerados valores de capacidade de água disponível (CAD) fixos entre 75 e 125 mm. A generalização da CAD pode prejudicar o desempenho do zoneamento, já que o seu valor apresenta variabilidade espacial conforme as condições do solo (GÓMEZ et al., 2023; BLASCHEK et al., 2019).

A cana-de-açúcar é uma planta C4 muito cultivada em condições de ambiente ensolarado e quente em que a seca, geadas e alagamento atuam como fatores limitantes da produtividade (LI, 2022; SALES et al., 2018). Além do período quente e úmido, uma segunda estação fresca e seca é importante para a maturação e acúmulo de sacarose nos colmos (CARNEIRO; CASAROLI, 2015). A temperatura mínima em que ocorre crescimento vegetativo é em torno de 19-20°C, sendo lento abaixo de 25°C, máximo entre 30 e 34°C, lento acima de 35°C e nulo acima de 38°C (AUDE, 1993). Na fase de maturação, temperaturas entre 10 e 20°C e/ou deficiência hídrica induzem o repouso fisiológico, contribuindo para concentração de sacarose (CARNEIRO; CASAROLI, 2015; ANDRADE; ANDRADE, 2007).

Com intuito de melhor entender o clima e suas mudanças no passado, presente e futuro, surge o Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), atualmente na sua fase 6, sob supervisão do WCRP Working Group on Coupled Modelling (WGCM) (EYRING et al., 2016). Em relação ao CMIP3 e CMIP5, os modelos do CMIP6 têm apresentado melhor habilidade em capturar características climáticas na região sudeste do Brasil, com boa performance em regiões da América do Sul que abrangem o estado de Minas Gerais (MEDEIROS; OLIVEIRA; AVILA-DIAZ, 2022; ALMAZROUI et al., 2021). As simulações dos modelos CMIP6 consideram cenários socioeconômicos (SSPs) de emissão de gases de efeito estufa entre os quais o ‘SSP1-2.6’ (desenvolvimento sustentável, com 2.6  $W m^2$  de forçamento radioativo em 2100), ‘SSP2-4.5’ (meio do caminho, 4.5  $W m^2$  de forçamento radioativo), ‘SSP3-7.0’ (rivalidade regional) e ‘SSP5-8.5’ (desenvolvimento baseado em alto uso de combustíveis fósseis) são considerados os cinco cenários prioritários (MEINSHAUSEN et al., 2020). O uso de dados projetados de cenários futuros de mudanças climáticas referentes à precipitação pluvial e temperatura, permite que se realizem zoneamentos climáticos de culturas na perspectiva de se avaliar possíveis mudanças na extensão de terras aptas ou inaptas para determinado cultivo.

Muitos estudos envolvendo zoneamentos climáticos são desenvolvidos em softwares de interface GUI que não promovem acesso à metodologia utilizada. O ambiente de programação livre R vêm apresentando rápido desenvolvimento no contexto de análise de dados e geoprocessamento, com uma grande quantidade de pacotes disponíveis (STAPLES, 2023; HACKENBERGER, 2020). A abordagem em linha de comando permite o acesso aos métodos utilizados e garante máxima reprodutibilidade (LOVELACE; NOWOSAD; MUENCHOW, 2019).

Diante do exposto, teve-se por objetivo a realização do zoneamento agroclimático e de mecanização da cana-de-açúcar no estado de Minas Gerais em cenário atual e futuro de mudan-

ças climáticas com uso de técnicas de geocomputação em R, superfícies climáticas interpoladas, considerando o balanço hídrico e CAD especializados.

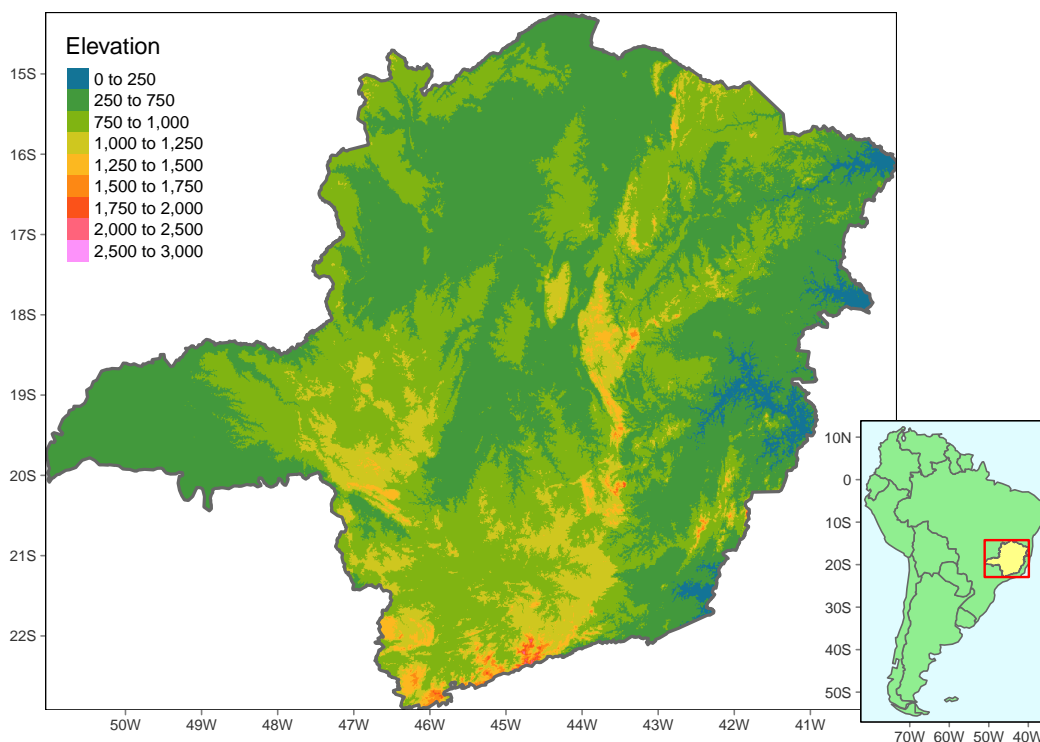
## 3.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.2.1 Caracterização da área de estudo

O estado de Minas Gerais está localizado na região sudeste do Brasil, com uma vasta extensão territorial de aproximadamente  $586000 \text{ km}^2$  e população de 20,5 milhões de habitantes (IBGE, 2023). Na Figura 3.1 é possível observar a localização do estado sobre mapa de elevação elaborado com modelo digital de elevação (DEM) proveniente do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) obtido pela função `getData` do pacote `raster` (HIJMANS; ETTEN et al., 2020) e mapeado pelo `tmap` (TENNEKES, 2018) R-package.

Os principais biomas que abrangem o estado são a Mata Atlântica, Cerrado e Caatinga (DRUMMOND, 2005). Em classificação climática de Köpen realizada por Sá Júnior et al. (2012) as classes Aw (clima tropical com inverno seco), Cwa (subtropical de inverno seco) e Cwb (subtropical de altitude) respondem por quase a totalidade do estado.

Figura 3.1 – Localização do estado de Minas Gerais sobre mapa de elevação (m).



Fonte: Do autor (2024).

### 3.2.2 Superfícies interpoladas de temperatura e precipitação

Foram utilizadas superfícies interpoladas do projeto WorldClim (FICK; HIJMANS, 2017). Se tratam de dados reduzidos de escala da base CRU-TS-4.06 (HARRIS et al., 2014) utilizando o WorldClim 2.1 para correção de viés. A resolução espacial adotada foi de 2.5 minutos (aprox. 5 km na área de estudo). Considerando a dimensão do estado e os custos computacionais esta resolução se mostrou apropriada. As variáveis utilizadas foram temperatura máxima média mensal (°C), temperatura mínima média mensal (°C) e precipitação total mensal (mm). O período utilizado para caracterização do clima atual foi de 1991-2020 correspondendo a 30 anos.

### 3.2.3 Balanço hídrico mensal

Foi realizado o balanço hídrico mensal pelo método de Thornthwaite (THORNTHWAITE; MATHER, 1955). Os dados de entrada para o cálculo do balanço hídrico são a temperatura média mensal, a precipitação total mensal e a latitude local. Portanto, a temperatura média mensal foi calculada como a média das temperaturas máxima média e mínima média recortadas pelo contorno do estado de Minas Gerais por meio do pacote `terra` (HIJMANS; BIVAND et al., 2023) no R. O produto vetorial do contorno do estado foi obtido do produto *Malha municipal 2021* (IBGE, 2021).

Além disso foi necessário fornecer a capacidade de água disponível (CAD) a ser considerada no cálculo. A CAD para uma determinada cultura varia conforme o tipo de solo e a profundidade do sistema radicular. Alguns estudos de zoneamento climático para cana-de-açúcar têm adotado uma CAD fixa de 100 mm (COLLICCHIO et al., 2015; WALDHEIM et al., 2006). Porém a CAD apresenta uma variação espacial de acordo com o tipo de solo de cada região. Para este trabalho, a CAD para cada localização foi considerada no balanço hídrico, sendo utilizado o produto vetorial *Capacidade de água disponível - CAD ou AWC dos solos no Brasil* da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2021). Este produto consiste na distribuição espacial dos valores de CAD em  $m^{-3} m^{-3}$ . Para utilização em conjunto com as superfícies climáticas, o mapeamento da CAD precisou ser transformado em raster por meio da função `rasterize` do pacote `terra` no R na mesma resolução de 2.5 minutos. Para obter a CAD para a cultura da cana foi aplicada a equação 3.1 em que Z é a profundidade efetiva do sistema radicular. A profundidade das raízes da cana depende das condições do solo, da distribuição e disponibilidade de água, além do genótipo cultivado (ZHAO et al.,

2020; BARBOSA et al., 2018; AQUINO et al., 2015). Portanto, a profundidade efetiva está sujeita a variações, não existindo um padrão específico, sendo também influenciada pela idade da planta (DINARDO-MIRANDA; VASCONCELOS; ANDRADE LANDELL, 2008). Farias et al. (2008) encontraram mais de 80% da fitomassa de raízes nos primeiros 0.60 m de solo para cultivo em sequeiro. Zhao et al. (2020) obtiveram profundidade efetiva do sistema radicular de até 0.72 m. Faroni e Trivelin (2006) encontraram 31% das raízes metabolicamente ativas na profundidade de 0,60-0,80 m. Adotou-se uma profundidade efetiva neste estudo de 0,70 m.

$$CAD_{\text{cana}} (\text{mm}) = CAD \left( \frac{m^3}{m^3} \right) \cdot Z(m) \cdot 1000 \left( \frac{L}{m^3} \right) \quad (3.1)$$

O pacote `bioclim` (SERRANO-NOTIVOLI; LONGARES; CÁMARA, 2022) no R foi utilizado para cálculo do balanço hídrico em cada pixel utilizando como entrada as superfícies climáticas de temperatura média, precipitação e CAD. A partir do balanço hídrico mensal calculado, foram obtidos os parâmetros de deficiência hídrica anual (Da) e excedente hídrico anual (Ea).

Foram obtidos os mapas cloropléticos da distribuição espacial da CAD para cana-de-açúcar, da deficiência hídrica mensal e anual a partir de legenda única com uso do pacote `stars` (PEBESMA, 2022) no R.

### 3.2.4 Zoneamento agroclimático e de mecanização

Os parâmetros utilizados no zoneamento agroclimático para a cana-de-açúcar foram a temperatura média anual (Ta), deficiência hídrica anual (Da), excedente hídrico anual (Ea). Na Tabela 3.1 são apresentados os parâmetros adotados na forma de condição lógica para cada classe de aptidão. A adoção dos parâmetros se deu com base em adaptação dos valores apresentados nos trabalhos de Brunini et al. (2008), Manzatto et al. (2009), Carneiro e Casaroli (2015), Collicchio et al. (2015) e Castro et al. (2020). Considerando as variações nos parâmetros utilizados na literatura e o melhoramento genético atual, adotamos 250 mm de deficiência anual para condição hídrica favorável e temperatura média anual superior a 20,5°C como condição térmica favorável.

Tabela 3.1 – Parâmetros e classes de aptidão climática para cana-de-açúcar.

Classe	Condição lógica	Descrição
1 Apto	$T_a \geq 20.5^\circ\text{C}$ and $D_a < 250$ mm and $E_a < 800$ mm	Condições térmicas e hídricas satisfatórias
2 Restrito por $D_a$	$T_a \geq 20.5^\circ\text{C}$ and $250 < D_a < 400$ mm and $E_a < 800$ mm	Condições hídricas restritas sendo recomendado o uso de irrigação suplementar.
3 Inapto por $D_a$	$T_a \geq 20.5^\circ\text{C}$ and $D_a \geq 400$ mm and $E_a < 800$ mm	Condição térmica favorável sendo indispensável o uso de irrigação.
4 Restrito por $T_a$	$18^\circ\text{C} < T_a < 20.5^\circ\text{C}$ and $D_a < 250$ mm and $E_a < 800$ mm	Inapto termicamente para indústria açucareira, mas apta para cachaça e forragem.
5 Restrito por $T_a$ e $D_a$	$18^\circ\text{C} < T_a < 20.5^\circ\text{C}$ and $250$ mm $< D_a < 400$ mm and $E_a < 800$ mm	Inapto termicamente para indústria açucareira, mas apta para cachaça e forragem sendo recomendada irrigação suplementar.
6 Restrito por $T_a$ e inapto por $D_a$	$18^\circ\text{C} < T_a < 20.5^\circ\text{C}$ and $D_a \geq 400$ mm and $E_a < 800$ mm	Inapto termicamente para indústria açucareira, mas apta para cachaça e forragem sendo indispensável a irrigação.
7 Inapto por $T_a$ ou $E_a$	$T_a \leq 18^\circ\text{C}$ or $E_a > 800$ mm	Não apresenta condições climáticas favoráveis devido à baixa temperatura ou excesso de umidade
8 Incultivável	CAD = 0 mm	Área incultivável, como superfície de água ou urbanizada.

Para análise de possibilidade de mecanização, utilizou-se o produto disponibilizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (AMARAL et al., 2004), em que os solos foram classificados da classe M1 a M4 quanto à possibilidade de mecanização. Na Tabela 3.2 estão dispostas as descrições de cada classe conforme metodologia apresentada por (RAMALHO FILHO; PEREIRA; BEEK, 1978). Para a cultura da cana-de-açúcar, tem se considerado um limite de 12% de declividade para possibilidade de mecanização (AGUIAR et al., 2011; MAGALHÃES; BRAUNBECK, 2014).

Tabela 3.2 – Níveis de possibilidade de mecanização das terras.

Nível	Descrição	Declive	Rendimento do trator
M1 - Alto	Sem limitação ao uso de máquinas e implementos	> 6%	> 90%
M2 - Médio	Baixa limitação ao uso de máquinas e implementos	6-12%	70-90%
M3 - Baixo	Limitação moderada a forte.	12-20%	50-70%
M4 - Muito baixo	Impedimentos muito fortes.	> 20%	> 50%

As representações visuais para a distribuição espacial das classes de aptidão climática e de mecanização foram obtidas por meio do pacote `tmap v4` (TENNEKES, 2018) no R. As classes de mecanização foram recortadas pelas zonas onde o cultivo é possível, sendo as aptas, restritas por deficiência hídrica ou inaptas por deficiência hídrica. Usou-se a função `st_intersection` do pacote `sf` (PEBESMA, 2018) para realizar tal operação, obtendo-se as classes de mecanização dentro das zonas onde o cultivo é possível. A área das classes foi calculada por meio da função `st_area` do pacote `sf` com entrada em latitude e longitude para área geodésica sobre elipsoide WGS84.

### 3.2.5 Cenários futuros de mudanças climáticas

Adotou-se o modelo MRI-ESM2-0 (YUKIMOTO et al., 2019) do CMIP6. Este modelo tem um bom desempenho em estudos disponíveis para regiões que abrangem Minas Gerais. No

estudo de Firpo et al. (2022), o modelo MRI-ESM2-0 esteve entre os três com maior habilidade para simular a precipitação em cinco regiões de estudo dentro do Brasil. Dentre essas regiões, nas duas que abrangem partes do estado de Minas Gerais, o modelo também esteve entre os que apresentaram maior correlação entre a simulação e a base de referência. Boa concordância entre modelo MRI-ESM2-0 e produtos de referência para temperatura e precipitação foi obtido por Almazroui et al. (2021) em regiões de estudo que abrangem Minas Gerais.

Foi utilizado o produto reduzido de escala e calibrado pelo WorldClim v2.1 do modelo MRI-ESM2-0 do CMIP6 com resolução de 2.5 minutos referentes às médias mensais de 20 anos dos períodos 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100 nos quatro cenários SSP (Shared Socio-economic Pathways) 126, 245, 370 e 585. Os dados correspondem à precipitação pluvial mensal e temperatura máxima e mínima mensais. Para obtenção da temperatura média, foi realizada a média das temperaturas máxima e mínima. Foi realizado o balanço hídrico mensal e o zoneamento agroclimático de modo idêntico ao realizado com os dados históricos. Obteve-se o zoneamento agroclimático para cana-de-açúcar nos 4 cenários SSP e 4 períodos futuros, totalizando 16 cenários de mudanças climáticas. A área das classificações foi obtida e representada por meio de gráfico de barras com eixos padronizados para cada cenário, permitindo as devidas comparações.

