



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

Alteração nas áreas de aptidão climática de frutíferas de clima temperado devido às mudanças climáticas para seis mesorregiões do Centro-Sul de Minas Gerais

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Alysson Fernando Ribeiro

Itajubá, MG, Brasil

2022

Alteração nas áreas de aptidão climática de frutíferas de clima temperado devido às mudanças climáticas para seis mesorregiões do centro-sul de Minas Gerais

por

Alysson Fernando Ribeiro

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Ciências Atmosféricas.

Orientadora: Dra. Fabrina Bolzan Martins
Coorientador: MSc. Diego Felipe dos Santos

Itajubá, MG, Brasil
2022

**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

**Alteração nas áreas de aptidão climática de frutíferas de clima
temperado devido às mudanças climáticas para seis mesorregiões do
centro-sul de Minas Gerais**

elaborada por

Alysson Fernando Ribeiro

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente



FABRINA BOLZAN MARTINS
Data: 30/11/2022 06:59:33-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Fabrina Bolzan Martins, Dra. (UNIFEI)
(Presidente/Orientadora)

Diego Felipe dos Santos, MSc. (AGROSMART)
(Coorientador)

Roger Rodrigues Torres, Dr. (UNIFEI)

Flávia Fernanda Azevedo Fagundes, Bel. Met. (UNIFEI)

Itajubá, 17 de novembro de 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha orientadora e exemplo profa. Dra. Fabrina, pela oportunidade, conhecimento, paciência e empenho na realização do trabalho, sempre me estimulando a dar o meu melhor na realização de todas as atividades. Ao meu coorientador Diego pela ajuda muitas vezes, pela paciência, empenho e conhecimento, e ajuda em programação. À minha colega e amiga Flávia, por toda a ajuda durante a graduação e amizade desde o curso pré vestibular. À minha família por todo o suporte para que eu pudesse me dedicar inteiramente ao curso e apoio para que eu continuasse estudando. A todos meus amigos de Pedralva e da UNIFEI, pelas conversas descontraídas, apoio e suporte em todos esses anos. Ao Juliano, Denis, Geovane, Vitor Hugo, Pedro, João Gabriel, Leonardo por toda a ajuda relacionada ao campo computacional. A todo corpo docente do IRN, o qual tenho muito orgulho, pois sempre procuraram lecionar da melhor maneira possível e aplicam esforços em pesquisa na busca de mitigar mudanças climáticas. A todos os demais funcionários do IRN e UNIFEI por proverem condições adequadas para estudar. Ao Curso Assistencial Theodomiro Santiago que foi essencial para que eu adentrasse o ensino superior. À prefeitura de Pedralva, a qual sempre forneceu transporte público gratuito para que pudesse vir à faculdade durante toda a graduação. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por todo apoio financeiro cedido aos projetos de pesquisa que participei. E a todo corpo científico mundial que combate o negacionismo climático e trabalha em prol da preservação do planeta.

Dedico a todos os que me incentivaram e apoiaram, e de alguma forma estiveram comigo ao longo da graduação.

RESUMO

Monografia de Graduação
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

Alteração nas áreas de aptidão climática de frutíferas de clima temperado devido às mudanças climáticas para seis mesorregiões do Centro-Sul de Minas Gerais

AUTOR(A): Alysson Fernando Ribeiro
ORIENTADORA: Fabrina Bolzan Martins
Local e Data da Defesa: Itajubá, 17 de novembro de 2022.

As projeções climáticas apontam mudanças consideráveis de temperatura e precipitação para Minas Gerais. Tais alterações poderão reduzir o número de horas frio (NHF) e aumentar a deficiência hídrica (DEF), podendo impactar as áreas de cultivo de frutíferas de clima temperado (FCT), as quais vem sendo ampliadas e atualmente representam aproximadamente R\$ 216 milhões do Produto Interno Bruto (PIB) do estado. Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo avaliar e identificar as alterações nas áreas de aptidão climática de FCT devido as mudanças climáticas. Para isso, foi utilizada uma metodologia de Zoneamento Agroclimático (ZA) baseada em notas de aptidão combinando condições térmicas, e hídricas, 2 cenários socioeconômicos distintos de emissões futuras de gases de efeito estufa (*Shared Socioeconomic Pathways* - SSP2-4.5 e SSP5-8.5). Foram utilizados dados diários de temperatura mínima (T_{min} , °C) e máxima (T_{max} , °C) do ar, e precipitação (P , mm.dia⁻¹), provenientes de 10 Modelos de Circulação Geral (MCG) pertencentes a nova geração de modelos climáticos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6). A metodologia de ZA foi simulada para o período presente (PP = 1995-2014) e projetada para o futuro próximo (FP = 2041-2060) e futuro distante (FD = 2081 – 2100). Devido aos intensos aumentos projetados de T_{min} , T_{max} , DEF anual (mm ano⁻¹) juntamente à redução do NHF anual (NHF_a, horas ano⁻¹) e mudanças heterogêneas da P , o cultivo de FCT mais exigentes em frio será inviável para o Centro-Sul de Minas Gerais no futuro distante, onde as áreas se resumiram a regulares, entre 43% (SSP2-4.5) e 85% (SSP5-8.5), e inadequadas (entre 13% e 52%). Somente o plantio de frutíferas de clima temperado de baixa exigência em frio ($T_b = 13^{\circ}\text{C}$) deverá ser adequado (ou totalmente adequado) na porção sul do Centro-Sul de Minas Gerais. Medidas adaptativas deverão ser adotadas para reduzir a vulnerabilidade dos cultivos de FCT devido ao acúmulo insuficiente de frio e aumento da DEF, como seleção e introdução de cultivares menos exigentes em frio, aprimoramento de técnicas de melhoramento de plantas, irrigação suplementar e uso de produtos para induzir artificialmente a quebra de dormência.

Palavras-chave: Deficiência hídrica, medidas adaptativas, modelos de circulação geral, CMIP6, número de horas frio, zoneamento agroclimático.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização das áreas com produção de frutíferas de clima temperado no Brasil (painel A) e em Minas Gerais (painéis B e C). Fonte: IBGE (2022) 14

Figura 2 - Representação esquemática das etapas de cálculo do balanço hídrico climatológico (BHC) para obtenção da deficiência hídrica (DEF, mm), ALT = alteração do armazenamento (mm); ARM = armazenamento (mm), CAD = capacidade de água disponível (mm), ETc = evapotranspiração da cultura (mm), ETR = evapotranspiração real (mm), P = precipitação (mm), NEG = perda de água acumulada (mm); $(P - ETc) +$ = somatório dos valores positivos de P-ETc, estação úmida), $(P - ETc) -$ = somatório dos valores negativos de P-ETc, estação seca). Como o BHC é calculado em escala mensal, o índice i refere-se a cada mês do ano (1= janeiro, 2 = fevereiro, ..., 12 = dezembro). Adaptado de Alves et al. (2020) e Martins et al. (2022). 22

Figura 3 - Painéis à esquerda: ciclo anual da temperatura do ar (T_{min} , T_{max} e T_{med} , °C) e precipitação acumulada (mm mês⁻¹) simulados pelos dez modelos climáticos de circulação geral, EM e dados observados fornecidos por Xavier et al., (2016) para o período presente (1995 – 2014). Painéis à direita: distribuição espacial do viés entre a EM dos MCGs e dado observado por Xavier et al., (2016). A e B = temperatura mínima do ar, C e D = temperatura máxima do ar, E e F = temperatura média do ar. G e H = precipitação acumulada mensal (mm mês⁻¹). 26

Figura 4 - Mudanças (futuro menos período presente) para a temperatura mínima do ar (T_{min} , °C) (painéis A, B), temperatura máxima do ar (T_{max} , °C) (painéis C, D), precipitação anual (P, mm ano⁻¹) (painéis E e F), número de horas frio anual para a temperatura base de 7°C (NHFa, painéis G, H), número de horas frio anual para a temperatura base de 13°C (NHFa, painéis I,J) e deficiência hídrica anual (DEF, mm ano⁻¹) painéis (K, L), nos cenários SSP2-4.5 e 5-8.5. Os painéis foram confeccionados usando a EM dos modelos climáticos do CMIP6. 28

Figura 5 - Zoneamento agroclimático, área (em porcentagem) e classes de aptidão climática ao cultivo das frutíferas de clima temperado de maior exigência em frio ($T_b = 7^\circ\text{C}$) simulado para o período presente (PP, 1995 – 2014) e projetado para o futuro próximo (FP, 2041 – 2060) e distante (FD, 2081 – 2100) para os dois cenários (SSP 2-4.5 e 5-8.5). 30

Figura 6 - Idêntica a figura anterior, porém para as frutíferas de clima temperado de menor exigência em frio ($T_b = 13^\circ\text{C}$). 30

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** – Lista de modelos do sistema terrestre pertencentes a base do CMIP6 utilizados no estudo e seus respectivos desenvolvedores e resoluções aproximadas (latitude/longitude) 17
- Tabela 2** - Aptidão (e notas) baseadas no número de horas frio anual e deficiência hídrica anual definidos para as principais frutíferas de clima temperado cultivadas em Minas Gerais. 19
- Tabela 3** – Notas, porcentagens de aptidão (P_A , %) e classes de aptidão para o zoneamento agroclimático (Z_A , %) para o cultivo de frutíferas de clima temperado baseados nas limitações térmica (dada pelo número de horas frio anual), e hídrica (dada pela deficiência hídrica anual).

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

BHC – Balanço hídrico climatológico
CAD – Capacidade de Água Disponível
CDO – *Climate Data Operator*
CMIP3 – *Coupled Model Intercomparison Project Phase 3*
CMIP5 – *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*
CMIP6 – *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*
CRAS – Capacidade de retenção de água no solo
DEF – Deficiência hídrica
ESGF – *Earth System Grid Federation*
EM – *Ensemble mean*
ETc – Evapotranspiração de cultura
ETP – Evapotranspiração potencial
FCT – Frutíferas de clima temperado
FD – Futuro distante
FP – Futuro próximo
IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*
Kc – Coeficiente de cultura
MCG – Modelos de circulação geral
N – Nota de aptidão
NHF – Número de horas frio
NHFa – Número de horas frio anual
NHFd – Número de horas frio diário
P – Precipitação
P_A – Porcentagem de Aptidão
PIB – Produto interno Bruto
PP – Período presente
SSP – *Shared Socioeconomic Pathways*
Tb – Temperatura base
Tmin – Temperatura mínima
Tmax – Temperatura máxima
Tmed – Temperatura média
RCPs – *Representative Concentration Pathways*

WCRP – *Worlds Climate Research Programme*

VM – Viés médio

ZA – Zoneamento Agroclimático

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. MATERIAIS E MÉTODOS	16
2.1. DADOS CLIMÁTICOS	16
2.2. METODOLOGIA DO ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO E DEFINIÇÃO DAS CLASSES DE APTIDÃO CLIMÁTICA PARA AS PRINCIPAIS FRUTÍFERAS DE CLIMA TEMPERADO	19
2.3. NÚMERO DE HORAS DE FRIO E DEFINIÇÃO DOS LIMIARES TÉRMICOS PARA AS FRUTÍFERAS DE CLIMA TEMPERADO	20
2.4. BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO E DEFINIÇÃO DOS LIMIARES DE DEFICIÊNCIA HÍDRICA PARA AS FRUTÍFERAS DE CLIMA TEMPERADO	21
2.5. ANÁLISE DO IMPACTO DAS PROJEÇÕES CLIMÁTICAS NO ZONEAMENTO DE APTIDÃO PARA AS FRUTÍFERAS DE CLIMA TEMPERADO	24
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
3.1. VALIDAÇÃO DA PERFORMANCE DAS SAÍDAS DOS MODELOS CLIMÁTICOS PARA O PERÍODO PRESENTE	24
3.2. PROJEÇÕES PARA AS VARIÁVEIS QUE MAIS IMPACTAM NAS FRUTÍFERAS DE CLIMA TEMPERADO	27
3.3. ZONEAMENTO AGROCLIMÁTICO E ALTERAÇÕES NAS ZONAS DE APTIDÃO	29
4. CONCLUSÃO	35
5. REFERÊNCIAS	36
ANEXOS	44

1. INTRODUÇÃO

As frutíferas de clima temperado (FCT) correspondem cerca de 7,6% do total da produção brasileira de frutas, atrás das frutas subtropicais (48,6%) e tropicais (43,8%) (FAO, 2020). Embora as frutíferas tropicais e subtropicais sejam majoritariamente cultivadas no Brasil (FACHINELLO et al., 2011; REETZ et al., 2022), as FCT possuem alto valor agregado (LOPES, 2015; ANDRESEN e BAULE, 2018), com cerca de 37% do valor total das exportações de frutas brasileiras (PIO et al., 2019; REETZ et al., 2022). Os estados onde se concentram atualmente a maioria das plantações de FCT no Brasil estão localizadas nas regiões sul (~ 72,8%) e sudeste (~ 12,5%) (Figura 1A). Embora tenha menor área plantada, a região sudeste, sobretudo o estado de Minas Gerais, tem ampliado as áreas plantadas com FCT devido aos incentivos e a necessidade de diversificação da produção agrícola (GARCIA et al., 2018; MARTINS et al., 2020). Como exemplo, no ano de 2020 foram colhidos 3.617 ha com FCT em Minas Gerais, incrementando em R\$ 216 milhões no produto interno bruto (PIB) do estado (IBGE, 2020). Os cultivos são concentrados majoritariamente nas regiões Centro - Sul de Minas Gerais (Figura 1B), principalmente com: uva (18.780 t., ~ 1,3% da produção brasileira), caqui (17.299 t., ~ 11% da produção brasileira), figo (2.285 t., ~ 11,7% da produção brasileira), maçã (4.186 t., ~ 0,4% da produção brasileira), marmelo (256 t., ~ 46% da produção brasileira), noz-pecã (11t., ~ 0,3% da produção brasileira), azeitona (641 t., ~ 24,2% da produção brasileira), pêra (1.235 t., ~ 8% da produção brasileira) e pêssego (11.904 t., ~ 5,9% da produção nacional) (IBGE, 2020).

