



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS**

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO EUCALIPTO: MODELOS
DE DESENVOLVIMENTO E ZONEAMENTO DE
APTIDÃO CLIMÁTICA**

Gabriel Wilson Lorena Florencio

Itajubá, MG, Brasil

2021

MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO EUCALIPTO: MODELOS DE DESENVOLVIMENTO E ZONEAMENTO DE APTIDÃO CLIMÁTICA

por

Gabriel Wilson Lorena Florencio

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração/Linha de pesquisa:

Meio Ambiente e Recursos Hídricos/Clima e Sustentabilidade

Orientadora:

Prof^a. Dra. Fabrina Bolzan Martins

**Itajubá, MG, Brasil
2021**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MEIO AMBIENTE E
RECURSOS HÍDRICOS**

GABRIEL WILSON LORENA FLORENCIO

**MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA O EUCALIPTO: MODELOS DE
DESENVOLVIMENTO E ZONEAMENTO DE APTIDÃO CLIMÁTICA**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 19 de fevereiro de 2021 conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos**.

Banca examinadora:



Profª Dra. Fabrina Bolzan Martins (Orientadora)
Universidade Federal de Itajubá



Profº Dr. Roger Rodrigues Torres
Universidade Federal de Itajubá



Profº Dr. Marcel Carvalho Abreu
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

**ITAJUBÁ (MG), BRASIL
2021**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por minha vida e por me proporcionar superar todos os desafios.

Aos meus pais Celia e Wilson pelo apoio incondicional, principalmente nos momentos mais difíceis e por serem meus maiores exemplos de vida.

As minhas irmãs Michele e Gizelli, por toda ajuda e pelos bons conselhos durante toda minha vida.

À todos professores da Pós-Graduação pelo conhecimento transmitido, e à Unifei pela oportunidade.

Aos amigos Leandro, João e Ana Flávia, pelos momentos de descontração e pela constante ajuda e troca de conhecimento.

Ao amigo Rafael pela paciência e ajuda com a programação.

Um agradecimento especial à minha orientadora (mamis) Fabrina Bolzan Martins pela amizade, paciência, confiança e incentivo. Foram mais de 5 anos de muito trabalho e boas risadas. Agradeço imensamente pela oportunidade e valores pessoais e profissionais transmitidos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro através da concessão da bolsa de estudo.

De maneira geral, à todos que direta ou indiretamente contribuíram para esta realização.

RESUMO

FLORENCIO, Gabriel Wilson Lorena. **Mudanças climáticas no eucalipto: modelos de desenvolvimento e zoneamento de aptidão climática**. 2021. 75 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021.

As projeções climáticas indicam aumento da temperatura do ar e alterações nos padrões de precipitação em todo o território brasileiro, os quais poderão impactar o cultivo de espécies florestais. Desta forma, torna-se importante a realização de estudos que analisem os potenciais impactos das projeções climáticas, especialmente para aquelas economicamente importantes, como o eucalipto. Diante destes aspectos, os objetivos dessa dissertação de mestrado foram: a) calibrar e avaliar os modelos de simulação do desenvolvimento filocrono (FIL) e Wang e Engel (WE) para o clima presente, assim como identificar os possíveis impactos dos aumentos projetados de temperatura do ar na duração da fase de muda (DFM) de duas espécies de eucalipto, considerando dois cenários de forçantes radiativas (RCP 4.5 e RCP 8.5) e; b) avaliar os impactos das projeções climáticas nas áreas de aptidão climática para as principais espécies de eucalipto cultivadas no Brasil, considerando as limitações hídricas e térmicas das espécies e para dois cenários de forçantes radiativas (RCP 4.5 e RCP 8.5). Os dois modelos (FIL e WE) foram capazes de prever a dinâmica do desenvolvimento para as duas espécies, com desempenho superior do modelo WE. Os aumentos projetados da temperatura do ar ao longo do século XXI poderão modificar as taxas de desenvolvimento e a DFM das duas espécies de eucalipto cultivadas em Itajubá, assim como em regiões de clima subtropical, reduzindo a taxa de desenvolvimento e aumentando a permanência das mudas nos viveiros florestais. Não haverá alterações consideráveis nas áreas de aptidão ao cultivo do eucalipto no território brasileiro para o futuro próximo (2021-2050). No entanto, no final do século XXI (2071-2100) poderá ocorrer redução de 3% (RCP 4.5) a 7% (RCP 8.5) das áreas totalmente adequadas ou adequadas ao cultivo de eucalipto comparado ao clima presente (1980 – 2005), e o surgimento de áreas restritas, até 47% do território brasileiro, nas quais há inadequação hídrica ao cultivo do eucalipto em longo prazo.

Palavras-chave: Duração da fase de muda; Filocrono; Wang e Engel; Aptidão agroclimática

ABSTRACT

FLORENCIO, Gabriel Wilson Lorena. **Climate change in eucalyptus: development models and climate suitability zoning**. 2021. 75 f. Master of Science (Master in Environment and Water Resources) - Natural Resources Institute, Federal University of Itajubá, Itajubá, 2021.

The climate projections indicate an increase in air temperature and changes in rainfall patterns throughout the Brazilian territory, which may impact the cultivation of forest species. Thus, it becomes important to conduct studies that analyze the potential impacts of climate projections, especially for those economically important, such as eucalyptus. Given these aspects, the aims of this master's thesis were: a) to calibrate and evaluate the development simulation models Phyllochron (PHYL) and Wang and Engel (WE) for the present climate, as well as to identify the possible impacts of projected increases in air temperature on the duration of the seedling phase (SDP) of two species of eucalyptus, considering two scenarios of radioactive forcing (RCP 4.5 e RCP 8.5) and; b) to evaluate the impacts of climate projections in agroclimatic zoning for the main species of eucalyptus cultivated in Brazil, considering the water and thermal limitations of the species for two scenarios of radiative forcing. The two models (PHYL and WE) were able to predict the dynamics of development in two species, with better performance of the WE model. The projected increase in air temperature throughout the 21st century may modify the development rates and SDP of the two species of eucalyptus cultivated in Itajubá, as well as in subtropical climate regions, reducing the development rate, and increasing the permanence of seedlings in forest nurseries. There will be no considerable changes in the adequate areas for eucalyptus cultivation in Brazilian territory for the near future (2021-2050). However, at the end of the 21st century (2071-2100) there may be a reduction from 3% (RCP 4.5) to 7% (RCP 8.5) of totally or adequate areas of eucalyptus cultivation compared to present climate (1980 – 2005), and the appearance of restricted areas, up to 47%, due to the increase of water deficit in eucalyptus cultivation in the far future.

Keywords: Seedling duration phase; Phyllochron; Wang and Engel; Agroclimatic aptitude

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1 – Funções de temperatura do ar utilizadas no modelo filocrono (A), dado pela soma térmica, e modelo de Wang e Engel (B), dado pela função beta, e temperaturas cardinais para *Corymbia citriodora* ($T_b = 8,7^{\circ}\text{C}$, $T_{ot} = 17,1^{\circ}\text{C}$, $T_B = 41,3^{\circ}\text{C}$) e *Eucalyptus urophylla* ($T_b = 11,5^{\circ}\text{C}$, $T_{ot} = 17,1^{\circ}\text{C}$, $T_B = 40,5^{\circ}\text{C}$). Os pontos vermelhos e azuis sobre o eixo x representam a T_b e T_B das espécies *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla*, respectivamente. O ponto amarelo representa a T_{ot} das espécies.24

Figura 1.2 - Caracterização da temperatura do ar (mínima, média e máxima) e duração da fase de muda (dias) das onze épocas de semeadura durante a condução dos experimentos para duas espécies de eucalipto: *Corymbia citriodora* (A) e *Eucalyptus urophylla* (B). Itajubá (Minas Gerais, 2014/2015)..... 29

Figura 1.3 – Valor estimado versus observado de número de folhas acumulado (NFa, folhas) (painéis A - D) e duração da fase de muda (DFM, dias) (painéis E e F) pelo modelo filocrono (FIL, painéis A, C, E e F, representado por cinza claro) e Wang e Engel (WE, painéis B, D, E e F, representado pela cor cinza escuro) para *Corymbia citriodora* (painéis A, B, E) e *Eucalyptus urophylla* (painéis C, D, F). A linha sólida é a linha 1:1. 33

Figura 1.4 – Variação temporal simulada (clima presente =1980-2005) e projetada (FP=2021-2050; FD=2071-2100) da temperatura média do ar para Itajubá obtidas por nove modelos regionalizados do NEX-GDDP em dois cenários de forçantes radiativa (RCP 4.5 e 8.5). As linhas em negrito (preto, azul e vermelho) representam o *ensemble* dos modelos do sistema terrestre..35

Figura 1.5 – Duração da fase de muda simulada para o clima presente (1980-2005) e projetada para o futuro (FP= 2021-2050 e FD= 2071-2100) pelos nove modelos do sistema terrestre para *Corymbia citriodora* (A, B) e *Eucalyptus urophylla* (C, D). Linhas tracejadas representam a duração da fase de muda para cada modelo climático do NEX-GDDP e as linhas em negrito representam o *ensemble* dos modelos do sistema terrestre. Os painéis A e C referem-se ao RCP 4.5 e os painéis B e D referem-se ao RCP 8.5. O eixo da duração da fase de muda possui diferentes escalas para cada uma das espécies em função de seus valores 36

CAPÍTULO II

Figura 2.1 – Distribuição espacial (à esquerda) e temporal (à direita) do viés entre os valores simulados pelo *ensemble* (à esquerda) e MSTs (à direita) e os dados disponibilizados por Xavier et al., (2016) para o clima presente (1980-2005) para todo o território brasileiro considerando os valores diários de precipitação acumulada (painel A e B, mm dia^{-1}), radiação solar global (painel C e D, $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), temperatura média do ar (painel E e F, $^{\circ}\text{C}$) e temperatura máxima do ar (painel G e H, $^{\circ}\text{C}$). Linha preta em negrito representa o *ensemble* dos nove modelos do sistema terrestre, linha azul representa os dados disponibilizados por Xavier et al., (2016). Os valores em escala de cinza representam o comportamento de cada MST..... 57

Figura 2.2 – Projeção de mudança para precipitação acumulada (Pr , mm ano^{-1}) (A,B,C,D), radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) (E,F,G,H), temperatura média (T_m , $^{\circ}\text{C}$) (I,J,K,L), temperatura máxima do ar (T_{max} , $^{\circ}\text{C}$) (M,N,O,P), evapotranspiração de referência acumulada (ET_o , mm ano^{-1}) (Q,R,S,T) e deficiência hídrica acumulada (mm ano^{-1}) (U,V,X,W) projetadas para o futuro próximo (FP, 2021-2050) (A,C,E,G,I,K,M,O,Q,S,U,X) e futuro distante (FD, 2071-2100) (B,D,F,H,J,L,N,P,R,T,V,W) para a forçante radiativa RCP 4.5 (A,B,E,F,I,J,M,N,Q,R,U,V) e RCP 8.5 (C,D,G,H,K,L,O,P,S,T,X,W). As figuras foram

geradas considerando o *ensemble* dos nove modelos do sistema terrestre.. 60

Figura 2.3 – Distribuição espacial da diferença entre as médias climatológicas do acumulado mensal da evapotranspiração de referência (ET_o, mm mês⁻¹) projetadas no futuro próximo (FP, 2021-2050) (A,C) e futuro distante (FD, 2071-2100) (B,D) para as forçantes radiativa RCP 4.5 (A,B) e RCP 8.5 (C,D) e simuladas no clima presente (1980-2005). As figuras foram geradas considerando o *ensemble* dos nove modelos do sistema terrestre.61

Figura 2.4 – Distribuição espacial da diferença entre a deficiência hídrica (DH, mm) projetadas no futuro próximo (FP, 2021-2050) (A,C) e futuro distante (FD, 2071-2100) (B,D) para as forçantes radiativa RCP 4.5 (A,B) e RCP 8.5 (C,D) e simulada no clima presente (1980-2005). As figuras foram geradas considerando o *ensemble* dos nove modelos do sistema terrestre.. 62

Figura 2.5 – Zoneamento de aptidão climática para o cultivo de eucalipto no Brasil simulado para o clima presente (1980-2005) e projetado para o futuro próximo (2021-2050) e futuro distante (2071-2100), considerando as duas forçantes radiativas (RCP 4.5 e 8.5)..... 64

Figura 2.6 – Porcentagem de área por zona de aptidão do eucalipto no Brasil simulada para o clima presente (1980-2005) e projetada para o futuro próximo (2021-2050) e futuro distante (2071-2100) para ambos cenários de forçante radiativa (RCP 4.5 e 8.5).. 65

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1.1 – Datas de semeadura, emergência, fim da fase de muda e duração média da fase de muda (dias) para as espécies *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla* obtidas durante a condução dos experimentos em Itajubá, Minas Gerais, 2014/2015. 22

Tabela 1.2 – Estatísticas utilizadas na avaliação do desempenho dos modelos de simulação do desenvolvimento Filocrono (FIL) e Wang e Engel (WE) para a estimativa do número de folhas acumuladas em *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla*. Itajubá, Minas Gerais.. 30

Tabela 1.3 - Comparação de médias para a duração da fase de muda (DFM, dias) para a *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla*, considerando as simulações para o clima presente (CP = 1980-2005) e as projeções de clima futuro (FP = 2021-2050, FD = 2071-2100) para onze épocas de semeadura e dois cenários de forçantes radiativas (RCP 4.5 e RCP 8.5). 37

CAPÍTULO II

Tabela 2.1 – Lista de modelos utilizados para as simulações e projeções climáticas no zoneamento de aptidão climática para o eucalipto, resoluções aproximadas e desenvolvedores. 51

Tabela 2.2 – Faixas e notas de aptidão com base na deficiência hídrica e temperatura para o eucalipto. 52

Tabela 2.3 – Classes de aptidão para o zoneamento de aptidão climática para o eucalipto baseadas nas porcentagens de aptidão para os limiares hídricos, dado pela deficiência hídrica (DH), e térmico, dado pela temperatura (Temp). 53

Tabela 2.4 – Temperaturas cardinais (Tb, Tot e TB) de desenvolvimento para as quatro espécies de eucalipto de maior destaque no setor florestal brasileiro..... 54

Tabela 2.5 – Avaliação da simulação dos dados de precipitação acumulada mensal, radiação solar global, temperatura média e máxima do ar entre o *ensemble* dos nove modelos do sistema terrestre e os dados observados de Xavier et al. (2016) para todo território brasileiro (1980-2005). 58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- α = coeficiente da função beta de temperatura do ar
- B = valor do teste de Bartlett
- λ - calor latente de vaporização
- APSIM - *Agricultural Production Systems Simulator*
- BHC – Balanço hídrico climatológico
- CAD – Capacidade de água disponível
- CMIP5 - *Coupled Models Intercomparison Project Phase 5*
- CP – Clima presente
- d – Índice de concordância de Wilmott
- DE – Data de emergência
- DFM – Duração da fase de muda
- DH – Deficiência hídrica
- ES – Época de semeadura
- Eto – Evapotranspiração de referência
- $f(t)$ – Função beta de temperatura do ar
- FD – Futuro distante
- FIL – Filocrono
- FP – Futuro próximo
- Índice – c – Índice de desempenho
- K_c – Coeficiente de cultura
- MST – Modelo do sistema terrestre
- NEX-GDDP - *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections*
- NFa – Número de folhas acumulado
- NFF – Número de folhas final
- PAcc – Porcentagem de aptidão
- PIB – Produto Interno Bruto
- Pr – Precipitação
- RCP - *Representative Concentration Pathways*
- RQME – Raiz quadrada média do erro
- R_s – Radiação solar global
- STd – Soma térmica diária
- TAF – Taxa diária de aparecimento de folhas
- TAFmax – Taxa diária máxima de aparecimento de folhas
- Temp – Limiar térmico

TB – Temperatura basal superior

Tb – Temperatura basal inferior

Tm – Temperatura média do ar

Tmax – Temperatura máxima do ar

Tot – Temperatura ótima

VM – Viés médio

WE – Wang e Engel

ZA – Zoneamento de aptidão

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
CAPÍTULO I.....	19
IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DE DUAS ESPÉCIES DE EUCALIPTO.....	19
1.1. INTRODUÇÃO	19
1.2. MATERIAL E MÉTODOS	22
1.2.1. DADOS E DESCRIÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DAS MUDAS.....	22
1.2.2. CALIBRAÇÃO DOS COEFICIENTES DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO.....	25
1.2.3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO.....	25
1.2.4. SIMULAÇÕES E PROJEÇÕES CLIMÁTICAS DO DESENVOLVIMENTO.....	27
1.3. RESULTADOS.....	28
1.3.1. CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO DO DESENVOLVIMENTO	28
1.3.2. SIMULAÇÕES E PROJEÇÕES CLIMÁTICAS NO DESENVOLVIMENTO	34
1.4. DISCUSSÃO.....	39
1.5. CONCLUSÃO	42
1.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
CAPÍTULO II	48
IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO ZONEAMENTO DE APTIDÃO CLIMÁTICA DO EUCALIPTO NO BRASIL.....	48
2.1 INTRODUÇÃO	48
2.2. MATERIAL E MÉTODOS	51
2.2.1. ÁREA DE ESTUDO E DADOS DE SIMULAÇÕES E PROJEÇÕES CLIMÁTICAS	51
2.2.2 ZONEAMENTO DE APTIDÃO CLIMÁTICA.....	52
2.2.3 DEFINIÇÃO DOS LIMIARES HÍDRICO E TÉRMICO AO CULTIVO DO EUCALIPTO	53
2.2.4 DEVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA, BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO E CAPACIDADE DE ÁGUA DISONÍVEL.....	54
2.2.5 IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO ZONEAMENTO DE APTIDÃO CLIMÁTICA PARA O EUCALIPTO NO BRASIL	56
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
2.3.1 CLIMA PRESENTE: VALIDAÇÃO DAS SIMULAÇÕES	56
2.3.2 CLIMA FUTURO: ALTERAÇÕES NAS VARIÁVEIS E NA DEFICIÊNCIA HÍDRICA NO SOLO	59
2.3.3 IMPACTO DAS PROJEÇÕES CLIMÁTICAS NO ZONEAMENTO DE APTIDÃO CLIMÁTICA PARA O EUCALIPTO NO BRASIL	63
2.4. CONCLUSÃO	67
2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

INTRODUÇÃO GERAL

O setor florestal brasileiro possui grande relevância no cenário nacional. Como exemplo, somente em 2019, o setor movimentou R\$ 86,6 bilhões na economia brasileira, o que representa cerca de 1,3 % do Produto Interno Bruto (PIB) nacional (IBÁ, 2019). Além disso, o setor é responsável por mais de 3,8 milhões empregos formais e informais (IBÁ, 2019).