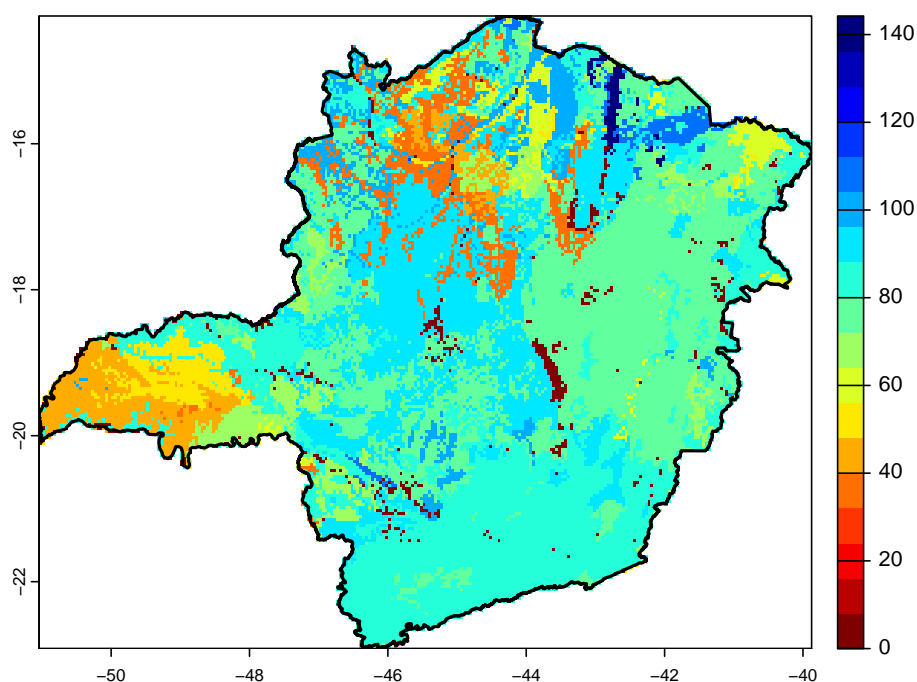
### **3.3 RESULTADOS**

#### **3.3.1 Balanço hídrico mensal**

Na Figura 3.2 é apresentada a distribuição espacial da Capacidade de água disponível (CAD) obtida para cana-de-açúcar considerando uma profundidade de 0.7 m. Esta distribuição foi utilizada no cálculo do balanço hídrico. Observa-se que em geral a CAD se situou entre 70 e 100 mm na maior parte do estado, porém se verifica grande variabilidade. Algumas regiões dispersas na porção norte e na porção sul do estado apresentaram CAD superior a 100 mm. Baixos valores de CAD foram obtidos em boa parte do Triângulo Mineiro, com valores na faixa de 50 mm. Alguns solos ao norte do estado apresentaram valores de CAD ainda mais baixos, por volta de 35 mm.

Na Figura 3.3 é apresentada a distribuição espacial da deficiência hídrica mensal obtida para a CAD da cana-de-açúcar variável conforme o solo, no período 1991-2020. As deficiências

Figura 3.2 – Capacidade de água disponível (CAD) (mm) para cana-de-açúcar em Minas Gerais, Brasil.



Fonte: Do autor (2024).

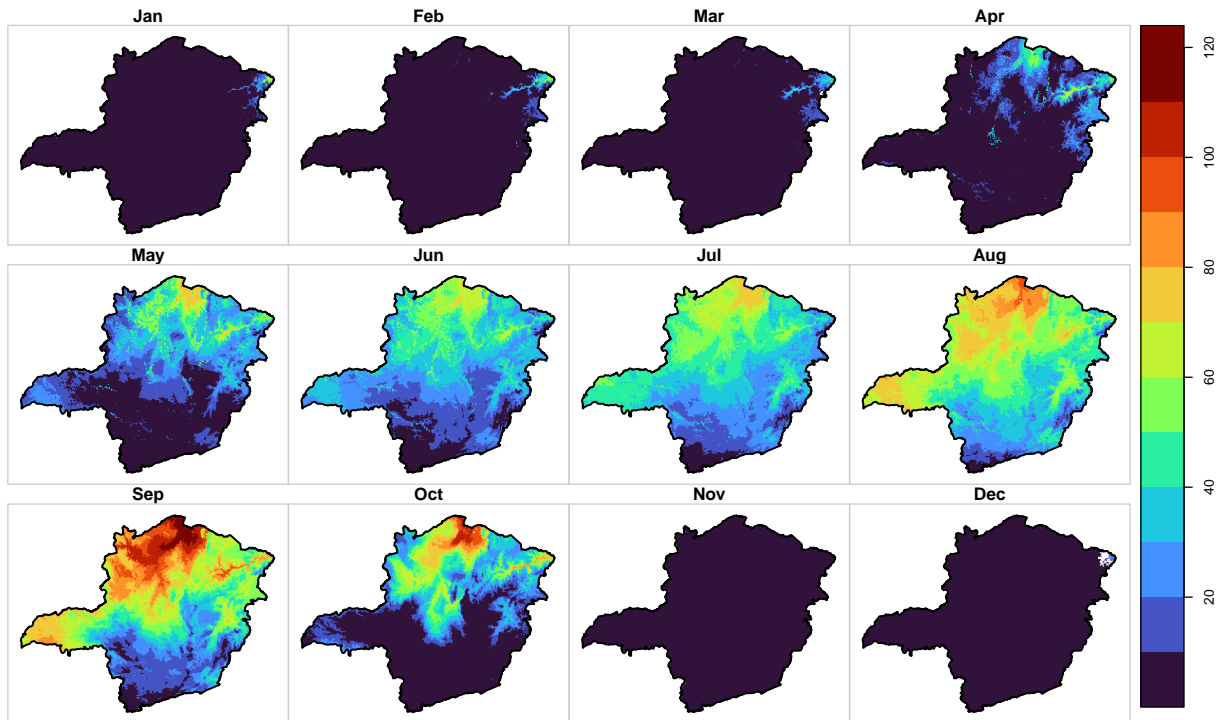
mais acentuadas são observadas no mês de setembro. No período de novembro a março quase a totalidade do estado não apresenta deficiência hídrica considerável.

Em relação a deficiência hídrica total anual e temperatura média anual, observa-se na Figura 3.4 que há uma distinção entre as porções norte e sul do estado. A maior deficiência hídrica é observada no extremo norte do estado com valores acima de 500 mm anuais. Já na porção sul a maior parte das terras apresentaram deficiências abaixo de 150 mm anuais. Com relação a temperatura média anual nota-se grande efeito do relevo na formação de microclimas de altitude. De maneira geral a porção sul do estado apresentou temperaturas médias anuais abaixo de 21°C, enquanto ao norte a temperatura média anual ultrapassa 23°C em diversas localidades.

### 3.3.2 Zoneamento agroclimático e de mecanização

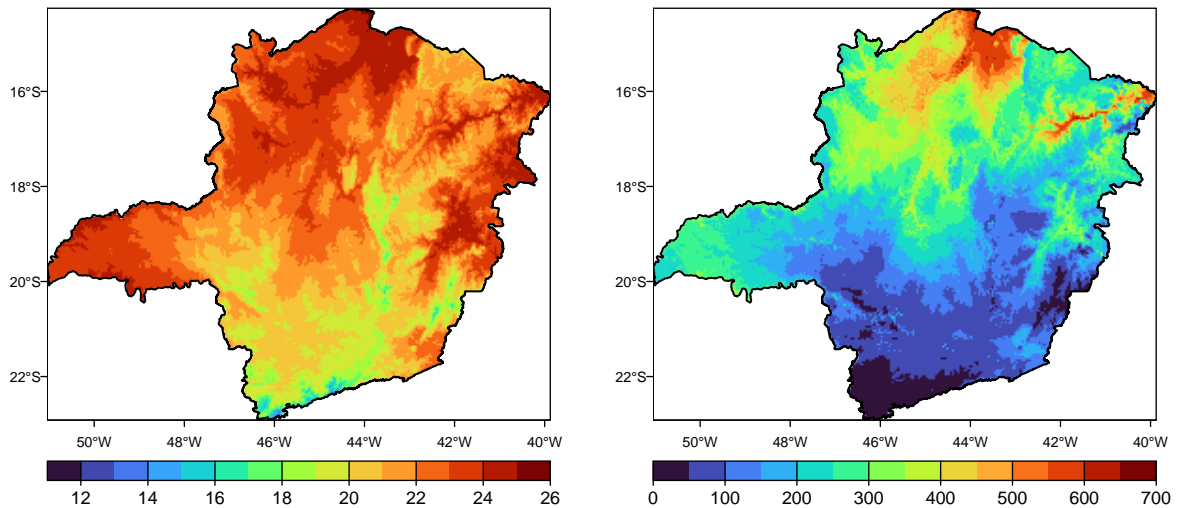
O zoneamento agroclimático para cana-de-açúcar conforme metodologia adotada está disposto na Figura 3.5. Não se verificou a presença da classe 6 (Restrito por Ta e inapto por Da). Nota-se que a região sul do estado apresenta condições hídricas favoráveis, porém temperatura média anual baixa para produção destinada à indústria sucroalcooleira. Ainda assim a

Figura 3.3 – Deficiência hídrica mensal (mm).



Fonte: Do autor (2024).

Figura 3.4 – Temperatura média anual (°C) (esquerda) e deficiência hídrica anual (mm).

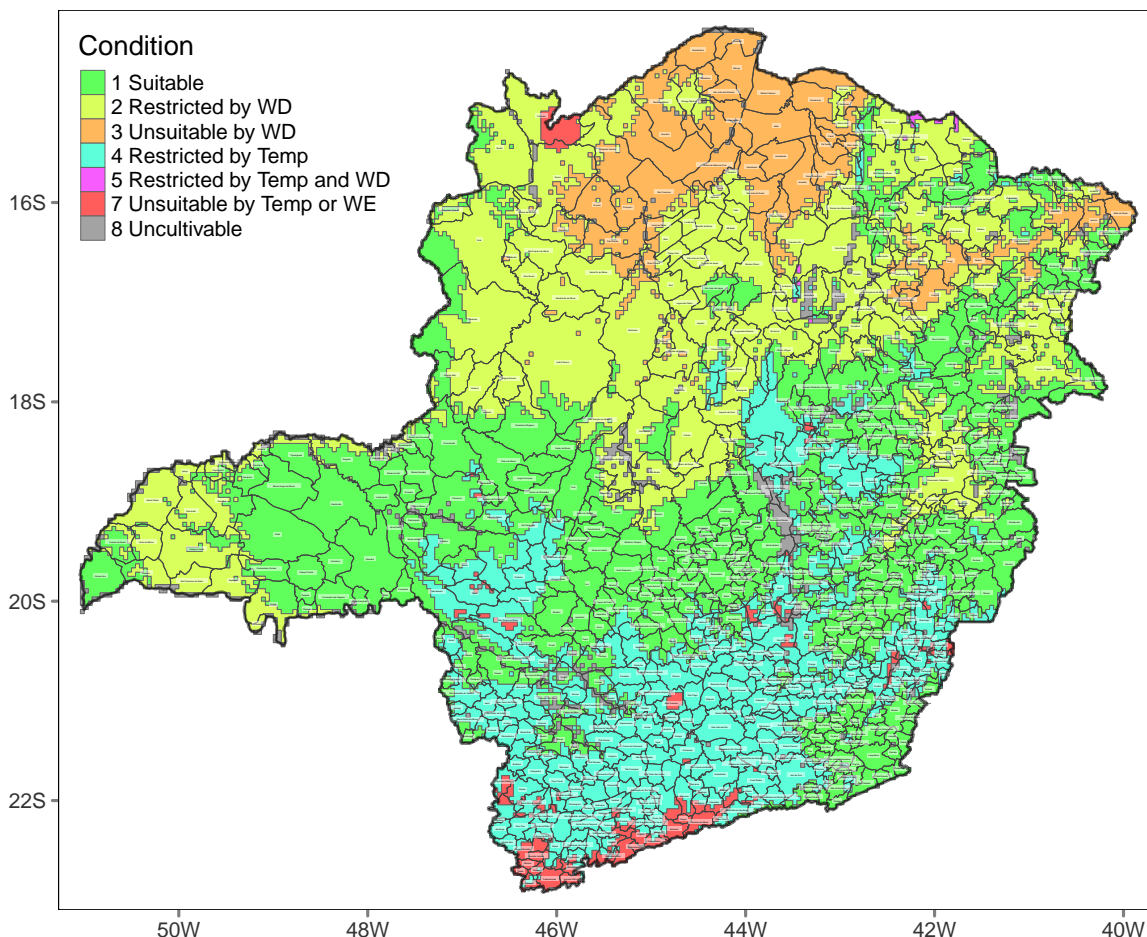


Fonte: Do autor (2024).

região apresenta potencial de cultivo para produção de aguardente e forragem. Algumas regiões no extremo sul apresentaram temperaturas médias anuais abaixo de 18°C sendo inapropriadas termicamente para o cultivo da cana-de-açúcar. As regiões aptas se situaram nas regiões do Triângulo mineiro, Central, Leste e Zona da Mata. Boa parte da porção norte do estado apresentou

potencial térmico adequado, porém deficiência hídrica mais elevada, sendo recomendado o uso de irrigação complementar para melhoria da produtividade. No extremo norte as condições de forte deficiência hídrica indicam para a necessidade indispensável de irrigação mais intensa.

Figura 3.5 – Zoneamento agroclimático para cana-de-açúcar no estado de Minas Gerais.

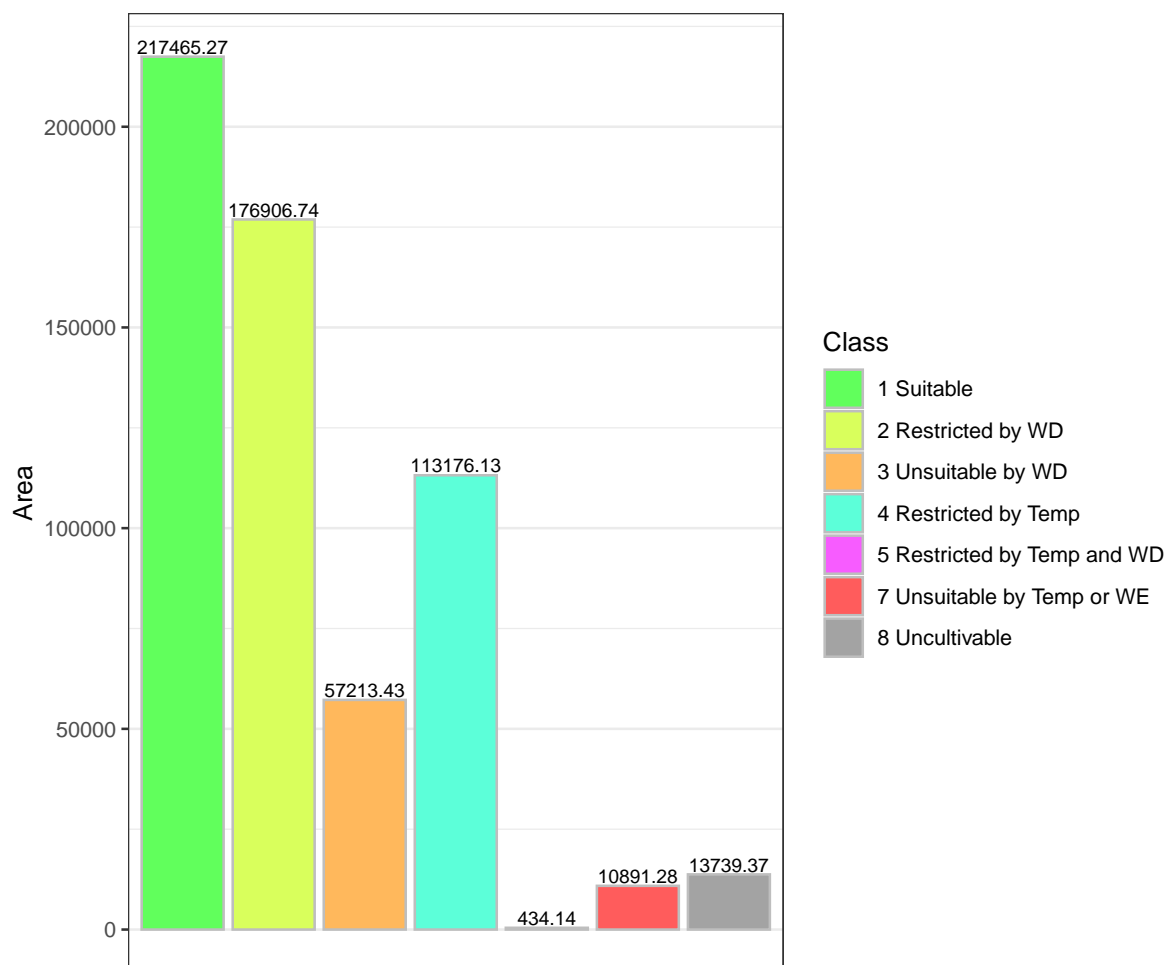


Fonte: Do autor (2024).

Na Figura 3.6 são apresentadas as áreas em  $km^2$  ( $1 km^2 = 100 ha$ ) de cada classe de aptidão climática. A classe 1 (apto) apresentou a maior ocorrência no estado, indicando que boa parte das terras possuem potencial térmico e hídrico adequado. A classe 2 (restrito por Da) foi a segunda com maior em ocorrência demonstrando que grandes extensões de terra possuem o potencial térmico mas apresentam limitações de deficiência hídrica.

Na Figura 3.7 é apresentada a distribuição espacial dos níveis de mecanização dentro das classes climáticas de interesse (1 a 3). A maior parte das áreas climaticamente aptas e com potencial de mecanização (classes M1 e M2) se situaram na região do Triângulo Mineiro. A região centro-oeste de Minas também apresentou quantidade significativa de terras aptas cli-

Figura 3.6 – Áreas das classes de aptidão ( $km^2$ ) ( $1 km^2 = 100 ha$ ).