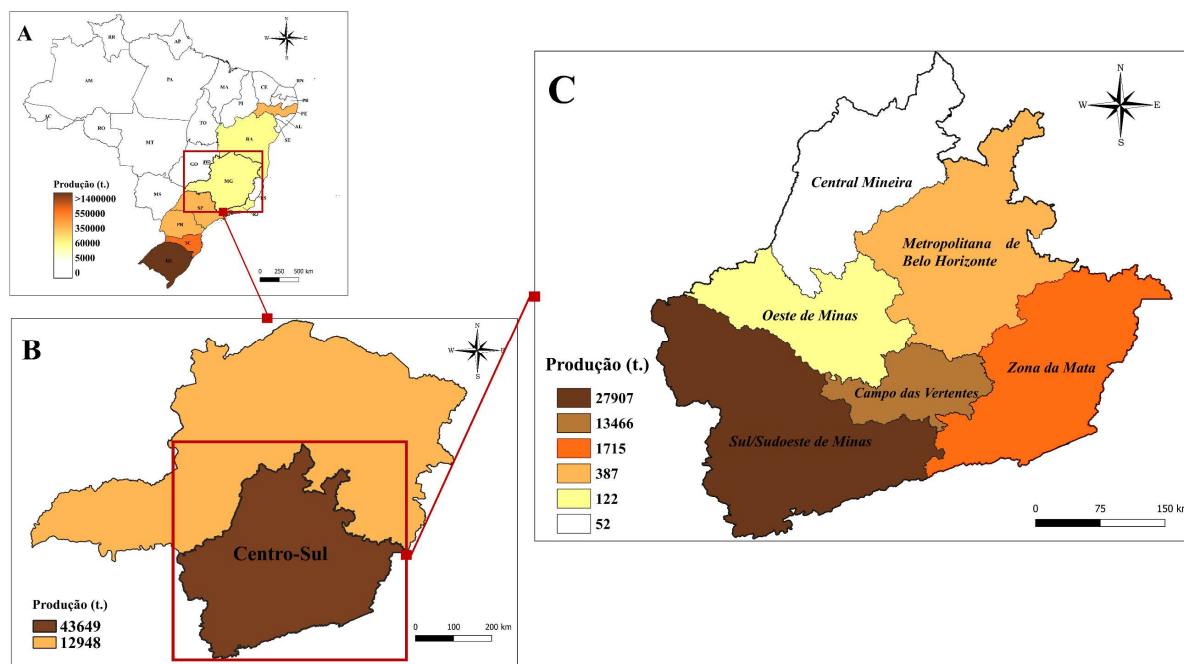


Figura 1 - Localização das áreas com produção de frutíferas de clima temperado no Brasil (painel A) e em Minas Gerais (painéis B e C). Adaptado de IBGE (2022)

Mesmo com os avanços significativos nas adaptações de cultivares/variedades, nas melhorias de práticas de manejo e fertilidade do solo e no controle de pragas e doenças; o desenvolvimento e a produtividade das FCT são fortemente afetados pela variabilidade climática (ANDRESEN e BAULE, 2018; AHMADI et al., 2019; HAOKIP et al., 2020; FERNANDEZ et al., 2020; MARTINS et al., 2020; RODRÍGUEZ et al., 2021). Como as FCT são caracterizadas pela necessidade de acúmulo de frio (SANTOS et al., 2017a; ANDRESEN e BAULE, 2018; FERNANDEZ et al., 2020; MARTINS et al., 2020; RODRÍGUEZ et al., 2021; SALAMA et al., 2021; NOORAZAR et al., 2022) e de disponibilidade hídrica adequada (TANASIJEVIC et al., 2014; SANTOS et al., 2017b; ANDRESEN e BAULE, 2018), o acúmulo insuficiente de frio e a deficiência hídrica (DEF), são as principais condições limitantes às FCT (CAMPOY et al., 2012; ANDRESEN e BAULE, 2018; ; EL YAACOUBI et al., 2019; FRAGA et al., 2019; HAOKIP et al., 2020; MARTINS et al., 2020). Ambas condições podem alterar as taxas de desenvolvimento (FLORÊNCIO et al., 2019), as respostas fenológicas repercutindo em atraso (ou irregularidade) da épocas de florescimento, frutificação e maturação dos frutos (GARCÍA-MOZO et al., 2010; FRAGA et al., 2019; HAOKIP et al., 2020; MARTINS et al., 2020), bem como modificar as áreas adequadas aos cultivos das FCT (SANTOS et al., 2017; FRAGA et al., 2019 e 2020; MARTINS et al., 2020). Tais alterações podem ser mais intensas nos locais onde são projetadas mudanças persistentes na temperatura e precipitação, uma vez que essas variáveis definem as horas de frio e a deficiência hídrica.

Podendo afetar financeiramente as regiões que possuem parte do PIB dependente do cultivo das FCT.

Diversos estudos tem apontado aumentos de temperatura e de DEF para Minas Gerais (SANTOS et al., 2017b; NATIVIDADE et al., 2017; REBOITA et al., 2018; FLORÊNCIO et al., 2019; ALVES et al., 2020; MARTINS et al., 2020; FAGUNDES et al., 2021). Altas temperaturas durante os meses de inverno podem levar ao não cumprimento dos requisitos de frio (FRAGA et al., 2019), que por sua vez, pode causar atrasos e/ou irregularidades na brotação e florescimento, aborto floral (GARCIA-MOZO et al., 2010), e baixa frutificação/produção (LUEDELING et al., 2009, 2011; FRAGA et al., 2019; MARTINS et al., 2020; RODRÍGUEZ et al., 2021; SALAMA et al., 2021). Além disso, altas temperaturas durante os meses de primavera e verão podem alongar o período de frutificação, acelerar o amadurecimento (FRAGA et al., 2019) e reduzir a qualidade e o rendimento dos frutos (CAMPOY et al., 2012; MARTINS et al., 2020). O acúmulo de frio das FCT é quantificado pelo número de horas de frio (NHF) (HELDWEIN et al., 1989; SANTOS et al., 2017a; MARTINS et al., 2020), que se refere ao número de horas em que a temperatura do ar permanece abaixo de determinada temperatura base (T_b) (ANGELLOCCI et al., 1979; SANTOS et al., 2017a; MARTINS et al., 2020; ANZANELLO et al., 2021). O NHF e a T_b variam substancialmente entre as espécies, cultivares e variedades de FCT (MARTINS et al., 2020; RODRÍGUEZ et al., 2021). Para a maioria das FCT, os valores de T_b de 7°C e 13°C são comumente adotados para as cultivares de alta e baixa exigência em frio, respectivamente (SANTOS, 2018; PIO et al., 2019; ANZANELLO et al., 2021).

Por outro lado, apesar de algumas FCT serem tolerantes à DEF, períodos de seca prolongada ou intermitentes podem resultar em diversos impactos negativos com alterações fisiológicas, morfológicas e fenológicas (TANASIJEVIC et al., 2014; FRAGA et al., 2020). Por exemplo, em situações de DEF, o abastecimento de água é menor que as perdas por evapotranspiração, levando a redução das trocas gasosas (SANTOS et al., 2017b), e consequentemente da taxa fotossintética. Além disso, reduz a área foliar, aumenta o número de flores imperfeitas e causa abortamento floral (ORGAZ e FERERES, 1999; GARCIA-MOZO et al., 2010). A DEF pode ser contabilizada pelo balanço hídrico climatológico (BHC) (SANTOS et al., 2017b; ALVES et al., 2020; MARTINS et al., 2022), fornecendo informações necessárias para as práticas de gestão de disponibilidade hídrica (MARTINS et al., 2022).

Por essas razões, mapear as áreas com potencial climático adequado para as FCT, considerando o acúmulo de horas de frio e a DEF, é essencial para reduzir as vulnerabilidades desses cultivos em cenários futuros, definir estratégias mais seguras de planejamento e práticas

agrícolas e orientar medidas efetivas de adaptação para enfrentar as ameaças das mudanças climáticas. Aplicando as saídas dos modelos climáticos de circulação geral (MCG) em ferramentas de zoneamento agroclimático (ZA) (SANTOS et al., 2017b; TAVARES et al., 2018; FRAGA et al., 2019; MARTINS et al., 2020; FLORÊNCIO et al., 2022) é possível mapear as regiões com condições climáticas adequadas para os plantios de determinadas FCT sob clima atual e futuro. Os MCGs provenientes do *Coupled Model Intercomparison Project*, versão 6 (CMIP6) são a nova geração de modelos climáticos, com aprimoramentos das representações físicas, e que possuem projeções que combinam desenvolvimento socioeconômico (SSPs, sigla do inglês *Shared Socioeconomic Pathways*) com cenários de emissões (RCPs, sigla do inglês *Representative Concentration Pathways*). Portanto, os MCGs do CMIP6 possuem melhor representação do sistema climático (IPCC, 2021) comparado às suas versões anteriores (CMIP3 e CMIP5) (ALMAZROUI et al., 2021; ORTEGA et al., 2021).

Estudos sobre esta temática foram realizados por Santos et al. (2017b) e Martins et al. (2020) para a cultura da oliveira em Minas Gerais. No entanto, tais estudos consideraram separadamente a DEF ou o acúmulo de frio, desconsiderando o efeito combinado de ambos no ZA, assim como os impactos para as demais FCT. Santos (2018) também realizou o ZA para as principais FCT nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, o que engloba Minas Gerais. No entanto, utilizou dados regionalizados do CMIP5 e uma metodologia distinta de ZA, sem atribuir notas (*scores*) de aptidão. Portanto, o efeito combinado de ambas as limitações considerando uma metodologia apropriada de ZA, assim como os impactos derivados da geração de MCG do CMIP6 nas FCT, ainda é desconhecido. Dadas as razões mencionadas, este trabalho de conclusão de curso (TCC) tem como objetivo avaliar e identificar os impactos das projeções climáticas nas áreas de aptidão climática ao cultivo das principais FCT cultivadas na região centro-sul de Minas Gerais (Figura 1B), através de uma metodologia de ZA que combina limitações térmicas e hídricas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Dados climáticos

Foram utilizados dados diários de temperatura mínima (T_{min} , °C) e máxima do ar (T_{max} , °C) e precipitação (P , mm.dia⁻¹) de 10 MCGs (Tabela 1) pertencentes ao CMIP6. Os dados do CMIP6 são fornecidos pelo *World Climate Research Programme* (WCRP) através do portal *Earth System Grid Federation* (ESGF) (disponível em < <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/> >). Os MCGs possuem resoluções horizontais variando de ~ 1° a

2,5° latitude/longitude e foram escolhidos devido ao bom desempenho para o Brasil (ALMAZROUI et al., 2021; ORTEGA et al., 2021). Para fins de intercomparação, os dados de Tmin, Tmax e P foram interpolados para grade regular comum de 0.25° latitude/longitude, através do método de interpolação bilinear do *Climate Data Operators* (CDO).

As simulações e projeções do ZA (detalhado no item 2.2) foram realizadas considerando os mesmos períodos temporais utilizados no sexto relatório do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2021): período presente (PP=1995-2014), futuro próximo (FP=2041-2060), e futuro distante (FD=2081-2100). As projeções (FP e FD) foram realizadas utilizando dois cenários de emissão do CMIP6: o SSP2-4.5 (denominado ‘*middle of the road*’) que é um cenário intermediário que considera a hipótese de um desenvolvimento socioeconômico onde as taxas de emissões em relação aos níveis pré-industriais se estagnam, levando a uma forçante radiativa de 4,5 W.m⁻² no FD (O’NEILL et al., 2016; FRICKO et al., 2017); e SSP5-8.5 (denominado ‘*fossil-fueled development*’), que é um cenário pessimista onde se assume negligência em relação a mitigação, implicando em um cenário socioeconômico baseado em fontes energéticas de combustíveis fósseis que assume um aumento da forçante radiativa de 8,5 W.m⁻² no FD (O’NEILL et al., 2016).

Tabela 1 – Lista de modelos do sistema terrestre pertencentes a base do CMIP6 utilizados no estudo e seus respectivos desenvolvedores e resoluções aproximadas (latitude/longitude)

Modelo	Desenvolvedor	Resolução horizontal
ACCESS-CM2	Commonwealth Scientific and Industrial Organisation (CSIRO). Austrália	~ 1,88° × 1,25°
INM-CM4-8	Institute for Numerical Mathematics, Russian Academy of Science. Moscou, Rússia	~ 2,00° x 1,50°
INM-CM5-0		~ 2,00° x 1,50°
IPSL-CM6A-LR	Institut Pierre Simon Laplace. Paris, França	~ 2,50° x 1,30°
MIROC6	Japan Agency of Marine-Earth Science Technology, Atmosphere and Ocean Research Institute, e RIKEN Center for Computational Science. Japão	~ 1,40° x 1,40°
MPI-ESM1-2-HR	Max Planck Institute Fur Meteorologie, Forschungszentrum Julich, University of Oxford, Finnish Meteorological Institute e Leibniz Institute for Tropospheric Research, ETH Zurich	~ 0,94° x 0,94°
MPI-ESM1-2-LR		~ 1,87° x 1,87°
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute. Tsukuba, Japão	~ 1,10° x 1,10°
NorESM2-LM	Norwegian Climate Centre (NCC). Noruega	~ 2,50° x 2,00°
NorESM2-MM		~ 1,25° x 1,00°

Previamente, foi realizada a validação dos dados diários dos MCGs simulados para o PP para evitar erros nos padrões projetados de Tmin, Tmax e P (no FP e FD). Nesta etapa, foram utilizados dados de Tmin, Tmax e P do banco de dados disponibilizados por Xavier et al. (2016), os quais derivam de dados observados de numerosas estações meteorológicas interpolados por pontos de grade com uma resolução de 0,25° longitude/latitude (MONTEIRO et al., 2021). As estatísticas usadas na validação foram viés médio (VM) e a correlação de Pearson (r) (JOHNSON e KUBY, 2014):

$$VM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i) \quad (1)$$

$$r = \frac{\sum (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{(\sum (S_i - \bar{S})^2 - \sum (O_i - \bar{O})^2)}} \quad (2)$$

Em que: S_i = valores simulados das variáveis (Tmin, Tmax e P) para os 10 MCG do CMIP6, O_i = valores observados das variáveis (Tmin, Tmax e P) fornecidos por Xavier et al. (2016), ambos para o período 1995-2014, $\bar{S}$ e $\bar{O}$ = valores médios do conjunto de dados simulados e observados, respectivamente. As estatísticas foram realizadas individualmente para cada modelo e para a média dos modelos (*ensemble mean*, EM) considerando cada ponto de grade em todos os n tempos.

Para melhorar o desempenho dos resultados e reduzir possíveis erros cumulativos nas simulações e projeções no ZA, no acúmulo de frio (detalhamento no item 2.3) e no BHC (detalhamento no item 2.4), foi aplicada a correção de viés para os dados diários de Tmin e Tmax. Para isso, foi utilizada a metodologia de Lenderink et al. (2007), na qual, primeiramente, obtém-se o viés mensal entre os dados simulados pela EM dos MCG e o observado para o PP (equação 3) para Tmin e Tmax (separadamente) (FLORENCIO et al., 2019; MARTINS et al., 2020). Posteriormente, o viés do i-ésimo mês é subtraído dos dados diários de Tmin e Tmax para a EM do PP, FP e FD, em ambos SSPs.

$$Viés_i = \overline{Vsim_i} - \overline{Vobs_i} \quad (3)$$

Em que: $Viés_i$ = Viés climatológico médio mensal referente da temperatura do ar (Tmin e Tmax) referente ao i-ésimo mês; $\overline{Vsim_i}$ = média mensal da temperatura do ar (Tmin e Tmax) simulada pela EM dos modelos climáticos no período 1995 - 2014; $\overline{Vobs_i}$ = média mensal da temperatura do ar (Tmin e Tmax) do banco de dados provenientes de Xavier et al. (2016) no período 1995 - 2014; i = cada mês do ano (i=janeiro, fevereiro, ..., dezembro).

2.2. Metodologia do zoneamento agroclimático e definição das classes de aptidão climática para as principais frutíferas de clima temperado

A metodologia de ZA utilizada neste estudo é uma adaptação do método proposto por Luppi et al. (2014) e Tavares et al. (2018). Esta metodologia combina as duas condições mais limitantes às FCT: i) limitação térmica, dada pelo NHF (detalhamento no item 2.3), e ii) limitação hídrica, dada pela DEF, obtida pelo extrato do BHC (detalhamento no item 2.4), relacionando-as dentro de classes de adaptação (Tabela 2). Áreas aptas, restritas e inaptas receberam notas (N) 1, 2 e 3, respectivamente (Tabela 2). Cada nota foi convertida em porcentagem de aptidão (P_A , %), calculada separadamente para a limitação térmica e hídrica (Equação 4), para posteriormente, obter a classe de aptidão (Equação 5):

$$P_A (\%) = \begin{cases} 100/2N, & \text{se } N = 1 \text{ ou } N = 2 \\ 0, & \text{se } N = 3 \end{cases} \quad (4)$$

$$Z_A (\%) = P_{A_{NHF}} + P_{A_{DEF}} \quad (5)$$

Em que: P_A = porcentagem de aptidão para cada condição limitante (NHF e DEF); N = nota para cada condição limitante; Z_A = classe de aptidão.

Tabela 2 - Aptidão (e notas) baseadas no número de horas frio anual e deficiência hídrica anual definidos para as principais frutíferas de clima temperado cultivadas em Minas Gerais.

Aptidão	Nota	NHF (horas ano ⁻¹) ¹	DEF (mm ano ⁻¹) ²
Adequado	1	≥ 300	< 195
Regular	2	entre 150 e 300	entre 195 e 220
Inadequado	3	< 150	≥ 220

¹ Os limiares térmicos foram definidos pelo número de horas frio requerido pelas principais FCT cultivadas na região (detalhamento no item 2.3). ² Os limiares de deficiência hídrica foram definidos com base na necessidade hídrica para as principais frutíferas de clima temperado (detalhamento no item 2.4).