No Brasil, a área de florestas plantadas totaliza aproximadamente 9,9 milhões de hectares. Dentre as principais espécies plantadas, destaca-se as do gênero *Eucalyptus* sp., com área de plantio equivalente a 7,6 milhões de hectares representando 76% do total (IBÁ, 2019; ELLI et al., 2020a). Dentre os estados com maior área plantada, destacam-se Minas Gerais (24%), São Paulo (17%), Mato Grosso do Sul (16%) e Bahia (11%) (IBÁ, 2019). A escolha por espécies do gênero *Eucalyptus* sp. é devido ao seu rápido crescimento e rotação (entre 5 e 10 anos), grande diversidade de uso da sua matéria prima (papel e celulose, carvão vegetal, construção civil e indústria madeireira) e adaptabilidade em diferentes condições edafoclimáticas (OTTO et al., 2013; SANTAROSA et al., 2014).

Apesar dos inúmeros avanços decorrentes de adaptação de clones, melhorias das práticas de manejo e preparação do solo, fertilização, controle de pragas e doenças, o desenvolvimento e a produtividade do eucalipto são fortemente afetados, e até mesmo inviabilizados, pelas condições climáticas (GONÇALVES et al., 2013; ELLI et al., 2020a,b; HUBBARD et al., 2020). Como exemplo, disponibilidade hídrica e as temperaturas elevadas são as principais causas de redução do desenvolvimento e produtividade do eucalipto (GONÇALVES et al., 2017; ELLI et al. 2020a,b).

Nesse contexto, as projeções climáticas indicam aumento da temperatura do ar podendo chegar até 6°C em algumas regiões, tais como sul da Amazônia e norte do estado de Minas Gerais (IPCC, 2013; MARENGO, 2015; SANTOS et al., 2017) e, mudanças heterogêneas nos padrões da precipitação ao longo de todo território brasileiro (IPCC, 2013; MARENGO, 2014; TORRES; MARENGO, 2015). Tais alterações são responsáveis por modificar os padrões anatômicos, morfológicos, fisiológicos, e conseqüentemente alterar os aspectos fenológicos podendo reduzir o desenvolvimento e a produtividade, além de alterar as zonas de aptidão ao cultivo (BAHUGUNA; JAGADISH, 2015; PIROVANI et al., 2018; TAVARES et al., 2018; MARTINS et al., 2019; ELLI et al., 2020a). Temperaturas abaixo ou acima de determinados limiares são fatores limitantes do desenvolvimento e produtividade do

eucalipto (HATFIELD e PRUEGER, 2015; FREITAS e MARTINS, 2019). Resumidamente, fora dos limiares adequados, a temperatura do ar causa redução das reações do processo de fotossíntese, aumento da fotorrespiração e desequilíbrio entre a transpiração e a absorção de CO₂ (ABREU et al., 2015; GAVRICHKOVA et al., 2019). Além disso, alterações na disponibilidade hídrica provocam desequilíbrios entre a evapotranspiração potencial e real podendo ocorrer deficiência hídrica no solo (PIROVANI et al., 2018; ELLI et al., 2020a) e consequentemente redução da produtividade do eucalipto (COSTA et al., 2018; ELLI et al., 2019; ELLI et al., 2020b; HUBBARD et al. 2020).

Entretanto, mesmo com a importante participação do setor florestal, e consequentemente do *Eucalyptus* sp., na economia brasileira, os trabalhos realizados considerando potenciais impactos das mudanças climáticas em culturas florestais ainda são escassos no Brasil (BAESSO et al., 2010; GARCIA et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2014; WREGE et al., 2016; COSTA; STRECK, 2018; PIROVANI et al., 2018; ELLI et al., 2020a). Além disso, a maioria dos trabalhos consideram apenas os impactos na produtividade, sem avaliar os impactos no desenvolvimento inicial.

Estudos dessa natureza podem ser realizados com saídas de modelos do sistema terrestre (WREGE et al., 2016; SANTOS et al., 2017; AMBRIZZI et al., 2018; REBOITA et al., 2018; FLORENCIO et al., 2019) aplicados em diferentes metodologias, que por sua vez são distintas entre as fases de desenvolvimento do eucalipto (COSTA; STRECK, 2018; ELLI et al., 2020a)). Como exemplo, na fase de desenvolvimento inicial, que se refere ao período de produção da muda no viveiro até o momento do transplante no campo, pode ser utilizado modelos de simulação do desenvolvimento inicial (MARTINS et al., 2014; COSTA e STRECK, 2018; FLORENCIO et al., 2019). A principal desvantagem dessa metodologia é a necessidade de calibrações locais. Nas fases juvenil à maturação utilizam-se modelos de simulação da produtividade ou ferramentas de zoneamento de aptidão climática (BAESSO et al., 2010; GARCIA et al., 2014; BOOTH, 2018; COSTA; STRECK, 2018; PIROVANI et al., 2018; ELLI et al., 2020a). O zoneamento de aptidão climática apresenta vantagens quando comparado aos modelos de produtividade, pois: i) pode ser realizado para qualquer escala espacial, sendo eficiente em estudos de macroescala; ii) não necessita de informações específicas de cada espécie, que muitas vezes são indisponíveis na literatura; iii) não necessita que os modelos sejam calibrados para as condições locais, e iv) fornece informações diretas, tornando-se uma alternativa eficiente para redução de riscos associados ao cultivo florestal (SANTOS et al., 2017; PIROVANI et al., 2018; TAVARES et al., 2018).

Os poucos trabalhos realizados no Brasil apresentam alguns pontos negativos, como: i) uso de cenários climáticos defasados (BAESSO et al. 2010; OLIVEIRA et al. 2012; GARCIA et al., 2014; PIROVANI et al., 2018); ii) aumentos sintéticos da temperatura do ar sem considerar dados provenientes de modelos do sistema terrestre (COSTA e STRECK, 2018), os quais são recomendáveis neste tipo de estudo (TAVARES et al., 2018; MARTINS et al., 2021); iii) avaliam os impactos das projeções climáticas na produtividade, não considerando a fase de desenvolvimento inicial (ELLI et al., 2020a); iv) e no caso dos estudos de aptidão climática, exceto Garcia et al., (2014), analisam os impactos em uma escala local ou regional, desconsiderando o impacto em todo o território brasileiro, e consideram apenas as limitações hídricas. Justamente por isso, inúmeras questões práticas ainda permanecem abertas sendo impossível avaliar o real impacto das projeções climáticas no desenvolvimento e na aptidão climática ao cultivo de eucalipto no Brasil.

Nesta dissertação, optou-se por avaliar os impactos das projeções climáticas no desenvolvimento inicial, através dos modelos de simulação do desenvolvimento, e no zoneamento de aptidão climática. Sendo assim, essa dissertação foi dividida em dois capítulos: o Capítulo I teve como objetivo calibrar e avaliar dois modelos de desenvolvimento (FIL e WE) na predição da dinâmica do desenvolvimento inicial, através do número de folhas e duração da fase de muda para o clima presente, assim como, identificar os possíveis impactos dos aumentos projetados de temperatura do ar das espécies *Corymbia citriodora* (ex Hook.) Hill & Johnson) e *Eucalyptus urophylla* (S. T. Blake) para o clima futuro; e o Capítulo II teve como objetivo avaliar os impactos das mudanças climáticas nas áreas de aptidão climática para as principais espécies de eucalipto no Brasil, considerando as limitações hídricas e térmicas das espécies.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. C.; MARTINS, F. B.; FREITAS, C. H. de; PEREIRA, R. A. A. Thresholds for transpiration, development and growth of *Corymbia citriodora* (hook.) kd hill & johnson in response to soil water stress. **Revista Árvore**, v. 39, p. 841-852, 2015.

AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; LLOPART, M. The state-of-the-art and fundamental aspects of Regional Climate Modeling in South America. **Annals of the New York Academy of Sciences, especial edition: Climate Science**, v.1436, p. 1-23, 2018.

BAESSO, R. C. E.; RIBEIRO, A.; SILVA, M. P. Impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto na região norte do Espírito Santo e sul da Bahia. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 2, p. 335-344, 2010.

BAHUGUNA, R. N.; JAGADISH, K. SV. Temperature regulation of plant phenological development. **Environmental and Experimental Botany**, v. 111, p. 83-90, 2015.

BOOTH, T.H. Species distribution modelling tools and databases to assist managing forests under climate change. **Forest Ecology and Management**, v.430, p.196–203, 2018.

COSTA, D. B.; STRECK, N. A. Duração da fase de mudas em eucalipto simulada em cenários de aumento de temperatura. **Ciência Florestal**, v.28, n.3, p.1263-1270, 2018.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; BENDER, F. D. Impacts and uncertainties of climate change projections on *Eucalyptus* plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 474, e118365, 2020a.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; HUTH, N.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C.A. Gauging the effects of climate variability on Eucalyptus plantations productivity across Brazil: A process-based modelling approach . **Ecological Indicators**, v. 114, e118365, 2020b.

FERREIRA, M. C.; MARTINS, F. B.; FLORENCIO, G. W. L; PASIN, L. A. A. P. Cardinal temperatures and modeling the vegetative development of seedlings of guava. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n.11, p.819-825, 2019.

FLORENCIO, G.W.L.; MARTINS, F.B.; FERREIRA, M.C.de; PEREIRA, R.A.A. Impacts of climatic changes on the vegetative development of olive crops in Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n. 9, p.641-647, 2019.

FREITAS, C. H. DE; MARTINS, F. B. Thermal requirements and photoperiod influence in the leaf development of two forest species. **Floresta e Ambiente**, v.26, n.4, e20190013, 2019.

GARCIA, L.G.; FERRAZ, S.F.B.; ALVARES, C.A.; FERRAZ, K.M.P.M.B.; HIGA, R.C.V. Modeling suitable climate for *Eucalyptus grandis* under future climates scenarios in Brazil. **Scientia Forestalis**, v.42, n.104, p.503-511, 2014.

GAVRICHKOVA, O.; SCARTAZZA, A.; GUIDOLOTTI, G.; KUZYKOV, Y.; LEONARDI, L.; MATTIONI, M.; NAWROCKA, J.; PALLOZZI, E.; SKWAREK, M.; TOMCZYNSKA, M.; CALFAPIETRA, C. When the Mediterranean becomes harsh: Heat pulses strongly affect C allocation in plant-soil-atmosphere continuum in *Eucalyptus camaldulensis*. **Environmental and Experimental Botany**, v. 162, p. 181-191, 2019.

GONCALVES, J. L.; ALVARES, C. A.; HIGA, A.; R.; SILVA, L.; D.; ALFENAS, A.; C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. DE B. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6-27, 2013.

GONÇALVES, J. L. M.; CLAYTON A. A.; JOSÉ H. T R.; BRANDANI, C. B.; HAKAMADA, R. Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests: Journal of Forest Science** v. 79, p. 169-183, 2017.

HATFIELD, J. L.; PRUEGER, J. H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. **Weather and Climate Extremes**, v. 10, p. 4–10, 2015.

HUBBARD, R.M.; CARNEIRO, R. L.; CAMPOE, O.; ALVARES, C. A.; FIGURA, M. A.; MOREIRA, G. G. Contrasting water use of two Eucalyptus clones across a precipitation and

temperature gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 475, e118407, 2020.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual IBÁ**. São Paulo, 2019.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change - Summary for Policymaker. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (Eds). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

MARENGO, J. A. **O futuro clima do Brasil**. Revista USP , v. 103, p. 26, 2015

MARTINS, F. B.; PEREIRA, R. A. de A.; PINHEIRO, M. V. M.; ABREU, M. C. Desenvolvimento foliar em duas cultivares de oliveira estimada por duas categorias de modelos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, p.505-514, 2014.

MARTINS, F. B.; STRECK, N. A. Aparecimento de folhas em mudas de eucalipto estimado por dois modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1091-1100, 2007.

MARTINS, M.A.; TOMASELLA, J.; DIAS, C.G. Maize yield under a changing climate in the Brazilian Northeast: Impacts and adaptation. **Agricultural Water Management**, v.216, n.1, p.339-350, 2019.

OLIVEIRA, L.T.; CECÍLIO, R.A.; PEZZOPANE, J.E.M. Potencial Impacto das Mudanças Climáticas no Zoneamento do Pinus no Espírito Santo. **Floresta e Ambiente**. v.18, p.37-49, 2012.

OTTO, M. S. G.; VERGANI, A. R.; GONÇALVES, A. N.; VRECHI, A.; SILVA, S. R.; STAPE, J. L. Fotossíntese, condutância estomática e produtividade de clones de Eucalyptus sob diferentes condições edafoclimáticas. **Revista Árvore**, v. 37, p, 431-439, 2013.

PIROVANI, D.B.; PEZZOPANE, J.E.M.; XAVIER, A.C.; PEZZOPANE, J.R.M.; JÚNIOR, W.C.J.; MACHUCA, M.A.H.; SANTOS, G.M.A.D.A.; SILVA, S.F.; ALMEIDA, S.L.H. ; PELUZIO, T.O.; EUGENIO, F.C.; MOREIRA, T.R.; ALEXANDRE, R.S.; SANTOS, A.R. Climate change impacts on the aptitude area of forest species. **Ecological Indicators**, v.95, p.405-416, 2018.

REBOITA, M. S.; MARRAFON, V. H. A.; LLOPART, M.; DA ROCHA, R. P. Cenários de mudanças climáticas projetadas para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 2, p. 207-224, 2018.

SANTAROSA, E.; PENTEADO-JUNIOR, J. F.; GOULART, ICG dos R. Cultivo de eucalipto em propriedades rurais: diversificação da produção e renda. **Embrapa Florestas-Fôlder/Folheto/Cartilha (INFOTECA-E)**, 2014.

SANTOS, D. F. dos.; 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. 77-88, 2017.

TAVARES, P.S., GIAROLLA, A., CHOU, S.C., SILVA, A.J.P., LYRA, A.A., 2018. Climate change impact on the potential yield of Arabica coffee in southeast Brazil. **Regional**

Environmental Change, v.18, n.3, p.873–883, 2018.

TORRES, R. R.; MARENGO, J. A. Climate change hotspots over South America: from CMIP3 to CMIP5 multi-model datasets. **Theoretical and Applied Climatology**, v.117, p.579-587, 2014.

WANG, E.; ENGEL, T. Simulation of phenological development of wheat crops. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v.58, n.1, p.1-24, 1998.

WREGE, M. S.; CARAMORI, P. H.; GARRASTAZU, M. C.; FRITZSONS, E.; PARTALA, A.; CHRISTENSEN, G. L. Plantios florestais com Pinus no Estado do Paraná e os novos cenários definidos pelas mudanças climáticas globais. **Revista do Instituto Florestal**, v. 28, n. 2, p. 159-175, 2016.