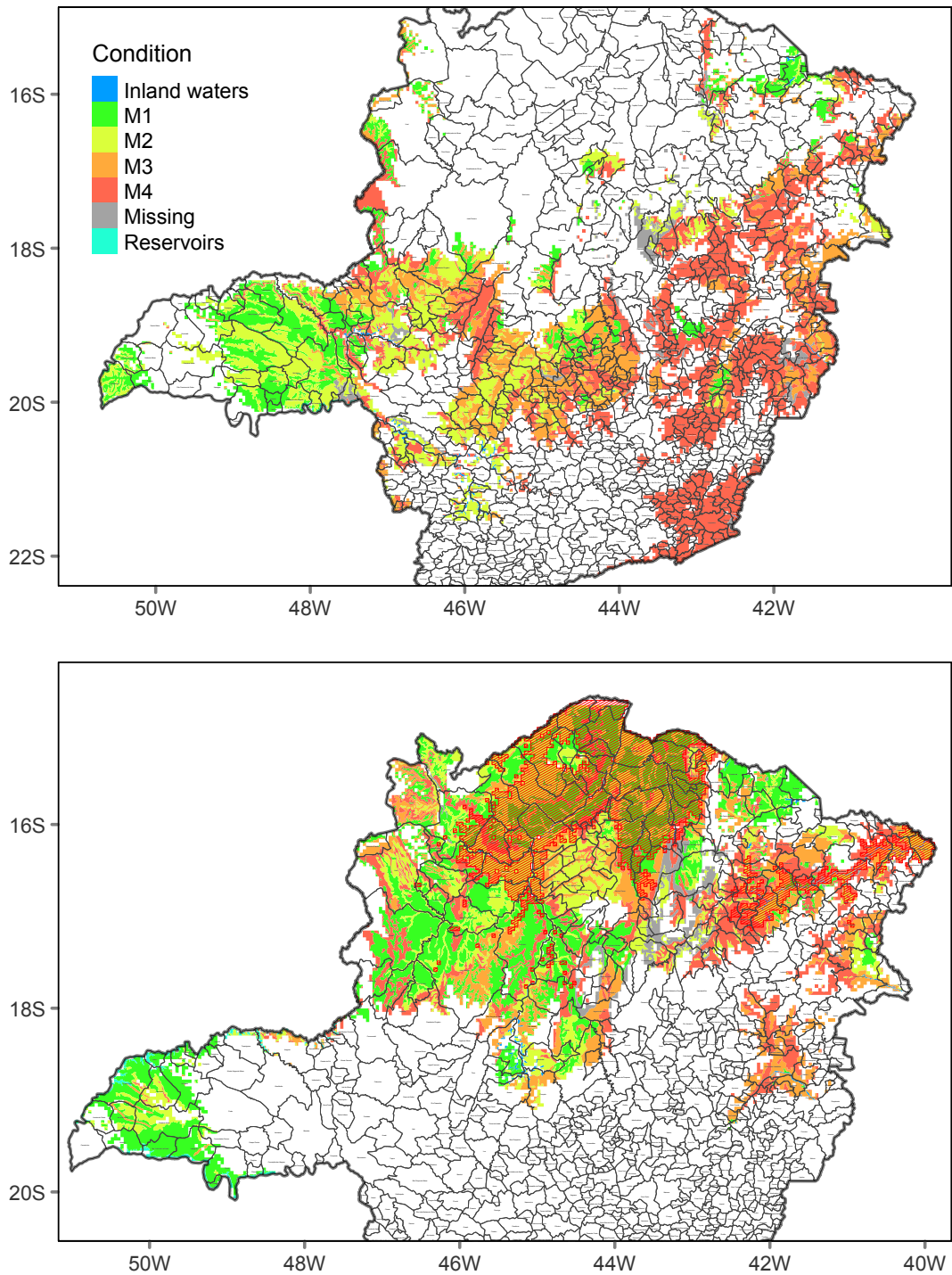


Fonte: Do autor (2024).

maticamente situadas na classe de mecanização M2. Nas demais regiões foi predominante a classe M4 em que a mecanização não é recomendada. Já quando analisadas as zonas climaticamente restritas e inaptas por deficiência hídrica (classes 2 e 3), há a presença de grandes áreas mecanizáveis no Triângulo Mineiro, Noroeste de Minas e Norte de Minas.

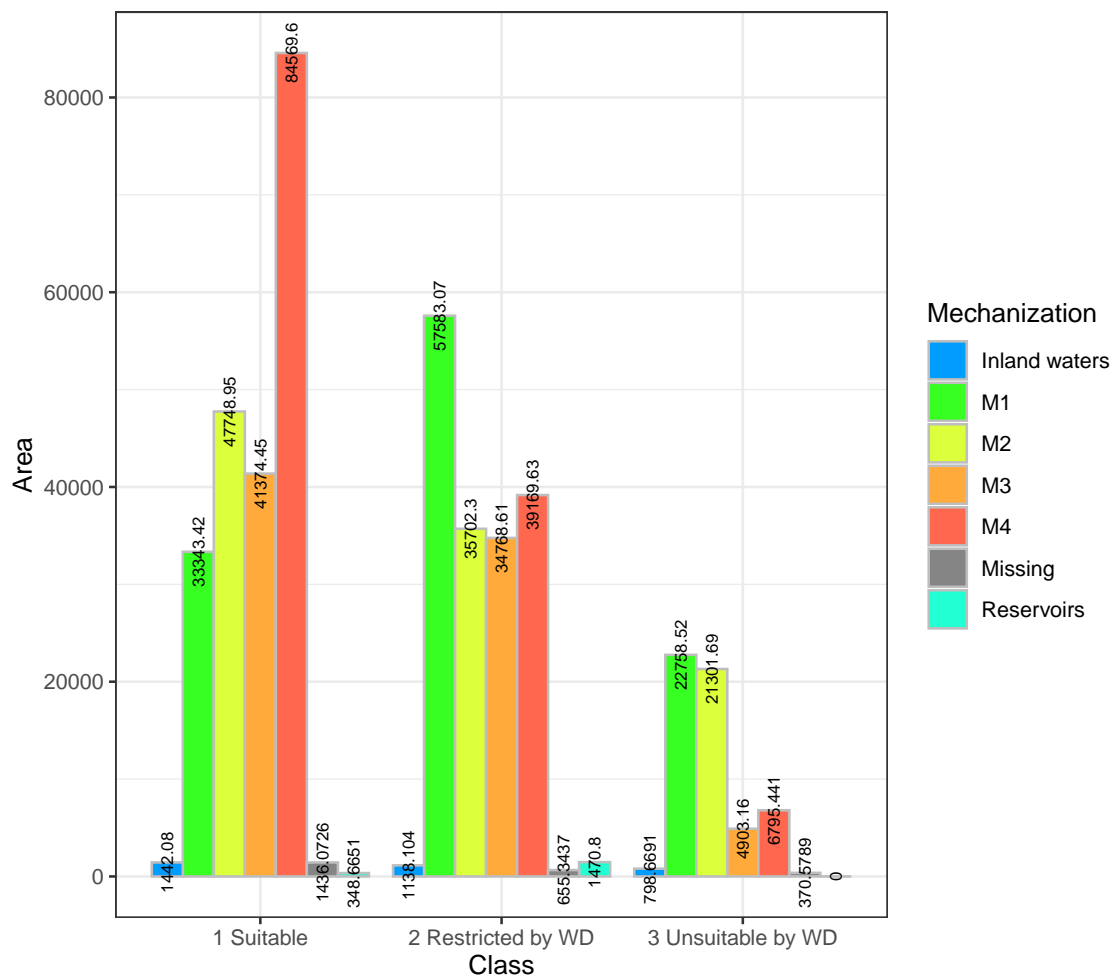
Na Figura 3.8 estão dispostas as áreas obtidas para cada nível de mecanização dentro das classes climáticas 1, 2 e 3. Nota-se que na classe climaticamente apta, a maior parte das terras são de nível M4, não sendo indicadas para mecanização. Já nas classes restrita e inapta por deficiência hídrica, há predominância de terras mecanizáveis.

Figura 3.7 – Classes de mecanização em zonas da classe 1 (esquerda) e em zonas das classes 2 e 3 (direita). A área de classe 3 apresenta-se hachurada de vermelho.



Fonte: Do autor (2024).

Figura 3.8 – Áreas dos níveis de mecanização por classe de aptidão climática ( $km^2$ ).



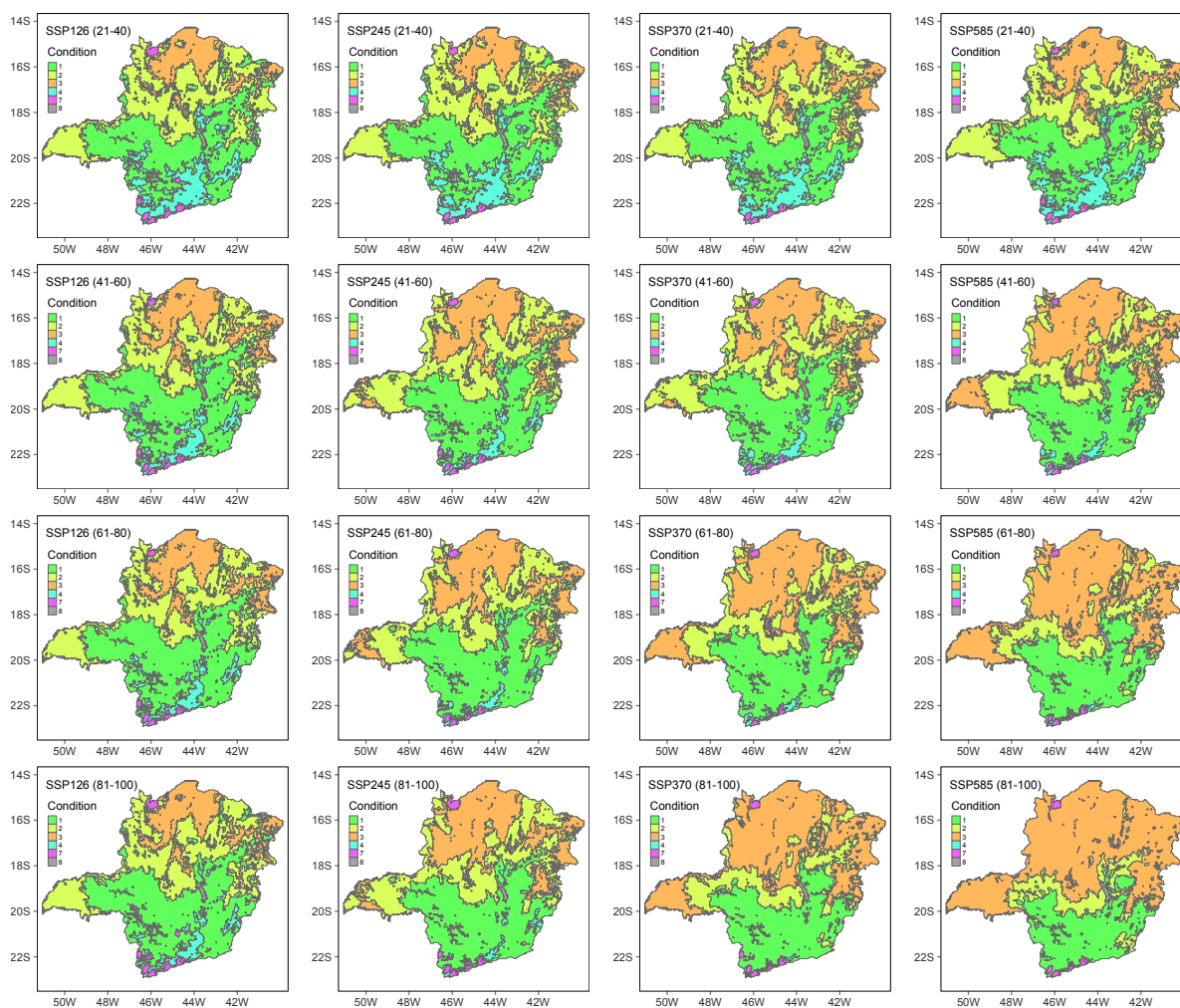
Fonte: Do autor (2024).

### 3.3.3 Cenários futuros de mudanças climáticas

O comportamento geral observado no zoneamento climático sob cenários futuros de mudanças climáticas (Figura 3.9), foi de redução das áreas restritas por temperatura (classe 3) e aumento das áreas inaptas por deficiência hídrica. Sob o cenário SSP126 (desenvolvimento sustentável), boa parte das terras na região do Triângulo Mineiro permaneceram aptas até 2100 enquanto que há avanço de terras inaptas por deficiência hídrica (classe 3) pela região norte do estado. Já em cenários mais rigorosos, o Triângulo Mineiro passa a perder parte considerável de suas terras climaticamente aptas, se tornando restritas por deficiência hídrica (classe 2) e posteriormente inaptas por deficiência hídrica (classe 3). A expansão das áreas inaptas por deficiência hídrica se mostrou mais acentuada conforme o cenário de emissões de gases de efeito estufa se torna mais rigoroso. Sob cenários SSP370 e SSP585, a classe 2 (restrita por

deficiência hídrica) é fortemente reduzida, dando lugar a uma condição de intenso contraste entre as classes apta e inapta por deficiência hídrica até 2100, em que somente a porção sul do estado apresenta aptidão climática.

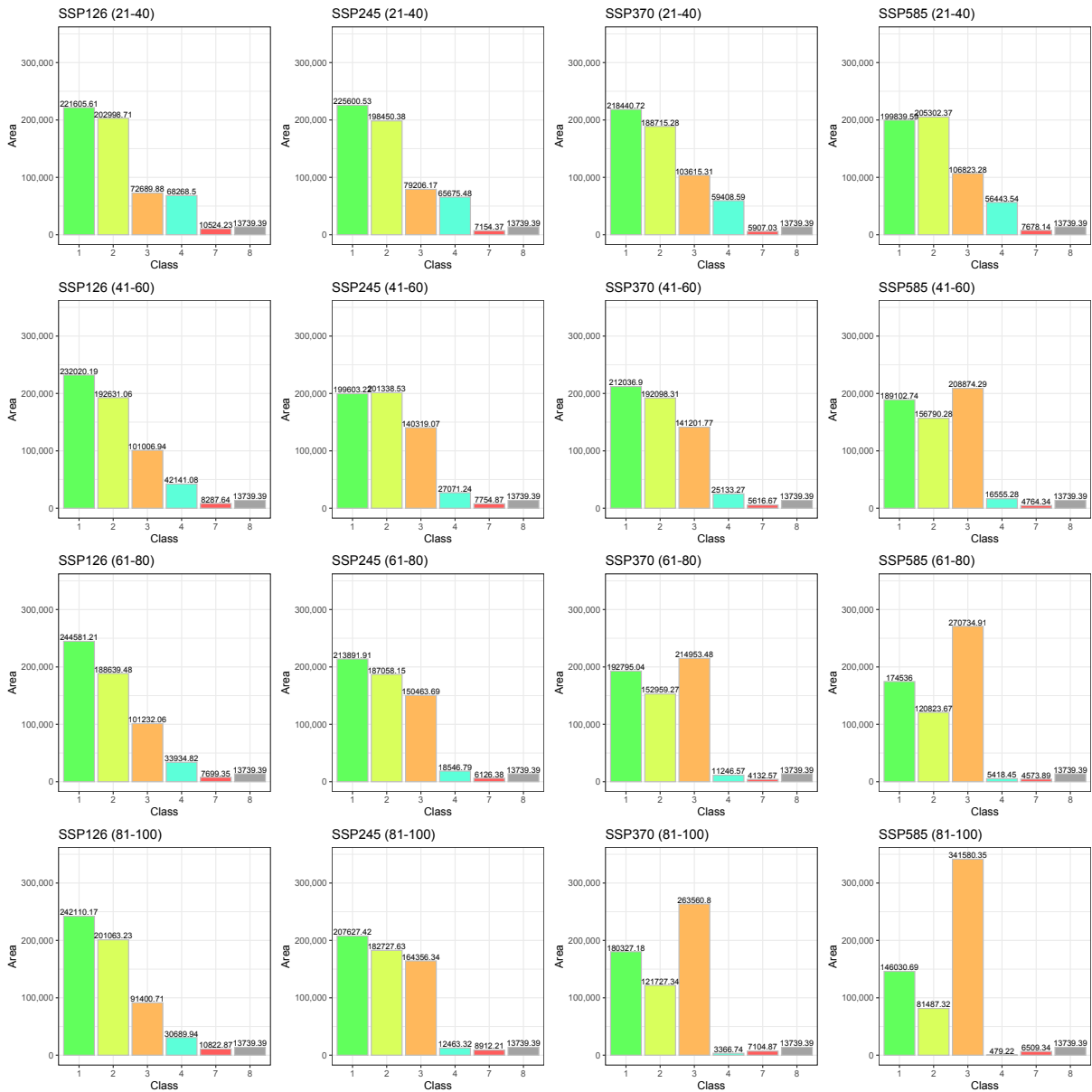
Figura 3.9 – Zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar em cenários futuros do modelo MRI-ESM2-0 do CMIP6.



Fonte: Do autor (2024).

Na Figura 3.10 é possível observar em termos de área a redução prevista para a classe restrita por temperatura em todos os cenários SSP. Apesar da redução desta classe, e sua consequente transformação em terras aptas, não se verificou tendência de aumento de área total da classe apta, devido a perdas por deficiência hídrica que se tornam mais intensas nos cenários SSP mais rigorosos. Portanto nota-se tendência de avanço de áreas com condições de restrição hídrica mais intensa.

Figura 3.10 – Áreas das classificações em cenários futuros do modelo MRI-ESM2-0 do CMIP6.



Fonte: Do autor (2024).

## 3.4 DISCUSSÃO

### 3.4.1 Dados climáticos e balanço hídrico

A distribuição espacial da temperatura média anual do produto CRU-TS-4.06 com correção de viés do WorldClim 2.1 utilizada neste estudo para o período 1991-2020 apresentou similaridade com os dados apresentados por Alves, Sanches e Carvalho (2022) referentes a estações climatológicas para o período 1981-2010 distribuídas pelo estado, indicando boa qualidade do produto.

Há falta de estudos envolvendo balanço hídrico e distribuição espacial da deficiência hídrica com CAD variável no estado de Minas Gerais. A distribuição espacial da deficiência hídrica anual foi similar ao verificado no produto TerraClimate (ABATZOGLOU et al., 2018) para o período 1991-2020, com a região norte do estado apresentando os valores mais acentuados de deficiência. Em relação à distribuição mensal da deficiência hídrica, os resultados demonstraram de forma clara dois períodos distintos, um seco e um úmido. O período seco apresentou início entre abril e maio e término em setembro, estando relacionado com o regime de chuvas. O período é similar ao verificado por Carvalho Júnior, Alves e Carvalho (2024) e Silva e Reboita (2013) em que a fase chuvosa em Minas Gerais se inicia em outubro e vai até a segunda metade de março, a partir daí dando início a fase seca. A deficiência hídrica causada pelo fim da época chuvosa é sentida a partir de maio inicialmente na porção norte do estado, onde a evapotranspiração é maior, reduzindo mais rapidamente as reservas de água no solo.