O Z_A variou de 0% a 100% (Tabela 3) o que corresponde a cinco classes de aptidão (FLORÊNCIO et al., 2022): inadequado, restrito, regular, adequado e totalmente adequado para o cultivo das FCT.

Tabela 3 – Notas, porcentagens de aptidão (P_A , %) e classes de aptidão para o zoneamento agroclimático (Z_A , %) para o cultivo de frutíferas de clima temperado baseados nas limitações térmica (dada pelo número de horas frio anual), e hídrica (dada pela deficiência hídrica anual).

Nota		Aptidão		P_A (%)		Z_A (%)	Classes
NHF	DEF	NHF	DEF	NHF	DEF		

1	1	Adequado	Adequado	50	50	100	Totalmente Adequado
1	2	Adequado	Regular	50	25	75	Adequado
1	3	Adequado	Inadequado	50	0	50	Regular
2	1	Regular	Adequado	25	50	75	Adequado
2	2	Regular	Regular	25	25	50	Regular
2	3	Regular	Inadequado	25	0	25	Restrito
3	1	Inadequado	Adequado	0	50	50	Regular
3	2	Inadequado	Regular	0	25	25	Restrito
3	3	Inadequado	Inadequado	0	0	0	Inadequado

Metodologia adaptada de Luppi et al. (2014) e Tavares et al. (2018) em que notas são atribuídos para cada condição limitante (térmica e hídrica); P_A é a porcentagem de aptidão para cada condição limitante; Z_A (%) é o somatório da P_A das condições térmica e hídrica.

2.3. Número de horas de frio e definição dos limiares térmicos para as frutíferas de clima temperado

Os limiares térmicos utilizados neste estudo foram baseados nos valores de NHF acumulado anual (NHFa), obtido pelo somatório do NHF diário (NHFd) calculado pelo método de Pola e Angelocci (1993). Este método é considerado o mais viável para computar o NHFd para qualquer limiar de T_b (SANTOS et al., 2017a). O método consiste em duas fases: i) reconstrução da curva diária de temperatura do ar através de funções senoidais de resfriamento (equação 6) e aquecimento (equação 7); ii) obtenção dos valores de NHFd (equação 8). O NHFd foi obtido para o período compreendido entre 15 de maio a 15 de setembro de cada ano (no PP, FP e FD), por compreenderem os meses em que há acúmulo de frio na região de estudo (GARCIA et al., 2018; SANTOS, 2018).

$$Tr(t) = T_{max_1} + (T_{min} - T_{max_1}) \sin \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{t - t_{M_1}}{t_m - t_{M_1}} \right] \quad (6)$$

$$Ta(t) = T_{min} + (T_{max_2} - T_{min}) \sin \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{t - t_m}{t_{M_2} - t_m} \right] \quad (7)$$

$$NHFd = \begin{cases} 0 & \dots \dots \dots \text{se } T_{max_1} > T_b \text{ e } T_{max_2} > T_b \text{ e } T_{min} > T_b \\ 24 & \dots \dots \dots \text{se } T_{max_1} < T_b \text{ e } T_{max_2} < T_b \\ tz - ta & \dots \dots \dots \text{se } T_{max_1} > T_b \text{ e } T_{max_2} > T_b \text{ e } T_{min} < T_b \\ tz - t_{M_1} & \dots \dots \dots \text{se } T_{max_1} \leq T_b \text{ e } T_{max_2} > T_b \text{ e } T_{min} < T_b \\ t_{M_2} - ta & \dots \dots \dots \text{se } T_{max_1} > T_b \text{ ou } T_{max_2} \leq T_b \end{cases} \quad (8)$$

Em que: $Tr(t)$ = temperatura horária do ar estimada para cada tempo (hora) entre às 0h e 16h, que representam, respectivamente o tempo decorrido das 15 horas do dia anterior e às 7h do dia atual (resfriamento, $0h \leq t \leq 16h$); T_{max_1} = temperatura máxima do ar do dia anterior ($^{\circ}C$);

T_{min} = temperatura mínima do ar do dia atual ($^{\circ}\text{C}$); t_{M1} = tempo inicial (0h); t_m = tempo decorrido entre as 15h do dia anterior e 7h do dia atual (16h); $T_a(t)$ = temperatura horária do ar estimada para cada tempo (hora) entre às 16h e 24h, que representa, respectivamente o tempo decorrido entre das 7h às 15 h (aquecimento, $16h \leq t \leq 24h$); T_{max_2} = temperatura máxima do ar do dia atual ($^{\circ}\text{C}$); t_{M2} = tempo final (24h); T_b = temperatura base (7°C e 13°C); t_z = tempo (h) em que $T_a \geq T_b$; t_a = tempo (h) em que $T_r \leq T_b$.

Neste estudo, o NHFd foi calculado para a $T_b = 7^{\circ}\text{C}$ que representa o limiar para as FCT mais exigentes em frio, e $T_b = 13^{\circ}\text{C}$ para as FCT menos exigentes em frio (ANGELOCCI et al., 1979; GARCIA et al., 2018; SANTOS, 2018; MARTINS et al., 2020).

Foi realizada uma revisão de literatura para determinar os limiares de NHFa (Anexo 1) para as principais FCT cultivadas na região de estudo (caqui, figo, maçã, marmelo, noz, pêra, pêssego, oliveira, uva). Dessa forma, considerando a ampla gama de requerimento em frio entre as FCT (DE MELO-ABREU et al., 2004; RAMOS e LEONEL, 2008; KUDEN et al., 2013; PERUZZO et al., 2014; ANZANELLO e BIASI, 2016; EPAGRI, 2016; CAMPOY et al., 2019; SANTOS, 2018; EL YAACOUBI et al., 2019; FRAGA et al., 2019; FADÓN et al., 2020; HAOKIP et al., 2020; MARTINS et al., 2020; STAFNE, 2020; VOSSEN e SILVER, 2000; RODRÍGUEZ et al., 2021), assim como as metodologias e o número de horas de requerimento, três limiares (e notas) foram estabelecidos: se $\text{NHFa} \geq 300$ horas (considerando as $T_b = 7^{\circ}\text{C}$ e 13°C) então $N = 1$ e a área pode ser considerada apta; se $150 \leq \text{NHFa} < 300$ horas (considerando ambas T_b) então $N = 2$ e a área é restrita; e, se $\text{NHFa} < 150$ horas (considerando ambas T_b), então $N = 3$ e a área pode ser considerada inapta ao cultivo das principais FCT.

2.4. Balanço hídrico climatológico e definição dos limiares de deficiência hídrica para as frutíferas de clima temperado

Os limiares hídricos foram obtidos pela DEF anual (DEFa , mm ano^{-1}) calculada pelo BHC proposto por Thornthwaite e Mather (1955, 1957), simplificado por Pereira (2005), e posteriormente modificado por Dourado-Neto et al. (2010). Este método requer como dados de entrada as climatologias mensais de P, evapotranspiração da cultura (ETc , mm mês^{-1}), ambas calculadas para PP, FP e FD, e capacidade de água disponível no solo (CAD , mm) (FLORÊNCIO et al., 2022; MARTINS et al., 2022). Por isso, a partir dos dados diários de P e de ETc , foram obtidas as climatologias mensais para cada período (PP, FP e FD). Apesar de requerer poucas variáveis de entrada (P e ETc) este método de BHC expressa coerentemente a disponibilidade hídrica em locais onde há pelo menos uma estação seca por ano (DOURADO-NETO et al., 2010; MARTINS et al., 2022), situação comum de ocorrer em vários locais de

Minas Gerais (SANTOS et al., 2017b; ALVES et al., 2020). As etapas de cálculo do BHC estão demonstradas na Figura 2, e detalhadas em Alves et al. (2020).

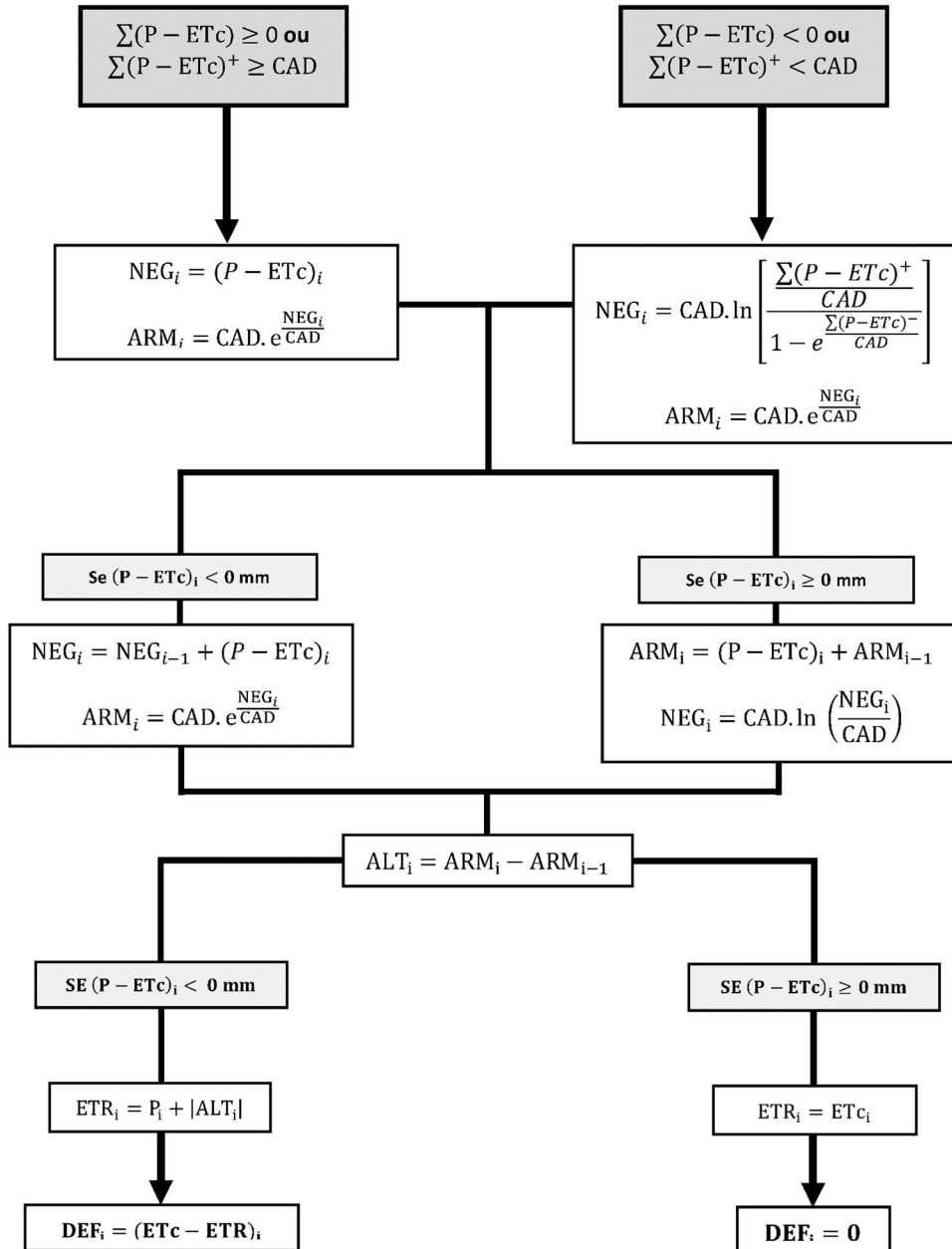


Figura 2 - Representação esquemática das etapas de cálculo do balanço hídrico climatológico (BHC) para obtenção da deficiência hídrica (DEF, mm), ALT = alteração do armazenamento (mm); ARM = armazenamento (mm), CAD = capacidade de água disponível (mm), ETc = evapotranspiração da cultura (mm), ETR = evapotranspiração real (mm), P = precipitação (mm), NEG = perda de água acumulada (mm); $\sum(P - ETc)^+$ = somatório dos valores positivos de P-ETc, estação úmida, $\sum(P - ETc)^-$ = somatório dos valores negativos de P-ETc, estação seca. Como o BHC é calculado em escala mensal, o índice i refere-se a cada mês do ano (1=

janeiro, 2 = fevereiro, ..., 12 = dezembro). Adaptado de Alves et al. (2020) e Martins et al. (2022).

A ET_c mensal foi obtida pelo produto entre a evapotranspiração potencial (ETP, mm mês⁻¹) e o coeficiente de cultura (K_c). A ETP foi estimada pela versão modificada do método de Thornthwaite (1948) proposta por Willmott et al. (1985), que aplica ajustes para médias mensais de temperaturas do ar acima de 26,5°C, comprimentos do dia e do mês (ASCHONITIS et al., 2022; MARTINS et al., 2022). Embora este método de ETP seja baseado apenas na temperatura do ar (Equações 9 a 13), ele fornece estimativas confiáveis de ETP para escala mensal considerando períodos de tempo mais longos (OUDIN et al., 2005). Além disso, é o método de ETP mais utilizado em estudos de BHC (SANTOS et al., 2017b; SANTOS, 2018; ALVES et al., 2020; MARTINS et al., 2022). O valor de K_c foi considerado como 1,0, obtido pela média dos valores de K_c das principais FCT (Figura 1) de acordo com Doorenbos e Pruitt (1977), Doorenbos e Kassan, (1994), Allen et al. (1998), Ferreira et al. (2013) e Conceição et al. (2011).

$$ETP = ETP_i \cdot c_i, \text{ sendo } c_i = (N/12) \cdot (NDP_i/30) \quad (9)$$

$$ETP_i = \begin{cases} 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{T_{med}}{I}\right)^a, & \text{se } 0 \leq T_{med} \leq 26,5 \\ -415 + 32,24 \cdot T_{med} - 0,43 \cdot T_{med}^2, & \text{se } T_{med} > 26,5 \end{cases} \quad (10)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 \cdot T_{med})^{1,514} \quad (11)$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239 \quad (12)$$

$$N = \frac{2}{15} \cdot \cos^{-1}[-1 \cdot (\tan \varphi \cdot \tan \delta)] \quad (13)$$

Em que: ETP = Evapotranspiração potencial mensal (mm mês⁻¹), ETP_i = Evapotranspiração potencial mensal corrigida (mm mês⁻¹), c_i = fator de correção, N = fotoperíodo do 15º dia do mês (i); NDP_i = Número de dias do i-ésimo mês (28 ou 30 ou 31), T_{med} = temperatura média do ar (°C) em escala mensal, obtida pela média aritmética de T_{min} e T_{max}; I = índice anual de calor, a = índice térmico regional, φ é a latitude (graus) e δ = declinação solar (graus).

A CAD foi obtida pelo produto entre a capacidade de retenção de água no solo (CRAS, mm cm⁻¹) e o comprimento radicular das FCT (cm). Foi adotado o valor de CRAS = 1,3 mm cm⁻¹ dado pela média de três tipos de solos encontrados no Centro-Sul de Minas Gerais (DOOREMBOS e KASSAN, 1994; ALVES et al., 2020): I) solos predominantemente argilosos com alta CRAS (2,0 mm cm⁻¹); (II) solos predominantemente francos com média CRAS (1,4 mm cm⁻¹); e (III) solos predominantemente arenosos com baixa CRAS (0,60 mm cm⁻¹). O comprimento radicular adotado foi de 150 cm, o qual foi obtido pela média dos valores encontrados na literatura (Anexo 2). Assim, o valor adotado de CAD foi de 195 mm.

Por fim, os limiares hídricos (e notas) foram definidos como: se $DEF < CAD$ (195 mm ano^{-1}) então $N = 1$ e a área pode ser considerada apta; se $CAD < DEF \leq CAD + 25$ (220 mm ano^{-1}) então $N = 2$ e a área é restrita; e, se $DEF > 220 \text{ mm } \text{ano}^{-1}$, então $N = 3$ e a área pode ser considerada inapta ao cultivo das principais FCT. O acréscimo de +25 mm no $N = 2$ foi baseado nas recomendações de Sedyama et al. (2001); Santos et al. (2017b) e Florêncio et al. (2022) para o BHC em escala regional de culturas perenes.