CAPÍTULO I

IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO DESENVOLVIMENTO INICIAL DE DUAS ESPÉCIES DE EUCALIPTO

1.1. INTRODUÇÃO

O setor florestal é vulnerável as mudanças climáticas principalmente devido aos aumentos projetados na temperatura do ar (COSTA e STRECK, 2018; PIROVANI et al., 2018; FREIRE et al., 2019; ELLI et al., 2020a), uma vez que alterações abruptas ou graduais na temperatura do ar representam ameaças aos processos fisiológicos, a diversidade ecológica e a sustentabilidade dos sistemas florestais (BAHUGUNA e JAGADISH, 2015; FREIRE et al. 2019). Isso ocorre devido à influência da temperatura do ar na rede de sensores, que programam toda a estrutura metabólica e hormonal das plantas (BAHUGUNA e JAGADISH, 2015).

Os impactos resultantes dos aumentos na temperatura do ar são diferenciados entre as diversas espécies florestais, podendo ser positivos em algumas regiões e determinadas épocas do ano, e negativos em outras (SANTOS et al. 2017; COSTA e STRECK, 2018; PIROVANI et al., 2018; TAVARES et al. 2018; FREIRE et al., 2019; ELLI et al., 2020a). Mesmo com a importante participação do setor florestal na economia brasileira com 1,3% do Produto Interno Bruto (PIB) e 6,9% do PIB industrial no ano de 2019 (IBÁ, 2019), as avaliações dos impactos das mudanças climáticas no setor florestal ainda são escassas (COSTA e STRECK, 2018; ELLI et al., 2019; ELLI et al., 2020; PIROVANI et al., 2018; FREITAS et al., 2019). Os poucos estudos realizados demonstram incertezas sobre a viabilidade do setor florestal brasileiro em toda a cadeia produtiva, desde a produção de mudas nos viveiros florestais, até a colheita (COSTA e STRECK, 2018; FREIRE et al., 2019; ELLI et al 2020a,b).

Dentre toda a cadeia produtiva florestal, a produção de mudas é a que merece maior destaque, pois para superar os desafios impostos pelas mudanças climáticas primeiramente deve-se produzir mudas de alta qualidade (MARTINS et al., 2021; WILLIAMS e DUMROESE, 2014). Infelizmente, muitos viveiros comerciais no Brasil e ao redor do mundo ainda não estão investigando como as mudanças climáticas poderão impactar no desenvolvimento das mudas e como as operações e as práticas nos viveiros florestais poderão ser alteradas (MOORE e ALLARD, 2008; WILLIAMS e DUMROESE, 2014; COSTA e STRECK, 2018; FLORENCIO et al.,

2019; TIETZE et al., 2019; MARTINS et al., 2021). Este tipo de informação é fundamental para ajustar as práticas de manejo atuais de modo a aumentar a produtividade e melhorar o gerenciamento de recursos para produção de mudas, visando minimizar os riscos associados às mudanças climáticas e alcançar as metas de comercialização e de qualidade das mudas. Estas respostas são ainda mais necessárias para as espécies florestais que possuem alto interesse econômico como as do gênero *Eucalyptus* sp (COSTA e STRECK, 2018; IBÁ, 2019; FREITAS et al., 2020; ELLI et al., 2020a,b)

O eucalipto é o gênero florestal mais plantado no Brasil, com aproximadamente 7,6 milhões de hectares (IBÁ, 2019; FREITAS et al., 2020; ELLI et al., 2020a), e o plantio vem crescendo principalmente nas fronteiras agrícolas tropicais (ELLI et al., 2020a) e no estado de Minas Gerais, que atualmente possui maior área plantada com espécies do gênero, correspondendo a cerca de 24,0% da área total plantada no país (IBÁ, 2019). Dentre as mais de 730 espécies de eucalipto, o plantio comercial é restrito a poucas espécies. No Brasil, a *Corymbia citriodora* ((ex Hook.) Hill & Johnson) (anteriormente descrita como *Eucalyptus citriodora*, PARRA-O et al., 2006) e o *Eucalyptus urophylla* (S. T. Blake), são cultivadas devido aos múltiplos usos da matéria prima, como: serraria, celulose, móveis, carvão vegetal, resina e óleos essenciais. Além disso, ambas as espécies possuem características desejáveis como rápido crescimento e curta rotação (<7 anos), elevada produtividade e resistência a doenças (ALFENAS et al., 2009; REZENDE et al., 2013; FLORES et al., 2016; FREITAS et al., 2017).

Nesse sentido, uma das melhores formas de avaliar os efeitos e os impactos do aumento da temperatura do ar no desenvolvimento das mudas de eucalipto em viveiros florestais pode ser realizado pelas saídas de modelos do sistema terrestre aplicadas em modelos de simulação do desenvolvimento (COSTA e STRECK, 2018; FLORENCIO et al., 2019; BECKER et al., 2021). Esses modelos simulam a dinâmica do desenvolvimento foliar, que integrada no tempo, fornece informações como o número de folhas acumuladas ao longo do tempo (NFa), número final de folhas (NFF), término e duração da fase de muda (DFM). Isso só é possível, pois os modelos de desenvolvimento estimam a taxa de aparecimento de folhas (TAF) através de funções de temperatura do ar (MARTINS e STRECK, 2007; MARTINS et al., 2014; COSTA e STRECK, 2018; FERREIRA et al., 2019). Os exemplos mais recorrentes de modelos de desenvolvimento são: Filocrono (FIL) que utiliza uma função linear de temperatura

denominada soma térmica (STRECK et al., 2011; MARTINS et al., 2014; LANGNER et al., 2018), e Wang e Engel (WE) (WANG e ENGEL, 1998; STRECK et al., 2011; FERREIRA et al., 2019) que utiliza uma função não linear de temperatura denominada função beta. Ambos os modelos necessitam, primeiramente, que as calibrações sejam realizadas localmente e para cada espécie florestal, devido à dependência ambiental e genética dos seus coeficientes (STRECK et al., 2011; UHLMANN et al., 2017; FERREIRA et al., 2019). Após essa etapa, os modelos estão aptos a serem alimentados com as saídas de projeções climáticas (FLORENCIO et al., 2019).

Apesar dos modelos de desenvolvimentos fornecerem informações úteis para fins de manejo das mudas nos viveiros (MARTINS et al., 2021), assim como para projetar o desenvolvimento inicial das espécies florestais em cenários climáticos, seu uso é praticamente restrito a culturas agrícolas e ornamentais, como exemplo arroz (STRECK et al., 2011; STRECK et al., 2013), milho (LANGNER et al., 2018), trigo (WANG e ENGEL, 1998; XUE et al., 2004), batata doce (ERPEN et al., 2013), mandioca (SAMBORANHA et al., 2013), batata (STRECK et al., 2007), soja (SETIYONO et al., 2007) e gladiolo (UHLMANN et al., 2017; BECKER et al., 2021). Apesar do grande potencial, estudos dessa natureza ainda são escassos em espécies florestais (COSTA e STRECK, 2018), inclusive em espécies que apresentam grande interesse comercial, como o *Eucalyptus urophylla* e *Corymbia citriodora*.

Nesse contexto, surgem as seguintes questões: (i) os modelos de desenvolvimento (FIL e WE) são capazes de predizer o NFa e a DFM de ambas as espécies para as condições de clima presente? (ii) como os aumentos projetados de temperatura do ar inerentes às mudanças climáticas podem afetar o desenvolvimento inicial (NFa e DFM) das duas espécies comparadas ao clima presente? (iii) caso o desenvolvimento inicial seja afetado, qual o impacto na DFM e nas práticas de manejo no viveiro florestal? Para responder essas questões, o objetivo deste primeiro capítulo da dissertação foi calibrar e avaliar ambos os modelos de desenvolvimento (FIL e WE) na predição do NFa e DFM para o clima presente, assim como, identificar os possíveis impactos dos aumentos projetados de temperatura do ar na DFM das espécies *Corymbia citriodora* (ex Hook.) Hill & Johnson) e *Eucalyptus urophylla* (S. T. Blake) para o município de Itajubá para o clima futuro.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1. Dados e descrição dos modelos de simulação do desenvolvimento das mudas

Primeiramente foi necessário calibrar e avaliar o desempenho de ambos os modelos (FIL e WE) em prever o NFA e DFM. Para isso, foram utilizados os dados fenológicos de desenvolvimento das mudas das espécies *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla* referentes às datas de semeadura, emergência, final da fase de muda, duração média da fase de muda (Tabela 1.1) e número de folhas. Os dados são provenientes de experimentos conduzidos na área experimental da Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, Minas Gerais (22° 30'S, 45° 27'O, 850 metros de altitude) em onze épocas de semeadura (ES) durante os anos de 2014 e 2015. O clima de Itajubá é típico de monção, com duas estações bem definidas: outono/inverno seco e primavera/verão úmido (MONTEIRO e MARTINS, 2019). Para detalhamento do protocolo experimental consulte Freitas et al., (2017) e Freitas e Martins (2019).

Tabela 1.1 – Datas de semeadura, emergência, fim da fase de muda e duração média da fase de muda (dias) para as espécies *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla* obtidas durante a condução dos experimentos em Itajubá, Minas Gerais, 2014/2015.

Época	Data de semeadura	<i>Corymbia citriodora</i>			<i>Eucalyptus urophylla</i>		
		Data de emergência (DE) ¹	Fim da fase de muda ²	Duração da fase de muda	Data de emergência (DE) ¹	Fim da fase de muda ²	Duração da fase de muda
ES1	04/04/2014	22/04/2014	28/07/2014	97	22/04/2014	28/07/2014	97
ES2	05/05/2014	15/05/2014	28/10/2014	166	15/05/2014	21/10/2014	159
ES3	02/06/2014	26/06/2014	21/10/2014	117	26/06/2014	21/10/2014	117
ES4	02/07/2014	30/07/2014	04/11/2014	97	30/07/2014	11/11/2014	104
ES5	19/08/2014	07/09/2014	07/01/2015	122	07/09/2014	18/12/2014	102
ES6	16/09/2014	30/09/2014	30/12/2014	91	02/10/2014	30/12/2014	89
ES7	15/10/2014	29/10/2014	28/01/2015	91	29/10/2014	04/02/2015	98
ES8	18/11/2014	03/12/2014	20/02/2015	79	30/11/2014	11/02/2015	73
ES9	18/12/2014	28/12/2014	13/03/2015	75	28/12/2014	20/03/2015	82
ES10	21/01/2015	05/02/2015	01/06/2015	116	--	--	--
ES11	20/02/2015	27/02/2015	22/06/2015	115	27/02/2015	23/05/2015	85

¹ A data de emergência foi considerada quando 50% das sementes estavam germinadas e visíveis acima do solo. ² O encerramento da fase de muda foi considerado quando ambas espécies atingiram 20 folhas acumuladas na haste principal -- Época em que houve perda de todas as unidades experimentais.

As ES foram divididas em dois grupos: o primeiro grupo (ES1 a ES4) foi utilizado para calibrar os coeficientes dos modelos (detalhes no item 1.2.2) e o segundo grupo (ES5 a ES11) foi utilizado para avaliar o desempenho dos dois

modelos (FIL e WE) (detalhes no item 1.2.3) (MARTINS et al., 2014; FERREIRA et al., 2019; MARTINS et al., 2021).

Em ambos os modelos (FIL e WE), o desenvolvimento das mudas é estimado em três partes: i) primeiro estima-se o número de folhas acumuladas (NFa) em escala diária, desde a data da emergência (DE) até o final da fase de muda; ii) obtém o número final de folhas (NFF), através da integração do NFa no tempo desde DE até o final da fase de muda; e iii) obtém a duração da fase de muda (DFM). O final da fase de muda e o NFF são definidos como o dia em que a muda atinge o limiar de comercialização, considerado quando o NFF = 20 folhas (MARTINS e STRECK 2007; ABREU et al., 2015; FREITAS et al., 2017; FREITAS e MARTINS, 2019).

Para estimar o NFa é necessário calcular primeiramente a taxa de aparecimento de folhas (TAF). Pelo modelo do FIL, a TAF diária foi obtida por (FLORENCIO et al., 2019; MARTINS et al., 2021) (Eq. 1.1):

$$TAF_{FIL} = a \cdot STd \quad (1.1)$$

Em que: TAF_{FIL} = taxa diária de aparecimento de folhas pelo modelo FIL (folhas dia⁻¹); a = coeficiente angular da regressão linear entre TAF e STd, que representa a taxa média de aparecimento de folhas (folhas °C dia⁻¹), específico para cada espécie e está descrito no item 2.2; STd = soma térmica diária (°C dia), dada por (FREITAS e MARTINS, 2019) (Eq.1.2):

$$STd = \begin{cases} 0 & \text{quando } T_m < T_b \text{ ou } T_m > T_B \\ T_m - T_b & \text{quando } T_b < T_m \leq T_{ot} \\ \frac{(T_{ot}-T_b) \cdot (T_B-T_m)}{(T_B-T_{ot})} & \text{quando } T_{ot} < T_m \leq T_B \end{cases} \quad (1.2)$$

Em que: T_m = temperatura média diária do ar (°C), obtida pela média da temperatura mínima e máxima do ar, da estação meteorológica automática localizada na área experimental; T_b , T_{ot} e T_B = temperaturas cardinais (°C) (mínima, ótima e máxima) de desenvolvimento para cada espécie. Para a *Corymbia citriodora* $T_b = 8,7^\circ\text{C}$, $T_{ot} = 17,1^\circ\text{C}$, $T_B = 41,3^\circ\text{C}$ e para *Eucalyptus urophylla* $T_b = 11,5^\circ\text{C}$, $T_{ot} = 17,1^\circ\text{C}$, $T_B = 40,5^\circ\text{C}$ (Freitas et al., 2017). As temperaturas cardinais e a função de soma térmica são demonstradas na Figura 1.1A.

Pelo modelo de WE, a TAF diária foi obtida por (Wang e Engel, 1998) (Eq. 1.3):

$$TAF_{WE} = TAF_{max} \cdot f(t) \quad (1.3)$$

Em que: TAF_{WE} = taxa diária de aparecimento de folhas pelo modelo WE (folhas dia⁻¹);

TAF_{max} = taxa máxima diária de aparecimento de folhas específica para cada espécie (folhas dia^{-1}) (detalhes no item 2.2); $f(T)$ = função beta de temperatura do ar (entre 0 e 1), dada por (UHLMANN et al., 2017; FLORENCIO et al., 2019) (Eq. 1.4):

$$f(t) = \begin{cases} 0 & \text{quando } T_m < T_b \text{ ou } T_m > T_B \\ \frac{[2(T_m - T_b)^\alpha (T_{ot} - T_b)^\alpha - (T_m - T_b)^{2\alpha}]}{(T_{ot} - T_b)^{2\alpha}} & \text{quando } T_b \leq T_m \leq T_B \end{cases} \quad (1.4)$$

$$\alpha = \frac{\ln 2}{\ln[(T_B - T_b)/(T_{ot} - T_b)]} \quad (1.5)$$

Em que: T_m = temperatura média diária do ar ($^{\circ}C$); T_b , T_{ot} e T_B = temperaturas cardinais (mínima, ótima e máxima) de desenvolvimento para cada espécie (mencionadas anteriormente); α = coeficiente da $f(t)$. A função beta é demonstrada na Figura 1.1 B.

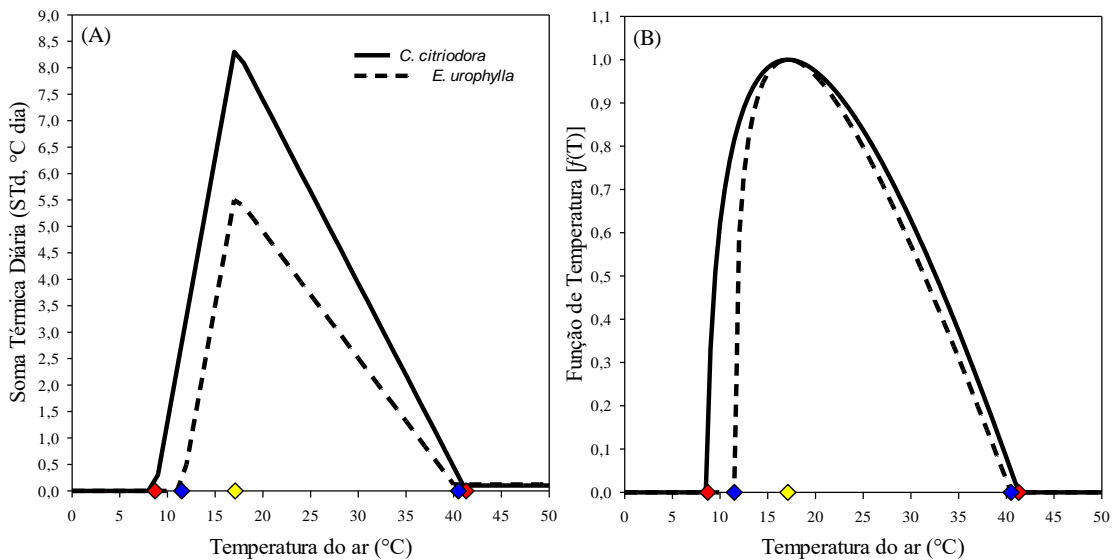


Figura 1.1 - Funções de temperatura do ar utilizadas no modelo filocrono (A), dado pela soma térmica, e modelo de Wang e Engel (B), dado pela função beta, e temperaturas cardinais para *Corymbia citriodora* ($T_b = 8,7^{\circ}C$, $T_{ot} = 17,1^{\circ}C$, $T_B = 41,3^{\circ}C$) e *Eucalyptus urophylla* ($T_b = 11,5^{\circ}C$, $T_{ot} = 17,1^{\circ}C$, $T_B = 40,5^{\circ}C$). Os pontos vermelhos e azuis sobre o eixo x representam a T_b e T_B das espécies *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla*, respectivamente. O ponto amarelo representa a T_{ot} das espécies.