### **3.4.2 Zoneamento agroclimático**

O zoneamento demonstrou a presença de grande quantidade de terras aptas ao cultivo da cana-de-açúcar no estado, porém aproximadamente metade destas terras se encontram no nível M4, não sendo recomendadas à mecanização. O uso da mecanização no cultivo da cana-de-açúcar vem sendo amplamente utilizado no estado, tanto no plantio quanto na colheita, reduzindo a utilização da queima (GARCIA; SPERLING, 2017). Fato que leva a produção a se concentrar em terras mecanizáveis. Quando se considera a classe 2 (restrita por deficiência hídrica), nota-se uma presença muito grande de terras mecanizáveis. A expansão da irrigação vem ocorrendo na cultura da cana-de-açúcar e pode levar a maiores possibilidades de cultivo em zonas no norte do estado onde a temperatura mais elevada é favorável a alta produtividade. Conforme verificado por Cesconetto et al. (2018) na bacia do rio Paracatu no cerrado mineiro (região noroeste do estado) existe disponibilidade de água para avanço da irrigação.

A região do Triângulo mineiro (oeste do estado) apresentou maior incidência de terras aptas mecanizáveis. A maior parte da produção se situa nesta região, onde há a presença de uma agricultura mais tecnificada e moderna (GENARO; CHELOTTI, 2013), além de grande presença de usinas sucroalcooleiras. Na região sul do estado, apesar da restrição térmica, as terras têm potencial para produção de cana-de-açúcar em sequeiro para cachaça. De maneira geral boa parte da região sul do estado possui relevo acidentado que dificulta a mecanização e a produção em larga escala. A produção de cachaça em alambiques é muito difundida em todo

estado, incluindo a região sul, sendo a produção estadual reconhecida pela sua qualidade (LIZ et al., 2016; CARDEAL et al., 2008). Conforme anuário da cachaça, Minas Gerais possuía 353 estabelecimentos produtores de cachaça em 2021, maior número entre os estados brasileiros, correspondendo a 38% do total (MAPA, 2022). Tais elementos tornam a porção sul do estado apropriada para produção de cachaça artesanal, podendo agregar qualidade e valor ao seu produto.

Os resultados do zoneamento climático apresentaram diferenças em relação a outros estudos envolvendo o estado de Minas Gerais, como Reis et al. (2017), Almeida, Calijuri e Pinto (2013) e Machado et al. (2007), que também apresentam divergências entre si. Maior concordância foi observada entre este trabalho e o de Machado et al. (2007). Tais divergências ocorrem devido às diferenças nos parâmetros climáticos adotados, além do período de dados climáticos (mais recente no presente estudo) e variações referentes a CAD fixa adotada no balanço hídrico. Neste trabalho adotamos uma CAD variável conforme o solo local, aumentando o nível de realismo. Os estudos em geral não apresentam as áreas da classificação, tornando difícil comparações numéricas.

### **3.4.3 Cenários futuros de mudanças climáticas**

O comportamento do zoneamento agroclimático nos cenários futuros do modelo MRI-ESM2-0 demonstrou aumento de zonas aptas no sul do estado pelo aumento da temperatura média, porém esses ganhos se apresentaram pequenos e ocorreram em áreas de relevo inapropriado à mecanização. Por outro lado, houve aumento da deficiência hídrica nos cenários futuros tornando inaptas grandes extensões de terra, que se intensifica a medida que o cenário de emissões de gases de efeito estufa se torna mais rigoroso. Tal fato é causado pelo aumento da evapotranspiração consequente do aumento da temperatura, além da tendência de redução do total precipitado conforme verificado por Carvalho Júnior, Alves e Carvalho (2024) usando dados do modelo CNRM-ESM2-1. Em cenários mais rigorosos, a maior região produtora (Triângulo Mineiro) pode enfrentar dificuldades ou até a inviabilização do cultivo em sequeiro a partir de 2060.

Além do aumento da deficiência hídrica em cenários futuros, diversos modelos de mudanças climáticas apontam para ocorrência mais frequente de eventos extremos Kotz, Levermann e Wenz (2022). Tal fato potencializa os impactos na agricultura, já que além da redução no total precipitado, a concentração em chuvas intensas gera aumento de escoamento super-

ficial direto e menor armazenamento da água no solo. Portanto, o uso da irrigação pode se tornar cada vez mais indispensável na fração norte do estado e também no Triângulo Mineiro. A redução das vazões nos rios pode levar a intensificação de conflitos pelo uso da água para irrigação (BORSATO et al., 2020). A região do extremo norte, localizada em clima semiárido é a mais vulnerável, não apenas pela irregularidade nas chuvas mas também socialmente e economicamente (CRUZ; RIBEIRO; GALIZONI, 2018).

### 3.5 CONCLUSÃO

Foi possível com a realização do zoneamento agroclimático identificar regiões apropriadas no estado de Minas Gerais para cultivo de cana-de-açúcar em sequeiro e irrigada, sob níveis de mecanização, para o período 1991-2020. O uso da CAD variável permitiu maior realismo dos resultados. O uso do ambiente R e seus pacotes mostraram grande aptidão para realização deste trabalho com valiosos grupos de ferramentas. A metodologia empregada neste trabalho pode ser utilizada em outras regiões e novos zoneamentos climáticos, servindo também como subsídio para aplicação em outras culturas agrícolas.

O estado apresentou bom potencial para aumento da produção. Cerca de 8.11 milhões de hectares se apresentaram aptos ao cultivo de sequeiro e mecanizáveis. Isso significa a possibilidade de quadruplicar a área plantada dos atuais cerca de 1 milhão de hectares para 4 milhões de hectares.

Apesar do aumento da temperatura levar a maior aptidão térmica no sul do estado, os cenários futuros de mudanças climáticas demonstraram tendência de aumento da deficiência hídrica, que se intensifica conforme o cenário de emissão de gases de efeito estufa. A produção de sequeiro poderá ser inviabilizada em diversas zonas produtoras, como o Triângulo Mineiro, levando a uma necessidade cada vez maior do uso de irrigação. No cenário atual, o estado apresentou grande potencial de produção de etanol em sequeiro e em terras mecanizáveis, com capacidade de suprir boa parte da demanda nacional.

## REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, J. T. et al. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. **Scientific Data**, V. 5, N. 1, p. 1–12, 2018. DOI: 10.1038/sdata.2017.191.
- AGUIAR, D. A. et al. Remote Sensing Images in Support of Environmental Protocol: Monitoring the Sugarcane Harvest in São Paulo State, Brazil. **Remote Sensing**, V. 3, p. 2682–2703, 2011. DOI: 10.3390/rs3122682.
- ALMAZROUI, M. et al. Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. **Earth Systems and Environment**, V. 5, N. 2, p. 155–183, 2021. DOI: 10.1007/s41748-021-00233-6.
- ALMEIDA, T. S.; CALIJURI, M. L.; PINTO, L. B. Agro-climatological zoning of cane sugar for the Minas Gerais state based on multiple regressions. **Revista Brasileira de Meteorologia**, V. 28, N. 3, p. 352–355, 2013. DOI: 10.1590/S0102-77862013000300011.
- ALVES, M. d. C.; SANCHES, L.; CARVALHO, L. G. d. Geostatistical surfaces of climatological normals of mean air temperature in Minas Gerais. **Environmental Monitoring and Assessment**, V. 194, N. 7, p. 513, 2022. DOI: 10.1007/s10661-022-10162-0.
- ALVES, R. S.; COSTA ESCARELA, V. A. da et al. Statistical quality control applied to the quantification of losses in mechanized sugarcane harvesting as a function of primary extractor rotation. **Research, Society and Development**, V. 11, N. 16, p. 1–15, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i16.38611.
- AMARAL, F. C. S. et al. **Mapeamento de Solos e Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais**. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 95 p.
- ANA. **Capacidade de água disponível - CAD ou AWC dos solos no Brasil**. 2021. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/28fe4baa-66f3-4f6b-b0d2-890abf5910c4>>. Acesso em: 11 abr. 2024.
- ANDRADE, L. A. B.; ANDRADE, P. P. Implantação e condução de canaviais. In: EPAMIG. **Informe Agropecuário: cana-de-açúcar**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2007. V. 28, p. 44–54.
- AQUINO, G. S. de et al. Sistema radicular e produtividade de soqueiras de cana-de-açúcar sob diferentes quantidades de palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, FapUNIFESP (SciELO), V. 50, N. 12, p. 1150–1159, 2015. DOI: 10.1590/S0100-204X2015001200004.
- AUDE, M. I. S. Growth stages of sugarcane and its effects on productivity. **Ciência Rural**, V. 23, N. 2, p. 241–248, 1993. DOI: 10.1590/S0103-84781993000200022.
- BARBOSA, L. C. et al. Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. **Geoderma Regional**, Elsevier BV, V. 13, p. 15–25, 2018.
- BLASCHEK, M. et al. Prediction of soil available water-holding capacity from visible near-infrared reflectance spectra. **Scientific Reports**, V. 9, N. 1, 2019. DOI: 10.1038/s41598-019-49226-6.

BORDONAL, R. O. et al. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, V. 38, N. 2, p. 1–23, 2018. DOI: 10.1007/s13593-018-0490-x.

BORSATO, E. et al. Weak and Strong Sustainability of Irrigation: A Framework for Irrigation Practices Under Limited Water Availability. **Front Sustain Food Syst**, V. 4, p. 1–16, 2020. DOI: 10.3389/fsufs.2020.00017.

BORTOLETTO, A. M.; ALCARDE, A. R. Assessment of chemical quality of Brazilian sugar cane spirits and cachaças. **Food Control**, V. 54, p. 1–6, 2015. DOI: 10.1016/j.foodcont.2015.01.030.

BRUNINI, O. et al. **Zoneamento de culturas bioenergéticas no Estado de São Paulo: aptidão edafoclimática da cultura da cana-de-açúcar**. Campinas: IAC, 2008. 31 p.

CARDEAL, Z. L. et al. Comprehensive two-dimensional gas chromatography for fingerprint pattern recognition in cachaça production. **Talanta**, V. 74, N. 4, p. 793–799, 2008. DOI: 10.1016/j.talanta.2007.07.021.

CARNEIRO, V. A.; CASAROLI, D. Sugar Cane: A Climatic Approach. **Revista Mirante**, V. 8, N. 3, p. 33–47, 2015.

CARVALHO JÚNIOR, F. V. d.; ALVES, M. d. C.; CARVALHO, L. G. d. Analysis of rainfall variations and coffee production areas with climate change in Minas Gerais via future scenarios. **Theoretical and Applied Climatology**, p. 1–22, 2024. DOI: 10.1007/s00704-024-04979-7.

CASTRO, F. S. et al. Impact of IPCC global climate change projections on agroclimatic zoning of sugarcane crops in South America. **Brazilian Journal of Development**, V. 6, N. 5, p. 28410–28427, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n5-331.

CESCONETTO, L. B. et al. Potentiality of sugarcane expansion under irrigation conditions considering natural and potential water availability. **Agricultural Water Management**, V. 203, p. 162–171, 2018. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.03.008.

COLLICCHIO, E. et al. Implications of climatic changes on agroclimatic sugarcane zoning for Tocantins State, considering the GFDL model. **Revista Brasileira de Geografia Física**, V. 8, N. 6, p. 1730–1747, 2015. DOI: 10.26848/rbgf.v8i6.233686.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar**. 1. ed. Brasília: Conab, 2024. V. 11. 52 p.

CRUZ, G. C. da; RIBEIRO, E. M.; GALIZONI, F. M. Semiarid, dry and "Gerais" North of Minas Gerais: a review of the bibliography on the high-middle São Francisco. **Revista Campo-Território**, V. 13, p. 29–56, 2018. DOI: 10.14393/RCT133102. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/campoterritorio/article/view/46151>>.

DIAS, F. M. F. Alguns elementos sobre a cadeia produtiva da cana-de-açúcar no Brasil. **Geosul**, V. 36, N. 79, p. 116–142, 2021. DOI: 10.5007/2177-5230.2021.e73805.

DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; ANDRADE LANDELL, M. G. de. **Cana-de-açúcar**. 1. ed. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. 882 p.

DRUMMOND, J. **Biodiversity in Minas Gerais - An Atlas for Its Conservation**. Belo Horizonte, 2005.

EYRING, V. et al. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**, V. 9, p. 1937–1958, 2016. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016. Disponível em: <<https://gmd.copernicus.org/articles/9/1937/2016/>>.

FARIAS, C. A. H. et al. Índices de crescimento da cana-de-açúcar irrigada e de sequeiro no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, V. 12, N. 4, p. 356–362, 2008. DOI: 10.1590/S1415-43662008000400004.

FARONI, C. E.; TRIVELIN, P. C. O. Quantification of sugarcane active metabolism roots. **Pesquisa agropecuária brasileira**, V. 41, N. 6, p. 1007–1013, 2006. DOI: 10.1590/S0100-204X2006000600017.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, V. 37, p. 4302–4315, 2017. DOI: 10.1002/joc.5086. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.5086>>.

FIRPO, M. A. F. et al. Assessment of CMIP6 models' performance in simulating present-day climate in Brazil. **Frontiers in Climate**, V. 4, p. 1–27, 2022. DOI: 10.3389/fclim.2022.948499.

GARCIA, J. C. C.; SPERLING, E. V. Greenhouse gas emissions from sugar cane ethanol: Estimate considering current different production scenarios in Minas Gerais, Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, V. 72, p. 1033–1049, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2017.01.046.

GENARO, F.; CHELOTTI, M. C. Transformation in the agro cerrado mineiro: analyzes from the Agricultural Censuses of 1995/96 and 2006 in mesoregion Triângulo Mineiro/Alto Paraíba. **Revista Eletrônica de Geografia**, V. 5, N. 14, p. 63–77, 2013.

GÓMEZ, A. M. R. et al. Digital mapping of the soil available water capacity: tool for the resilience of agricultural systems to climate change. **Science of the Total Environment**, V. 882, p. 163572, 2023. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163572.

HACKENBERGER, B. K. R software: unfriendly but probably the best. **Croat Med J.**, V. 61, p. 66–68, 2020. DOI: 10.3325/cmj.2020.61.66.

HARRIS, I. et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. **International Journal of Climatology**, V. 34, p. 623–642, 2014. DOI: 10.1002/joc.3711.

- HIJMANS, R. J.; BIVAND, R. et al. **Package ‘terra’**. 2023. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/terra/terra.pdf>>. Acesso em: 4 nov. 2023.
- HIJMANS, R. J.; ETTEEN, J. van et al. **raster: Geographic Data Analysis and Modeling**. 2020. Disponível em: <<https://rspatial.org/raster>>. Acesso em: 10 nov. 2022.
- IBGE. **Cidades e Estados - Minas Gerais**. 2023. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg.html>>. Acesso em: 11 out. 2023.
- \_\_\_\_\_. **Malha municipal 2021. Mapas, bases e referenciais, bases cartográficas, malhas digitais**. 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=acesso-ao-produto>>. Acesso em: 10 nov. 2022.
- KOTZ, M.; LEVERMANN, A.; WENZ, L. The effect of rainfall changes on economic production. **Nature**, V. 601, p. 223–227, 2022. DOI: 10.1038/s41586-021-04283-8. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41586-021-04283-8>>.
- LI, Y.-R. Growth and Development of Sugarcane (*Saccharum spp. Hybrid*) and Its Relationship with Environmental Factors. In: **AGRO-INDUSTRIAL Perspectives on Sugarcane Production under Environmental Stress**. [S.l.]: Springer Nature Singapore, 2022. P. 1–11. DOI: 10.1007/978-981-19-3955-6\_1.
- LIZ, C. N. et al. Produção de cachaça artesanal e seu contexto: um estudo de caso com alambiques do sul de Minas Gerais. **Revista da UI<sub>1</sub>PSantarm**, V. 4, N. 4, p. 1–20, 2016. DOI: 10.25746/ruiips.v4.i4.14459.
- LOVELACE, R.; NOWOSAD, J.; MUENCHOW, J. **Geocomputation with R**. [S.l.]: CRC Press, 2019. DOI: 10.1201/9780203730058.
- MACHADO, M. L. et al. Zoneamento agropedoclimático da cana-de-açúcar. In: **EPAMIG. Informe Agropecuário: cana-de-açúcar**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2007. V. 28, p. 12–18.
- MAGALHÃES, P. S. G.; BRAUNBECK, O. A. Sugarcane and straw harvesting for ethanol production. In: CORTEZ, L. A. B. **Sugarcane bioethanol — RD for Productivity and Sustainability**. São Paulo: Blucher, 2014. P. 465–476. DOI: 10.5151/BlucherOA-Sugarcane-SUGARCANEETHANOL\_43.
- MANZATTO, C. V. et al. **Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar: expandir a produção, preservar a vida, garantir o futuro**. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55 p.
- MAPA. **Anuário da cachaça 2021**. 1. ed. Brasília: MAPA/AECS, 2022. 29 p.
- MATOS, M. de; SANTOS, F.; EICHLER, P. Chapter 1 - Sugarcane world scenario. In: **SUGARCANE Biorefinery, Technology and Perspectives**. [S.l.]: Elsevier, 2020. P. 1–19. DOI: 10.1016/b978-0-12-814236-3.00001-9.

MATOS, R. M. de; SILVA, P. F. da et al. Agroclimatic potential for mango culture in the municipality of Barbalha CE. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, V. 12, N. 1, p. 2366–2373, 2018. DOI: 10.7127/rbai.v12n100732.

MEDEIROS, F. J.; OLIVEIRA, C. P. de; AVILA-DIAZ, A. Evaluation of extreme precipitation climate indices and their projected changes for Brazil: From CMIP3 to CMIP6. **Weather and Climate Extremes**, V. 38, p. 100511, 2022. DOI: 10.1016/j.wace.2022.100511.