2.5. Análise do impacto das projeções climáticas no zoneamento de aptidão para as frutíferas de clima temperado

O impacto das projeções climáticas no ZA para as principais FCT foi analisado em duas etapas: i) considerando as mudanças nas variáveis T_{min} ($^{\circ}\text{C}$), T_{max} ($^{\circ}\text{C}$), P (mm ano^{-1}), $NHFa$ (horas ano^{-1}) e DEF (mm ano^{-1}) que mais impactam os cultivos das FCT (TANASIJEVIC et al., 2014; SANTOS et al., 2017b; FRAGA et al., 2019; MARTINS et al., 2020; RODRÍGUEZ et al., 2021) e, ii) considerando alterações nas classes de aptidão. Na etapa i, o termo ‘mudanças’ refere-se à diferença entre os valores médios das variáveis projetadas no FP e FD (ambos para o SSP2-4.5 e SSP5-8.5) e o respectivo valor médio para o PP. Na etapa ii, foi gerado o padrão espacial da porcentagem de ZA e as classes de aptidão climática para o PP, FP e FD (SSP2-4.5, e SSP5-8.5). As análises de ambas etapas (i e ii) foram realizadas utilizando a média do conjunto de dados (EM) de todos os MCG, a fim de reduzir possíveis incertezas geradas individualmente por cada MCG, seguindo as recomendações de Elli et al. (2019), Fagundes et al. (2021), Reis et al. (2021) e Martins et al. (2022).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Validação da performance das saídas dos modelos climáticos para o período presente

Antes de realizar o ZA, foram validadas as simulações dos MCG para o PP (1995 – 2014) para cada variável (T_{min} , T_{max} , T_{med} e P) (Figura 3). Para isso, foi analisada a performance de cada um dos MCG, baseado no valor do viés médio (VM) e correlação (r), assim como o padrão espacial do VM considerando a EM dos MCG. Todos os MCGs conseguiram representar o comportamento mensal (e sazonal) das variáveis, com boa representação do sistema de monção da região (verões quentes e úmidos e invernos frios e secos (REBOITA et al., 2015; GARCIA et al., 2018). Apesar da maioria dos MCGs apresentarem elevados valores de r ($> 0,75$ para todas variáveis), houve superestimativa no VM para os valores diários de T_{min} (até 4°C), principalmente no IPSL-CM64-LR, MIROC6 e NorESM2-

LM e para os valores acumulados mensais de P (até 30 mm mês⁻¹), principalmente no ACCESS-CM2 e MIROC6. Do contrário, os MCGs tenderam a subestimar a Tmax em até 4°C. Ou seja, a superestimativa da Tmin e subestimativa da Tmax refletiram na subestimativa da Tmed, em ~-3°C para grande parte da região de estudo, exceto na porção sul (~+4°C). Tais tendências também refletiram nos valores mensais da EM.

Valores elevados de VM para Tmin e Tmax, principalmente na porção sul, podem estar ligados a dificuldade dos MCG do CMIP6 representar a temperatura de regiões de topografia complexa (ALMAZROUI et al., 2021; ORTEGA et al. 2021), uma vez que os maiores vieses ocorreram nas regiões de maior altitude. Dessa forma, para reduzir erros sistemáticos nos padrões simulados e projetados, principalmente de NHFd, NHFa e na ETP foi aplicada a correção de viés (equação 3) para Tmin e Tmax. Desse modo, a Tmed foi recalculada com base nas correções de Tmin e Tmax. Com relação a P, os vieses majoritariamente positivos podem estar associados a simulação mais intensa de convecção, devido a menor capacidade dos MCG representar a diversidade topográfica (ALMAZROUI et al., 2021); ou ainda uma possível representação errônea do transporte de umidade (RIVERA e ARNOULD, 2020) gerando superestimativa da P. Devido à baixa cobertura de dados observados para algumas regiões do Brasil (FLORENCIO et al., 2022), incluindo Minas Gerais (SANTOS, 2018), a precipitação não foi corrigida pela carência de uma base observada mais sólida.

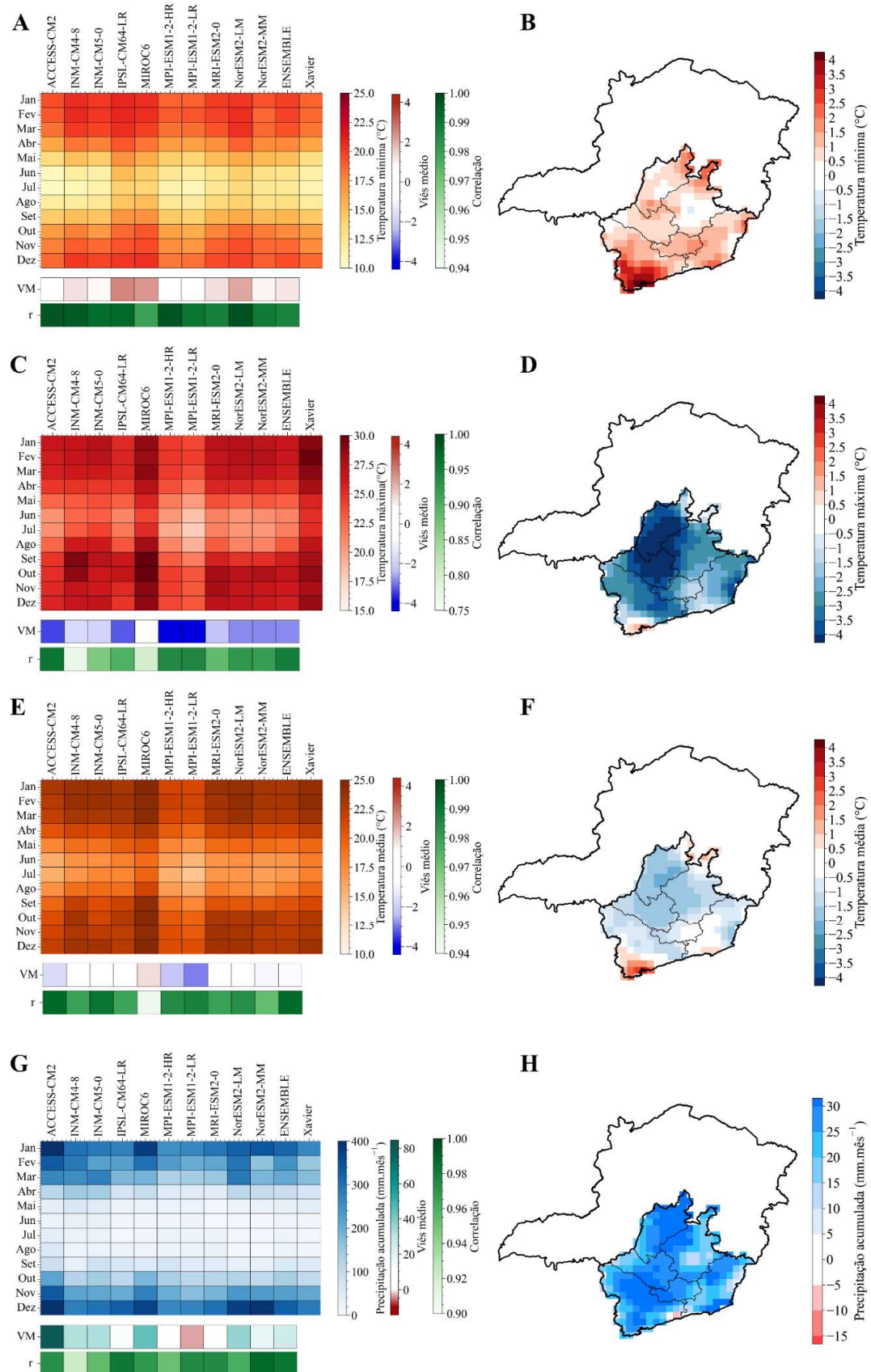


Figura 3 - Painéis à esquerda: ciclo anual da temperatura do ar (Tmin, Tmax e Tmed, °C) e precipitação acumulada (mm.mês⁻¹) simulados pelos dez modelos climáticos de circulação geral, EM e dados observados fornecidos por Xavier et al., (2016) para o período presente

(1995 – 2014). Painéis à direita: distribuição espacial do viés entre a EM dos MCGs e dado observado por Xavier et al., (2016). A e B = temperatura mínima do ar, C e D = temperatura máxima do ar, E e F = temperatura média do ar. G e H = precipitação acumulada mensal (mm mês^{-1}).

3.2. Projeções para as variáveis que mais impactam nas frutíferas de clima temperado

A figura 4 mostra o padrão espacial das mudanças (futuro menos período presente) para Tmin, Tmax, P, NHFa e DEF para o FD (2081 - 2100) em ambos SSPs (2-4.5 e 5-8.5). Os padrões espaciais de mudanças e magnitudes para o FP (2041 – 2060) foram omitidos por serem similares ao FD, exceto por uma tendência positiva de P no FP (no SSP2-4.5) em uma pequena porção ao sudeste da Zona da Mata.

São projetados aumentos de Tmin (Figura 4A-B) e Tmax (Figura 4C-D), para toda a região, sendo maior que $1,5^{\circ}\text{C}$ (SSP2-4.5), e chegando a $\sim 4,5^{\circ}\text{C}$ no SSP5-8.5 na maior parte da região e $\sim 5^{\circ}\text{C}$ na Central mineira. As projeções de mudança para a Tmin possuem magnitude semelhantes as projeções para a Tmax em ambos SSPs ($\sim 2^{\circ}\text{C}$ no SSP2-4.5 e $\sim 4,5^{\circ}\text{C}$ no SSP 5-8.5), porém, é mais intensa sobre as regiões Oeste de Minas, Central Mineira, e porção oeste do Sul/Sudoeste de Minas ($>4^{\circ}\text{C}$ no SSP5-8.5).

Uma ligeira divergência nas tendências (em sinal e magnitude) entre os SSPs é observada ao analisar as mudanças da P anual (Figura 4 E-F), o que pode indicar que existem influências das trajetórias de emissões nas caracterizações espaciais da P para a região de estudo. Tendência similar foi observada por Santos et al. (2017b); Reboita et al. (2018); Torres et al. (2021) e Florêncio et al. (2022) sobre Minas Gerais considerando modelos do CMIP5 e por Almazroui et al., (2021) por modelos do CMIP6. No cenário intermediário (SSP2-4.5) (Figura 4E) é projetada tendência de redução de P ($> 40 \text{ mm ano}^{-1}$) na maior parte da região, exceto na porção sul da região Sul/Sudeste, com aumento gradativo em direção ao norte. No cenário pessimista (SSP5-8.5) é projetada tendência de redução da P (em torno de -60 mm ano^{-1}) nas regiões Campos das Vertentes, Metropolitana de Belo Horizonte e Zona da Mata, e tendência de aumento da P (entre $+20$ a $+60 \text{ mm ano}^{-1}$) na porção sul da região Sul/Sudoeste. Além disso, pouca ou nenhuma alteração da P no norte da região Sul/Sudeste e extremo sul das regiões Campos das Vertentes e Zona da Mata.

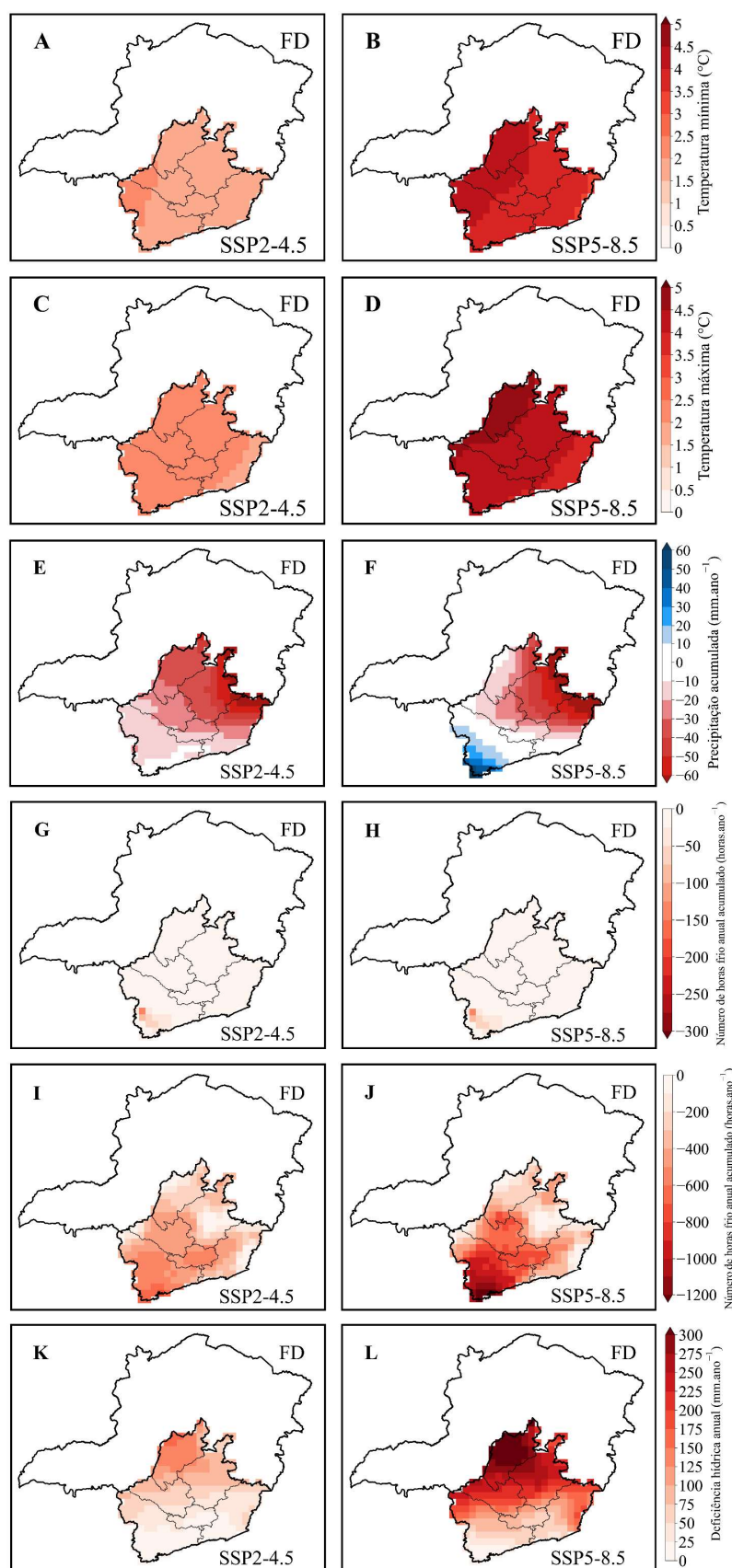


Figura 4 - Mudanças (futuro menos período presente) para a temperatura mínima do ar (T_{min} , °C) (painéis A, B), temperatura máxima do ar (T_{max} , °C) (painéis C, D), precipitação anual (P, mm ano⁻¹) (painéis E e F), número de horas frio anual para a temperatura base de 7°C (NHFa,

painéis G, H), número de horas frio anual para a temperatura base de 13°C (NHFa, painéis I, J) e deficiência hídrica anual (DEF, mm ano⁻¹) painéis (K, L), nos cenários SSP2-4.5 e 5-8.5. Os painéis foram confeccionados usando a EM dos modelos climáticos do CMIP6.

Com relação as mudanças no NHFa projetado para ambos limiares de Tb (7°C e 13°C), nota-se redução no acúmulo de frio em ambos SSPs (Figura 4 G, H, I, J) decorrente do aumento projetado da Tmin e Tmax. A redução foi mais intensa na Tb = 13°C, entre 200 - 600h ano⁻¹ no SSP2-4.5 e 400 - 1200h ano⁻¹ no SSP5-8.5, comparada a Tb = 7°C (<150h no SSP5-8.5). Ou seja, a menor redução para a Tb = 7°C, que representa o NHFa das FCT mais exigentes em frio, é justificada pelo menor acúmulo de NHFa no PP, onde apenas uma pequena área localizada no Sul/Sudoeste apresenta valores anuais entre 25-150h ano⁻¹ e nas demais regiões o NHFa < 25h ano⁻¹. De mesmo modo a simulação de NHFa relativa a Tb de 13°C foram mais significativas no Sul/Sudoeste de Minas devido a simularem as maiores quantidades da variável no clima presente.