Dessa forma, em ambos os modelos (FIL e WE) o NFA foi calculado pelo acúmulo diário da TAF, ou seja, $NFA = \sum_{i=DE}^{NFF} TAF(\text{folhas})$, o NFF foi obtido pelo

acúmulo dos valores diários de N_{Fa} até atingir N_{FF} = 20 folhas, e a DFM foi contabilizada pela duração, em dias, entre a DE e N_{FF}, ou seja, $DFM = \text{Dia}_{DE} - \text{Dia}_{NFF}$.

1.2.2. Calibração dos coeficientes dos modelos de simulação do desenvolvimento

Os coeficientes ‘a’ (modelo FIL) e TAF_{max} (modelo WE) foram calibrados para cada espécie considerando os dados fenológicos de NF das ES1 a ES4, conforme recomendações de Martins e Streck (2007), Streck et al., (2011), Martins et al., (2014) e Ferreira et al., (2019). O coeficiente ‘a’ foi calibrado através de regressões lineares entre N_{Fa} e STd acumulados, ajustadas para cada ES (1 a 4) e espécie, sendo obtido pela média aritmética dessas regressões (STRECK et al., 2011; MARTINS et al., 2014; FERREIRA et al., 2019;). O coeficiente TAF_{max} foi estimado através de regressões não lineares entre N_{Fa} em função dos valores acumulados de f(T) para cada ES (1 a 4) e espécie (MARTINS et al., 2014; FERREIRA et al., 2019). O valor de TAF_{max} com menor valor do quadrado médio do erro (QME) entre as regressões ajustadas foi adotado (MARTINS et al., 2014; FERREIRA et al., 2019). Foi aplicado o procedimento *nonlinear estimation* do software Statistica® (STATSOFT, 2008), considerando a variante de Gauss-Newton pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MARTINS et al., 2014; FERREIRA et al., 2019).

1.2.3. Avaliação do desempenho dos modelos de simulação do desenvolvimento

A avaliação do desempenho dos modelos (FIL e WE) foi realizada pela comparação entre os valores estimados e observados de N_{Fa} das ES5 a ES11, provenientes de conjunto independente de dados. As estatísticas usadas para avaliar o desempenho dos modelos foram (SAMBORANHA et al., 2013; MARTINS et al., 2014; FERREIRA et al., 2019): raiz do quadrado médio do erro (RQME), índice BIAS, índice de concordância de Wilmott (d) e índice de desempenho (índice-c) (Eqs. 1.6 a 1.9).

$$RQME = \left[\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 / n \right]^{0,5} \quad (1.6)$$

$$BIAS = \left(\sum_{i=1}^n E_i - \sum_{i=1}^n O_i \right) / \sum_{i=1}^n O_i \quad (1.7)$$

$$d = 1 - \left\{ \frac{\left[\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{O}) \right] \left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]} \right\} \quad (1.8)$$

$$\text{índice-c} = \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(E_i - \bar{E}) / \left\{ \left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \right] \right\} \cdot d \quad (1.9)$$

Em que: E_i = número de folhas estimado pelos modelos FIL e WE; O_i = número de folhas observado; \bar{E}_1 = média dos valores de número de folhas estimado pelos modelos (FIL e WE); \bar{O}_1 = média dos valores de número de folhas observados; n = números de observações.

O critério para a interpretação do índice-c é: $> 0,85$: excelente; $0,76$ a $0,85$: muito bom; $0,66$ a $0,75$: bom; $0,61$ a $0,65$: moderado; $0,51$ a $0,60$: fraco; $0,41$ a $0,50$: muito fraco; e $\leq 0,40$: péssimo (CAMARGO e SENTELHAS, 1997; MONTEIRO e MARTINS, 2019).

Adicionalmente, foi testada a homogeneidade da variância entre os valores observados e estimados de NFa para cada modelo (FIL e WE) e ES. Para isso, foi aplicado o teste de Bartlett através das hipóteses: H_0 : variância homogênea ($p \geq 0,05$) versus H_1 : variância heterogênea ($p < 0,05$) (SNEDECOR e COCHRAN, 1989; FERREIRA et al., 2019) (Eq. 1.10):

$$B = \frac{(\sum vi) \ln \left(\frac{\sum vi Si^2}{\sum vi} \right) - \sum vi \ln Si^2}{1 + \left\{ \sum \left(\frac{1}{vi} \right) - 1 \right\} / \{3(K-1)\}} \quad (1.10)$$

Em que: B = valor do teste de Bartlett; $vi = n-1$; n = número de dados; Si^2 = variância entre o NFa observada e estimada (para cada modelo, espécie e época); $K = 2$ que refere-se ao número de dados pareados (observado versus estimado).

Além disso, foi verificado o desempenho dos modelos (FIL e WE) em estimar a DFM entre as ES através do teste t-pareado. No teste t-pareado foi testada a hipótese H_0 = média dos valores observados de DFM não difere da média dos valores estimados de DFM (para cada modelo e espécie) ($p \geq 0,05$) versus H_1 = média dos valores observados de DFM difere da média dos valores estimados de DFM (SNEDECOR e COCHRAN, 1989; FERREIRA et al., 2019) (eq. 1.11):

$$t = \frac{\bar{O}_i - \bar{E}_i}{\frac{Si^2}{\sqrt{n}}} \quad (1.11)$$

Em que: t = valor do teste t pareado; (\bar{O}_i) = média dos valores observados de DFM; \bar{E}_i = média dos valores estimados da DFM; Si^2 = variância entre valores observados e estimados da DFM (para cada modelo e espécie); n = número de dados.

O modelo de desenvolvimento que apresentou melhor estimativa do NFa, dado

pelo menor valor de RQME e BIAS, maior valor de ‘d’ e índice-c, homogeneidade da variância ($p \geq 0,05$), assim como melhor desempenho na estimativa da DFM, foi selecionado para verificar o impacto do aumento projetado de temperatura do ar no desenvolvimento de ambas espécies durante a fase de muda (detalhes no item 1.2.4).

1.2.4. Simulações e projeções climáticas do desenvolvimento

O desenvolvimento de ambas as espécies foi simulado para o clima presente (CP, 1980-2005) e projetado para o futuro próximo (FP, 2021-2050) e futuro distante (FD, 2071-2100), utilizando o modelo (FIL ou WE) de melhor desempenho nas condições experimentais (detalhada no item 1.2.3). A simulação e as projeções foram realizadas para as onze ES a partir da DE (i) (Tabela 1.1) até a data de término da fase de muda (NFF = 20 folhas), contabilizando a DFM pelo $\sum_{i=DE}^{n=NFF}$ dias (FLORENCIO et al., 2019). Esse procedimento foi realizado para cada modelo climático pela inserção dos dados diários de Tm na STd (modelo FIL) ou f(t) (modelo WE).

Para isso, foram utilizados dados diários de Tm próximo à superfície (C°), de nove modelos do sistema terrestre (MST) regionalizados com *downscaling* estatístico: ACCESS 1.0, CCSM4, CNMR-CM5, EC-EARTH, GFDL-CM3, IPSL-CM5A-MR, MIROC5, MPI-ESM-MR, MRI-CGCM3. O conjunto de dados é oriundo do NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP) e fornecidos pelo *Climate Analytics Group* e *NASA Ames Research Center*, sendo disponibilizados pelo *NASA Center for Climate Simulation* (NCCS) (TAYLOR et al., 2012) (<https://portal.nccs.nasa.gov/datashare/NEXGDDP/BCSD/historical/day/atmos/>). Os dados do NEX-GDDP derivam das saídas geradas pelos MST do *Coupled Models Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) (TAYLOR et al. 2012). Todos MST possuem uma resolução horizontal de 0,25° de latitude/longitude e foram extraídos para o ponto de grade mais próximo a Itajubá (22° 25’S e 45° 27’O). Os modelos do NEX-GDDP possuem escala mais refinada o que possibilita melhor representação do clima em escala local e regional (JACOBET et al., 2014; BAO e WEN, 2017). Os dados diários de Tm de cada modelo climático foram inseridos no modelo de simulação do desenvolvimento (FIL ou WE) para o CP, FP e FD.

As projeções do NEX-GDDP são realizadas utilizando os cenários de forçantes radiativas denominados *Representative Concentration Pathways* (RCP). Neste estudo utilizou o RCP 4.5 e 8.5, que correspondem a uma forçante radiativa aproximada no

final do século XXI de 4.5 Wm^{-2} (CO_2 equivalente $\approx 650\text{ppm}$) e 8.5 Wm^{-2} (CO_2 equivalente $\approx 1370\text{ppm}$), relativo às condições pré-industriais (MOSS et al., 2010).

Previamente, os dados de T_m dos MSTs foram validados pela comparação com os dados disponibilizados por Xavier et al. (2016) (<https://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA>), os quais derivam de validação cruzada entre dados pontuais observados através de estações meteorológicas e métodos de interpolação para pontos de grade, com resolução horizontal de $0,25^\circ$ em latitude/longitude. Esta etapa foi realizada para evitar erros nos padrões projetados de T_m dos nove modelos do sistema terrestre do NEX-GDDP (anexo 1). Nesta validação foram utilizadas as estatísticas: raiz do quadrado médio do erro (RQME) e viés médio (VM) (Eq. 12 e 13):

$$\text{RQME} = [\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 / N]^{0,5} \quad (12)$$

$$\text{VM} = N^{-1} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i) \quad (13)$$

Em que: E_i = valores de T_m simulados pelos nove modelos do sistema terrestre (1980-2005); O_i = valores de T_m provenientes do banco de dados disponibilizado por Xavier et al. (2016) (1980-2005), N = número de observações .

Para avaliar o impacto das projeções climáticas na DFM de cada espécie, os valores de DFM foram previamente submetidos ao teste de Shapiro-Wilk ($\alpha=0,05$) para verificar a normalidade. Posteriormente, foi realizada a análise de variância (ANOVA) pela interação entre as fontes de variação: época de simulação da semeadura (onze épocas), períodos (CP= 1980-2005, FP= 2021-2050, FD=2071-2100) e forçantes radiativas (RCPs 4.5 e 8.5), conforme recomendações de Streck et al., (2013), Costa e Streck et al. (2018) e Florêncio et al. (2019). Após, foi realizada a comparação de médias pelo teste Scott-Knott ($\alpha=0,05$).

1.3. RESULTADOS

1.3.1. Calibração e avaliação do desempenho dos modelos de simulação do desenvolvimento

O conjunto de dados utilizados para calibração (ES1 a ES4) e avaliação do desempenho (ES5 a ES11) de ambos os modelos foram conduzidos em épocas que possuem variação das condições de temperatura do ar (Figura 1.2). Os valores de temperatura variaram entre $3,8^\circ\text{C}$ (mínimo absoluto) a $35,7^\circ\text{C}$ (máximo absoluto). Tal condição é uma premissa para a calibração e avaliação dos modelos de desenvolvimento

(MARTINS et al., 2014; UHLMANN et al., 2017; FERREIRA et al., 2019).

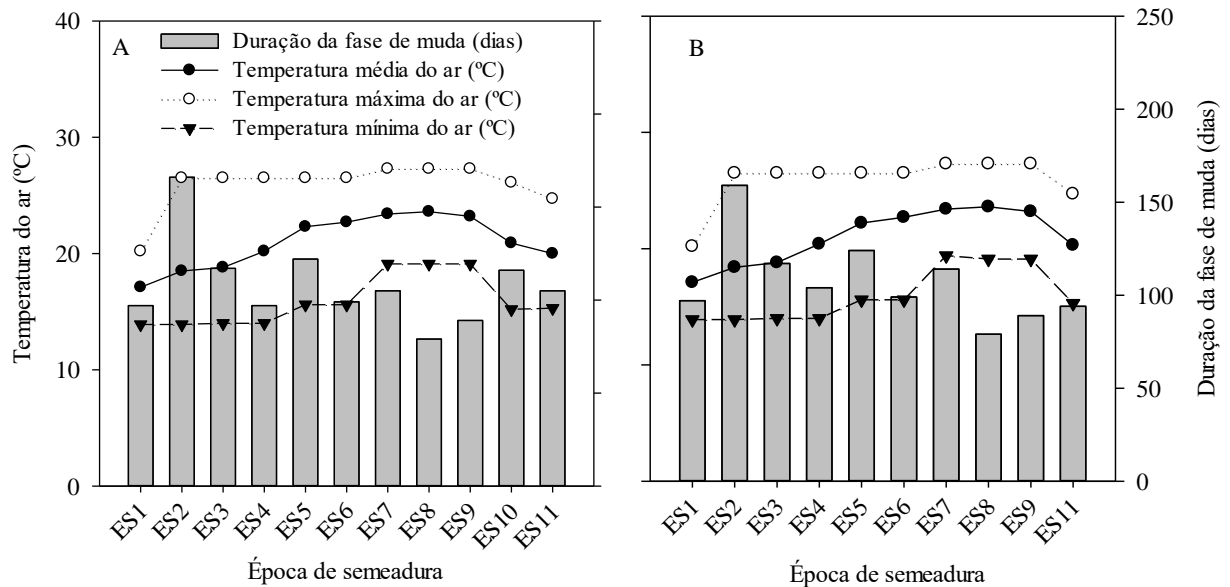


Figura 1.2 - Caracterização da temperatura do ar (mínima, média e máxima) e duração da fase de muda (dias) das onze épocas de semeadura durante a condução dos experimentos para duas espécies de eucalipto: *Corymbia citriodora* (A) e *Eucalyptus urophylla* (B). Itajubá (Minas Gerais, 2014/2015).

Apesar de ambas as espécies apresentarem rápido desenvolvimento nas condições de campo (FREITAS et al., 2017; FREITAS e MARTINS, 2019), os coeficientes de calibração de ambos os modelos (FIL e WE) variaram entre as duas espécies. Em comum, todos os coeficientes foram significativos pelo teste-t ($p < 0,05$). Maior valor de 'a' (FIL) e TAF_{max} (WE) indicam que a espécie é mais precoce e possui menor ciclo de desenvolvimento (MARTINS et al., 2021), antecipando a DFM (COSTA e STRECK, 2018). O valor de 'a' foi de $0,0243$ folhas $^{\circ}C$ dia $^{-1}$ para *Corymbia citriodora* e $0,0409$ folhas $^{\circ}C$ dia $^{-1}$ para *Eucalyptus urophylla*. No modelo FIL, o significado biológico do coeficiente 'a' é avaliado pelo inverso do coeficiente 'a', ou seja $1/0,0243$ ($41,15$ $^{\circ}C$ dia folha $^{-1}$) para *Corymbia citriodora* e $1/0,0409$ ($24,45$ $^{\circ}C$ dia folha $^{-1}$) para *Eucalyptus urophylla*, e representa a quantidade de energia necessária para a emissão de uma folha (FERREIRA et al., 2019; MARTINS et al., 2021). Por essa abordagem, a STd acumulada para finalizar a fase de muda (NFF= 20 folhas) varia, aproximadamente, de 489 $^{\circ}C$ dia (*Eucalyptus urophylla*) a 823 $^{\circ}C$ dia (*Corymbia citriodora*). O valor de TAF_{max} foi de $0,2337$ folha dia $^{-1}$ para *Corymbia citriodora* e de

0,3078 folha dia⁻¹ para *Eucalyptus urophylla*, que representam a menor duração da fase de muda quando a temperatura do ar é igual (ou próxima) à Tot de desenvolvimento (STRECK et al., 2011; MARTINS et al., 2021). Usando essa abordagem, a DFM varia de, aproximadamente, 65 dias (*Eucalyptus urophylla*) a 86 dias (*Corymbia citriodora*).