MEINSHAUSEN, M. et al. The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. **Geoscientific Model Development**, V. 13, N. 8, p. 3571–3605, 2020. DOI: 10.5194/gmd-13-3571-2020.

MINGALEV, D. E. Agroclimatic Zoning of Russia and Kazakhstan under Current Climate Change. **Geography and Natural Resources**, V. 42, N. 2, p. 115–121, 2021. DOI: 10.1134/S1875372821020086.

OLIVEIRA APARECIDO, L. E. de et al. Climate Efficiency for Sugarcane Production in Brazil and its Application in Agricultural Zoning. **Sugar Tech**, V. 23, N. 4, p. 776–793, 2021. DOI: 10.1007/s12355-020-00949-1.

PEBESMA, E. Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. **The R Journal**, V. 10, N. 1, p. 439–446, 2018. DOI: 10.32614/RJ-2018-009. Disponível em: <<https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>>.

\_\_\_\_\_. **stars: Spatiotemporal Arrays, Raster and Vector Data Cubes**. 2022. Disponível em: <<https://r-spatial.github.io/stars/>>. Acesso em: 10 nov. 2022.

PEREIRA, D. S. et al. Production of forage of sugarcane and pigeon pea grown in monoculture and consortium. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, V. 7, N. 4, p. 80–87, 2018. DOI: 10.21206/bjsa.v7i4.421.

RAMALHO FILHO, A.; PEREIRA, E. G.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agríolas das terras**. Brasília: Empresa Brasileira de Agropecuária, 1978. 55 p.

REIS, L. S. dos et al. Agroclimatic zoning of crops with energy potential in the state of Minas Gerais. **Revista Espinhaço**, V. 1, N. 6, p. 50–63, 2017.

SÁ JÚNIOR, A. et al. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, V. 108, p. 1–7, 2012. DOI: 10.1007/s00704-011-0507-8.

SALES, C. R. G. et al. Flexibility of C4 decarboxylation and photosynthetic. **Environmental and Experimental Botany**, V. 149, p. 34–42, 2018. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2017.10.027.

SERRANO-NOTIVOLI, R.; LONGARES, L. A.; CÁMARA, R. bioclim: An R package for bioclimatic classifications via adaptive water balance. **Ecological Informatics**, V. 71, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101810>.

- SILVA, D. L. G.; BATISTI, D. L. S. et al. Sugarcane: Economic, social, environmental, by-products and sustainability. **Research, Society and Development**, V. 10, N. 7, e44410714163, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i7.14163.
- SILVA, E. D.; REBOITA, M. S. Precipitation estudy for Minas Gerais state, Brazil. **Revista Brasileira de Climatologia**, V. 13, p. 120–136, 2013.
- STAPLES, T. L. Expansion and evolution of the R programming language. **Royal Society Open Science**, V. 10, N. 221550, p. 1–12, 2023. DOI: 10.1098/rsos.221550.
- TENNEKES, M. tmap: Thematic Maps in R. **Journal of Statistical Software**, V. 84, N. 6, p. 1–39, 2018. DOI: 10.18637/jss.v084.i06.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Climatology**, Centerton, V. 8, N. 1, 1955.
- TORCATO, A. A.; SANTOS FACHINELLI FERRARINI, A. dos. The reflection of sugar cane harvest mechanization in remuneration of independent suppliers from Sertãozinho's region. **Economia Região**, V. 3, N. 2, p. 7–24, 2015. DOI: 10.5433/2317-627X.2015v3n2p7.
- WALDHEIM, P. V. et al. Sugar Cane, Orange and Herbaceous Cotton Climatic Zoning for the Northeast Region of Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências**, V. 29, N. 2, p. 30–43, 2006. DOI: 10.11137/2006\_2\_30-43.
- WOLLMANN, C. A.; GALVANI, E. Zoneamento agroclimático: linhas de pesquisa e caracterização teórica-conceitual. V. 25, N. 1, p. 179–190, 2013. DOI: 10.1590/S1982-45132013000100014.
- YUKIMOTO, S. et al. The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, V. 97, N. 5, p. 931–965, 2019. DOI: 10.2151/jmsj.2019-051.
- ZHAO, L. et al. Sugarcane root distribution and growth as affected by genotype and crop cycle. **Bragantia**, V. 79, N. 2, p. 192–202, 2020. DOI: 10.1590/1678-4499.20190407.
- ZHENG, Y. et al. High-resolution map of sugarcane cultivation in Brazil using a phenology-based method. **Earth System Science Data**, V. 14, N. 4, p. 2065–2080, 2022. DOI: 10.5194/essd-14-2065-2022.

**4 ARTIGO 2 – ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO E DE MECANIZAÇÃO DO CAFÉ ARÁBICA NO ESTADO DE MINAS GERAIS SOB CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

## RESUMO

O café arábica tem grande importância econômica no estado de Minas Gerais e no Brasil, sendo produzido desde a agricultura familiar até a empresarial. Os zoneamentos agroclimáticos são essenciais no planejamento agrícola de uma região. Teve-se por objetivo a realização do zoneamento agroclimático do café arábica no estado de Minas Gerais no cenário atual e futuro de mudanças climáticas. Foram utilizadas superfícies climáticas para o período 1991-2020 e em cenários futuros de mudança climáticas do produto WorldClim 2.1. Foi considerado mapeamento de CAD do solo e produto de possibilidade de mecanização. Obteve-se zoneamentos com alto nível de detalhamento que possibilitam a identificação mais precisa das zonas de interesse. O uso de múltiplas classes no mesmo mapa facilitaram a visualização das informações. Aproximadamente 23% do território do estado se encontrou em condições climaticamente favoráveis. Cerca de 58% da área climaticamente apta se situou em classe não recomendada à mecanização. Foi verificada forte redução de zonas climaticamente aptas para produção em sequeiro nos cenários futuros de mudanças climáticas.

**Palavras-chave:** Climatologia. WorldClim. MRI-ESM2-0. Superfícies climáticas. Balanço hídrico.

## ABSTRACT

Arabica coffee has great economic importance in the state of Minas Gerais and in Brazil, being produced from family to business agriculture. Agroclimatic zoning is essential in the agricultural planning of a region. The objective was to carry out the agroclimatic zoning of Arabica coffee in the state of Minas Gerais in the current and future scenario of climate change. Climate surfaces were used for the period 1991-2020 and in future climate change scenarios from the WorldClim 2.1 product. CAD mapping of the soil and the possibility of mechanization were considered. Zoning with a high level of detail was obtained, enabling more precise identification of areas of interest. The use of multiple classes on the same map made it easier to visualize information. Approximately 23% of the state's territory was in favorable climatic conditions. Around 58% of the climatically suitable area was in a class not recommended for mechanization. There was a strong reduction in areas climatically suitable for rainfed production in future climate change scenarios.

**Keywords:** Climatology. WorldClim. MRI-ESM2-0. Climate surfaces. Water balance.

## 4.1 INTRODUÇÃO

O café arábica possui grande importância econômica para o estado de Minas Gerais, representando cerca de 84% do valor de produção das culturas perenes no estado e 55% do café arábica produzido no Brasil, destacando-se as regiões do Sul/Sudoeste de Minas e Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba pela alta produção e produtividade (VALE; CALDERARO; FAGUNDES, 2014; IBGE, 2021b). A espécie de café de maior relevância são o arábica (*Coffea arabica* L.) e canéfora (*Coffea canephora* P.) (CHEMURA et al., 2021). Entre 60 e 70% do café comercializado mundialmente é da espécie arábica devido a suas bebidas de sabores apreciados (CARVALHO, A. C. et al., 2017; ROMANI et al., 2012), sendo o Brasil, maior produtor e exportador mundial (CALDARELLI; GILIO; ZILBERMAN, 2018; VOLSI et al., 2019).

O cafeeiro arábica é mais sensível em relação a espécie canéfora, possuindo requisitos hídricos e térmicos diferenciados (CHEMURA et al., 2021). A temperatura média anual considerada mais favorável é em torno de 19 °C a 21 °C e o déficit hídrico anual inferior a 150 mm (MATIELLO, 1991; THOMAZIELLO et al., 1996). Conforme esquema fenológico do cafeeiro (CAMARGO; CAMARGO, 2001), a planta possui um ciclo bienal em que as fases vegetativa e reprodutiva ocorrem simultaneamente de Setembro a Junho. A demanda hídrica é elevada durante a fase reprodutiva e baixa durante a colheita e repouso (CARVALHO, I. R. et al., 2013; MATIELLO, 1991; PETEK; SERA; BATISTA FONSECA, 2009). A deficiência hídrica ocorrida antes do início das chuvas é benéfica para a uniformidade da florada (MEIRELES, 2009), portanto, a transição bem definida de uma estação seca para chuvosa é importante no contexto fenológico da planta.

O sistema radicular pivotante do cafeeiro arábica apresenta em média 1,2 m de profundidade (RENA; GUIMARAES, 2000). Solos pouco desenvolvidos apresentam restrições ao uso agrícola, capacidade de armazenamento de água e profundidades incompatíveis com as demandas radiculares do cafeeiro. No estado de Minas Gerais, os Latossolos ocupam 53,5% do território, seguidos dos Cambissolos com 18% e Argissolos 12% (COELI et al., 2018). Como os Cambissolos apresentam horizonte B em fase inicial de desenvolvimento (COELI et al., 2018; RESENDE et al., 2014), Latossolos e Argissolos constituem os tipos de solos desenvolvidos mais comuns no estado. Apenas 3.1% das terras de Minas Gerais são consideradas férteis, enquanto 75.2% possuem baixa disponibilidade de nutrientes, muitas vezes com a presença de altos níveis de alumínio tóxico (AMARAL et al., 2004). As limitações químicas, muito presente nos Latossolos, podem ser resolvidas com corretivos e fertilizantes (AMARAL et al.,

2004; SILVA; OLIVEIRA, 2021). Já as limitações físicas, constituem além do clima um fator limitante de grande relevância. No contexto atual de cafeicultura mecanizada, se torna essencial considerar os níveis de impedimento a mecanização na avaliação de um solo para cafeicultura.

O zoneamento agroclimatológico é uma importante ferramenta para o planejamento agrícola. O uso de superfícies climáticas interpoladas de alta resolução espacial tem potencial de captar características climáticas em escala regional (NEW et al., 2002), produzindo com isso, zoneamentos mais detalhados. A maioria dos estudos de zoneamento para café, não apresenta de maneira detalhada a metodologia utilizada. Na maioria dos casos são utilizados softwares comerciais de interface GUI, em que não se tem acesso aos métodos e rotinas empregadas no processamento dos dados. O R é uma linguagem de programação open-source, constituindo um ambiente de desenvolvimento e aplicação de análise de dados que vem sofrendo rápida evolução (STAPLES, 2023). Um dos pontos fortes da linguagem é a grande quantidade de pacotes disponíveis que permitem diversos tipos de análises de dados (HACKENBERGER, 2020). A abordagem em linha de comando do R, ao invés do foco em interface gráfica (GUI), permite que os trabalhos tenham máxima reprodutibilidade (LOVELACE; NOWOSAD; MUNCHOW, 2019).

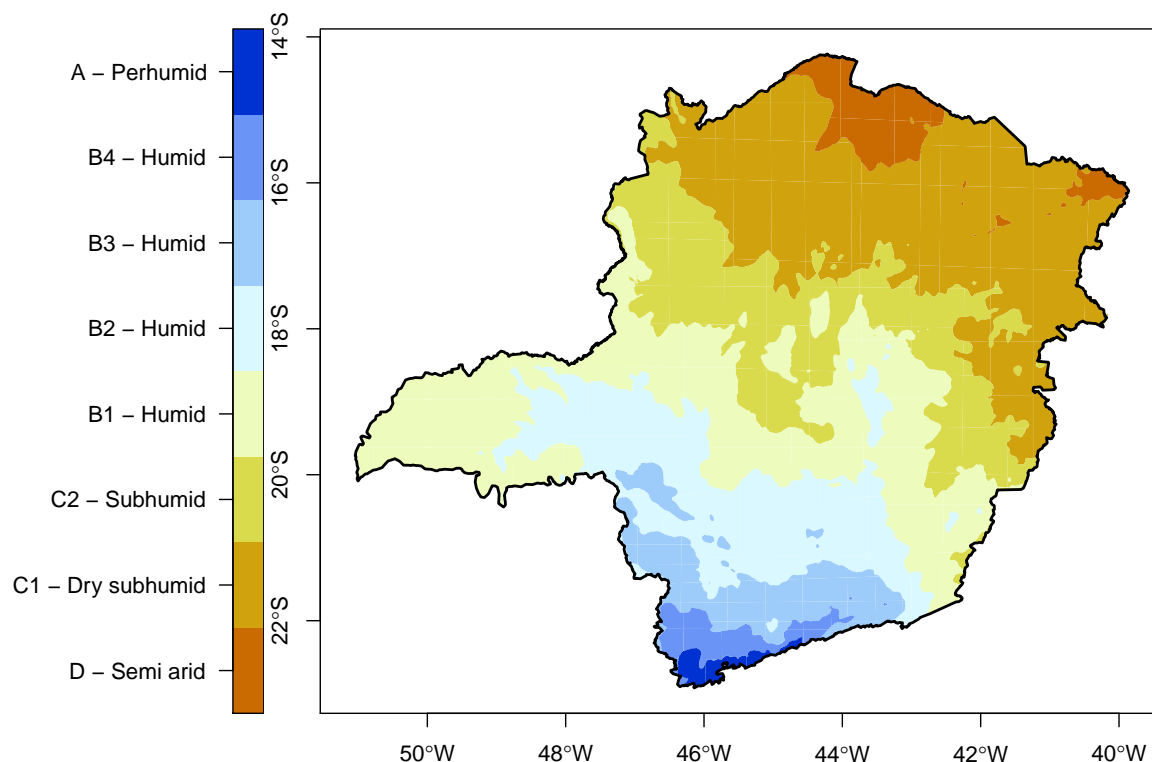
O objetivo desse trabalho foi utilizar superfícies climáticas interpoladas de alta resolução espacial para realizar o zoneamento agroclimatológico atual e futuro do cafeeiro arábica no estado de Minas Gerais incluindo o critério possibilidade de mecanização, permitindo uma fácil identificação das regiões de interesse por meio de geovisualização científica, com todo o processamento e análises realizados por meio do ambiente de programação livre R. Pretende-se quantificar as áreas em todas condições de aptidão ou restrição climática e de mecanização.

## **4.2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.2.1 Caracterização da área de estudo**

Minas Gerais apresenta uma extensão territorial de aproximadamente 586 mil  $km^2$  sendo o quarto estado brasileiro mais extenso. E uma população residente de 20,5 milhões de habitantes (IBGE, 2023), segundo mais populoso. Na Figura 4.1 tem-se a classificação climática de Thornthwaite modificada (CARVALHO, L. G. et al., 2010), na qual foi considerada a evapotranspiração Penman–Monteith–FAO (ALLEN et al., 1998). Os climas são classificados conforme o índice de umidade.

Figura 4.1 – Classificação climática de Thornthwaite modificada para Minas Gerais.



Fonte: Do autor (2024).

Quando considerada a classificação de Köppen, estão presentes os grupos climáticos tropical chuvoso (A), seco (B) e temperado quente (C), com as classes Aw (Tropical de inverno seco), Cwa (Subtropical de inverno seco) e Cwb (Subtropical de altitude) ocupando 99,89% do território (SÁ JÚNIOR et al., 2012). Verifica-se grande complexidade climática, influenciada fortemente pelo relevo, com a formação de microclimas (ÁVILA et al., 2014). O estado abrange desde o bioma da Mata Atlântica, até o Cerrado e a Caatinga (DRUMMOND, 2005).

#### 4.2.2 Superfícies interpoladas de temperatura e precipitação

Foram utilizadas superfícies interpoladas do projeto WorldClim (FICK; HIJMANS, 2017). Se tratam de dados reduzidos de escala da base CRU-TS-4.06 (HARRIS et al., 2014) utilizando o WorldClim 2.1 para correção de viés. A resolução espacial adotada foi de 2.5 minutos (aprox. 5 km na área de estudo). Considerando a dimensão do estado e os custos computacionais esta resolução se mostrou apropriada. As variáveis utilizadas foram temperatura máxima média mensal (°C), temperatura mínima média mensal (°C) e precipitação total mensal (mm).

O período utilizado para caracterização do clima atual foi de 1991-2020 correspondendo a 30 anos.

### 4.2.3 Balanço hídrico mensal

Foi realizado o balanço hídrico mensal pelo método de Thornthwaite (THORNTHWAITE; MATHER, 1955). Os dados de entrada para o cálculo do balanço hídrico são a temperatura média mensal, a precipitação total mensal e a latitude local. Portanto, a temperatura média mensal foi calculada como a média das temperaturas máxima média e mínima média recortadas pelo contorno do estado de Minas Gerais por meio do pacote `terra` (HIJMANS et al., 2023) no R. O produto vetorial do contorno do estado foi obtido do produto *Malha municipal 2021* (IBGE, 2021a).

Além disso é necessário fornecer a capacidade de água disponível (CAD) a ser considerada no cálculo. A CAD para uma determinada cultura varia conforme o tipo de solo e a profundidade do sistema radicular. Alguns estudos têm adotado uma CAD fixa de 100 mm para o café arábica (SANTOS; CAMARGO, 2006). Porém a CAD apresenta uma variação espacial de acordo com o tipo de solo de cada região. Para este trabalho, a CAD para cada localização foi considerada no balanço hídrico, sendo utilizado o produto vetorial *Capacidade de água disponível - CAD ou AWC dos solos no Brasil* da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2021). Este produto consiste na distribuição espacial dos valores de CAD em  $m^{-3} m^{-3}$ . Para utilização em conjunto com as superfícies climáticas, o mapeamento da CAD precisou ser transformado em raster por meio da função `rasterize` do pacote `terra` no R na mesma resolução de 2.5 minutos. Para obter a CAD para a cultura do café arábica foi aplicada a equação 4.1 em que Z é a profundidade efetiva do sistema radicular. A profundidade efetiva das raízes do café arábica é variável de acordo com as condições do solo. Conforme apresentado por Matiello et al. (2020), estudos realizados em três regiões de Minas Gerais demonstraram que aproximadamente 80% das raízes finas se situaram na profundidade de até 0,85 m. Adotamos uma profundidade efetiva neste estudo de 0,85 m.

$$CAD_{\text{cafe}} \text{ (mm)} = CAD \left( \frac{m^3}{m^3} \right) \cdot Z(m) \cdot 1000 \left( \frac{L}{m^3} \right) \quad (4.1)$$

O pacote `bioclim` (SERRANO-NOTIVOLI; LONGARES; CÁMARA, 2022) no R foi utilizado para cálculo do balanço hídrico em cada pixel utilizando como entrada as superfícies climáticas de temperatura média, precipitação e CAD. A partir do balanço hídrico mensal cal-

culado, foram obtidos os parâmetros de deficiência hídrica anual (Da) e excedente hídrico anual (Ea).