Com relação a DEF, valores positivos de DEF são projetados (entre 150 e 300 mm ano⁻¹) para praticamente toda a região de estudo, exceto para a porção sul da região Sul/Sudoeste (~25 mm ano⁻¹), sendo mais intensos no SSP5-8.5 (Figura 4 K-L). As maiores magnitudes de mudanças (entre 225 e 300 mm ano⁻¹) ocorrem na Central mineira, Metropolitana de Belo Horizonte e Oeste de Minas. Enquanto as menores magnitudes (< 150 mm ano⁻¹) ocorrem nas porções mais ao sul como das regiões Campo das Vertentes, Zona da Mata e Sul/Sudoeste de Minas.

3.3. Zoneamento Agroclimático e alterações nas zonas de aptidão

As figuras 5 e 6 mostram o padrão espacial do ZA, porcentagem e classes de aptidão para as FCT mais exigentes (Tb = 7°C) e menos exigentes (Tb = 13°C) em frio no PP, FP e FD (em ambos SSPs). Considerando as FCT mais exigentes em frio (Figura 5), as áreas são totalmente regulares no PP (100%), com aparecimento de áreas restritas (~3%) e inaptas (~10%) no FP em ambos SSPs (2-4.5 e 5-8.5). As áreas restritas e inaptas são localizadas nas regiões Central Mineira e pequena porção da Metropolitana e são decorrentes, principalmente, do acúmulo insuficiente frio (~0h ano⁻¹) e aumento da DEF (> 100 mm ano⁻¹). No FD, são projetadas redução nas áreas regulares (entre 4% e 43%), manutenção das áreas restritas (entre 2% a 5%) e aumento das áreas inaptas (entre 13% e 52%). Ou seja, as áreas serão majoritariamente inaptas ao cultivo de culturas mais exigentes em frio, como maçã, noz-pecã, pêra, e cultivares mais exigentes de uva como a cv. Cabernet Sauvignon que necessita em torno de 300h a 450h (MONTEIRO et al., 2013; SANTOS, 2018).

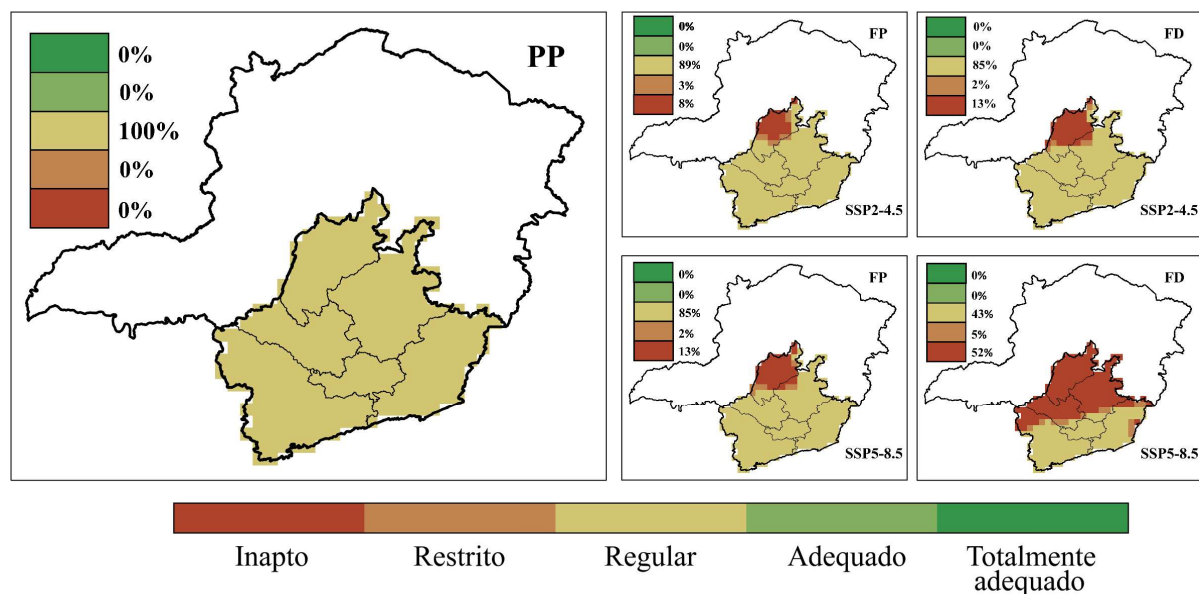


Figura 5 - Zoneamento agroclimático, área (em porcentagem) e classes de aptidão climática ao cultivo das frutíferas de clima temperado de maior exigência em frio ($T_b = 7^\circ\text{C}$) simulado para o período presente (PP, 1995 – 2014) e projetado para o futuro próximo (FP, 2041 – 2060) e distante (FD, 2081 – 2100) para os dois cenários (SSP 2-4.5 e 5-8.5).

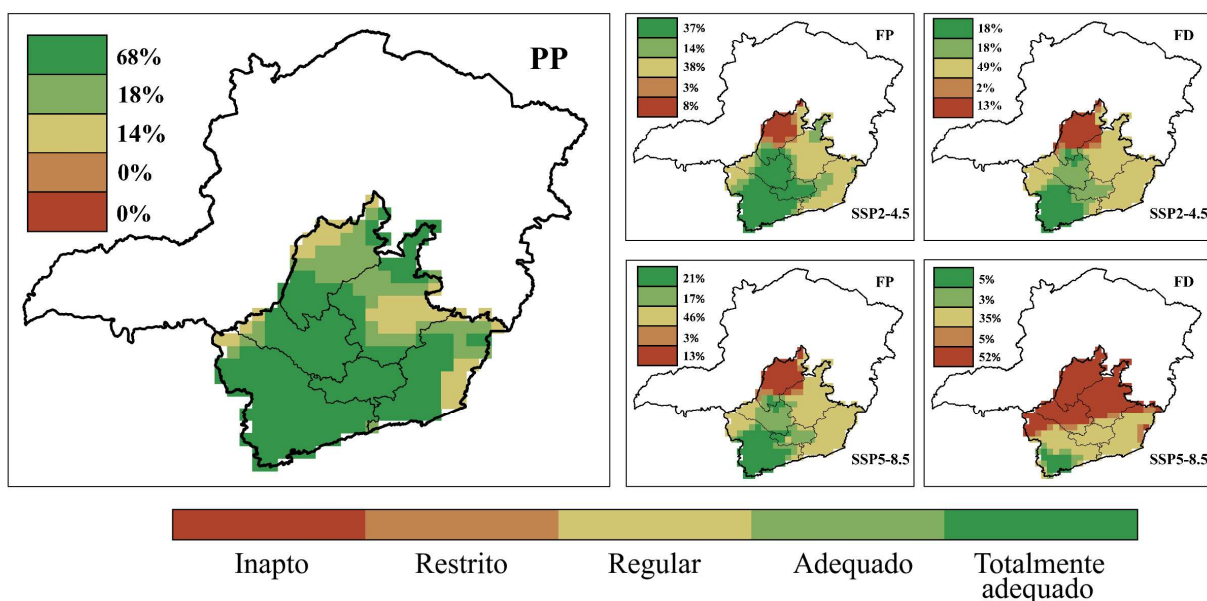


Figura 6 - Idêntica a figura anterior, porém para as frutíferas de clima temperado de menor exigência em frio ($T_b = 13^\circ\text{C}$).

Com relação as FCT menos exigentes em frio (Figura 6), 68% da área é totalmente adequada, 18% é adequada e 14% é regular ao cultivo no PP, sendo inexistente área restrita ou inapta. No entanto, no FP e FD são projetadas reduções nas áreas totalmente adequadas e adequadas, surgimento (e aumento) de áreas com aptidão regular, restrita e inapta, sendo mais intenso no FD e no SSP5-8.5. No FP entre ~37% (SSP5-8.5) e ~51% (SSP2-4.5) é totalmente

adequado ou adequado, ~42% é regular, ~3% restrito e ~13% é inapto ao cultivo das FCT. No FD, há diferença na abrangência das áreas inaptas e regulares entre os SSPs, decorrentes das influências das trajetórias de emissão nas caracterizações espaciais da P, e consequentemente da DEF (Figura 4 K-L). Ou seja, no SSP2-4.5 é projetado ~36% da área adequada, enquanto no SSP5-8.5 apenas a porção sul da região Sul/Sudeste será totalmente adequada ao cultivo de FCT, o que representa ~9% da área de estudo (ou ~5625 Km²). Apesar do sul da região Sul/Sudeste ter as maiores reduções no NHFa para ambas Tbs (7°C e 13°C) em ambos SSPs, as projeções do NHFa é > 300 h ano⁻¹. Nesta área, o acúmulo suficiente de NHFa (~1000 h ano⁻¹ no SSP2-4.5 e ~400 h ano⁻¹ no SSP5-8.5) associado a menor DEF (< 50 mm ano⁻¹ em ambos SSPs) (Figura 4) são responsáveis pela total aptidão das FCT ao longo do século XXI. As demais áreas serão majoritariamente inaptas (entre 13% e 52%), restritas (entre 2% a 5%) ou regulares (entre 35% a 49%) ao cultivo de FCT menos exigentes em frio (Tb = 13°C). Esses locais coincidem com regiões com projeções de redução da P (até 60 mm ano⁻¹), aumento da temperatura (entre 2° e 5 °C) e DEF (> 175 mm ano⁻¹), e que são hotspots de mudanças climáticas persistentes (SANTOS et al., 2017b; REBOITA et al., 2018; TORRES et al., 2021).

Projeções menos intensas de aumento da temperatura (Tmin e Tmax) aliadas a aumentos da P (Figura 4) no sul da região Sul/Sudeste são responsáveis pelo acúmulo suficiente de frio (> 300 h ano⁻¹), menor perda por ETc, menor DEF (< 50 mm ano⁻¹), e consequente aptidão ao cultivo de FCT menos exigentes em frio (Figura 6). Nesta área poderão ser cultivados figo, marmelo, pêssigo, uva, cultivares menos exigentes de oliveira, como as cvs. MGS GRAP1, MGS GRAP575, Cordovil de Serpa, Ropades 392 e Santa Catalina (MARTINS et al., 2020), e cultivares menos exigentes de maçã como a cv. Eva, que necessita acumular entre 150h–400h (CABONIERI e MORAIS, 2015). Além disso, no caso da uva, poderão ser cultivadas as cvs. Bordô, Chardonnay, Concord Isabel, Merlot e Niágara rosada, que necessitam de baixo acúmulo de frio (PERUZZO et al., 2014; SANTOS, 2018). Porém, especificamente para a oliveira, aumentos de P nos meses de frutificação (entre novembro e janeiro) (GARCÍA-MOZO et al., 2010) podem ser negativos, pois reduzem o conteúdo de óleo dos frutos (SANTOS et al., 2017b; GARCIA et al., 2018), gerando prejuízo na extração e na qualidade do azeite (ORGAZ e FERERES, 1999; SANTOS et al., 2017b; FRAGA et al., 2019).

Já nas demais regiões são projetados aumentos intensos da temperatura (até 4°C na Tmin e 5°C na Tmax), redução da P (> 60 mm ano⁻¹). Aumentos de temperatura além de reduzir o acúmulo de frio das FCT (LUEDELING et al., 2012; FRAGA et al., 2019; AHMADI et al., 2019; EL YAACOUBI et al., 2019; FERNANDEZ et al., 2020; MARTINS et al., 2020; FRAGA e SANTOS, 2021; RODRÍGUEZ et al., 2021; SALAMA et al., 2021, NOORAZAR

et al., 2022) são responsáveis pela ocorrência de várias alterações metabólicas, fisiológicas e morfológicas (BAHUGUNA e JAGADISH, 2015; GARCÍA-MOZO et al., 2010). Tais alterações são desencadeadas devido (RUELLAND e ZACHOWSKI 2010, BAHUGUNA e JAGADISH, 2015; HATFIELD e PRUEGER, 2015): i) prejuízo na ativação da ribulose-1,5-bifosfato carboxilase-oxigenase (RuBisCo) pela RuBisCo activase; ii) favorecimento da atividade oxigenase da RuBisCo devido à maior solubilidade do O₂ em relação ao CO₂, e com isso há um aumento da fotorrespiração em detrimento a fotossíntese; iii) inibição da atividade de transporte de elétrons, síntese de ATP e regeneração da ribulose-1,5-bifosfato (RuBP), a qual limita a fixação de CO₂; e iv) aumento do consumo de energia ou esqueletos carbonatos. Todas alterações elevam os custos de manutenção celular, reduzem as taxas de desenvolvimento e, conseqüentemente, aumentam as durações dos estágios fenológicos, podendo impactar a qualidade das FCT.

Por outro lado, processos fisiológicos decorrentes especificamente da redução do acúmulo de frio são: redução da permeabilidade das membranas celulares, menor translocação de solutos para as células, solubilização do amido, nitrogênio e substâncias graxas, proporcionando menor disponibilidade de ácidos graxos, açúcares e nitrogênio solúveis, os quais são essenciais para a brotação (HELDWEIN et al., 1989; BAHUGUNA; JAGADISH, 2015; FRAGA et al., 2019; MARTINS et al., 2020). Além disso, há alteração na síntese de giberelina, no balanço hormonal e conseqüentemente na taxa de respiração das FCT (HELDWEIN et al., 1989; SANTOS et al., 2017a). Todos processos associados influenciam negativamente a fenologia e a duração dos estágios fenológicos das FCT (GARCÍA-MOZO et al., 2010; FRAGA et al., 2019; MARTINS et al., 2020; RODRÍGUEZ et al., 2021; SALAMA et al. 2021). No entanto, as alterações mais significativas ocorrem durante o período reprodutivo. Nesse sentido, a emissão e a abertura de flores e brotos só ocorre após o acúmulo de frio ser completado (PIO et al., 2019; FRAGA et al., 2019; FERNANDEZ et al.; MARTINS et al., 2020; RODRÍGUEZ et al., 2021; NOORAZAR et al., 2022). Caso o acúmulo seja insuficiente, haverá atrasos na floração, floração prolongada e desuniforme, redução do número de inflorescência por ramo, aumento na produção de flores imperfeitas e em casos mais graves abortamento floral (GOU et al., 2014; MARTINS et al., 2020). O aumento da temperatura durante os meses de inverno também pode contribuir para que haja um florescimento precoce das FCT, podendo danificar os princípios de brotos e folhas devido a ocorrência de eventos que causem redução da temperatura (PIO et al., 2019; HAOKIP et al., 2020), como entrada de sistemas frontais (REBOITA et al., 2015). Todos esses fatores são responsáveis pela menor produção de biomassa, redução da produtividade da qualidade da produção (ANDRESEN e

BAULE, 2018; HOOKIP et al., 2020, FRAGA et al., 2019; MARTINS et al., 2020; NOOZARAR et al., 2022), além de afetar a longevidade das FCT (MARTINS et al., 2020; GARCIA et al., 2020).

Ademais, aumentos da temperatura contribuem para o déficit de pressão de vapor e aumento da ETc. Porém, a redução projetada na P (Figura 4 F) limita a disponibilidade de água às FCT, uma vez que as perdas por ETc são superiores a entrada de P, levando a situações de DEF (TANASIJEVIC et al., 2014; SANTOS et al., 2017b; SANTOS, 2018), afetando diretamente a atenuação da temperatura foliar que ocorre através da transpiração (ANDRESEN e BAULE, 2018). Como estratégia de defesa as FCT reduzem a área foliar, fecham os estômatos, o que leva a redução das trocas gasosas (TANASIJEVIC et al., 2014; SANTOS et al., 2017b), impactando, em longo prazo, na redução da produtividade e qualidade da produção das FCT (TANASIJEVIC et al., 2014; ANDRESEN e BAULE, 2018; FRAGA et al., 2020). Outros processos fisiológicos afetados pela DEF são o aumento da relação fotorrespiração/fotossíntese (FAGUNDES et al., 2021) e afrouxamento da parede celular devido a contração celular (SANTOS, 2018).