Justamente por apresentar ‘a’ e TAF_{max} ligeiramente maiores, a *Eucalyptus urophylla* consegue se desenvolver mais rapidamente que a *Corymbia citriodora*, antecipando o término da fase de muda. Enquanto a *Eucalyptus urophylla* se desenvolve mais rapidamente, a *Corymbia citriodora* se desenvolve mais lentamente comparada a outras espécies florestais como: *Eucalyptus grandis* (1/a = 30,9 °C dia folha⁻¹ e TAF_{max} = 0,4107 folha dia⁻¹), *Eucalyptus saligna* (1/a = 32,2 °C dia folha⁻¹ e TAF_{max} = 0,3180 folha dia⁻¹) (MARTINS e STRECK, 2007), *Hymenolobium petraeum*, *Parkia pendula*, *Adenanthera pavonina* e *Cassia fistula* (1/a entre 11,40 °C dia folha⁻¹ a 30,30 °C dia folha⁻¹) (MONTEIRO et al., 2014), incluindo a espécie nativa *Citharexylum myrianthum* (1/a= 33.3 °C dia folha⁻¹ e TAF_{max} = 0,1867 folhas dia⁻¹) (MARTINS et al., 2021). Os valores de 1/a observados neste estudo são semelhantes aos observados por Freitas e Martins (2019), especialmente para a *Eucalyptus urophylla* (23,39 °C dia folha⁻¹), no entanto, foram considerados métodos de STd distintos ao deste estudo.

De maneira geral, ambos os modelos (FIL e WE) conseguiram estimar com precisão o Nfa para as duas espécies em todas as ES (Tabela 1.2), com baixos valores de RMQE (1,01 a 6,32 folhas) e BIAS (-0,013 a 0,309) e elevados valores de d (≥0,710) e índice c (≥0,708). Exceto para a ES8 para *Corymbia citriodora* (FIL), os pressupostos da normalidade e homogeneidade da variância não foram violados por nenhum dos modelos (FIL e WE) independentemente da espécie e ES (Tabela 1.2). Esta resposta é um fator desejável na escolha do modelo mais apropriado de simulação do desenvolvimento (MARTINS e STRECK, 2007; FERREIRA et al., 2019) do ponto de vista biológico e estatístico (MONTEIRO e MARTINS, 2019).

Tabela 1.2 - Estatísticas utilizadas na avaliação do desempenho dos modelos de simulação do desenvolvimento, Filocrono (FIL) e Wang e Engel (WE), para a estimativa do número de folhas acumuladas em *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla*. Itajubá, Minas Gerais.

Épocas de semeadura	Modelos	RQME (folhas)	BIAS	d	Índice-c ⁽¹⁾ (adimensional)	Valor -p ⁽²⁾
<i>Corymbia citriodora</i>						

ES5	FIL	1,327	-0,092	0,983	0,974	0,914 ^{ns}
	WE	3,184	0,212	0,932	0,923	0,289 ^{ns}
ES6	FIL	4,494	-0,318	0,825	0,816	0,255 ^{ns}
	WE	1,284	-0,076	0,987	0,976	0,932 ^{ns}
ES7	FIL	3,871	-0,282	0,845	0,839	0,120 ^{ns}
	WE	1,013	-0,013	0,991	0,985	0,612 ^{ns}
ES8	FIL	6,323	-0,473	0,710	0,708	0,046*
	WE	3,572	-0,264	0,896	0,894	0,314 ^{ns}
ES9	FIL	6,253	-0,459	0,722	0,719	0,075 ^{ns}
	WE	3,316	-0,241	0,912	0,908	0,402 ^{ns}
ES10	FIL	3,194	-0,231	0,924	0,901	0,911 ^{ns}
	WE	2,026	0,031	0,975	0,955	0,368 ^{ns}
ES11	FIL	2,273	-0,164	0,958	0,949	0,605 ^{ns}
	WE	1,47	0,097	0,986	0,979	0,760 ^{ns}
Média	FIL	3,960	-0,288	0,853	0,844	0,418
	WE	2,401	-0,036	0,954	0,946	0,525
Épocas de semeadura	Modelos	RQME (folhas)	BIAS	d	Índice-c ⁽¹⁾ (adimensional)	Valor -p ⁽²⁾
<i>Eucalyptus urophylla</i>						
ES5	FIL	2,423	-0,150	0,945	0,926	0,423 ^{ns}
	WE	4,466	0,309	0,887	0,869	0,412 ^{ns}
ES6	FIL	3,499	-0,270	0,877	0,871	0,445 ^{ns}
	WE	2,262	0,143	0,963	0,957	0,481 ^{ns}
ES7	FIL	1,733	-0,083	0,964	0,961	0,300 ^{ns}
	WE	3,318	0,285	0,922	0,920	0,591 ^{ns}
ES8	FIL	5,630	-0,404	0,733	0,731	0,063 ^{ns}
	WE	1,223	-0,051	0,987	0,986	0,586 ^{ns}
ES9	FIL	4,295	-0,320	0,852	0,849	0,182 ^{ns}
	WE	1,186	0,089	0,991	0,988	0,889 ^{ns}
ES10	FIL	--	--	--	--	--
	WE	--	--	--	--	--
ES11	FIL	2,668	-0,180	0,944	0,939	0,386 ^{ns}
	WE	3,225	0,256	0,945	0,941	0,677 ^{ns}
Média	FIL	3,375	-0,234	0,886	0,880	0,299
	WE	2,613	0,172	0,949	0,943	0,606

-- Época em que houve perda de todas as unidades experimentais. ⁽¹⁾ Critério de classificação pelo índice-c: > 0,85: performance excelente; 0,76 < c < 0,85: muito bom; 0,66 < c < 0,75: bom; 0,61 < c < 0,65: moderado; 0,51 < c < 0,60: fraco; 0,41 < c < 0,50: muito fraco c ≤ 0,40: péssimo (Monteiro e Martins, 2019). ⁽²⁾ Valor-p = valor da probabilidade do teste Bartlett (que compara a variância entre o número de folhas observada e estimada por cada modelo – FIL e WE); ns = variância homogênea (p ≥ 0,05); * = variância heterogênea (p < 0,05)

A Figura 1.3 (A-D) mostra os valores de NFa estimado versus observado pelos dois modelos de simulação do desenvolvimento. Apesar do desempenho ser semelhante entre os dois modelos (Tabela 1.2), o WE foi ligeiramente superior ao FIL em ambas as espécies. No modelo FIL, o RQME global variou entre 3,4 a 4,0 folhas, enquanto no WE, o RQME global variou entre 2,4 a 2,6 folhas. Além disso, o modelo WE apresentou melhor capacidade em estimar o NFa ao longo do tempo nas duas espécies, principalmente nas ES5 e ES7 para *Corymbia citriodora* e nas ES8 e ES9 *Eucalyptus urophylla* (Tabela 1.2 e Figura 1.3A-D). Apesar disso, o modelo WE gerou superestimativa (em torno de 4 folhas) acima de 18 NFa (Figura 1.3 C, D). Em contrapartida, o modelo FIL gerou maior subestimativa no NFa para todas as ES (Figura 3 A,B), principalmente na *Corymbia citriodora*.

Quando se analisa a DFM estimada pelos dois modelos (Figura 1.3 E-F), exatamente nas ES em que houve maior subestimativa (superestimativa) do NFa, houve maior superestimativa (subestimativa) da DFM em ambas espécies. Além disso, quanto maior a magnitude na subestimativa do NFa, maior a magnitude na superestimativa do DFM (Tabela 1.2 e Figura 1.3 E-F). Por exemplo, a maior subestimativa do NFa nas ES8 e ES9 para a *Corymbia cotriodora* pelo modelo FIL ocasionou a maior superestimativa da DFM (+55 dias). Subestimativas no NFa são promovidas por uma diminuição da TAF ao longo do tempo, o que resulta em um ciclo de desenvolvimento mais longo e, conseqüentemente maior DFM (MARTINS et al., 2021). Por outro lado, o aumento do TAF ao longo do tempo acarreta superestimativa da NFa e antecipação da DFM, exatamente o que ocorreu na espécie *Corymbia citriodora*, principalmente na ES5 pelo modelo WE.

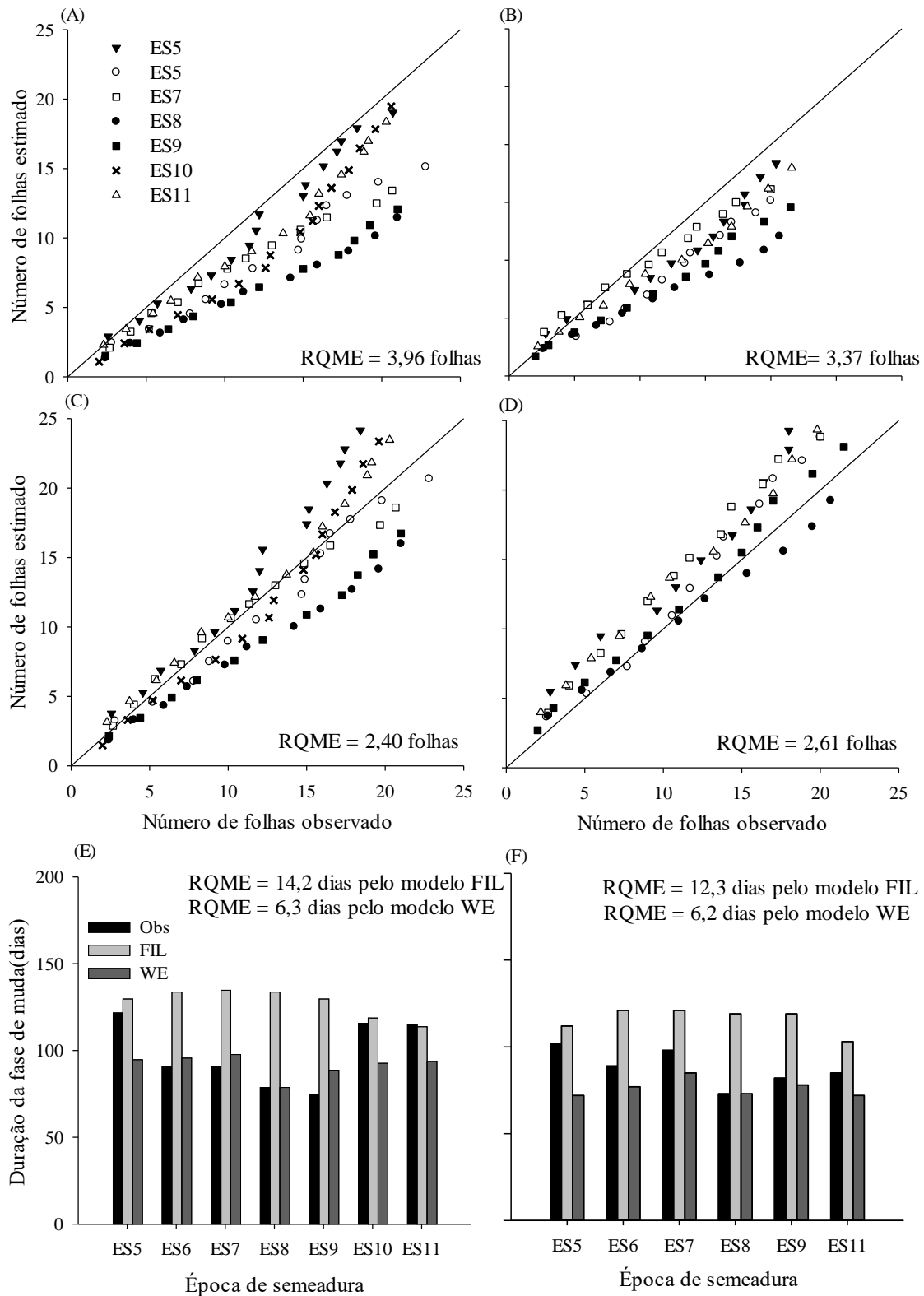


Figura 1.3 - Valor estimado versus observado de número de folhas acumulado (NFa, folhas) (painéis A - D) e duração da fase de muda (DFM, dias) (painéis E e F) pelo modelo filocrono (FIL, painéis A, C, E e F, representado por cinza claro) e Wang e Engel (WE, painéis B, D, E e F, representado pela cor cinza escuro) para *Corymbia*

citriodora (painéis A, B, E) e *Eucalyptus urophylla* (painéis C, D, F). A linha sólida é a linha 1:1.

Apesar dos modelos FIL e WE apresentarem erros baixos e aceitáveis na estimativa do N_{Fa} (entre 2,4 a 4 folhas), o WE conseguiu estimar com maior precisão a DFM entre as ES para a *Corymbia citriodora*, com RQME em torno de 6 dias, comparada ao FIL (RQME = 14,2 dias) (Figura 1.3 E e F). Mesmo com a diferença entre a DFM estimada e observada entre -27 dias (ES5) e + 14 dias (ES9) pelo WE, e entre -1 dia (ES11) e +55 dias (ES8 e 9) pelo FIL, o teste-t pareado não indicou diferença entre a DFM observada e estimada pelo modelo WE ($p=0,174$), enquanto o oposto ocorreu para o modelo FIL ($p=0,010$). Para o *Eucalyptus urophylla*, apesar da excelente performance na estimativa do N_{Fa} (RQME entre 2,6 e 3,4 folhas), ambos modelos apresentaram diferenças significativas na DFM estimada entre as ES, com valores entre -30 dias (WE) a +46 dias (FIL). Isso ocorreu em função da subestimativa do N_{Fa} em praticamente todas as ES para o FIL, e superestimativa para o WE (Figura 1.3 B,D), principalmente nas ES5, ES6 e ES8. Mesmo assim, o WE errou, em média, 6,2 dias e o FIL errou 12,3 dias.

Mesmo que erros na estimativa da DFM entre as ES ocorram, eles foram os menores possíveis e estão dentro dos limites aceitáveis para as condições de viveiro (FERREIRA et al., 2019; FLORENCIO et al., 2019). Erros menores que 12-15 dias são aceitos na predição da DFM em espécies florestais, uma vez que não representam problemas práticos em viveiros florestais e comercialização das mudas (MARTINS e STRECK, 2007; FERREIRA et al., 2019; MARTINS et al., 2021). Por isso, ambos os modelos poderiam ser utilizados para verificar o impacto das projeções climáticas de temperatura do ar na DFM. Porém, como o modelo WE errou menos na estimativa da DFM (e N_{Fa}) em ambas espécies (~6 dias) optamos por selecioná-lo.

1.3.2. Simulação e projeções climáticas no desenvolvimento

Os nove MST do NEX-GDDP conseguiram representar o ciclo mensal e anual da temperatura média do ar (T_m) para o clima presente (1980-2005) (Anexos 1 e 2). Os valores de T_m obtidos individualmente pelos modelos do sistema terrestre apresentaram pequena variabilidade ($0,92^{\circ}\text{C} < \text{VM} < 1,09^{\circ}\text{C}$) e erro inferior a $2,9^{\circ}\text{C}$ (Anexo 1), com destaque para o modelo MIROC5 (RQME = $2,54^{\circ}\text{C}$ e VM = $0,92^{\circ}\text{C}$). Adicionalmente, os valores médios (*ensemble*) dos nove MST se aproximam dos valores observados de

T_m (Anexo 2). Por isso, foi possível utilizar os dados de T_m de cada modelo climático do NEX-GDDP nas funções de T_m (f(t)) do modelo WE para *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla*.

As projeções dos modelos do sistema terrestre apontam para um aumento gradual da T_m para Itajubá ao longo do século XXI, sendo mais intenso no FD e no RCP 8.5. (Figura 1.4). As projeções de temperatura são mais brandas no RCP 4.5 e no FP (~+2,0°C) e mais intensas no RCP 8.5 e no FD (~+4,0°C). Esse padrão é esperado, e são semelhantes às projeções encontradas por Alves et al., (2020) para Itajubá, oriundas de projeções climáticas do modelo regional RegCM4, com valores entre 4°C a 6°C no final do século XXI (RCP 8.5). Além disso, são coerentes com os valores projetados para a região Sul de Minas Gerais (TAVARES et al., 2018; FLORENCIO et al., 2019), com aumentos de aproximadamente 1,8°C (FP) a 5°C (FD) no RCP8.5.