Foram obtidos os mapas cloropléticos da distribuição espacial da CAD para cana-de-açúcar, da deficiência hídrica mensal e anual a partir de legenda única com uso do pacote `stars` (PEBESMA, 2022) no R.

#### 4.2.4 Zoneamento agroclimático e de mecanização

Os parâmetros para o zoneamento agroclimático do café arábica são a temperatura média anual (Temp) e deficiência hídrica anual (DH). Com relação à temperatura, Santinato, Fernandes e Fernandes (1996) apresentam a faixa de 18-23°C como apta, sendo 19-22°C o ideal. Valores similares são apresentados por Matiello et al. (2020), sendo as faixas de 18-19°C e 22-23°C consideradas marginais. Ainda de acordo com os autores, temperaturas médias anuais acima de 22-23°C prejudicam a frutificação com abortamento de flores e ocorrência de estrelinhas. Tal efeito pode reduzir drasticamente a produtividade. De acordo com Thomaziello et al. (1996) a faixa ideal está entre 19 e 21°C. Portanto adotamos como condição termicamente apta a faixa de 19 a 21°C de temperatura média anual.

Em relação à deficiência hídrica anual Santinato, Fernandes e Fernandes (1996) apresentam como aptas sem irrigação as regiões onde a deficiência é inferior a 100 mm. Necessidade ocasional de irrigação para faixa 100-150 mm, necessidade de irrigação complementar para faixa 150-200 mm e irrigação obrigatória para deficiência acima de 200 mm. De acordo com Matiello et al. (2020), deficiência anual entre 100 e 200 mm é considerada faixa marginal necessitando de irrigação ocasional e obrigatória acima de 200 mm. Já Thomaziello et al. (1996) apresentam como aptas regiões até 150 mm de deficiência anual. Estudos têm demonstrado que o café arábica tolera até 150 mm de deficiência anual. Regiões com deficiência anual de 100 a 150 mm podem apresentar anos com deficiência acima de 150 mm sendo prejudicial ao cafeeiro (SANTINATO; FERNANDES; FERNANDES, 1996). Porém condições de solos mais profundos e cultivares mais resistentes à seca como Acauã e Siriema podem atenuar os efeitos da deficiência hídrica (MATIELLO et al., 2020). Foi adotado de maneira geral como aptas hídricamente as regiões até 150 mm de deficiência anual, porém esta condição deve ser analisada de maneira particular.

Na Tabela 4.1 estão apresentadas as condições lógicas utilizadas para classificação das áreas conforme aptidão climática para o café arábica e parâmetros obtidos da referida literatura.

Tabela 4.1 – Parâmetros e classes de aptidão climática para café arábica.

Condição	Operação lógica
Apto	Temp $\geq$ 19 and Temp $\leq$ 21 and DH $<$ 150
Restrito por DH	Temp $\geq$ 19 and Temp $\leq$ 21 and DH $\geq$ 150 and DH $\leq$ 200
Restrito por Temp	Temp $\geq$ 18 and Temp $\leq$ 19 or (Temp $\geq$ 21 and Temp) $\leq$ 23 and DH $<$ 150
Restrito por Temp and DH	Temp $\geq$ 18 and Temp $\leq$ 19 or (Temp $\geq$ 21 and Temp $\leq$ 23) and DH $\geq$ 150 and DH $\leq$ 200
Unsuitable by Temp	Temp $>$ 23 or Temp $<$ 18 and DH $<$ 150
Inapto por DH	DH $>$ 200 and Temp $\geq$ 19 and Temp $\leq$ 21
Inapto por Temp e restrito por DH	Temp $<$ 18 or Temp $>$ 23 and DH $\geq$ 150 and DH $<$ 200
Inapto por DH e restrito Temp	DH $>$ 200 and Temp $\geq$ 18 and Temp $\leq$ 19 or (Temp $\geq$ 21 and Temp $\leq$ 23)
Inapto por Temp e DH	DH $>$ 200 and Temp $>$ 23 or Temp $<$ 18

Para análise de possibilidade de mecanização, utilizou-se o produto disponibilizado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (AMARAL et al., 2004) em que os solos foram classificados da classe M1 a M4 quanto à possibilidade de mecanização. Na Tabela 4.2 estão dispostas as descrições de cada classe conforme metodologia apresentada por (RAMALHO FILHO; PEREIRA; BEEK, 1978). No contexto da cafeicultura, para implementação de novas lavouras, as classes M1 e M2 são possíveis de mecanização com maior facilidade. No nível M3, a mecanização é mais dispendiosa, devendo ser analisada a viabilidade técnica e econômica. Já o nível M4 a mecanização não é recomendada. Convém ressaltar que com o avanço da tecnologia de maquinário agrícola, declividades cada vez maiores tem sido atingidas nas recomendações de operação.

Tabela 4.2 – Níveis de possibilidade de mecanização das terras.

Nível	Descrição	Declive	Rendimento do trator
M1 - Alto	Sem limitação ao uso de máquinas e implementos	> 6%	> 90%
M2 - Médio	Baixa limitação ao uso de máquinas e implementos	6-12%	70-90%
M3 - Baixo	Limitação moderada a forte.	12-20%	50-70%
M4 - Muito baixo	Impedimentos muito fortes.	> 20%	> 50%

As representações visuais para a distribuição espacial das classes de aptidão climática e de mecanização foram obtidas por meio do pacote `tmap v4` (TENNEKES, 2018) no R. As classes de mecanização foram recortadas pelas zonas onde o cultivo é possível, sendo as aptas, restritas por deficiência hídrica ou inaptas por deficiência hídrica. Usou-se a função `st_intersection` do pacote `sf` (PEBESMA, 2018) para realizar tal operação, obtendo-se as classes de mecanização dentro das zonas onde o cultivo é possível. A área das classes foi calculada por meio da função `st_area` do pacote `sf` com entrada em latitude e longitude para área geodésica sobre elipsoide WGS84.

#### 4.2.5 Cenários futuros de mudanças climáticas

Foi adotado o modelo `MRI-ESM2-0` (YUKIMOTO et al., 2019) do CMIP6. Este modelo tem um bom desempenho em estudos disponíveis para regiões que abrangem Minas Gerais. No estudo de Firpo et al. (2022), o modelo `MRI-ESM2-0` esteve entre os três com maior habilidade para simular a precipitação em cinco regiões de estudo dentro do Brasil. Dentre essas regiões, nas duas que abrangem partes do estado de Minas Gerais, o modelo também esteve entre os que apresentaram maior correlação entre a simulação e a base de referência. Boa concordância entre modelo `MRI-ESM2-0` e produtos de referência para temperatura e precipitação foi obtido por Almazroui et al. (2021) em regiões de estudo que abrangem Minas Gerais.

Foi utilizado o produto reduzido de escala e calibrado pelo WorldClim v2.1 do modelo MRI-ESM2-0 do CMIP6 com resolução de 2.5 minutos referentes às médias mensais de 20 anos dos períodos 2021-2040, 2041-2060, 2061-2080, 2081-2100 nos quatro cenários SSP (Shared Socio-economic Pathways) 126, 245, 370 e 585. Os dados correspondem à precipitação pluvial mensal e temperatura máxima e mínima mensais. Para obtenção da temperatura média, foi realizada a média das temperaturas máxima e mínima. Foi realizado o balanço hídrico mensal e o zoneamento agroclimático de modo idêntico ao realizado com os dados históricos. Obteve-se o zoneamento agroclimático para o café arábica nos 4 cenários SSP e 4 períodos futuros, totalizando 16 cenários de mudanças climáticas. A área das classificações foi obtida e representada por meio de gráfico de barras com eixos padronizados para cada cenário, permitindo as devidas comparações.

### **4.3 RESULTADOS**

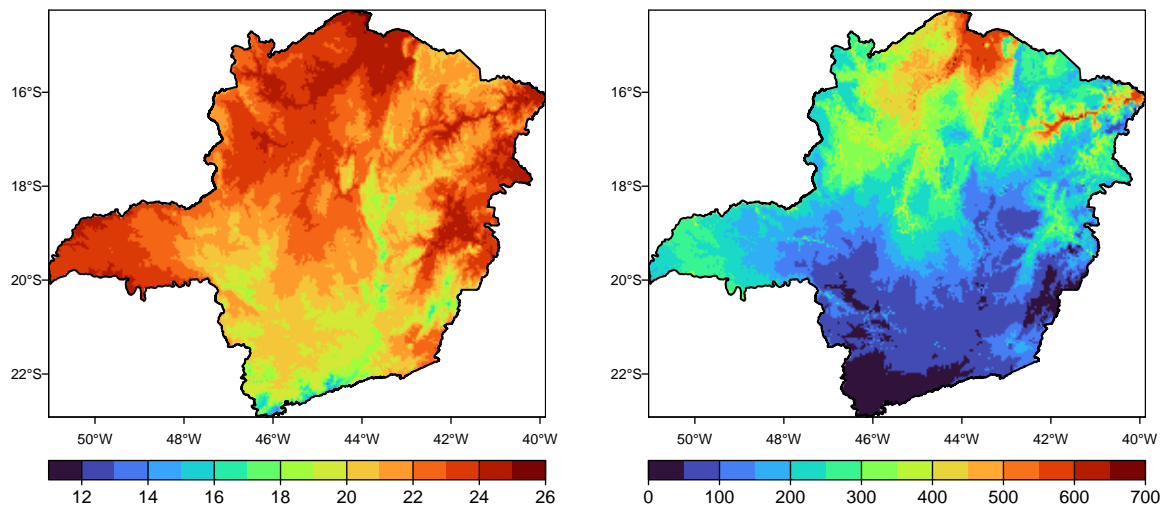
#### **4.3.1 Balanço hídrico mensal**

Os valores de temperatura média anual variaram entre 11,43 e 25,23 °C. O valor médio para o estado foi de 21,91 °C. Na Figura 4.2 é possível observar a distribuição espacial da temperatura. Regiões mais elevadas apresentaram menores temperaturas, como na Serra da Mantiqueira no sul do estado, na serra do Espinhaço na porção centro-norte, Serra do Brigadeiro na Zona da Mata mineira e Serra da Canastra a sudoeste. Por outro lado, as regiões de menor altitude no norte, nordeste, leste e Triângulo Mineiro, apresentaram as temperaturas mais elevadas.

Os valores de deficiência hídrica anual variaram de 0 a 693 mm. O valor médio de deficiência hídrica anual para o estado foi de 213 mm. Na Figura 4.2, nota-se que partes da região sul e do leste estado apresentam deficiência hídrica anual inferior a 50 mm. Já na região norte os valores ultrapassam os 300 mm. Desta forma é possível identificar forte contraste de disponibilidade hídrica entre as porções norte e sul do estado.

Para distribuição mensal do déficit hídrico (Figura 4.3), nos meses de novembro e dezembro, nenhuma região do estado apresentou déficit. A partir do mês de janeiro foi possível observar que o déficit hídrico se inicia na região do vale do Jequitinhonha e se estende para o norte e leste do estado a partir de abril. No mês de agosto, o déficit hídrico atinge a sua maior extensão, abrangendo praticamente todo o estado. Em setembro, observa-se um processo in-

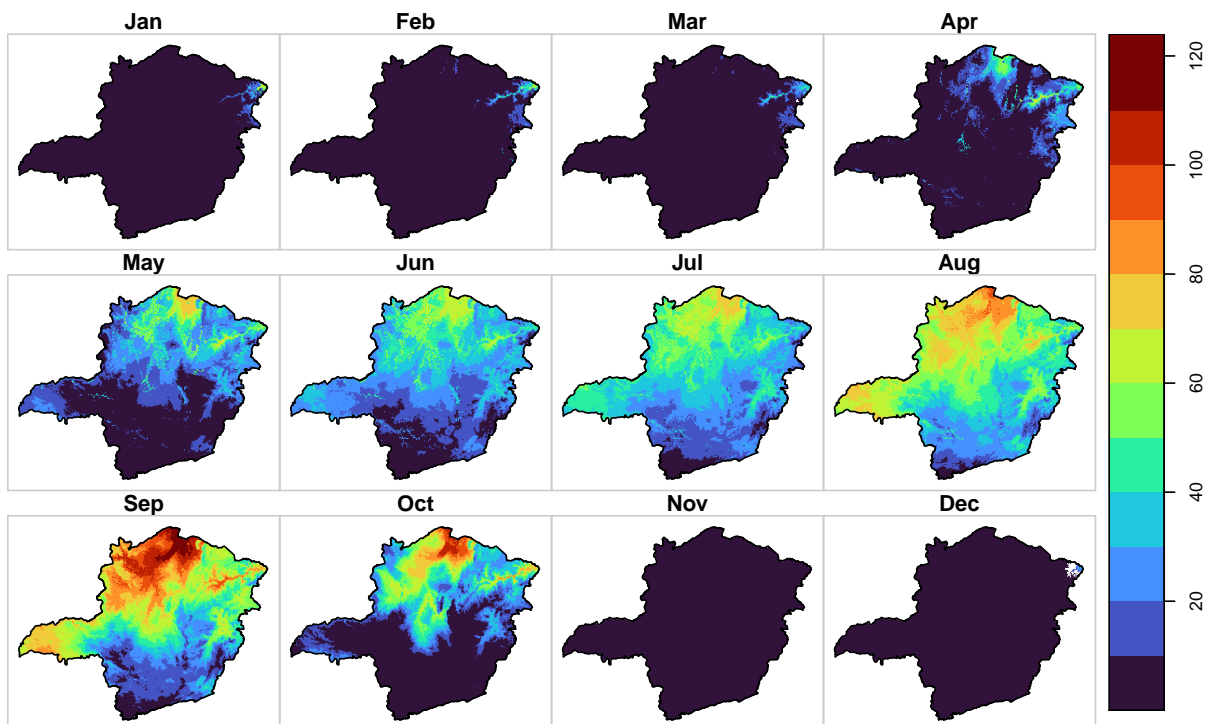
Figura 4.2 – Temperatura média anual (°C) (esquerda) e Deficiência hídrica anual (mm) para o café.



Fonte: Do autor (2024).

verso, com o retorno da disponibilidade hídrica ocorrendo inicialmente na parte sul, enquanto que no norte se atinge os maiores valores de déficit hídrico mensal. O retorno da disponibilidade hídrica na porção norte se dá apenas a partir de outubro.

Figura 4.3 – Deficiência hídrica mensal (mm).

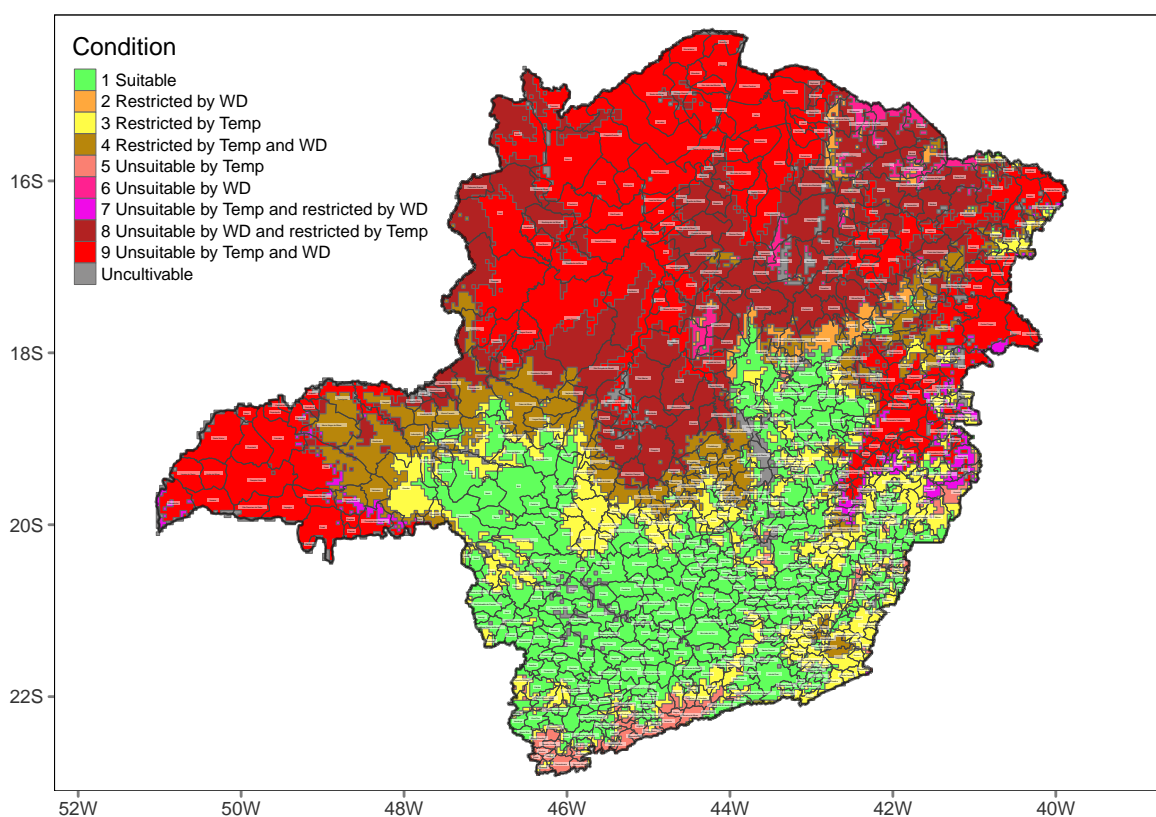


Fonte: Do autor (2024).