É importante salientar que o efeito dos eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas severas e tempestades severas que são projetados para a região (NATIVIDADE et al., 2017; REBOITA et al., 2018; AVILA-DIAZ et al., 2020; GEIRINHAS et al., 2021; SILVA et al., 2022) não foram levados em consideração neste estudo. Portanto, espera-se que sejam ameaças adicionais ao cultivo de FCT na região em condições de clima futuro. Deve-se enfatizar que os achados deste estudo são dependentes das culturas e variedades, e não devem ser diretamente comparáveis dadas as especificidades de cada cultura e variedade (MARTINS et al., 2020; FRAGA; SANTOS, 2021).

Como resultado, medidas adaptativas para enfrentar os aumentos de temperatura, especialmente a Tmin, e redução da P devem ser adotadas para mitigar as perdas de rendimento/qualidade e garantir a sustentabilidade da fruticultura de plantas de clima temperado. Nas regiões em que o acúmulo de frio é entre 150 e 300 h ano⁻¹ devem ser adotadas as medidas: i) desenvolvimento e introdução de novas cultivares, especialmente genótipos de menor requerimento de frio (ANDRESEN e BAULE, 2018; PIO et al., 2019; FRAGA e SANTOS, 2021; RODRIGUEZ et al., 2021); ii) revolução nas técnicas de melhorias das plantas (molecular ou convencional) (TORRES et al., 2021); iii) indução da quebra de dormência pela utilização de compostos químicos ou orgânicos, como extrato de alho (BOTELHO e MÜLLER, 2007), cianamidas (EREZ, 1995; BOTELHO et al., 2002; PETRI et al., 2016; SALAMA et al., 2021), óleos minerais (EREZ, 1995; BOTELHO e MÜLLER, 2007; PETRI et al., 2016;

SALAMA et al., 2021), thiorueia e ácido giberélico (EREZ, 1995; PETRI et al., 2016; SALAMA et al., 2021)., nitrato de potássio, dinitro-ortho-cresol (DNOC), dinitro-orto-butilfenol (DNOPB), dinitro-butilfenol (DNBP), thiorueia, pentaclorofenolato de sódio, TCMTB (2-tiocitiometiltio), benzotiazol 30%, thiadizuron (TDZ) (PETRI et al., 2016). Porém, é válido ressaltar que a utilização de compostos químicos pode levar a danos na saúde, redução da qualidade do fruto (BOTELHO e MÜLLER, 2007; PIO et al., 2019; RODRIGUEZ et al., 2019) e ser tóxicos para insetos polinizáveis, como a abelha.

Nas áreas em que a deficiência hídrica é elevada (e acima de 220 mm ano⁻¹), as seguintes medidas deverão ser adotadas: i) irrigação suplementar (ANDRESEN e BAULE, 2018; FRAGA et al., 2020; FLORÊNCIO et al., 2022), ii) uso de sistemas de sombreamento ou protetores solares que reduzem os fluxos excessivos de calor e radiação (FRAGA; SANTOS, 2021). Entretanto, é importante salientar que medidas relacionadas à irrigação podem ser restringidas nos locais onde há redução intensa da P (TANASIJEVIC et al., 2014; SANTOS et al., 2017b; FRAGA et al., 2020).

Outras medidas relacionadas a práticas culturais e de manejo, como o aperfeiçoamento de porta-enxertos, desfolha direcionada (FRAGA; SANTOS, 2021) e indução da brotação através de estresse hídrico em FCT menos exigentes em frio (PIO et al., 2019) podem ser efetivas na redução dos requisitos em frio. Estratégias de controle de pragas e doenças também serão necessárias. Os níveis de pragas e doenças podem aumentar, com muitas gerações por ano, ou várias gerações sobrepostas devido ao aumento da temperatura e DEF (TORRES et al., 2021; MARTINS et al., 2022; FLORÊNCIO et al., 2022). Controles biológicos serão necessários, por exemplo pela introdução de inimigos potenciais naturais (predadores ou parasitoides), ou pela adoção de estratégias não ambientalmente amigáveis, como aplicação de inseticidas óleo mineral, deltametrina, malationa, trimedlure, tiametoxam, indoxacarbe e lufenuron (NAVA et al., 2020). clorpirifós-etil, metidatim, triclorfom, tebufenozide, fenitrotion e carbaril (BOTTON et al., 2000), fipronil (BOTTON et al., 2013), acetamiprido, clorantraniliprole, etofenproxi, fosmete e Espinetoram (CHAVES et al., 2014).

Além disso, com o aumento da frequência e intensidade de eventos extremos (NATIVIDADE et al., 2017; REBOITA et al., 2018; AVILA-DIAZ et al., 2020; SILVA et al., 2022) a ocorrência de granizo deve se tornar mais frequente, devendo ser recomendada a utilização de telas antigranizo (ANDRESEN e BAULE, 2018; TREDER et al., 2016), principalmente para culturas mais vulneráveis a esse tipo de evento, como a maçã, uva e oliveira (ANDRESEN e BAULE, 2018).

4. CONCLUSÃO

Mudanças na temperatura mínima, máxima, precipitação, número de horas frio e deficiência hídrica são projetadas ao longo do século XXI. Essas mudanças podem aumentar a vulnerabilidade das frutíferas de clima temperado, ou amplificar as vulnerabilidades já existentes. Os aumentos de temperatura são mais intensos no futuro distante e nas áreas localizadas mais ao norte como a Central Mineira, Metropolitana de Belo Horizonte e parte oeste do Sul/Sudoeste de Minas. Redução na precipitação é projetada no futuro distante para quase toda a região com valores mais intensos na Central Mineira, Metropolitana de Belo Horizonte e parte norte da Zona da Mata, exceto na porção sul da região Sul/Sudoeste de Minas.

O padrão espacial do zoneamento agroclimático indica que os plantios com frutíferas de clima temperado serão restritos e economicamente inviáveis em cerca de 13% (SSP2.4-5) a 52% (SSP5.8-5) da área no futuro distante (2081 – 2100) devido ao aumento combinado da temperatura do ar e deficiência hídrica com redução da precipitação e acúmulo de frio. As áreas regulares abrangem entre 35% a 49% ao longo do século 21, onde a temperatura do ar tem aumento superior a 2°C e o déficit hídrico projetado é inferior a 200 mm ano⁻¹. Por outro lado, somente o plantio de frutíferas de clima temperado de baixa exigência em frio ($T_b = 13^{\circ}\text{C}$) será adequado (ou totalmente adequado) na porção sul do Centro-Sul de Minas Gerais.

Os resultados mostram que há projeções de áreas adequadas (entre 8% a 50%) e regulares (entre 35% a 49%) ao plantio de frutíferas de clima temperado. Assim, medidas adaptativas deverão ser adotadas para reduzir as vulnerabilidades dos futuros plantios, como seleção e introdução de cultivares menos exigentes em requerimento de frio, aprimoramento de técnicas de melhoramento de plantas, irrigação suplementar e uso de produtos químicos ou orgânicos para induzir artificialmente a quebra de dormência, mesmo sendo prejudiciais ao ambiente.

5. REFERÊNCIAS

- AHMADI, H.; GHALHARI, G. F.; BAAGHIDEH, M. Impacts of climate change on apple tree cultivation areas in Iran. **Climatic Change**, v. 153, n. 1-2, p. 91-103, 2019.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. **FAO – Irrigation and Drainage Paper**, Roma, n. 56, p. 333, 1998.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. **ESTUDIO FAO RIEGO Y DRENAJE**, Roma, n. 56, p. 277, 2006
- ALMAZROUI, M.; ASHFAQ, M.; ISLAM, M. N.; RASHID, I. U.; KAMIL, S.; ABID, M. A.; O'BRIEN, E.; ISMAIL, M.; REBOITA, M. R.; SÖRENSON A. A.; ARIAS, P. A.; ALVEZ, L. M.; TIPPETT M. K.; SAEED, S.; HAARSMA, R.; DOBLAS-REYES, F. J.; SAEED, S.; KUCHARSKI, F.; NADEEM, I.; SILVA-VIDAL, Y.; RIVERA, J. A.; EHSAN, M. A.; MARTÍNEZ-CASTRO, D.; MUÑOZ, Á. G.; ALI, Md. A.; COPPOLA, E.; SYLLA, M. B. 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.
- ALVES, A. M. DE M. R.; MARTINS, F. B.; REBOITA, M. S. Balanço hídrico climatológico para Itajubá-MG: cenário atual e projeções climáticas. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 712-732, 2020.
- ANDRESEN, J. A.; BAULE, W. J. Perennial Systems (Temperate Fruit Trees and Grapes). **Agroclimatology: Linking Agriculture to Climate**, v. 60, p. 425-452, 2020.
- ANGELOCCI, L. B.; CAMARGO, B. P. M.; PEDRO JR, M. J.; ORTOLANI, A. A.; ALFONSI, R. R. Estimativa do total de horas abaixo de determinada temperatura-base através das medidas diárias da temperatura do ar. **Bragantia**, v. 38, p. 27-36, 1979.
- ANZANELLO, R.; BIASI, L. A. Base temperature as a function of genotype: a foundation for modeling phenology of temperate fruit species. **Ciências Agrárias**, v. 37, n. 4, p. 1811-1826, 2016.
- ANZANELLO, R.; FOGAÇA, C. M.; SARTORI, G. B. D. Induction and overcoming of dormancy of grapevine buds in response to thermal variations in the winter period. **Ciência Rural**, v. 51, n. 11, p. e20200887, 2021.
- ASCHONITIS, V.; TOULOUMIDIS D.; TEN VELDHUIS, M.-C.; COENDERS-GERRITS M. Correcting Thornthwaite potential evapotranspiration using a global grid of local coefficients to support temperature-based estimations of reference evapotranspiration and aridity indices. **Earth System Science Data**, v. 14, n. 1, p. 163-177, 2022.
- ASSAD, E. D.; MARTINS, S. C.; BELTRÃO, N. E. M; PINTO, H. S. Impacts of climate change on the agricultural zoning of climate risk for cotton cultivation in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 1, p. 1-8, 2013.
- AVILA-DIAZ, A.; JUSTINO, F.; LINDEMANN, D. S.; RODRIGUES, J. M.; FERREIRA, G. R. Climatological aspects and changes in temperature and precipitation extremes in Viçosa-Minas Gerais. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, n. 2, 2020.
- BAHUGUNA, R. N.; JAGADISH, K. SV. Temperature regulation of plant phenological development. **Environmental and Experimental Botany**, v. 111, p. 83-90, 2015.

- BOTELHO, R. V.; PIRES, E. J. P.; TERRA M. M. BROTAÇÃO E PRODUTIVIDADE DE VIDEIRAS DA CULTIVAR CENTENNIAL SEEDLESS (*Vitis vinifera* L.) TRATADAS COM CIANAMIDA HIDROGENADA NA REGIÃO NOROESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 24, n. 3, p. 611-614, 2002.
- BOTELHO, R. V.; MÜLLER, M. M. L. EXTRATO DE ALHO COMO ALTERNATIVA NA QUEBRA DE DORMÊNCIA DE GEMAS EM MACIEIRAS cv. FUJI KIKU. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 29, n. 1, p. 037-041, 2007.
- BOTTON, MARCOS; NAKANO, OCTÁVIO; KOVALESKI, ADALÉCIO. Controle químico da lagarta-enroladeira (*Bonagota cranaodes* Meyrick) na cultura da macieira. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 11, p. 2139-2144, 2000.
- BOTTON, M.; BERNARDI, D.; EFROM, C. F. S.; BARONIO, C. A. Eficiência de inseticidas no controle de *Eurhizococcus brasiliensis* (Hemiptera: Margarodidae) na cultura da videira. **Bioassay**, v. 8, n.5, p. 1-5, 2013.
- CAMPOY, J. A.; RUIZ D.; ALLDERMAN, L.; COOK, N.; EGEA, J. The fulfilment of chilling requirements and the adaptation of apricot (*Prunus armeniaca* L.) in warm winter climates: an approach in Murcia (Spain) and the Western Cape (South Africa). **European Journal of Agronomy**, v. 37, n. 1, p. 43-55, 2012.
- CAMPOY, J. A.; DARBYSHIRE, R.; DILEWANGER E.; QUERO-GARCÍA J.; WENDEN B. Yield potential definition of the chilling requirement reveals likely underestimation of the risk of climate change on winter chill accumulation. **International Journal of Biometeorology**, v. 63, n. 2, p. 183-192, 2019.
- CARBONIERI, J.; MORAIS, H. Horas e unidades de frio em pomares de maçã com diferentes microclimas. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 37, p. 1-12, 2015.
- CHAVES, C. C.; BARONIO, C. A.; BOTTON, M.; GARCIA, M. S. Efeito de inseticidas em diferentes fases de desenvolvimento de *Grapholita molesta* (Busck, 1916) (Lepidoptera: Tortricidae) e estruturas vegetais da macieira e do pessegueiro. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, n. 4, p. 842-852, 2014.
- CONCEIÇÃO, M. A. F.; NACHTIGALL, G. R.; CARGNINO, C.; FIORAVANÇO, J. C. Demanda hídrica e coeficientes de cultura (Kc) para macieiras em Vacaria, RS. **Ciência Rural**, v. 41, n. 3, p. 459-462, 2011.
- DE MELO-ABREU, J. P.; BARRANCO, D.; CORDEIRO, A. M.; TOUS, J.; ROGADO, B. M.; VILLALOBOS, F. J. Modelling olive flowering date using chilling for dormancy release and thermal time. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 125, n. 1-2, p. 117-127, 2004.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Crop water requeriments**. Rome: FAO, 1977. 306p. (Irrigation and Drainage Paper, v. 24).
- DOORENBOS, J.; KASSAN, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Trad. GHEYI, H. Campina Grande: UFPB, 1994. 306p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).
- DOURADO-NETO, D.; de JONG van Lier, Q.; METSELAAR K.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. R. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 1, p. 87-95, 2010.
- EL YAACOUBI, A.; OUKABLI, A.; LEGAVE, J-M.; AINANE, T.; MOUHAJIR, A.; ZOUHAIR, R.; HAFIDI, M. Response of almond flowering and dormancy to Mediterranean temperature conditions in the context of adaptation to climate variations. **Scientia Horticulturae**, v. 257, p. 108687, 2019.

- ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; FREITAS, C. H.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A. Intercomparison of structural features and performance of Eucalyptus simulation models and their ensemble for yield estimations. **Forest Ecology and Management**, v. 450, p. 117493, 2019.
- EPAGRI. **Avaliação de cultivares para o estado de Santa Catarina 2015-2016**. Boletim Técnico, n. 171, 73p.
- EREZ A. MEANS TO COMPENSATE FOR INSUFFICIENT CHILLING TO IMPROVE BLOOM AND LEAFING. **Acta Horticulturae**, v. 395, p. 81-95, 1995.
- FACHINELLO, J. C.; PASA, M. da S.; SCHMTIZ, J. D.; BETEMPS, D. L. Situação e perspectivas da fruticultura de clima temperado no Brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, n. spe1, p. 109-120, 2011.
- FADÓN, E.; HERRERA, S.; GUERRERO B. I.; GUERRA, M. E. M.; RODRIGO, J. Chilling and heat requirements of temperate stone fruit trees (*Prunus* sp.). **Agronomy**, v. 10, n. 3, p. 409, 2020.
- FAGUNDES, F. F. A.; REIS, F. Y. S.; MARTINS, F. B. A model for predicting the initial development of two native forest species under current and future climates. **Environmental and Experimental Botany**, v. 192, p. 104662, 2021.
- FAO - Food and Agriculture Organization. **FAOSTAT (2020)**. Disponível em: < (<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>) >. Acesso em 14 de junho de 2022.
- FERNANDEZ, E.; WHITNEY C.; CUNEO, I. F.; LUEDELING E. Prospects of decreasing winter chill for deciduous fruit production in Chile throughout the 21st century. **Climatic Change**, v. 159, n. 3, p. 423-439, 2020.
- FERREIRA, T. T. S.; RODRIGUES, D. N. B.; GOMES FILHO, R. R. Demanda hídrica de fruteiras utilizando coeficiente de redução da evapotranspiração adequado a região do Baixo Jaguaribe no Ceará. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 4, n. 4, p. 217-225, 2013.
- FLORÊNCIO, G. W. L.; MARTINS, F. B.; FERREIRA, M. C.; PEREIRA, R. A. A. Impactos de mudanças climáticas no desenvolvimento vegetativo de cultivares de oliveira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 9, p. 641-647, 2019.
- FLORÊNCIO, G. W. L.; MARTINS, F. B.; FAGUNDES, F. F. A. Climate change on Eucalyptus plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across Brazil. **Industrial Crops & Products**, v. 188, p. 115538, 2022.
- FRAGA, H.; PINTO, J. G.; SANTOS, J. A. Climate change projections for chilling and heat forcing conditions in European vineyards and olive orchards: A multi-model assessment. **Climatic Change**, v. 152, n. 1, p. 179-193, 2019.
- FRAGA, H.; PINTO, J. G.; SANTOS, J. A. Olive tree irrigation as a climate change adaptation measure in Alentejo, Portugal. **Agricultural Water Management**, v. 237, p. 106193, 2020.
- FRAGA, H.; SANTOS, J. A. Assessment of climate change impacts on chilling and forcing for the main fresh fruit regions in Portugal. **Frontiers in Plant Science**, v. 12, p. 1-13, 2021.
- FRICKO, O.; HAVILIK, P.; ROGELJ, J.; KLIMONT, Z.; GUSTI, M.; JOHNSON, N.; KOLP, P.; STRUBEGGER, M.; VALIN, H.; AMANN, M.; ERMOLIEVA T.; FORSELL, N.; HERRERO, M.; HEYES, C.; KINDERMANN, G.; KREY, V.; MCCOLLUM, D. L.; OBERSTEINER, M.; PACHAURI, S.; RAO, S.; SCHMID E.; SCHOEPP, W.; RIAHI, K. The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 251-267, 2017.

- GARCIA, S. R.; SANTOS, D. F.; MARTINS, F. B.; TORRES, R. R. Aspectos climatológicos associados ao cultivo da oliveira (*Olea europaea* L.) em Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 188-209, 2018.
- GARCÍA-MOZO, H.; MESTRE, A.; GALÁN, C. Phenological trends in southern Spain: A response to climate change. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.150, n. 4, p.575-580, 2010.
- GEIRINHAS, J. L.; RUSSO, A.; LIBONATI, R.; SOUSA, P. M.; MIRALLES, D. G.; TRIGO, R. M. Recent increasing frequency of compound summer drought and heatwaves in Southeast Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 3, p. 034036, 2021.
- GOU, L.; DAI, J.; RANJITKAR, S.; YU, H.; XU, J.; LUEDELING, E. Chilling and heat requirements for flowering in temperate fruit trees. **International Journal of Biometeorology**, v. 58, n. 6, p. 1195-1206, 2014.
- HAOKIP, S. W.; SHANKAR, K.; LALRINNGHETA, J. Climate change and its impact on fruit crops. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 9, n. 1, p. 435-438, 2020.
- HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. **Weather and Climate Extremes**, v. 10, p. 4-10, 2015.
- HELDWEIN, A. B.; ANGELOCCI, L. R.; ESTEFANEL, V.; SCHNEIDER, F. M.; BURIOL, G. A. Avaliação de modelos de estimativa de horas de frio para Santa Maria, RS. **Revista Centro de Ciências Rurais**, v. 19, p. 45-92, 1989.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística: **Plano Agrícola Municipal (2020)**. Disponível em: < (www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=destaques /)> Acesso em: 10 de abril de 2022.
- IPCC. **Intergovernmental Panel on Climate Change - Summary for Policymaker. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021.
- JOHNSON, R.; KUBY, P. **ESTAT**. 2ª ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014. 368 p.
- KUDEN, A. B.; TUZCU, Ö.; BAYAZIT S.; YILDIRIM, B.; IMRAK, B. Studies on the chilling requirements of pecan nut (*Carya illionensis* Koch) cultivars. **African Journal of Agricultural Research**, v. 8, n. 24, p. 3159-3165, 2013.
- LENDERINK, G.; BUISHAND, A.; VAN DEURSEN, W. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 3, p. 1145-1159, 2007.
- LOPES, P. R. C. Pesquisas com frutas de clima temperado e subtropical chegam às áreas dos produtores. **Cadernos do Semiárido: Riquezas e Oportunidades**, Recife, n. 4, p. 34-35, 2015.
- LUEDELING, E.; ZHANG, M.; GIRVETZ, E. H. Climatic changes lead to declining winter chill for fruit and nut trees in California during 1950–2009. **PloS One**, v. 4, n. 7, p. e6166, 2009.
- LUEDELING, E. Climate change impacts on winter chill for temperate fruit and nut production: a review. **Scientia Horticulturae**, v. 144, p. 218-229, 2012.

- LUPPI, A. S. L.; SANTOS A. R.; EUGÊNIO, F. C.; BRAGANÇA, R. PELUZIO, J. B. E.; DALFI, R. L.; SILVA, R. G. Metodologia para classificação de zoneamento agroclimatológico. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 15, p. 80-97, 2014.
- MARENCO, R. A.; LOPES, N. F. **Fisiologia vegetal: Fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição mineral**. 3.ed. Viçosa: Editora UFV, 2009. 486p.
- MARTINS, F. B.; PEREIRA, R. A. A.; TORRES, R. R.; SANTOS, D. F. Climate projections of chill hours and implications for olive cultivation in Minas Gerais, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, p. 01852, 2020.
- MARTINS, F. B.; BENASSI, R. B.; TORRES, R. R.; NETO, F. A. B. Impacts of 1.5° C and 2° C global warming on Eucalyptus plantations in South America. **Science of The Total Environment**, v. 825, p. 153820, 2022.
- MONTEIRO, A. F. M.; MARTINS, F. B.; TORRES, R. R.; ALMEIDA, V. H. M.; ABREU, M. C.; MATTOS, E. V. Intercomparison and uncertainty assessment of methods for estimating evapotranspiration using a high-resolution gridded weather dataset over Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 146, p. 583-597, 2021.
- MONTEIRO, J. E. B. de A.; SANTOS, H. P. dos; FARIAS, A. R. **Zoneamento de horas de frio no sul do Brasil para uvas de baixa e alta exigência: presente e futuro**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 18., 2013, Belém, PA. Belém, PA: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 2013.
- NATIVIDADE, U. A.; GARCIA, S. R.; TORRES, R. R. Tendências dos Índices de Extremos Climáticos Observados e Projetados no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 600-614, 2017.
- NAVA, D. E.; UENO, B.; MENEZES, A.; BERNARDI, D.; BOTTON, M.; FLORES CANTILLANO, R. F. **Grade de agrotóxicos e afins da produção integrada do pêssego - Ciclo 2020/2021**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2020. 11p. (Embrapa Clima Temperado. Comunicado Técnico, 378).
- NOORAZAR, H.; KALCSITS, L.; JONES, V. P.; JONES M. S.; RAJAGOPALAN, K. Climate change and chill accumulation: implications for tree fruit production in cold-winter regions. **Climate Change**, v. 171., n. 3-4, p. 16, 2022.
- O'NEILL, B. C.; TEBALDIL, C.; Van VUUREN, D. P.; EYRING V.; FRIEDLINGSTEIN, P.; HURTT G.; KNUTTI R.; KRIEGLER E. 8, LAMARQUE J-F., LOWE J.; MEEH G. A.; MOSS R.; RIAHI K.; SANDERSON B. M. The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. **Geoscientific Model Development**, v. 9, n. 9, p. 3461-3482, 2016.
- ORGAZ, F.; FERERES, E. Riego. In: Barranco, D. **Cultivo del olivo**. Madri: Mundi-Prensa. 1999. p.267-288.
- ORTEGA, G.; ARIAS, P. A.; VILLEGAS, J. C.; MARQUET, P. A.; NOBRE, P. Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 15, p. 6713-6735, 2021.
- UDIN, L.; HERVIEU, F.; MICHEL, C.; PERRIN, C.; ANDRÉASSIAN, V.; ANCTIL, F.; LOUMAGNE, C. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. **Journal of hydrology**, v. 303, n. 1-4, p. 290-306, 2005.

- PETRI, J. L.; HAWERROTH, F. J.; LEITE, G. B.; SEZERINO, A. A.; COUTO, M. **Reguladores de crescimento para frutíferas de clima temperado**. Florianópolis, SC: Epagri, 2016. 141p.
- PEREIRA, A. R. Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, v. 64, n. 2, p. 311-313, 2005.
- PERUZZO, S. N.; MARCHI, V. V.; SANTOS, H. P.; FIALHO, F. B.; SOUZA, D. A. Necessidade de horas de frio para superação da endodormência em cultivares *Viris labrusca* L. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 4., 2014, Bento Gonçalves, RS. **Anais...** Bento Gonçalves: IFRS, 2014. p.1-5.
- PIO, R.; SOUZA, F. B. M.; KALCSITZ, L.; BISI, R. B.; FARIAS, D. H. Advances in the production of temperate fruits in the tropics. **Acta Scientiarum**, v. 41, p. e39549, 2019.
- POLA, A. C.; ANGELOCCI, L. R. Avaliação de modelos de estimativa do número diário de "horas de frio" para o estado de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.1, n. 1, p. 105-116, 1993.
- RAMOS, D. P.; LEONEL, S. Características dos frutos de cultivares de pessegueiros e de nectarineira, com potencial de cultivo em Botucatu, SP. **Bioscience Journal**, v. 24, n. 1, p. 10-18, 2008.
- REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, p. 206-226, 2015.
- REBOITA, M. S.; MARRAFON, V. H. A.; LLOPART, M.; DA ROCHA, R. P. CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS PROJETADOS PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 33, n. 2, p. 110-128, 2018.
- REETZ, E. R.; KIST, B. B.; CARVALHO, C. BELING, R. R. **Anuário brasileiro de Horti&Fruti 2022**. Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, 2022. 96p.
- RIAH, K., Van VUUREN, D. P.; KLIEGER E.; EDMONDS, J.; O'NEILL, B. C.; FUJIMORI, S.; BAUER, N.; CALVIN, K., DELLINK, R.; FRICKO, O.; LUTZ W., POPP, A.; CUARESMA, J.; KC S.; LEIMBACH, M.; JIANG; L.; KRAM, T; RAO, S; EMMERLING J.; EBI, K.; HASEGAWA, T.; HAVLIK, P.; HUMPENÖDER, F.; SILVA, L. A.; SMITH, S.; STEHFEST, E.; DROUET, L.; KREY, V.; LUDERER, G.; HARMSSEN, M.; TAKAHASHI, K.; BAUMSTARK, L.; DOELMAN, J. C.; KAINUMA, M.; KLIMONT Z.; MARANGONI, G.; LOTZE-CAMPEN, H.; OBSERTEINER, M.; TABEAU, A.; TAVONI, M. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. **Global environmental change**, v. 42, p. 153-168, 2017.
- REIS, F. Y S.; MARTINS, F. B.; TORRES, R. R.; FLORÊNCIO, G. W. L.; CASEMIRO, J. M.; MONTEIRO, V. F. C.; FERREIRA, M. C. Climate change impact on the initial development of tropical forest species: a multi-model assessment. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 145, p. 533-547, 2021.
- RIVERA, J. A. ARNOULD, G. Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: Climatic features and long-term trends (1901–2014). **Atmospheric Research**, v. 241, p. 104953, 2020.
- RODRÍGUEZ, A.; PÉREZ-LÓPEZ. D; CENTENO, A.; RUIZ-RAMOS, M. Viability of temperate fruit tree varieties in Spain under climate change according to chilling accumulation. **Agricultural Systems**, v. 186, p. 102961, 2021.

- RUELLAND, E.; ZACHOWSKI, A. How plants sense temperature. **Environmental and Experimental Botany**, v. 69, p.225-232, 2010.
- SALAMA, A.-M.; EZZAT, A.; EL-RAMADY, H.; ALAM-ELDEIN, S.M.; OKBA, S.; ELMENOFY, H.M.; HASSAN, I.F.; ILLÉS, A.; HOLB, I.J. Temperate fruit trees under climate change: Challenges for dormancy and chilling requirements in warm winter regions. **Horticulturae**, v. 7, n. 4, p. 86, 2021.
- SANTOS, D. F.; LEITE, R. R. M.; MARTINS, F. B. Avaliação dos métodos de estimativa de número de horas frio para o sul e sudoeste do Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.21, p.401-416, 2017a.
- SANTOS, D. F.; MARTINS, F. B.; TORRES, R. R. Impacts of climate projections on water balance and implications on olive crop in Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.2, p.77-82, 2017b.
- SANTOS, DIEGO FELIPE DOS. **Impacto das mudanças climáticas no zoneamento de aptidão climática para as principais frutíferas de clima temperado nas regiões Sul e Sudeste do Brasil**. 2018. 118 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.
- SEDIYAMA, G. C.; MELO JUNIOR, J. C. F.; SANTOS, A. R.; RIBEIRO, A.; COSTA, M. H.; HAMAKAWA, P. J.; COSTA, J. M. N.; COSTA, L. C. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) para o Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 501-509, 2001.
- SILVA, V. O.; DE MELLO, C. R.; CHOU, S. C. Projections of severe droughts in future climate in Southeast Brazil: a case study in Southern Minas Gerais State, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 148, n. 3, p. 1289-1302, 2022.
- STAFNE, E. T. **Chilling-Hour Requirements of Fruit Crops**. Starkville: Extension Service of Mississippi State University, 2020. 2p. Disponível em <(http://extension.msstate.edu/sites/default/files/publications/publications/P3067_1.pdf) >..
- TANASIJEVIC, L.; TODOROVIC, M.; PEREIRA, L. S., PIZZIGALLI, C., LIONELLO, P. Impacts of climate change on olive crop evapotranspiration and irrigation requirements in the Mediterranean region. **Agricultural Water Management**, v. 144, p. 54-68, 2014.
- TAVARES, P. S.; GIAROLLA, A.; CHOU, S. C.; SILVA, A. J. D.; LYRA, A.A. Climate change impact on the potential yield of Arabica coffee in southeast Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 18, n. 3, p. 873-883, 2018.
- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton, N. J.: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, v. 8, n. 1)
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance**. Centerton, N. J.: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1957. 311p. (Publications in Climatology, v. 10, n. 3)
- TORRES, R. R.; BENASSI, R. B.; MARTINS, F. B.; LAPOLA, D. M. **Projected impacts of 1.5 and 2 C global warming on temperature and precipitation patterns in South America**. *International Journal of Climatology*, v. 42, n. 3, p. 1-15, 2021.

TREDER, W.; MIKA, A.; BULER, Z.; KLAMKOWSKI, K. Effects of hail nets on orchard light microclimate, apple tree growth, fruiting and fruit quality. **Acta Scientiarum Polonorum-Hortorum Cultus**, v. 15, n. 3, p. 17-27, 2016.

VOSSEN, P. M.; SILVER, D. **Growing temperate tree fruit and nut crops in the home garden**. California: University of California Research and Information Center / The California Backyard Orchard, 2000. 91 p.

XAVIER, A. C.; KING, CAREY W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2016.

WILLMOTT, C. J.; ROWE, C. M.; MINTZ, Y. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. **Journal of Climatology**, v. 5, n. 6, p. 589-606, 1985.

ANEXOS

Anexo 1 – Exigência de valores de NHF das principais frutíferas de clima temperado cultivadas nas regiões Centro-Sul de Minas Gerais encontrados na literatura.