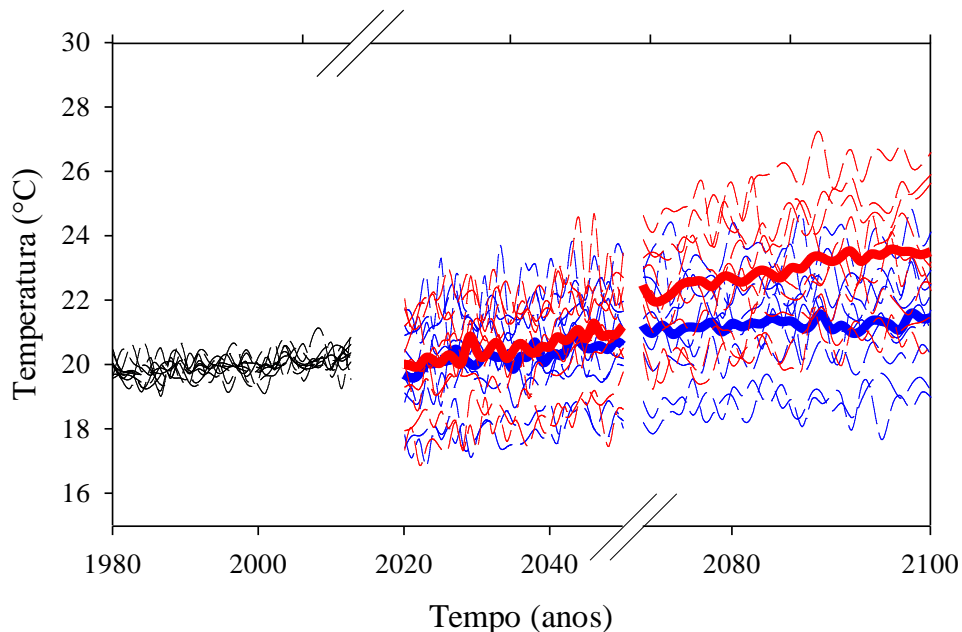


Figura 1.4 - Variação temporal simulada (clima presente =1980-2005) e projetada (FP=2021-2050; FD=2071-2100) da temperatura média do ar para Itajubá obtidas por nove modelos regionalizados do NEX-GDDP em dois cenários de forçantes radiativa (RCP 4.5 e 8.5). As linhas em negrito (preto, azul e vermelho) representam o *ensemble* dos modelos do sistema terrestre. As linhas tracejadas (preto, azul e vermelho) representam os dados de cada modelo climático.

Os aumentos projetados de T_m (Figura 1.4) refletem diretamente em mudanças da taxa de desenvolvimento das duas espécies florestais (Figura 1.5). Dependendo da intensidade do aumento da T_m três situações podem ocorrer: i) aumentos da T_m podem

acelerar a TAF, fazendo com que as plantas emitam folhas mais rapidamente e reduzam a DFM; ii) podem reduzir a TAF e aumentar a DFM (COSTA e STRECK, 2018; FLORENCIO et al., 2019), ou iii) ou podem não alterar a TAF e a DFM.

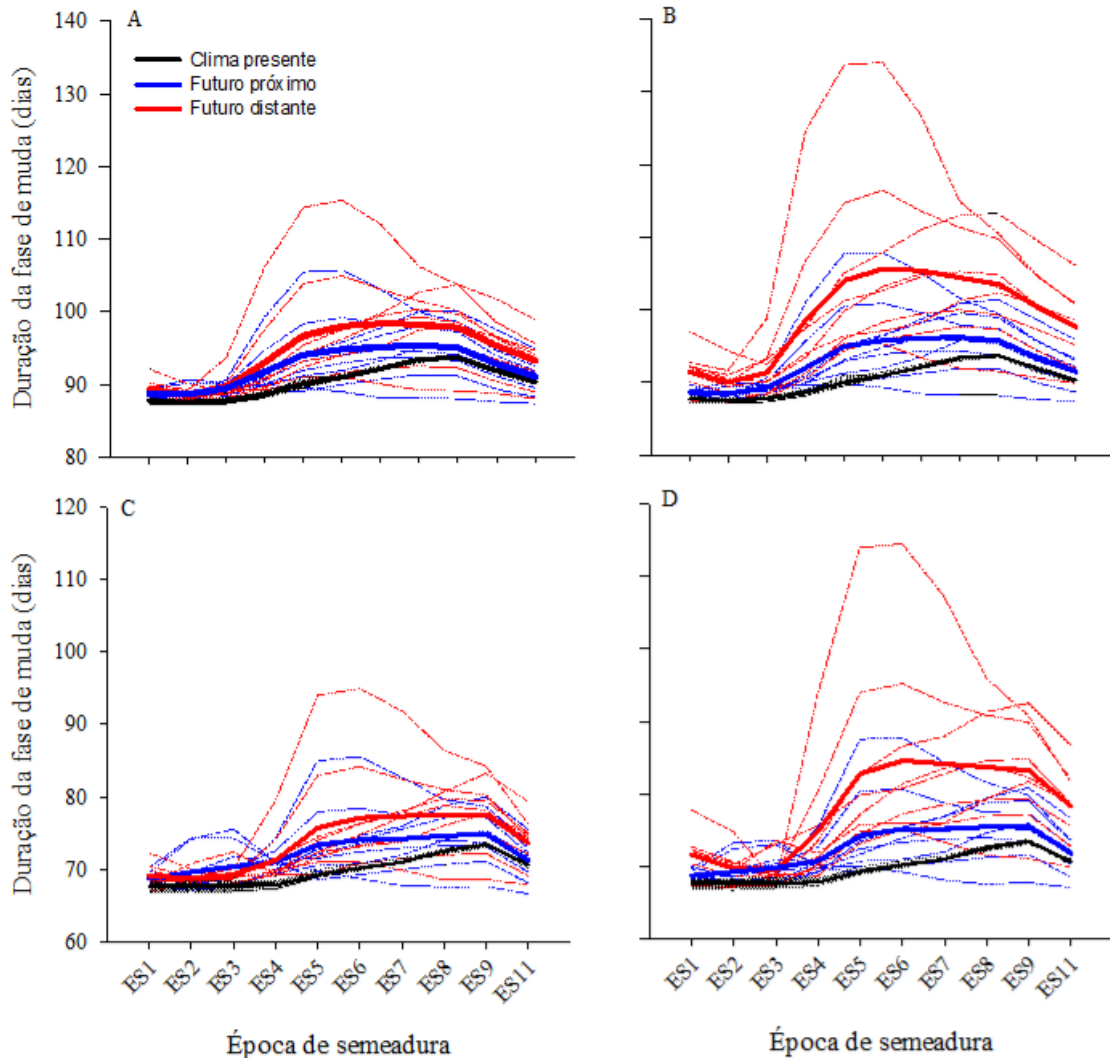


Figura 1.5 - Duração da fase de muda simulada para o clima presente (1980-2005) e projetada para o futuro (FP= 2021-2050 e FD= 2071-2100) pelos nove modelos do sistema terrestre para *Corymbia citriodora* (A, B) e *Eucalyptus urophylla* (C, D). Linhas tracejadas representam a duração da fase de muda para cada modelo do sistema terrestre do NEX-GDDP e as linhas em negrito representam o ensemble dos modelos do sistema terrestre. Os painéis A e C referem-se ao RCP 4.5 e os painéis B e D referem-se ao RCP 8.5. O eixo da duração da fase de muda possui diferentes escalas para cada uma das espécies em função de seus valores.

Como já observado nas condições experimentais, o *Eucalyptus urophylla* é

ligeiramente mais precoce que a *Corymbia citriodora*, pois possui maior TAF_{max} e menor DFM (Figura 1.3 E-F). Apesar da magnitude dos valores simulados e projetados serem ligeiramente distintos entre as duas espécies (Tabela 1.3), os padrões de alteração da DFM são similares entre as espécies e datas de simulação da semeadura (Figura 1.5 e Tabela 1.3). Apesar da maior incerteza gerada pela menor capacidade do modelo WE estimar a DFM para o *Eucalyptus urophylla*, projeta-se aumento da DFM em todas as ES sendo intensificado no FD e RCP 8.5, em ambas as espécies (Figura 1.5). Para todas as ES houve um aumento da DFM em relação ao clima presente, entre 2 dias a 15 dias, nas duas forçantes radiativas (RCP 4.5 e RCP 8.5) e projeções (FP e FD). O aumento ocorreu principalmente nas ES simuladas tardiamente no inverno (ES5) e precocemente na primavera (ES6, ES7, ES8, e ES9), exatamente nas ES em que são projetados os maiores aumentos de T_m ($\sim +4,3^\circ\text{C}$ no FD para o RCP 8.5°C) para Itajubá (ALVES et al., 2020). Nesses meses (agosto a dezembro), tais aumentos poderão reduzir a TAF, fazendo com que as plantas emitam folhas mais lentamente, retardando a finalização da fase de muda e aumentando a DFM (entre 11 a 15 dias) devido a T_m estar acima da T_{ot} e mais próxima da T_B das espécies.

Tabela 1.3 - Comparação de médias para a duração da fase de muda (DFM, dias) para a *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla*, considerando as simulações para o clima presente (CP=1980-2005) e as projeções de clima futuro (FP=2021-2050, FD=2071-2100) para onze épocas de semeadura e dois cenários de forçantes radiativas (RCP 4.5 e RCP 8.5).

<i>Corymbia citriodora</i>					
Época de simulação do desenvolvimento	CP	RCP 4.5		RCP 8.5	
		FP	FD	FP	FD
ES1	87,7 A1	88,7 Aa2	89,3 Ba3	88,6 Aa2	91,5 Bb3
ES2	87,5 A1	88,7 Aa2	88,6 Aa3	88,4 Aa2	90,0 Ab3
ES3	87,7 A1	89,4 Ba2	89,6 Ba3	89,3 Ba2	91,4 Bb3
ES4	88,6 B1	91,8 Da2	93,1 Ca3	92,0 Ca2	98,7 Db3
ES5	89,7 C1	94,1 Fa2	96,7 Ea3	95,0 Eb2	103,9 Fb3
ES6	90,9 E1	94,8 Ga2	97,9 Fa3	95,8 Fb2	105,4 Hb3
ES7	92,1 F1	95,1 Ga2	98,4 Fa3	96,1 Fb2	105,6 Hb3

ES8	93,4 G1	95,4 Ga2	98,3 Fa3	96,2 Fb2	104,6 Gb3
ES9	93,7 G1	95,0 Ga2	97,8 Fa3	95,8 Fb2	103,7 Fb3
ES10	91,9 F1	92,8 Ea2	95,4 Da3	93,4 Da2	100,5 Eb3
ES11	90,4 D1	91,0 Ca2	93,3 Ca3	91,5 Ca2	97,8 Cb3
<i>Eucalyptus urophylla</i>					
Época de simulação do desenvolvimento	CP	RCP 4.5		RCP 8.5	
		FP	FD	FP	FD
ES1	67,6 A1	68,8 Aa1	69,2 Aa1	68,7 Aa1	71,6 Bb2
ES2	67,6 A1	69,6 Ba2	68,8 Aa1	69,3 Aa1	69,8 Ab1
ES3	67,7 A1	70,4 Ca2	69,3 Aa1	69,8 Ba1	69,5 Aa1
ES4	67,8 A1	71,0 Da1	71,3 Ba1	70,8 Ca1	75,0 Cb2
ES5	69,3 B1	73,4 Ea1	75,8 Da2	74,3 Eb1	82,7 Eb2
ES6	70,2 C1	74,1 Fa1	77,1 Ea2	75,1 Fb1	84,4 Fb2
ES7	71,1 C1	74,0 Fa1	77,3 Ea2	75,1 Fb1	83,9 Fb2
ES8	72,6 D1	74,7 Fa1	77,6 Ea2	75,5 Fb1	83,9 Fb2
ES9	73,4 E1	74,9 Fa1	77,6 Ea2	75,6 Fb1	83,4 Eb2
ES10	--	--	--	--	--
ES11	70,7 C1	71,3 Da1	73,7 Ca2	71,8 Da1	78,4 Db2

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna (época de simulação da semente), minúscula na linha (forçante radiativa) e número (períodos) não diferem entre si pelo teste Skott-Knott a 5% de probabilidade. Os valores da DFM foram obtidos com as projeções de temperatura de cada um dos nove modelos do sistema terrestre e os dados da tabela referem-se ao *ensemble* da DFM. A DFM foi transformada (Ln(DFM)), devido a não pressuposição da normalidade pelo teste de Shapiro –Wilk ($p < 0.05$) (Florêncio et al., 2019). *Para as datas de simulação da semente consulte a tabela 1.1 (item 1.2.1).

Pela ANOVA e comparação de médias pelo teste Scott Knott (Tabela 1.3) foi verificado efeito significativo para a interação entre as fontes de variação: épocas de (simulação) da semente (11ES) 2 forçantes radiativas (RCP 4.5 e 8.5) 3 períodos (CP, FP e FD) ($p \leq 0,05$) na DFM das duas espécies. Entre os efeitos principais, o período (CP, FP e FD) exerce maior influência na DFM (com maior valor do teste F) para *Corymbia citriodora* (3340,73) e *Eucalyptus urophylla* (2062,81), seguida da forçante radiativa (valor do teste F = 1418,33 para *Corymbia citriodora* e 944,59 para

Eucalyptus urophylla) e época de simulação da semeadura (valor do teste F = 1041,38 para *Corymbia citriodora* e 893,92 para *Eucalyptus urophylla*). Ou seja, a DFM será mais susceptível às variações interanuais de Tm, corroborando com os resultados observados por Reis (2018) para três espécies tropicais brasileiras.

1.4. DISCUSSÃO

Ambos modelos de desenvolvimento usados neste estudo utilizam a Tm como variável de entrada para estimar o desenvolvimento das espécies *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla*. Como o NFa e DFM de ambas as espécies são governadas pela Tm (FREITAS et al., 2017 e FREITAS e MARTINS, 2019) é natural que sejam utilizados modelos que estimem o desenvolvimento em função a Tm (COSTA e STRECK, 2018; FERREIRA et al., 2019). Neste estudo, as diferentes ES (Tabela 1.1) levaram as plantas a se desenvolver em diferentes condições de temperatura do ar (Figura 1.2). Tal condição é importante para avaliar a robustez dos modelos (FIL e WE) em estimar o NFa e a DFM em condições ambientais diferentes da calibração (MARTINS et al., 2014; UHLMANN et al., 2017; FERREIRA et al., 2019; MARTINS et al., 2021). Por isso, a calibração dos coeficientes ('a' ou TAF_{max}), avaliação do desempenho e a escolha do modelo mais preciso na estimativa da NFa e DFM são passos importantes e necessários para entender como os aumentos projetados de temperatura do ar ao longo do século XXI (Figura 1.5) podem afetar o desenvolvimento (NFa e DFM) das duas espécies. Além disso, esses passos produzem informações que podem ser usadas em aplicações práticas de viveiros florestais (MONTEIRO et al., 2014; FERREIRA et al., 2019; MARTINS et al., 2021).

Apesar de estudos com a aplicação de modelos de simulação do desenvolvimento serem escassos em espécies florestais, ambos (FIL e WE) tem sido usados para prever a TAF e o NFa em várias culturas anuais como: cevada, sorgo e milho (YAN e HUNT, 1999), trigo (XUE et al. 2004), melão (STRECK et al. 2006), batata (STRECK et al. 2007), mandioca (SAMBORANHA et al. 2013), batata doce (ERPEN et al., 2013), e arroz (STRECK et al. 2011); além de culturas ornamentais como o gradíolo (UHLMANN et al., 2017; UHLMANN et al., 2020). Algumas razões para a escassez desses estudos em espécies florestais são: i) longo ciclo de desenvolvimento comparado às culturas anuais; ii) menor acervo de dados fenológicos disponíveis (COSTA e STRECK, 2018); iii) épocas reduzidas de dispersão de sementes

(1 ou 2 vezes ao ano) e perda da viabilidade das sementes ao longo do tempo (FREITAS e MARTINS, 2019) que inviabilizam a instalação de experimentos para a calibração dos coeficientes ('a' e TAF_{max}) e avaliação dos modelos de desenvolvimento (FERREIRA et al., 2019; MARTINS et al., 2021).

Nesse sentido, ambos os modelos foram capazes de estimar a NFa, com bom desempenho (índice-c > 0,71) (Tabela 1.3), e baixo erro (RQME < 4 folhas) (Figura 1.3 A-D). No entanto, a subestimativa do NFa, principalmente no *Eucalyptus urophylla* pelo modelo FIL, gerou superestimativa da DFM em todas as ES (Figura 1.3 E-F), contribuindo para atrasar o término da fase de muda. Ou seja, os erros cumulativos na estimativa do NFa, desde o início do desenvolvimento somado ao longo dos dias de aparecimento de folhas, acarretaram erros de 6,2 dias (WE) a 14,2 dias (FIL) na estimativa da DFM. No entanto, o modelo WE conseguiu captar melhor o desempenho na estimativa da DFM entre as ES e, na média, não diferiu da DFM observada para a *Corymbia citriodora* ($p=0,174$). Erros menores que 12 dias são aceitos na estimativa da DFM em espécies florestais (MARTINS e STRECK, 2007; MONTEIRO et al., 2014), pois não impacta significativamente a data de transplante das mudas no campo (FERREIRA et al., 2019; MARTINS et al., 2021). Inclusive, foi similar aos erros na predição de estágios de desenvolvimento de culturas agrícolas, como o arroz (entre 4,3 a 10,9 dias) (STRECK et al., 2011) e batata (entre 7 a 13 dias) (STRECK et al., 2007), e para a espécie florestal *Bixa orellana* (12,3 dias) (MARTINS et al., 2021).