### 4.3.2 Zoneamento agroclimático e de mecanização

O zoneamento obtido após aplicadas as condições lógicas, sem considerar o solo, está representado na Figura 4.4. Obteve-se um alto nível de detalhamento e o uso da malha municipal permite identificar com maior facilidade as regiões de interesse. Aproximadamente 23% do território estadual se demonstrou climaticamente apto. As áreas obtidas para cada classe constam na Tabela 4.5.

Figura 4.4 – Zoneamento agroclimático para o café arábica no estado de Minas Gerais.

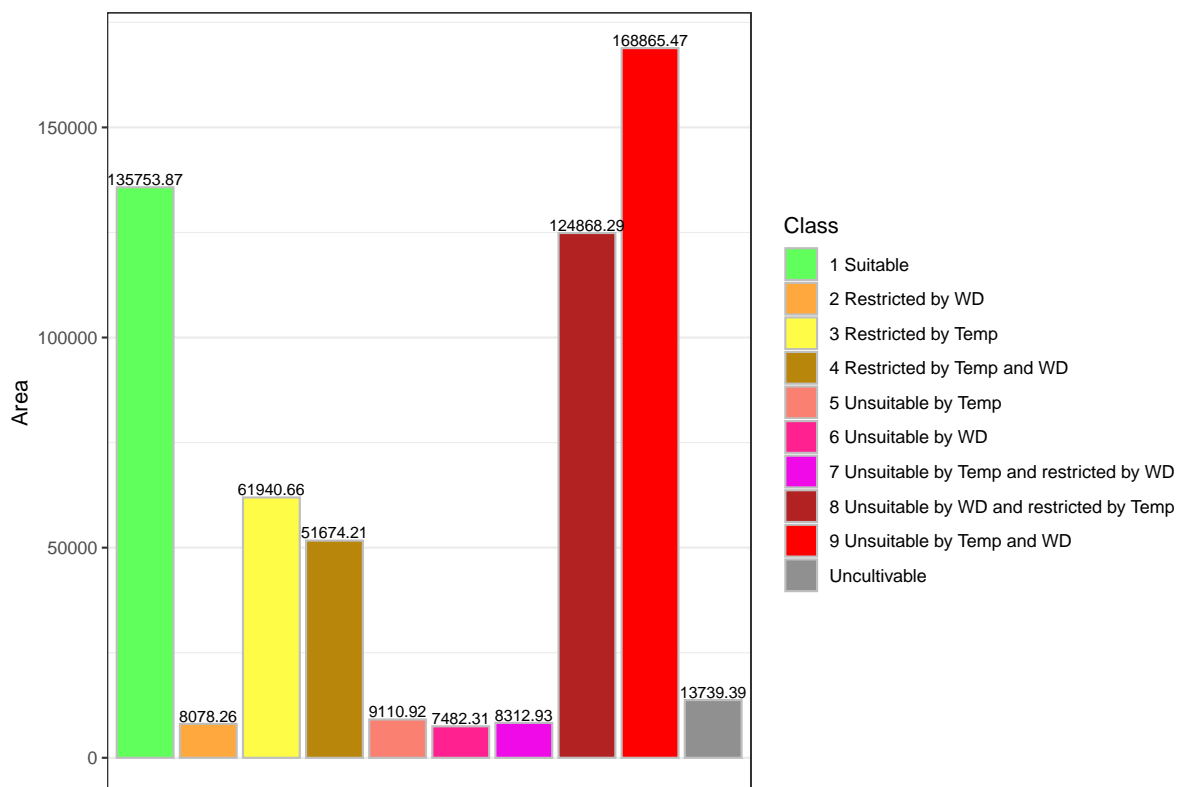


Fonte: Do autor (2024).

Na Figura 4.6 são apresentadas as classes de possibilidade de mecanização dentro da área climaticamente apta (lado esquerdo). Também são apresentadas as classes de possibilidade de mecanização dentro das classes climáticas 2, 3, 4, 6 e 8, onde o cultivo seria possível com adoção de irrigação (Figura 4.6 (lado direito)). As classes climáticas estão hachuradas com a sua respectiva cor adotada no zoneamento agroclimático (Figura 4.4).

Foi observada uma grande presença do nível M4, em que a mecanização não é recomendada, dentro da área climaticamente apta. O nível M4 também foi predominante nas outras classes climáticas em que é possível o cultivo. A maior presença de terras nível M1 e M2 com

Figura 4.5 – Áreas das classes de aptidão ( $km^2$ ) ( $1 km^2 = 100 ha$ ).



Fonte: Do autor (2024).

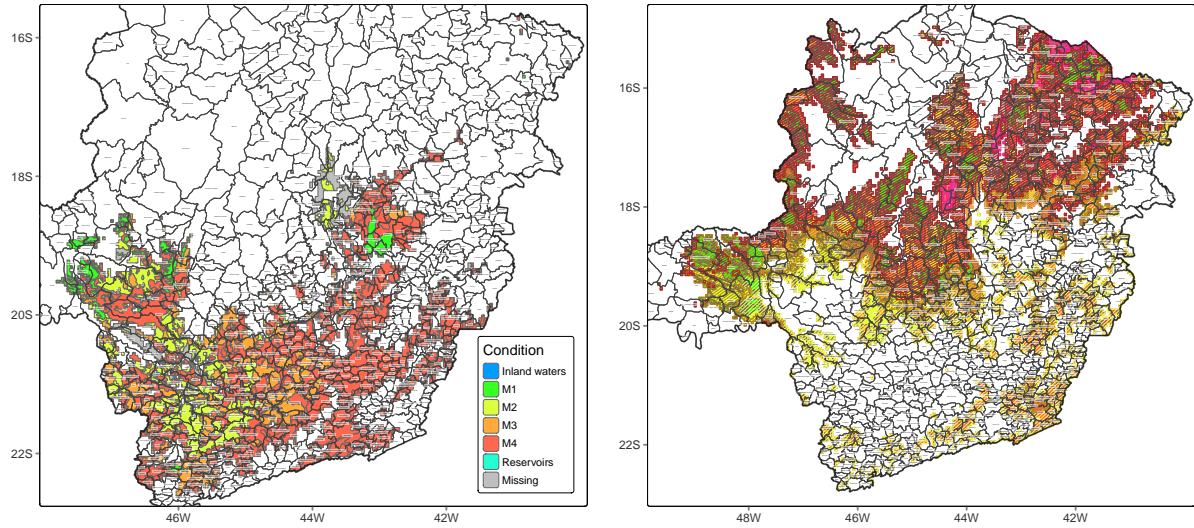
alto potencial de mecanização se deu na classe climática 8 (inapta por deficiência hídrica e restrito por temperatura) em que a irrigação tecnificada se torna obrigatória. Na Figura 4.7 em que são apresentadas as áreas calculadas dos níveis de mecanização nas classes climáticas foi possível notar tal condição.

### 4.3.3 Cenários futuros de mudanças climáticas

Na Figura 4.8 estão dispostos os zoneamento agroclimáticos para os 16 cenários de mudanças climáticas. Nota-se a tendência de redução da classe climaticamente apta em todos os cenários. Nos cenários mais rigorosos a redução é intensa e ocorre já no período 2041-2060. Inicialmente as zonas aptas passaram para classe 3 (restrito por temperatura) devido ao aumento da temperatura. Ao mesmo tempo é verificado o avanço da classe 9 (inapta por temperatura e deficiência hídrica) que atinge boa parte do estado.

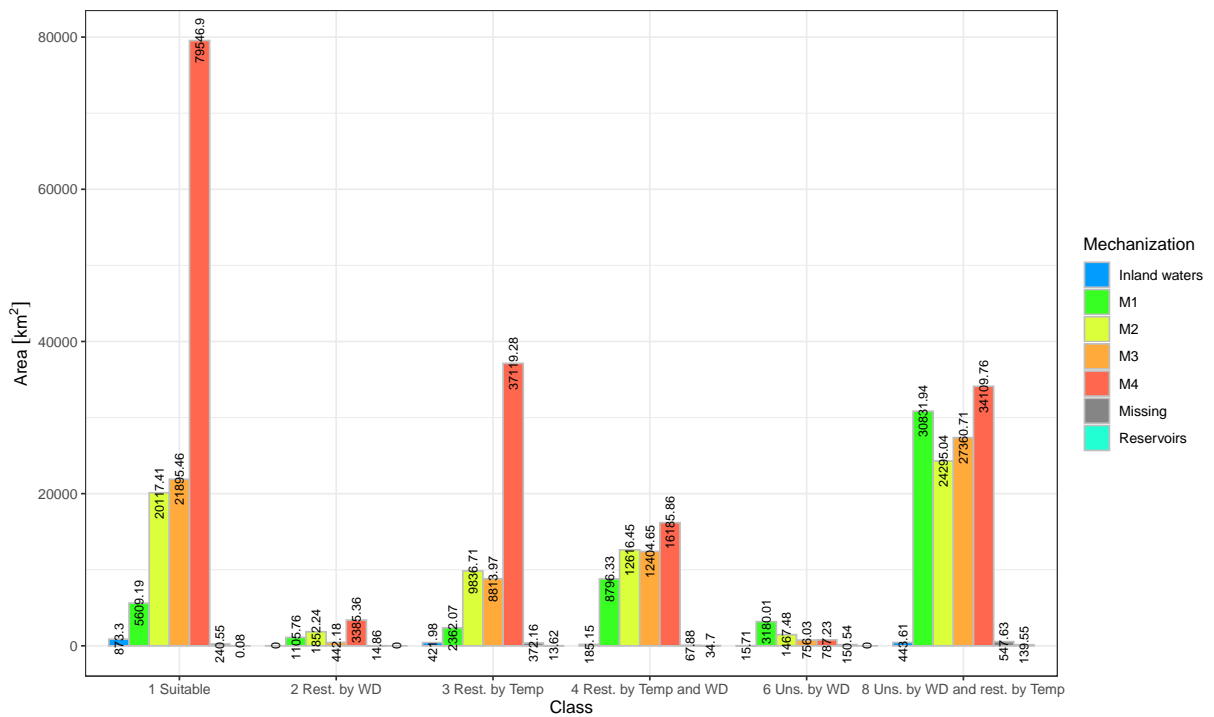
Na Figura 4.9 estão dispostas as áreas das classes climáticas nos 16 cenários de mudanças climática avaliados. Nota-se rápido crescimento da classe 9. Apenas no cenário SSP126 há

Figura 4.6 – Níveis de possibilidade de mecanização dentro da classe climaticamente apta (lado esquerdo). Níveis de possibilidade de mecanização nas classes 2, 3, 4, 6 e 8, em que o cultivo irrigado é possível.



Fonte: Do autor (2024).

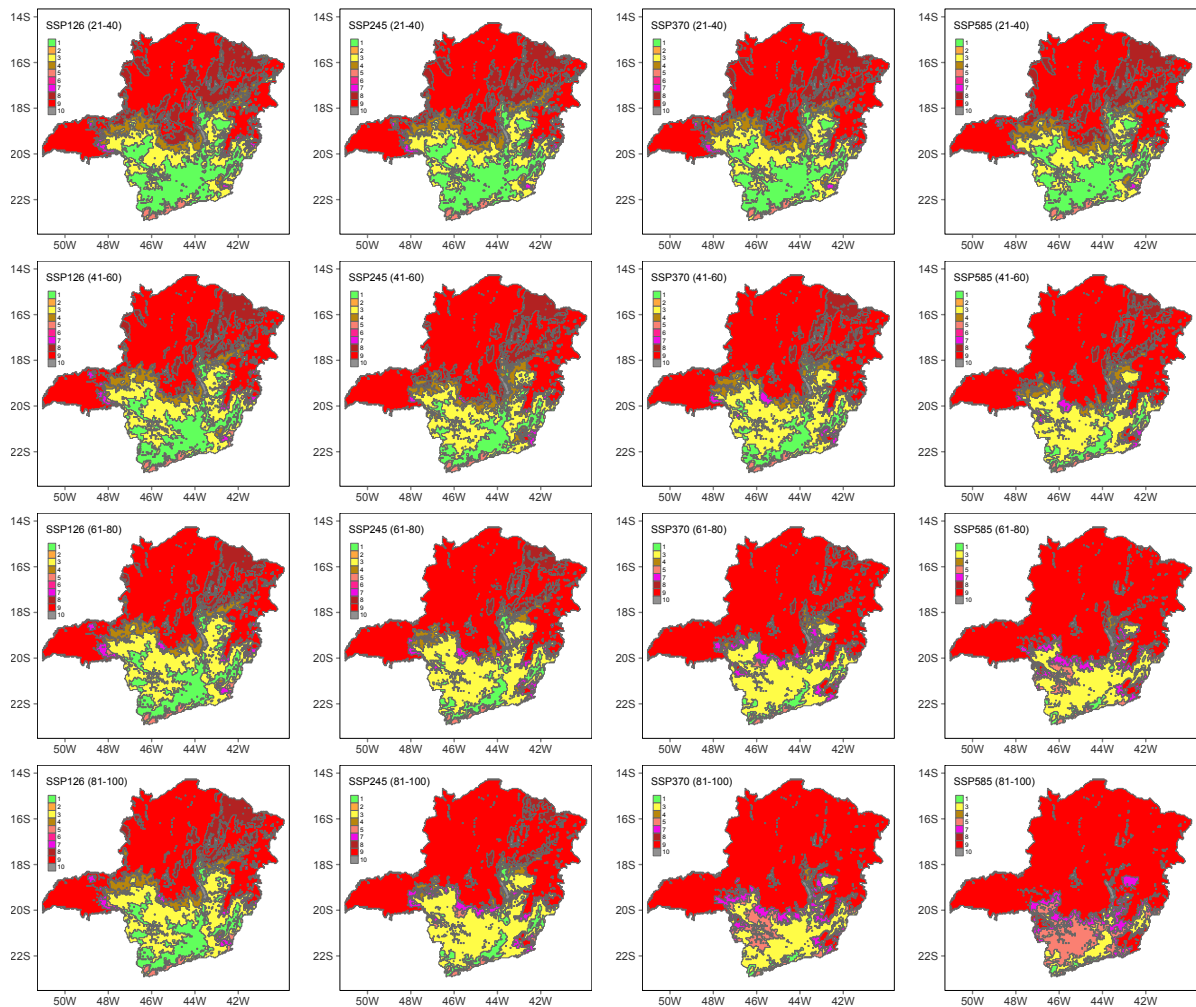
Figura 4.7 – Áreas dos níveis de mecanização por classe de aptidão climática (km<sup>2</sup>).



Fonte: Do autor (2024).

a manutenção considerável da classe 1 (apta) no período 2081-2100, com redução de aproxi-

Figura 4.8 – Zoneamento agroclimático do café arábica em cenários futuros do modelo MRI-ESM2-0 do CMIP6.



Fonte: Do autor (2024).

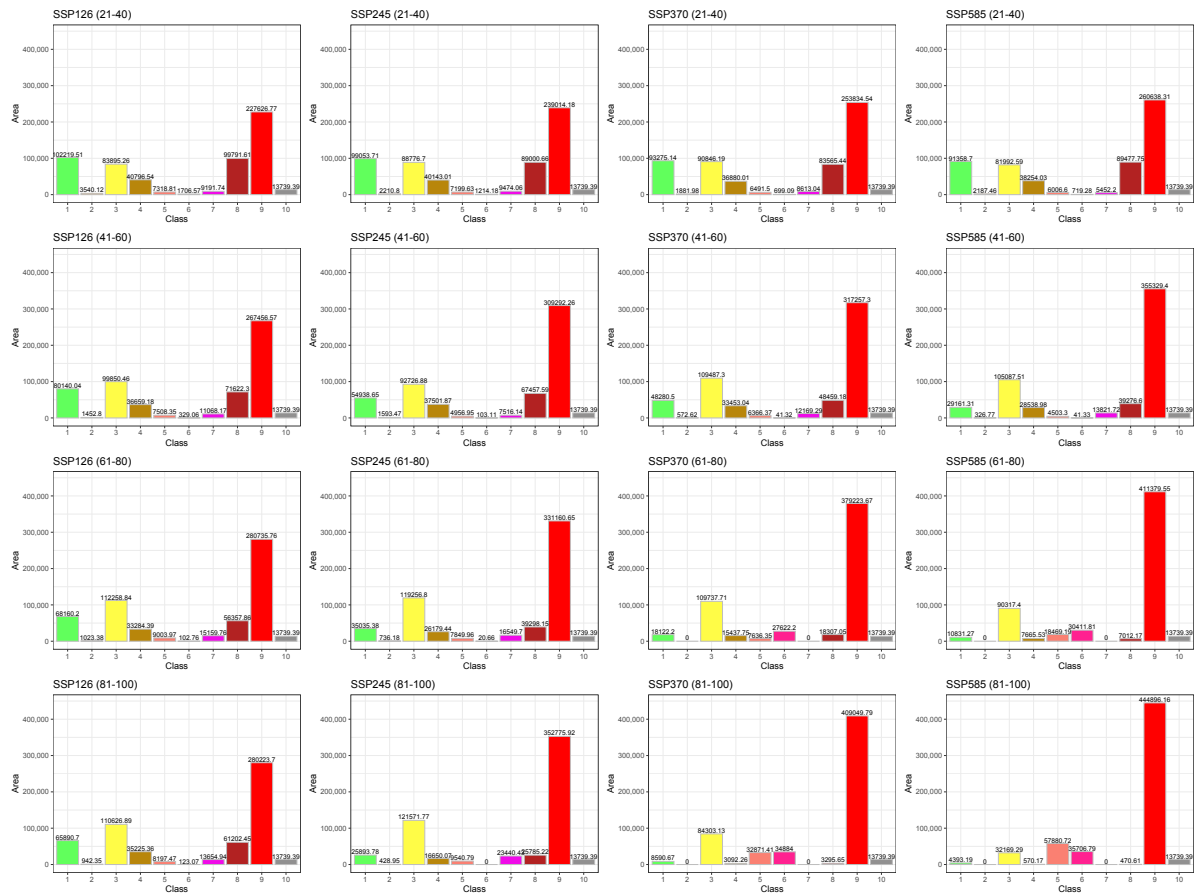
madamente 50% de sua área em relação ao período histórico. Nos demais cenários a redução é drástica no período 2081-2100.