CULTURA	CULTIVAR	NHF (h)	FONTE
Figueira	Roxo de valinhos	100-150	SANTOS, 2018
Marmeleiro	Orange	< 300	VOSSEN e SILVER, 2000
	Pineapple	< 300	VOSSEN e SILVER, 2000
	Smyrna	< 300	VOSSEN e SILVER, 2000
Macieira	Anna	< 800	HAOKIP et al., 2020
		< 450	SANTOS, 2018
	Condessa	< 450	SANTOS, 2018
		400	PETRI et al., 2016
	Eva	150-400	CABONIERI e MORAIS, 2015
		250-450	SANTOS, 2018
	Gala	≥ 600	SANTOS, 2018
		600	PETRI et al., 2016
	Fuji	< 800	CABONIERI e MORAIS, 2015
		≥ 600	SANTOS, 2018
	Golden Delicious	< 600	SANTOS, 2018
		800	PETRI et al., 2016
	Imperatriz	< 600	SANTOS, 2018
	Mayan	< 800	HAOKIP et al., 2020
	Princesa	< 450	SANTOS, 2018
		400	PETRI et al., 2016
	Tamma	< 800	HAOKIP et al., 2020
	Tropical Beauty	< 800	HAOKIP et al., 2020
	Parlins's beauty	< 800	HAOKIP et al., 2020

	Scholimt	< 800	HAOKIP et al., 2020
	Michel	< 800	HAOKIP et al., 2020
	Vered	< 800	HAOKIP et al., 2020
Nogueira-pecã	Big Z	541	KUDEN et al., 2020
	Burkett	451	KUDEN et al., 2020
	Choctaw	550	KUDEN et al., 2020
	Comanche	541	KUDEN et al., 2020
	Desirable	550	KUDEN et al., 2020
	Harris Super	469	KUDEN et al., 2020
	Hastings	541	KUDEN et al., 2020
	Ideal	451	KUDEN et al., 2020
	Kiowa	541	KUDEN et al., 2020
	Mahan	451	KUDEN et al., 2020
	Mohawk	541	KUDEN et al., 2020
	Moneymaker	451	KUDEN et al., 2020
	Pawnee	550	KUDEN et al., 2020
	Royal	550	KUDEN et al., 2020
	Shawnee	547	KUDEN et al., 2020
	Texhan	469	KUDEN et al., 2020
	Western	541	KUDEN et al., 2020
	Wichita	451	KUDEN et al., 2020
Oliveira	Arbequina	300 - 500	SANTOS, 2018
	Arbosana	300 - 500	SANTOS, 2018
	Ascolana	300 - 500	SANTOS, 2018
	Grappolo	300 - 500	SANTOS, 2018
	Gordal	422	RODRÍGUEZ et al., 2021
	Hojiblanca	494	RODRÍGUEZ et al., 2021
	Koroneikei	300 - 500	SANTOS, 2018
	M. Tommaso Corsini	722	RODRÍGUEZ et al., 2021
	Maria da fé	300 - 500	SANTOS, 2018

	Picual	469	RODRÍGUEZ et al., 2021
	Picudo	320	RODRÍGUEZ et al., 2021
Pereira	Barlett	1500	VOSEN e SILVER, 2000
	Baldwin	< 300	VOSEN e SILVER, 2000
	Carnes	< 300	VOSEN e SILVER, 2000
	Florida Home	< 300	VOSEN e SILVER, 2000
	Fan Still	< 300	VOSEN e SILVER, 2000
	Garber	< 300	VOSEN e SILVER, 2000
	Gola	< 150	HAOKIP et al., 2020
	Hengsan	< 300	VOSEN e SILVER, 2000
	Hood	< 300	VOSEN e SILVER, 2000
	Housui	500-700	EPAGRI, 2016
	Kieffer	< 300	VOSEN e SILVER, 2000
		< 150	HAOKIP et al., 2020
	Kousui	500-700	EPAGRI, 2016
	Max Red Bartlett	700	EPAGRI, 2016
	Nectar	<150	HAOKIP et al., 2020
	Nijisseiki	500-700	EPAGRI, 2016
	Orient	< 300	VOSEN e SILVER, 2000
	Paternakh (Sand Pear)	< 150	HAOKIP et al., 2020

	Pineapple	< 300	EPAGRI, 2016
	Punjab	< 150	HAOKIP et al., 2020
	Rocha	700	EPAGRI, 2016
	Santa Maria	700	EPAGRI, 2016
	Seleta	< 300	VOSSSEN e SILVER, 2000
	Spadona	< 300	VOSSSEN e SILVER, 2000
Pessequeiro	Afterglow	750	FADÓN et al., 2020
	Akatsuki	1176	FADÓN et al., 2020
	Adrighi	350	SANTOS, 2018
	Aniiry Asali	862	FADÓN et al., 2020
	Aniiry Zafarany	973	FADÓN et al., 2020
	Ametista	400	SANTOS, 2018
	August Pride	< 300	VOSSSEN e SILVER, 2000
	Aurora	150-300	EPAGRI, 2016; SANTOS, 2018
	Babcock	<300	VOSSSEN e SILVER, 2000
	Babygold5	498	FADÓN et al., 2020
	Belle	850	FADÓN et al., 2020
	Belvedere	400	SANTOS, 2018
	Best May	850	FADÓN et al., 2020
	Big Top	363	FADÓN et al., 2020
	Biuti	200	SANTOS, 2018
	Bolinha	400	SANTOS, 2018
	Bonão	142	FADÓN et al., 2020
	BR-1	300	SANTOS, 2018
	BR-2	300	SANTOS, 2018
	BR-3	305	FADÓN et al., 2020
	BR-4	250-300	SANTOS, 2018
	BR-6	350	SANTOS, 2018

	Cascata 711	300	EPAGRI, 2016; SANTOS, 2018
	Cambará do sul	371	FADÓN et al., 2020
	Candoka	850	FADÓN et al., 2020
	Catherina	793	FADÓN et al., 2020
	Changbangjosaeng	232	FADÓN et al., 2020
	Capdeboscq	300	SANTOS, 2018
	Cheonghong	146-261	FADÓN et al., 2020
	Cheonioongdo	137	FADÓN et al., 2020
	Chinese Cling	850	FADÓN et al., 2020
	Chimarrita	150-300	SANTOS, 2018
	Chiripá	450-500	EPAGRI, 2016; SANTOS, 2018
		500	PETRI et al., 2016
	Chivohime	820	FADÓN et al., 2020
	Chula	400	SANTOS, 2018
	Convenio	350-400	SANTOS, 2018
	Colora	1050	FADÓN et al., 2020
	Coral	354	FADÓN et al., 2020
		350	PETRI et al., 2016
		300-450	EPAGRI, 2016; SANTOS, 2018
	CP-951 C	250	RAMOS e LEONEL, 2008; SANTOS. 2018
	CP-9553 CYN	225	RAMOS e LEONEL, 2008; SANTOS. 2018
	Cumberland	850	FADÓN et al., 2020
	Delicioso Precoce	200	SANTOS, 2018
	Delicioso	200	FADÓN et al., 2020
	Della Nona	400	FADÓN et al., 2020
		300-450	SANTOS, 2018

	Desert Gold	< 300	VOSSSEN e SILVER, 2000
	Diamante	294	FADÓN et al., 2020
		200	SANTOS, 2018
	Dixigem	850	FADÓN et al., 2020
	Dixigold	850	FADÓN et al., 2020
	Dixired	950	FADÓN et al., 2020
	Dourado	150-300	SANTOS, 2018
	Duke of York	1150	FADÓN et al., 2020
	EarliGrande	< 300	VOSSSEN e SILVER, 2000
	Early Amber	< 300	VOSSSEN e SILVER, 2000
	Early Elberta	850	FADÓN et al., 2020
	Early Halegaven	850	FADÓN et al., 2020
	Early Hiley	750	FADÓN et al., 2020
	Early Jubilee	850	FADÓN et al., 2020
	Early May Crest	300	FADÓN et al., 2020
	Early Role	1150	FADÓN et al., 2020
	Early Vedette	950	FADÓN et al., 2020
	Early Wheller	950	FADÓN et al., 2020
	Eclipse	950	FADÓN et al., 2020
	Elberta	790-850	FADÓN et al., 2020
	Eldorado	300	FADÓN et al., 2020; SANTOS, 2018
	Elegante lady	806	FADÓN et al., 2020
	Eragil	450-600	EPAGRI, 2016; ANZANELLO E BIASI, 2016; SANTOS, 2018
	Erly-Red-Fre	850	FADÓN et al., 2020
	Escarlate	400	SANTOS, 2018
	Fairs Beaut	1050	FADÓN et al., 2020

	Farrapos	350	SANTOS, 2018
	Fascinio	150-300	EPAGRI, 2016; SANTOS, 2018
	Fay Elberta	750	FADÓN et al., 2020
	Feicheng Bai Li 10	1100	FADÓN et al., 2020
	Fergold	921	FADÓN et al., 2020
	Fireglow	70	FADÓN et al., 2020
	Fireprince	341	FADÓN et al., 2020
	Fisher	950	FADÓN et al., 2020
	Fla 91-Sc	100	FADÓN et al., 2020
	Flaming Gold	750	FADÓN et al., 2020
	Flordaglo	79	FADÓN et al., 2020
	FlordaGrand	< 300	VOSSSEN e SILVER, 2000
	Flordaking	250	EPAGRI, 2016; SANTOS, 2018
	FlordaPrince	150	EPAGRI, 2016; SANTOS, 2018
		< 300	VOSSSEN e SILVER, 2000
	Franca	818	FADÓN et al., 2020
	Fuzzless Berta	1150	FADÓN et al., 2020
	Gage	750	FADÓN et al., 2020
	GaLa	306	FADÓN et al., 2020
	Gemmes Elberta	750	FADÓN et al., 2020
	Golden Jubilee	850	FADÓN et al., 2020
	Goldeneast	1050	FADÓN et al., 2020
	Guaiaca	200-300	SANTOS, 2018
	Guglielmina	488	FADÓN et al., 2020
	Hai Kamzemi	1390	FADÓN et al., 2020
	Halberta Giant	850	FADÓN et al., 2020
	Halegold	850	FADÓN et al., 2020
	Halehaven	850	FADÓN et al., 2020

Herbhale	850	FADÓN et al., 2020
Hikawahakuhou	1173	FADÓN et al., 2020
Hiley	750	FADÓN et al., 2020
Ideal	850	FADÓN et al., 2020
J. H. Hale	850	FADÓN et al., 2020
Janghowon	134	FADÓN et al., 2020
July Elberta	750	FADÓN et al., 2020
Kalhaven	950	FADÓN et al., 2020
Kosary	1390	FADÓN et al., 2020
Late Dwarf	71	FADÓN et al., 2020
Levante 30	321	FADÓN et al., 2020
Levante 40	341	FADÓN et al., 2020
Lizzie	950	FADÓN et al., 2020
Maravilha	100-150	SANTOS, 2018
	203	FADÓN et al., 2020
Marfim	313	FADÓN et al., 2020
Maria Delizia	338	FADÓN et al., 2020
Maria Marta	327	FADÓN et al., 2020
Marli	300-450	SANTOS, 2018
Maruja	572	FADÓN et al., 2020
Maxine	1050	FADÓN et al., 2020
Mayflower	1150	FADÓN et al., 2020
Michelini	884	FADÓN et al., 2020
Midpride	< 300	VOSSSEN e SILVER, 2000
Midway	850	FADÓN et al., 2020
Mistral 30	402	FADÓN et al., 2020
Momo tsukuba 127	555	FADÓN et al., 2020
MONDARDO	150	EPAGRI, 2016; SANTOS, 2018
Morro-Redondo	250	SANTOS, 2018
Nectaross	925	FADÓN et al., 2020
Newday	750	FADÓN et al., 2020

	Okinawa1	319	FADÓN et al., 2020
	Onix	300	SANTOS, 2018
	Pacemaker	750	FADÓN et al., 2020
	Pampeano	150-300	SANTOS, 2018
	Pepita	204	FADÓN et al., 2020
	Pilcha	400	SANTOS, 2018
	Planalto	300-450	EPAGRI, 2016; SANTOS, 2018
	Precocinho	150	RAMOS e LEONEL, 2008; SANTOS, 2018
		150-216	FADÓN et al., 2020
	Premier	150	EPAGRI, 2016; PETRI et al., 2016; SANTOS, 2018
	PS 10.711	300	EPAGRI, 2016; SANTOS, 2018
	Qingzhou Bai PiMi Tao	1100	FADÓN et al., 2020
	Raritan Rose	950	FADÓN et al., 2020
	Redelberta	750	FADÓN et al., 2020
	RedHaven	850-870	FADÓN et al., 2020
	Redrose	850	FADÓN et al., 2020
	Rich lady	73	FADÓN et al., 2020
	Rio Oso Gem	850	FADÓN et al., 2020
	Riograndense	300	FADÓN et al., 2020; SANTOS, 2018
	Rosa del West	434	FADÓN et al., 2020
	Rubimel	150	EPAGRI, 2016; SANTOS, 2018
	Rubidoux	600	PETRI et al., 2016
	Salberta	850	FADÓN et al., 2020
	Safira	400-500	SANTOS, 2018

Salwy	1050	FADÓN et al., 2020
Sentinela	150	SANTOS, 2018
Shipper Late Red	850	FADÓN et al., 2020
Sinuelo	300	SANTOS, 2018
Siroco 5	246	FADÓN et al., 2020
Siroco 20	344	FADÓN et al., 2020
Siroco 30	308	FADÓN et al., 2020
Siroco 40	310	FADÓN et al., 2020
Siroco43	370	FADÓN et al., 2020
Southland	750	FADÓN et al., 2020
Spring Belle	650	FADÓN et al., 2020
Spring Lady	33	FADÓN et al., 2020
Stark Red Gold	898	FADÓN et al., 2020
Sullivan	850	FADÓN et al., 2020
Summercrest	950	FADÓN et al., 2020
Sunhigh	750	FADÓN et al., 2020
TopicSweet	< 300	VOSSSEN e SILVER, 2000
Triogem	850	FADÓN et al., 2020
Tropic-Berta	< 300	VOSSSEN e SILVER, 2000
Tropic Beauty	150-300	ANZANELLO e BIASI, 2016; SANTOS, 2018
Tropical	200	SANTOS, 2018
Turmalina	200	RAMOS e LEONEL, 2008; SANTOS, 2018
	250	FADÓN et al., 2020
Turquesa	200-300	SANTOS, 2018
Up-to-date	850	FADÓN et al., 2020
Valiant	850	FADÓN et al., 2020
Vanguardia	150	SANTOS, 2018

	Vedette	1050	FADÓN et al., 2020
	Veteran	1050	FADÓN et al., 2020
	Vila-nova	400	SANTOS, 2018
	Worlds Earliest	750	FADÓN et al., 2020
	Youmyeong	150-277	FADÓN et al., 2020
	Yu Hua Lu	800	FADÓN et al., 2020
	Zilli	150	EPAGRI, 2016; SANTOS, 2018
	Zoud Ras	1130	FADÓN et al., 2020
Videira	Bordô	150-300	SANTOS, 2018
	Cabernet Sauvignon	300-450	SANTOS, 2018
		400	PERUZZO et al., 2014
	Chardonnay	150	PERUZZO et al., 2014
		150-300	SANTOS, 2018
	Concord Isabel	150-300	SANTOS, 2018
	Merlot	300	PERUZZO et al., 2014
	Niágara Rosada	150-300	SANTOS, 2018

Anexo 2 – Valores de comprimento radicular das principais frutíferas de clima temperado cultivadas nas regiões Centro-Sul de Minas Gerais.

CULTURA	COMPRIMENTO RADICULAR (cm)	FONTE
Caquizeiro	100 - 150	ALLEN et al., 1998
Macieira	100 - 200	DOORENBOS e PRUITT, 1977
Marmeleiro	100 - 150	ALLEN et al., 1998
Nogueira-pecã	170 - 240	ALLEN et al., 2006
Oliveira	120 - 170	DOORENBOS e PRUITT, 1977
Pereira	100 - 200	DOORENBOS e PRUITT, 1977
Pessegueiro	100 - 200	DOORENBOS e PRUITT, 1977
Videira	100 - 150	DOORENBOS e PRUITT, 1977
	100 - 200	ALLEN et al., 1998