A vantagem do modelo WE em relação ao FIL, principalmente nos estudos com projeções climáticas, é devido a melhor simulação do desenvolvimento em condições próximas à Tot (FERREIRA et al., 2019; UHLMANN et al., 2020) (Figura 1.1). Nessa região, a $f(t)$ do modelo de WE possui um ponto de inflexão suave comparada a STd (FIL) (YAN e HUNT, 1999; XUE et al., 2004; MARTINS et al., 2014), que por sua vez possui um ponto de inflexão abrupto e inflexível (SINCLAIR et al., 2004; FERREIRA et al., 2019). Além disso, a STd não consegue captar a suave mudança da T_m próximo à T_b e T_B , oposto ao obtido com a $f(t)$ do modelo WE (ERPEN et al., 2013; MARTINS et al., 2014; FERREIRA et al., 2019). O modelo de WE também é aplicado em condições que ocorrem grandes variações diárias (e sazonais) da temperatura do ar, sendo, portanto recomendado para estudos de mudanças climáticas aplicadas ao desenvolvimento e fenologia de diferentes espécies (XUE et al. 2004; ERPEN et al., 2013; MARTINS et al. 2014; FLORENCIO et al. 2019; UHLMANN et al., 2020; BECKER et al, 2020).

Incertezas nas simulações da DFM podem ser observadas devido a i) limitações de previsibilidade dos modelos do sistema terrestre (ELII et al., 2020a), e ii) capacidade dos modelos simularem o desenvolvimento das espécies (COSTA e STRECK, 2018; FLORENCIO et al., 2019). Para minimizar o item i, optou-se por considerar o *ensemble* de nove modelos do sistema terrestre do NEX-GDDP. Já o erro atrelado ao item ii é mínimo (aceitável) para ambas espécies e pelo modelo WE (FIL).

As projeções de aumento da DFM ao longo do século XXI para as duas espécies são mais intensas nas épocas em que a emergência ocorre nos meses de primavera e verão (~15 dias) (Figura 1.5), nos quais são projetados T_m diária acima da T_{ot} e próxima da T_B das duas espécies (*Corymbia citriodora* = 17,1 e 41,3 °C e *Eucalyptus urophylla* = 17,1 e 40,5 °C FREITAS et al., 2017). Como a DFM depende do acúmulo térmico diário ($f(t)$), o qual é ajustado metabolicamente pelas plantas para ocorrer dentro dos limiares das temperaturas cardinais (BAHUGUNA e JAGADISH, 2015; FERREIRA et al., 2019), qualquer modificação na T_m altera a $f(t)$, e conseqüentemente, altera o N F_a e DFM (STRECK et al., 2013; COSTA e STRECK, 2018; FLORENCIO et al., 2019). Em temperaturas supra ótimas, a $f(t)$ (modelo de WE) é menor que 1.0 (MARTINS et al., 2014; COSTA e STRECK, 2018), e assim o N F_a é menor que a TAF_{max} . Por isso, há uma redução da taxa desenvolvimento, resultando em aumento da DFM. O efeito de temperaturas supra ótimas no retardamento do desenvolvimento em projeções de aumento de T_m também foi verificado nas espécies *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* (COSTA e STRECK, 2018), cultivares de oliveira (FLORENCIO et al., 2019), gladiolo (BECKER et al., 2021), batata (STRECK et al., 2006), milho (STRECK et al., 2012) e arroz (STRECK et al., 2013).

Existem razões fisiológicas para a redução da TAF, dentre as quais, três merecem destaque (RUELLAND e ZACHOWSKI, 2010; COSTA e STRECK, 2018; FLORENCIO et al., 2019; MARTINS et al., 2021) : i) Condições de temperatura do ar $\geq T_{ot}$ aumentam o consumo de energia (ATP e NADPH) ou esqueletos carbonatos provenientes da fotossíntese, que por sua vez eleva os custos de manutenção celular e fotorrespiração, reduzindo o desenvolvimento e aumentando a DFM; ii) Altas temperaturas favorecem a atividade oxigenase da ribulose-1,5-bifosfato carboxilase-oxigenase (RuBP) devido à maior solubilidade do O_2 em relação ao CO_2 , e com isso há um aumento da fotorrespiração em detrimento a fotossíntese (SAGE, 2002; RUELLAND; ZACHOWSKI, 2010; FLORENCIO et al., 2019); iii) Altas temperaturas modificam as atividades enzimáticas, o acúmulo de amido e a síntese de sacarose, reduzindo o

metabolismo das plantas (GUO et al., 2007; BITA e GERATS, 2013).

As estratégias para a mitigação dos efeitos adversos em condições de aumento de temperatura do ar poderão variar entre as ES. Nas ES em que são projetados os maiores aumentos da DFM, principalmente ES5 a ES9 deve-se alterar as épocas de realização da sementeira/plantio (COSTA e STRECK, 2018; FLORENCIO et al., 2019), visto que a maior permanência dessas espécies nos viveiros florestais pode resultar em aumento do custo da manutenção das mudas, sem a garantia de produção de mudas com vigor necessário à comercialização. Além disso, em curto prazo plantios realizados nessas ES reduzem o sucesso do estabelecimento das mudas no campo, o desenvolvimento pleno (FERREIRA et al., 2019; FLORENCIO et al., 2019; BECKER et al., 2021), e em longo prazo podem comprometer o desenvolvimento juvenil e alterar o padrão fenológico destas espécies (MOORE e ALLARD 2008; HATFIELD e PRUEGER 2015; COSTA e STRECK 2018).

Outra estratégia é a necessidade de sombreamento artificial, para minimizar os impactos das altas temperaturas, ou a intensificação da irrigação (COSTA e STRECK, 2018). No entanto, a utilização dessas técnicas pode onerar os custos de produção e impactar a qualidade das mudas. Ambas as aplicações podem não favorecer *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla* uma vez que o sombreamento adicional associado à Tm elevada pode estiolar as mudas e reduzir sua qualidade (WILLIAMS e DUMROESE, 2014; COSTA e STRECK 2018). Por outro lado, a intensificação da irrigação pode propiciar o surgimento e a inoculação de patógenos responsáveis por doenças foliares e de podridão radicular, sendo necessária aplicação de fungicidas como azoxystrobina, carbendazim, triadimenol e tebuconazole (BIZI et al., 2005; FERREIRA et al., 2006; BALDIN et al., 2017) o que também eleva o custo de produção e venda das mudas (FERREIRA et al., 2019; MARTINS et al., 2021).

1.5. CONCLUSÃO

Ambos os modelos (FIL e WE) foram capazes de prever a dinâmica do desenvolvimento, o número de folhas acumuladas para *Corymbia citriodora* e *Eucalyptus urophylla*, com superioridade para o modelo Wang e Engel. Todavia, os erros cumulativos na estimativa do número de folhas acumuladas repercutiram em estimativas menos precisas da duração da fase de muda, sendo maior no modelo do filocrono.

Os aumentos projetados da temperatura do ar ao longo do século XXI (de 2,0°C no futuro próximo a 4,0°C no futuro distante) poderão modificar as taxas de desenvolvimento e a duração da fase de muda das duas espécies de eucalipto cultivadas em Itajubá, assim como em regiões de clima subtropical. Entre os efeitos principais, o período de projeção exerce maior influência na duração da fase de muda em ambas as espécies.

Apesar das incertezas relativas às projeções dos modelos do sistema terrestre, os aumentos projetados na temperatura do ar poderão reduzir a taxa de desenvolvimento e aumentar a permanência das mudas nos viveiros florestais, principalmente nos meses entre agosto e dezembro.

1.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. C.; MARTINS, F. B.; FREITAS, C. H.; PEREIRA, R. A. A.; MELLONI, E. G. P. Valores limítrofes para transpiração, desenvolvimento e crescimento de *Corymbia citriodora* em resposta à deficiência hídrica no solo. **Revista Árvore**, v.39, n.5, p. 841-852, 2015.

ALFENAS, A.C.; ZAUZA, A. A. V.; MAFIA, R. G.; DE A, A. F. **Clonagem e doenças do eucalipto**. 2a ed. Viçosa: UFV, 2009. 500 p.

ALVES, A. M. 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.

BALDIN, E. L.; KRONKA, A. Z.; SILVA, I. F. **Inovações em manejo fitossanitário**. Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Flores, 2017.

BAHUGUNA, R. N.; JAGADISH, K. S. V. Temperature regulation of plant phenological development. **Environmental and Experimental Botany**, v.111, p.83-90, 2015.

BAO, Y.; WEN, X. Projection of China's near- and long-term climate in a new high-resolution daily downscaled dataset NEX-GDDP. **Journal of Meteorological Research**, v.31, p.236–249, 2017.

BECKER, C. C.; STRECK, N. A.; UHLMANN, L. O.; CERA, J. C.; FERRAZ, S. E. T.; SILVEIRA, W. B.; BALEST, D. S.; SILVA, L. F. Assessing climate change effects on gladiola in Southern Brazil, **Scientia Agricola**, v.78, n.1, p.1-11, 2021.

BITA, C. E.; GERATS, T. Plant tolerance to high temperature in a changing environment:scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. **Frontiers in Plant Science**, v.4. p.1-17, 2013.

BIZI, R. M.; GRIGOLETTI, A.; AUER, C. G. Seleção de fungicidas para o controle

alternativo do oídio do eucalipto. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v.51, p.100-107, 2005.

CAMARGO, A.P. de; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

COSTA, D. B.; STRECK, N. A. Duração da fase de mudas em eucalipto simulada em cenários de aumento de temperatura. **Ciência Florestal**, v.28, n.3, p.1263-1270, 2018.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; BENDER, F. D. Impacts and uncertainties of climate change projections on Eucalyptus plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 474, e118365, 2020a.

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.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; HUTH, N.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C.A. Gauging the effects of climate variability on Eucalyptus plantations productivity across Brazil: A process-based modelling approach . **Ecological Indicators**, v. 114, e118365, 2020b.

ERPEN, L.; STRECK, N. A.; UHLMANN, L. O.; LANGNER, J. A.; WINCK, J. E. M.; GABRIEL, L. F. Estimativa das temperaturas cardinais e modelagem do desenvolvimento vegetativo em batata-doce. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 11, p. 1230-1238, 2013.

FERREIRA, E. M.; ALFENAS, A. C.; MAFFIA, L.A.; MAFIA, R. G. Eficiência de fungicidas sistêmicos para o controle de *Cylindrocladium candelabrum* em eucalipto. **Fitopatologia brasileira**, v.31, p.468-475, 2006.

FERREIRA, M. C.; MARTINS, F. B.; FLORENCIO, G. W. L; PASIN, L. A. A. P. Cardinal temperatures and modeling the vegetative development of seedlings of guava. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n.11, p.819-825, 2019.

FLORENCIO, G.W.L.; MARTINS, F.B.; FERREIRA, M.C.de; PEREIRA, R.A.A. Impacts of climatic changes on the vegetative development of olive crops in Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n. 9, p.641-647, 2019.

FLORES, T. B.; ALVARES, C. A.; SOUZA, V. C.; STAPE, J. L. **Eucalyptus no Brasil**. Piracicaba: IPEF, 2016.

FREITAS, C. H. DE; MARTINS, F. B.; ABREU, M. C. Cardinal temperatures for the leaf development of *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus urophylla* seedlings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.52, p.283-292, 2017.

FREITAS, C. H. DE; MARTINS, F. B. Thermal requirements and photoperiod influence in the leaf development of two forest species. **Floresta e Ambiente**, v.26,

e20190013, n.4, 2019.

GUO, T. R.; ZHANG, G. P.; ZHANG, Y. H. Physiological changes in barley plants under combined toxicity of aluminum, copper and cadmium. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**, v.57 p.182–188, 2007.

HATFIELD, J. L.; & PRUEGER, J. H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. **Weather and Climate Extremes**, v. 10, p. 4–10, 2015.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual IBÁ**. São Paulo, 2019.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change - Summary for Policymaker. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (Eds). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

JACOBET, J., HERTIG, E., SEUBERT, S., & LUTZ, K. Statistical downscaling for climate change projections in the Mediterranean region: methods and results. **Regional environmental change**, v.14, p.1891-1906, 2014.

LANGNER, J. A.; STRECK, N. A.; DURIGON, A.; SILVA, S. D.; LAGO, I.; DALMAGO, G. A.; REINIGER, L. R. S.; SCHEFFEL, L. G.; POERSCH, A. H. Observed and estimated leaf appearance of landrace and improved maize cultivars. **Ciência Rural**, v.48, n.1, p.1-9, 2018.

MARTINS, F. B.; FERREIRA, M. C.; FLORENCIO, G. W. L. A model for predicting development in seedlings of two native forest species. **Scientia Agricola**, v.xx, p.xx-xx, 2021 (no prelo).

MARTINS, F. B.; PEREIRA, R. A. A.; PINHEIRO, M. V. M.; ABREU, M. C. Desenvolvimento foliar em duas cultivares de oliveira estimado por duas categorias de modelo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.29, n.4, p.505-514, 2014.

MARTINS, M.A.; TOMASELLA, J.; DIAS, C.G. Maize yield under a changing climate in the Brazilian Northeast: Impacts and adaptation. **Agricultural Water Management**, v.216, n.1, p.339-350, 2019.

MOORE, B.A.; ALLARD, G.B. **Climate change impacts on forest health**. Forest Health & Biosecurity Working Papers FBS/34E. Forest Resources Development Service, Forest Management Division, FAO, Rome, 2008.

MOSS, R. H.; EDMONDS, J. A.; HIBBARD, B. A.; MANNING, M. R.; ROSE, S. K.; VURREN, D. P. V.; CARTER, T. R.; EMORI, S.; KAINUMA, M.; KRAM, T.; MEEKL, G. A.; MITCHELL, J. F. B.; NAKICENOVIC, N.; RIAHI, K.; SMITH, S. J.; STOUFFER, R. J.; THOMSON, A. M.; WEYANT, J. P.; WILBANKS, T.J. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v.463, p.747-756, 2010.

MONTEIRO, A. F. M.; MARTINS, F. B. Global Solar Radiation Models in Minas

- Gerais, Southeastern Brazil. **Advances in Meteorology**, v. 2019, p.1-17, 2019.
- MONTEIRO, E. B.; DA SILVA, C. C.; DA SILVA, A. C.; DE SOUZA, A. P. Estimating Emission of Leaves Seedlings Forest in Different Shading Levels, at Conditions of Transition Amazon-Cerrado, Brazil. **American Journal of Plant Sciences**, v. 5, p. 2330-2341, 2014.
- PARRA-O, C.; BAYLY, M.; UDOVICIC, F.; LADIGES, P. ETS sequence support monophyly of the eucalypt genus *Corymbia* (Myrtaceae). **Taxon**, v.55, p. 653-663, 2006.
- PIROVANI, D.B.; PEZZOPANE, J.E.M.; XAVIER, A.C.; PEZZOPANE, J.R.M.; JÚNIOR, W.C.J.; MACHUCA, M.A.H.; SANTOS, G.M.A.D.A.; SILVA, S.F.; ALMEIDA, S.L.H. ; PELUZIO, T.O.; EUGENIO, F.C.; MOREIRA, T.R.; ALEXANDRE, R.S.; SANTOS, A.R. Climate change impacts on the aptitude area of forest species. **Ecological Indicators**, v.95, n.1, p.405-416, 2018.
- REZENDE, J.B.; PEREIRA, J.R.; BOTELHO, D.O. Expansão da cultura do eucalipto nos municípios mineiros e gestão ambiental. **Revista Cerne**, v.19, n.1, p.1-7, 2013.
- RUELLAND, E.; ZACHOWSKI, A. How plants sense temperature. **Environmental and Experimental Botany**, v.69, p.225-232, 2010.
- SAGE, R. Variation in the kcat of Rubisco in C3 and C4 plants and some implications for photosynthetic performance at high and low temperature. **Journal of Experimental Botany**. v.53, p.609-620, 2002.
- SAMBORANHA, F. K.; STRECK, N. A.; UHLMANN, L. O.; GABRIEL, L. F. Modelagem matemática do desenvolvimento foliar em mandioca. **Revista Ciência Agronômica**, v.44, n.4, p.815-824, 2013.
- SETIYONO, T. D.; WEISS, A.; SPECHT, J. E.; BASTIDAS, A. M.; CASSMAN, K. G.; DOBERMANN, A. Understanding and modeling the effect of temperature and daylength on soybean phenology under high-yield conditions. **Field Crops Research**, v.100, p.257-271, 2007.
- SINCLAIR, T.R; GILBERT, R. E.; PERDOMO, J.M. JUNIOR, S.; POWEL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, v.88, n.1, p.171-178, 2004.
- SNEDECOR, G. W.; COCHRAN, W. G. **Statistical Methods**, Iowa State University Press, Iowa City, IA, USA, Eighth edition, 1989.
- STATSOFT, INC. **Statistica for windows (data analysis softwares system)** version 8.0. 2008.
- STRECK, N.A.; LAGO, I.; GABRIEL, L.F.; SAMBORANHA, F.K. Simulating maize phenology as a function of air temperature with linear and nonlinear model. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, n.4, p.449-455, 2008.
- STRECK, N. A.; LAGO, I.; BURIOL, G. A.; HELDWEIN, A. B.; TIBOLA, T.A non-linear model to simulate node appearance in muskmelon (*Cucumis melo* L.) grown

inside plastic greenhouse as a function of air temperature. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.14, n.2, p.210-216, 2006.