## 4.4 DISCUSSÃO

### 4.4.1 Dados climáticos e balanço hídrico

A distribuição espacial da temperatura média anual do produto CRU-TS-4.06 com correção de viés do WorldClim 2.1 utilizada neste estudo para o período 1991-2020 apresentou similaridade com os dados apresentados por Alves, Sanches e Carvalho (2022) referentes a estações climatológicas para o período 1981-2010 distribuídas pelo estado, indicando boa qualidade do produto.

Figura 4.9 – Áreas das classificações em cenários futuros do modelo MRI-ESM2-0 do CMIP6.



Fonte: Do autor (2024).

Há falta de estudos envolvendo balanço hídrico e distribuição espacial da deficiência hídrica com CAD variável no estado de Minas Gerais. A distribuição espacial da deficiência hídrica anual foi similar ao verificado no produto TerraClimate (ABATZOGLOU et al., 2018) para o período 1991-2020, com a região norte do estado apresentando os valores mais acentuados de deficiência. Em relação à distribuição mensal da deficiência hídrica, os resultados demonstraram de forma clara dois períodos distintos, um seco e um úmido. O período seco apresentou início entre abril e maio e término em setembro, estando relacionado com o regime de chuvas. O período é similar ao verificado por Carvalho Júnior, Alves e Carvalho (2024) e Silva e Reboita (2013) em que a fase chuvosa em Minas Gerais se inicia em outubro e vai até a segunda metade de março, a partir daí dando início a fase seca. A deficiência hídrica causada pelo fim da época chuvosa é sentida a partir de maio inicialmente na porção norte do estado, onde a evapotranspiração é maior, reduzindo mais rapidamente as reservas de água no solo.

Durante o período seco, o cafeeiro apresenta baixa demanda hídrica (MATIELLO, 1991). O período de déficit hídrico que antecede o regime chuvoso é benéfico, pois é o principal fato que induz a florada, contribuindo com sua uniformidade (CAMARGO; CAMARGO, 2001; MEIRELES, 2009). Foi observado que no mês de Agosto, praticamente todo o estado apresentou déficit hídrico, indicativo favorável para condução da cafeicultura. O mapeamento de deficiência hídrica anual demonstrou que a região norte do estado possui forte limitação hídrica para cultivo de café, com deficiência anual acima de 200 mm em praticamente toda a região.

#### **4.4.2 Zoneamento agroclimático**

O zoneamento climático apresentou similaridades aos encontrados em outros estudos (EVANGELISTA; CARVALHO; SEDIYAMA, 2002; SEDIYAMA et al., 2001), porém com nível de detalhamento superior e área apta inferior. Os dados de superfícies climáticas de alta resolução foram capazes de produzir um zoneamento em que se identificam variações dentro das áreas consideradas aptas em outros estudos. O estudo realizado por Sedyama et al. (2001) apresentou uma área apta maior. A diferença pode ser explicada pelos critérios mais restritivos adotados nesse trabalho, como CAD variável ao invés de 125 mm e menor faixa de temperatura. Nos referidos estudos não foram apresentadas as áreas das classificações, o que dificulta comparações numéricas.

Em relação a possibilidade de mecanização, 58% da área climaticamente apta se situou na classe M4, em que a mecanização não é recomendada. Isso se desse ao relevo movimentado do estado, muitas vezes associado a altitude, onde o clima costuma ser mais apropriado ao cafeeiro arábica. A classe M2 apresentou área considerável (15%) e é passível de mecanização sem muitos impeditivos. Em relação a colheita, autores reportam o valor máximo de declividade de 15% para colhedoras de café, porém o número é variável conforme o modelo do equipamento (SILVA; CARVALHO, 2011). Portanto, as classes M1 e M2 atendem com segurança o requisito de declividade. Com novas colhedoras no mercado operando em declividades cada vez maiores, as classes M3 e M4 podem ser aptas a colheita mecanizada a depender das especificações técnicas da máquina.

#### **4.4.3 Cenários futuros de mudanças climáticas**

A redução das áreas aptas observada em todos os cenários futuros de mudanças climática indica para uma futura inviabilização de parte das áreas atualmente cultiváveis. A área de cultivo

em sequeiro poderá ser a mais afetada, já que além do aumento da temperatura, há tendência de acentuação da deficiência hídrica, principalmente nas regiões fora do sul do estado.

Os zoneamentos obtidos são para média de 20 anos, porém os estudos referentes à mudanças climáticas têm demonstrado a crescente incidência de eventos extremos, como chuvas de alta intensidade e ondas de calor (KOTZ; LEVERMANN; WENZ, 2022). Tal fato acentua o efeito negativo das mudanças climáticas nas lavouras cafeeiras, já que a má distribuição do acumulados reduz a disponibilidade de água no solo ao longo do ciclo produtivo. Por outro lado, as ondas de calor cada vez mais intensas podem levar a ocorrências mais frequentes de abortamento de flores e estrelinhas, efeitos resultantes das altas temperaturas que podem reduzir drasticamente a produtividade (MATIELLO et al., 2020).

As condições futuras do clima poderão levar à migração das lavouras cada vez mais para o sul do estado e/ou para áreas de maior altitude. Conforme os mapeamentos apresentados, apenas a região sul do estado ainda terá condições de cultivo em sequeiro, porém serão necessárias maiores altitudes para satisfazer as condições térmicas. Sabe-se que a temperatura diminui em média  $0,6^{\circ}\text{C}$  a cada 100 m de aumento na altitude (HIRASUGA; LEUNG, 2019). Há de se considerar os desafios desta migração e a baixa disponibilidade de terras mecanizáveis em altitudes superiores. O desenvolvimento de novas cultivares mais resistentes à seca e altas temperaturas poderá desempenhar um papel essencial na manutenção da produção.

#### 4.5 CONCLUSÃO

Foi possível obter com bom nível de detalhamento a distribuição espacial da temperatura média e déficit hídrico o que resultou em um zoneamento agroclimatológico capaz de captar variações em escala pormenorizada. O uso do ambiente R se demonstrou totalmente viável, com boa disponibilidade de pacotes e funções para todas as etapas deste trabalho.

As nove classes simultâneas utilizadas permitiram avaliar a condição local e o eventual fator limitante para o cultivo do arábica. Aproximadamente 23% do território do estado se encontrou em condições climaticamente favoráveis. Cerca de 58% da área climaticamente apta se situou em classe não recomendada à mecanização.

Os cenários futuros de mudanças climáticas apontam para uma redução das áreas climaticamente aptas e aumento de terras inaptas por temperatura e deficiência hídrica. Tal fato poderá levar à migração de lavouras para zonas de maior altitude e adoção mais frequente de irrigação.

## REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, J. T. et al. TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. **Scientific Data**, V. 5, N. 1, p. 1–12, 2018. DOI: 10.1038/sdata.2017.191.
- ALLEN, R. et al. **Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. 300 p.
- ALMAZROUI, M. et al. Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. **Earth Systems and Environment**, V. 5, N. 2, p. 155–183, 2021. DOI: 10.1007/s41748-021-00233-6.
- ALVES, M. d. C.; SANCHES, L.; CARVALHO, L. G. d. Geostatistical surfaces of climatological normals of mean air temperature in Minas Gerais. **Environmental Monitoring and Assessment**, V. 194, N. 7, p. 513, 2022. DOI: 10.1007/s10661-022-10162-0.
- AMARAL, F. C. S. et al. **Mapeamento de Solos e Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais**. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 95 p.
- ANA. **Capacidade de água disponível - CAD ou AWC dos solos no Brasil**. 2021. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/28fe4baa-66f3-4f6b-b0d2-890abf5910c4>>. Acesso em: 11 abr. 2024.
- ÁVILA, L. F. et al. Trends of minimum and maximum air temperatures in the state of Minas Gerais, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, V. 49, p. 247–256, 2014. DOI: 10.1590/S0100-204X2014000400002. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-204X2014000400247&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2014000400247&lng=pt&tlng=pt)>.
- CALDARELLI, C. E.; GILIO, L.; ZILBERMAN, D. The Coffee Market in Brazil: challenges and policy guidelines. **Revista de Economia**, V. 39, N. 69, p. 1–21, 2018.
- CAMARGO, Â. P.; CAMARGO, M. B. P. Definition and outline for the phenological phases of arabic coffee under Brazilian tropical conditions. **Bragantia**, V. 60, p. 65–68, 2001. DOI: 10.1590/S0006-87052001000100008. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0006-87052001000100008&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0006-87052001000100008&lng=pt&tlng=pt)>.
- CARVALHO, A. C. et al. Panorama e importância econômica do café no mercado. **Agroecossistemas**, V. 9, N. 2, p. 223–222, 2017.
- CARVALHO, I. R. et al. Water demand of crop agronomic interest. **Enciclopédia Biosfera**, V. 9, p. 969, 2013.
- CARVALHO, L. G. et al. Multivariate geostatistical application for climate characterization of Minas Gerais State, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, V. 102, p. 417–428, 2010. DOI: 10.1007/s00704-010-0273-z.
- CARVALHO JÚNIOR, F. V. d.; ALVES, M. d. C.; CARVALHO, L. G. d. Analysis of rainfall variations and coffee production areas with climate change in Minas Gerais via future

scenarios. **Theoretical and Applied Climatology**, p. 1–22, 2024. DOI: 10.1007/s00704-024-04979-7.

CHEMURA, A. et al. Climate change and specialty coffee potential in Ethiopia. **Scientific Reports**, V. 11, p. 8097, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-87647-4. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-021-87647-4>>.

COELI, L. et al. Pedodiversidade no estado de Minas Gerais – Brasil. **Caderno de Geografia**, V. 28, N. 1, p. 18–39, 2018. DOI: 10.5752/p.2318-2962.2018v28.

DRUMMOND, J. **Biodiversity in Minas Gerais - An Atlas for Its Conservation**. Belo Horizonte, 2005.

EVANGELISTA, A. W. P.; CARVALHO, L. G.; SEDIYAMA, G. C. Zoneamento climático associado ao potencial produtivo da cultura do café no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, V. 6, N. 3, p. 445–452, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662002000300011>.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, V. 37, p. 4302–4315, 2017. DOI: 10.1002/joc.5086. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.5086>>.

FIRPO, M. A. F. et al. Assessment of CMIP6 models' performance in simulating present-day climate in Brazil. **Frontiers in Climate**, V. 4, p. 1–27, 2022. DOI: 10.3389/fclim.2022.948499.

HACKENBERGER, B. K. R software: unfriendly but probably the best. **Croat Med J.**, V. 61, p. 66–68, 2020. DOI: 10.3325/cmj.2020.61.66.

HARRIS, I. et al. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations - the CRU TS3.10 Dataset. **International Journal of Climatology**, V. 34, p. 623–642, 2014. DOI: 10.1002/joc.3711.

HIJMANS, R. J. et al. **Package 'terra'**. 2023. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/terra/terra.pdf>>. Acesso em: 4 nov. 2023.

HIRASUGA, N.; LEUNG, L. Using computer climate generator versus conventional lapse rate to model skyscrapers. **Earth and Environmental Science**, V. 294, N. 012038, p. 1–10, 2019. DOI: 10.1088/1755-1315/294/1/012038.

IBGE. **Cidades e Estados - Minas Gerais**. 2023. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg.html>>. Acesso em: 11 out. 2023.

\_\_\_\_\_. **Malha municipal 2021. Mapas, bases e referenciais, bases cartográficas, malhas digitais**. 2021a. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html?=&t=acesso-ao-produto>>. Acesso em: 10 nov. 2022.

- IBGE. **PAM - Produção Agrícola Municipal**. 2021b. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/tabelas>>. Acesso em: 10 nov. 2022.
- KOTZ, M.; LEVERMANN, A.; WENZ, L. The effect of rainfall changes on economic production. **Nature**, V. 601, p. 223–227, 2022. DOI: 10.1038/s41586-021-04283-8. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41586-021-04283-8>>.
- LOVELACE, R.; NOWOSAD, J.; MUENCHOW, J. **Geocomputation with R**. [S.l.]: CRC Press, 2019. DOI: 10.1201/9780203730058.
- MATIELLO, J. B. **O café: do cultivo ao consumo**. São Paulo: Globo, 1991. 320 p.
- MATIELLO, J. B. et al. **Cultura do café no Brasil - Manual de Recomendações**. 1. ed. Varginha: Fundação Procafé, 2020. 716 p.
- MEIRELES, E. J. L. **Fenologia do Cafeeiro: condições agrometeorológicas e balanço hídrico do ano agrícola 2004–2005**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 128 p.
- NEW, M. et al. A high-resolution data set of surface climate over global land areas. **Climate Research**, V. 21, p. 1–25, 2002.
- PEBESMA, E. Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. **The R Journal**, V. 10, N. 1, p. 439–446, 2018. DOI: 10.32614/RJ-2018-009. Disponível em: <<https://doi.org/10.32614/RJ-2018-009>>.
- \_\_\_\_\_. **stars: Spatiotemporal Arrays, Raster and Vector Data Cubes**. 2022. Disponível em: <<https://r-spatial.github.io/stars/>>. Acesso em: 10 nov. 2022.
- PETEK, M. R.; SERA, T.; BATISTA FONSECA, I. C. de. Exigências climáticas para o desenvolvimento e maturação dos frutos de cultivares de coffee arabica. **Bragantia**, Campinas, V. 68, N. 1, p. 169–181, 2009.
- RAMALHO FILHO, A.; PEREIRA, E. G.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícolas das terras**. Brasília: Empresa Brasileira de Agropecuária, 1978. 55 p.
- RENA, A. B.; GUIMARAES, P. T. G. **Sistema radicular do cafeeiro: estrutura, distribuicao, atividade e fatores que o influenciam**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2000. 80 p.
- RESENDE, M. et al. **Pedologia base para distinção de ambientes**. 6. ed. Lavras, MG: Editora UFLA, 2014. 378 p.
- ROMANI, S. et al. Evaluation of coffee roasting degree by using electronic nose and artificial neural network for off-line quality control. Versão inglesa. **Journal of food science**, United States, V. 77, N. 9, p. c960–5, 2012.
- SÁ JÚNIOR, A. et al. Application of the Köppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, V. 108, p. 1–7, 2012. DOI: 10.1007/s00704-011-0507-8.
- SANTINATO, R.; FERNANDES, A. L. T.; FERNANDES, D. R. **Irrigação na cultura do café**. 1. ed. Campinas: Arbore Agrícola e Comércio, 1996. 146 p.

- SANTOS, M. A. d.; CAMARGO, M. B. P. d. Parametrização de modelo agrometeorológico de estimativa de produtividade do cafeeiro nas condições do estado de São Paulo. **Bragantia**, V. 65, N. 1, p. 173–183, 2006. DOI: 10.1590/S0006-87052006000100022.
- SEDIYAMA, G. C. et al. Climatological zoning for arabic coffee (*Coffea arabica* L.) in the state of Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, V. 9, N. 3, p. 501–509, 2001.
- SERRANO-NOTIVOLI, R.; LONGARES, L. A.; CÁMARA, R. bioclim: An R package for bioclimatic classifications via adaptive water balance. **Ecological Informatics**, V. 71, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101810>.
- SILVA, E. D.; REBOITA, M. S. Precipitation estudy for Minas Gerais state, Brazil. **Revista Brasileira de Climatologia**, V. 13, p. 120–136, 2013.
- SILVA, F. M.; CARVALHO, G. R. Evolução da mecanização na cafeicultura. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, V. 32, N. 261, p. 52–65, 2011.
- SILVA, S. H. G.; OLIVEIRA, G. C. Caracterização dos solos e ambientes utilizados na cafeicultura de sequeiro. In: CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C. **Manejo do solo na cafeicultura: produtividade e sustentabilidade**. 1. ed. Lavras: Editora UFLA, 2021. P. 14–31.
- STAPLES, T. L. Expansion and evolution of the R programming language. **Royal Society Open Science**, V. 10, N. 221550, p. 1–12, 2023. DOI: 10.1098/rsos.221550.
- TENNEKES, M. tmap: Thematic Maps in R. **Journal of Statistical Software**, V. 84, N. 6, p. 1–39, 2018. DOI: 10.18637/jss.v084.i06.
- THOMAZIELLO, R. A. et al. **Cultura do café**. 1. ed. Campinas: Coordenadoria de Assistência Técnica Integral, 1996. 68 p.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The water balance. **Climatology**, Centerton, V. 8, N. 1, 1955.
- VALE, A. R.; CALDERARO, R. A. P.; FAGUNDES, F. N. The coffee production in Minas Gerais: comparative study between regions Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba and South/Southwest. **Campo Território: Revista de Geografia Agrária**, V. 9, p. 1–23, 2014. DOI: 10.14393/RCT91826933.
- VOLSI, B. et al. The dynamics of coffee production in Brazil. **PLOS ONE**, Public Library of Science, V. 14, N. 7, p. 1–15, 2019. DOI: 10.1371/journal.pone.0219742.
- YUKIMOTO, S. et al. The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, V. 97, N. 5, p. 931–965, 2019. DOI: 10.2151/jmsj.2019-051.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Foi possível realizar o zoneamento agroclimático atual e futuro com critério de mecanização para as culturas da cana-de-açúcar e café arábica no estado de Minas Gerais. O uso da CAD variável e superfícies climáticas e balanço hídrico espacializado foi viável com as técnicas de geoprocessamento em R.

A metodologia utilizada pode ser aplicada em outras culturas e regiões com as facilidades promovidas pela abordagem em linha de comando. São necessários novos estudos envolvendo dados provenientes de modelos de sistemas terrestres em novas regiões e culturas agrícolas no contexto de enfrentamento às mudanças climáticas.