STRECK, N. A.; LAGO, I.; OLIVEIRA, F. B.; HELDWEIN, A. B.; AVILA, L. A.; BOSCO, L. C. Modeling the development of cultivated rice and weedy red rice. **Transactions of the ASAE**, v. 54, p. 371-384, 2011.

STRECK, N. A.; LAGO, I.; PAULA, F. L. M. de; BISOGNIN, D. A.; HELDWEIN, A. B. Improving predictions of leaf appearance in field grown potato. **Scientia Agrícola**, v.64, n.1, p.12-18, 2007.

STRECK, N. A.; UHLMANN, L. O.; GABRIEL, L. F. Leaf development of cultivated rice and weedy red rice under elevated temperature scenarios. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.1, p.190-199, 2013.

TAVARES, P.S., GIAROLLA, A., CHOU, S.C., SILVA, A.J.P., LYRA, A.A., 2018. Climate change impact on the potential yield of Arabica coffee in southeast Brazil. **Regional Environmental Change**, v.18, n.3, p.873–883, 2018.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v.93, p.485-498, 2012.

UHLMANN, L. O.; STRECK, N. A.; BECKER, C. C.; SCHWAB, N. T.; BENEDETTI, R. P.; CHARÃO, A. S. ; RIBEIRO, B. S. M. R.; SILVEIRA, W. B. ; BACKES, F. A. A. L.; ALBERTO, C. M.; MUTTONI, M.; DE PAULA, G. M.; TOMIOZZO, R.; BOSCO, L. C.; BECKER, D. PhenoGlad: A model for simulating development in Gladiolus. **European Journal of Agronomy**, v. 82, p. 33-49, 2017.

UHLMANN, L. O.; STRECK, N. A. ; BECKER, C. ; TOMIOZZO, R. ; SCHWAB, N. T. ; ORTIZ, V. M. Climate risk zoning for gladiolus in Rio Grande do Sul State, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 55, p. e01094, 2020.

WANG, E.; ENGEL, T. Simulation of phenological development of wheat crops. **Agricultural Systems**, v.58, n.1, p.1-24, 1998.

WILLIAMS, M.I.; DUMROESE, R.K. Role of climate change in reforestation and nursery practices. **Western Forester**, v.59, n.1, p.11-13, 2014.

WREGGE, M. S.; CARAMORI, P. H.; FRITZONS, E.; CHRISTENSEN, G.L. Agroclimatic zoning for eucalyptus in the state of Paraná and the new scenarios defined by global climate change. **Revista Geama**. v.3, n.4, p. 216-228, 2017.

XUE, Q.; WEISS, A.; BAENZIGER, P. S. Predicting leaf appearance in field-grown winter wheat: evaluating linear and non-linear models. **Ecological Modelling**, v.175, p.261-270, 2004.

YAN, Q.; HUNT, L.A. An equation for modelling the temperature response of plants using only the cardinal temperatures. **Annals of Botany**, v.84, n.5, p.607-614, 1999

CAPÍTULO II

IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO ZONEAMENTO DE APTIDÃO CLIMÁTICA DO EUCALIPTO NO BRASIL

2.1. INTRODUÇÃO

O *Eucalyptus* sp. é o gênero florestal mais plantado no mundo, com uma área total de 25 milhões de ha (ELLI et al, 2020a). No Brasil, a área cultivada com eucalipto é de aproximadamente 7,6 milhões de ha e a produtividade média de 36 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, tornando o país o maior produtor mundial (IBGE, 2019; ELLI et al., 2020a,b). Nos cultivos brasileiros, utilizam-se espécies puras, principalmente (em ordem de importância) (GONÇALVES et al., 2013; IBÁ, 2019): *E. grandis* (Ex Maiden) Hill, *Corymbia citriodora* (ex Hook). Hill & Johnson) (anteriormente classificada como *E. citriodora*), *E. urophylla* (S. T. Blake), *E. saligna* (Smith), *E. globulus* (Labill), *E. camaldulensis* (Dehnh.), híbridos e clones, ambos obtidos, respectivamente, do cruzamento e hibridização interespecífica das espécies descritas anteriormente (BINKLEY et al., 2017; ELLI et al., 2019; FREITAS et al., 2020). A preferência por essas espécies se dá em função das características favoráveis, como qualidade e propriedades desejáveis da madeira, rápido crescimento, ciclo curto de rotação (< 7 anos), elevada produtividade, adaptação em diferentes condições edafoclimáticas, e facilidade de manejo (GONÇALVES et al., 2013; COSTA et al., 2018; COSTA e STRECK, 2018; FLORES et al., 2018; ELLI et al., 2019; ELLI et al., 2020b).

Apesar dos avanços significativos na adaptação de clones, melhorias das práticas de manejo, preparo e fertilidade do solo, controle de pragas e doenças, o desenvolvimento e a produtividade do eucalipto são fortemente afetados pelas condições climáticas sob as quais não se tem controle (GONÇALVES et al., 2013; ELLI et al., 2020a,b; HUBBARD et al., 2020). Nesse sentido, a temperatura acima de limiares adequados e a deficiência hídrica são os dois principais responsáveis por reduzir e até mesmo inviabilizar o desenvolvimento e produtividade do eucalipto (MARTINS et al., 2008; HATFIELD e PRUEGER, 2015; BINKLEY et al., 2017; ELLI et al., 2019; FREITAS e MARTINS, 2019; SCOLFORO et al., 2019). Diante desses aspectos, há uma preocupação crescente sobre os potenciais impactos que as mudanças climáticas poderiam exercer nos padrões de desenvolvimento, crescimento e

produtividade do eucalipto (BATTAGLIA e BRUCE, 2017; ELLSWORTH et al., 2017; JORDAN et al., 2017; COSTA e STRECK, 2018; ELLI et al., 2020a).

Tais impactos são decorrentes, principalmente, das projeções de aumento da temperatura do ar em todo território brasileiro, de até 5 °C nas regiões norte, nordeste e centro-oeste (CHOU et al., 2014; LYRA et al., 2017; LLOPART et al., 2019), além dos padrões heterogêneos de alteração da precipitação (redução em baixas latitudes e aumento em latitudes altas) (IPCC, 2013; SANTOS et al., 2017; TAVARES et al., 2018; LLOPART et al., 2019). Os aumentos na temperatura podem elevar os estresses fisiológicos, causando aumento na razão fotorrespiração em detrimento a fotossíntese (RAWAL et al., 2015), e elevar o déficit de pressão de vapor, gerando incrementos na evapotranspiração, fazendo com que as plantas percam água para a atmosfera em taxas elevadas (ABREU et al., 2015; ELLI et al., 2020a; HUBBARD et al., 2020). Em contrapartida, com a possível redução da precipitação, principalmente nas regiões tropicais (LYRA et al., 2017; LLOPART et al., 2020), a oferta de água é menor que a demanda, e resulta em situação de deficiência hídrica (MARTINS et al., 2008; ABREU et al., 2015; ELLI et al., 2020a; HUBBARD et al., 2020). Caso essas situações ocorram mesmo de forma lenta e gradual, elas podem modificar os padrões anatômicos e morfológicos do eucalipto levando a mortalidade das plantas, alterações na distribuição das espécies e inaptidão ao cultivo (BOOTH, 2017; BOOTH, 2018; ELLI et al., 2020a).

Estudos sobre mudanças climáticas podem ser realizados com saídas de modelos do sistema terrestre (AMBRIZZI et al., 2018; REBOITA et al., 2018) aplicados em modelos de desenvolvimento ou produtividade (BAESSO et al., 2010; OLIVEIRA et al., 2012; COSTA e STRECK, 2018; FLORENCIO et al., 2019; FREIRE et al., 2019; ELLI et al., 2020a). No entanto, para realizar esse tipo de estudo deve-se primeiramente calibrar os coeficientes dos modelos com dados específicos para cada espécie e avaliar a capacidade de predição dos modelos para cada local de calibração (OLIVEIRA et al., 2012; COSTA e STRECK et al., 2018; ELLI et al., 2020a,b). Ambas as premissas tornam o uso de modelos de desenvolvimento e produtividade praticamente inviável em estudos de macroescala. Por isso, uma alternativa é a realização de estudos de aptidão climática (PIROVANI et al., 2018; TAVARES et al., 2018).

Através do zoneamento de aptidão climática (ZA), é possível delimitar as regiões com condições edafoclimáticas favoráveis ao cultivo de determinadas espécies de eucalipto no clima presente e futuro, sendo uma ferramenta crucial no planejamento florestal e na adoção de práticas silviculturais. A principal vantagem do ZA é que pode

ser realizada em qualquer escala espacial, uma vez que não necessita que sejam feitas calibrações, comuns nos modelos de desenvolvimento e produtividade. Além disso, o ZA não necessita de parametrizações, avaliações e correções de modelos, que muitas vezes possuem incertezas na predição, devido às limitações do próprio modelo. Como por exemplo, o modelo APSIM – *Agricultural Production Systems Simulator* (ELLI et al., 2019) apresentou boa capacidade na estimativa da produtividade de eucalipto em alguns locais do Brasil. Porém, quando aplicado em condições de clima futuro, apresentou grandes incertezas (ELLI et al., 2020a), sendo em parte devido aos modelos do sistema terrestre, mas, majoritariamente, à incapacidade em alterar as parametrizações do modelo. Justamente por isso, o ZA é uma ferramenta que pode ser utilizada para o planejamento, manejo e tomada de decisão no setor florestal (WREGE et al., 2016; FRAGA et al., 2018; PIROVANI et al., 2018; CORREA et al., 2020), permitindo reduzir de riscos associados ao cultivo do eucalipto em regiões que não apresentam aptidão.

Estudos que analisam os impactos das mudanças climáticas no zoneamento de aptidão climática de espécies florestais são escassos no Brasil, e os poucos existentes foram realizados para escala local (CAMPANHARO et al., 2011; WREGE et al., 2016; WREGE et al., 2017; PIROVANI et al., 2018). Além disso, a maioria considera apenas as limitações na disponibilidade hídrica e desconsidera as projeções de temperatura. Por isso, não há como verificar o impacto integrado das projeções hídricas e térmicas, e definir as áreas que apresentam potencial ao cultivo do eucalipto no Brasil ao longo do século XXI. Nesse sentido, devido à escassez desses estudos, três questões práticas surgem: i) Os cultivos de eucalipto serão impactados regionalmente em resposta às mudanças climáticas na temperatura e disponibilidade hídrica? ii) em caso positivo, as áreas tradicionais de cultivo de eucalipto serão impactadas? iii) e qual será o impacto nas demais regiões brasileiras?

Diante destes aspectos e para responder a essas questões, o objetivo deste segundo capítulo da dissertação foi avaliar os impactos das mudanças climáticas nas áreas de aptidão climática para as principais espécies de eucalipto no Brasil, considerando as limitações hídricas e térmicas, para dois cenários de emissões de gases do efeito estufa (RCP 4.5 e RCP 8.5) e dois períodos de projeção denominado futuro próximo (FP = 2021-2050) e futuro distante (FD = 2071-2100).

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Área de estudo e dados de simulações e projeções climáticas

Para as simulações e projeções climáticas foram utilizados dados diários de precipitação (Pr, mm dia⁻¹), radiação solar global (Rs, MJm⁻²dia⁻¹), temperatura média (Tm, °C) e temperatura máxima do ar (Tmax, °C) do conjunto de dados de nove modelos do sistema terrestre (MSTs) integrantes do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) (Tabela 2.1), fornecidos pelo *World Climate Research Programme* e disponibilizados pelo *Earth System Grid data portal* (<https://esgf-data.dkrz.de/search/cmip5-dkrz/>). Estes dados possuem resoluções espaciais que variam de 1.1° a 2.8° de latitude/longitude.

Tabela 2.1 - Lista de modelos utilizados para as simulações e projeções climáticas no zoneamento de aptidão climática para o eucalipto, resoluções aproximadas e desenvolvedores.

Modelo	Resolução (latitude/longitude)	Centro desenvolvedor
ACCESS1-0	1.3° x 1.9°	<i>Centre for Australian Weather and Climate Research</i>
CanESM2	2.8° x 2.8°	<i>Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis</i>
CNRM-CM5	1,4° x 1,4°	<i>Centre National de Recherches Meteorologiques</i>
CSIRO-Mk3.6.0	1.9° x 1.9°	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization/Queensland Climate Change Centre of Excellence</i>
HadGEM2-CC	1.3° x 1.9°	<i>Met Office Hadley Centre</i>
IPSL-CM5A-CC	1.3° x 2.5°	<i>Institut Pierre-Simon Laplace</i>
MIROC-ESM	2.8° x 2.8°	<i>Atmosphere and Ocean Research Institute/ National Institute for Environmental Studies/ Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology</i>
MPI-ESM-LR	1.9° x 1.9°	<i>Max Planck Institute for Meteorology</i>
MRI-CGCM3	1.1° x 1.1°	<i>Meteorological Research Institute</i>

As simulações dos MSTs foram realizadas para o período histórico, denominado clima presente (CP, 1980-2005), e as projeções para dois períodos denominados futuro próximo (FP=2021-2050) e futuro distante (FD=2071-2100). As projeções do CMIP5

são realizadas utilizando cenários de forçantes radiativas denominados *Representative Concentration Pathways* (RCPs). Neste trabalho foram utilizados os RCPs 4.5 e 8.5, que representam, respectivamente, comportamento intermediário de emissão no final do século XXI de 4.5 Wm^{-2} (CO_2 equivalente ≈ 650 ppm) e mais intenso de 8.5 Wm^{-2} (CO_2 equivalente ≈ 1360 ppm) (MOSS et al., 2010).

Inicialmente, as simulações foram validadas através da comparação com os dados disponibilizados por Xavier et al. (2016) (<https://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA>), que derivam de inúmeras estações meteorológicas interpoladas para uma grade regular com resolução horizontal de $0,25^\circ$ em latitude e longitude abrangendo todo o território brasileiro. Para fins de comparação, os dados dos MSTs foram interpolados para uma grade regular comum de $0,25^\circ$ latitude/longitude, longitude através do remapeamento conservador (JONES, 1999), amplamente utilizado em estudos com a mesma temática (TORRES et al., 2012; TORRES e MARENGO, 2014). Foram utilizadas as estatísticas: raiz quadrada média do erro (RQME) e viés médio (VM) (Eqs. 2.1 e 2.2):

$$\text{RQME} = [\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 / N]^{0,5} \quad (2.1)$$

$$\text{VM} = N^{-1} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i) \quad (2.2)$$

Em que: E_i são os valores diários de precipitação, radiação solar global, temperatura média do ar e temperatura máxima do ar obtidos pelos nove os modelos do sistema terrestre, O_i são os valores diários para as mesmas variáveis do banco de dados disponibilizados por Xavier et al. (2016), N é o número de observações diárias.

2.2.2. Zoneamento de aptidão climática

Para o zoneamento de aptidão climática (ZA) foi utilizada a metodologia proposta por Luppi et al. (2014) e Tavares et al., (2018), com as devidas adaptações para quatro espécies de eucalipto de maior destaque no setor florestal brasileiro: *E. grandis*, *C. citriodora*, *E. urophylla* e *E. saligna* (GONÇALVES et al., 2013; REIS et al., 2013; FLORES et al., 2016, FREITAS et al., 2017; COSTA e STRECK, 2018; IBÁ, 2019). Esta metodologia leva em consideração dois limiares: hídrico (DH), fornecido pela deficiência hídrica, e térmico (Temp), fornecido pelas temperaturas cardinais, relacionando a aptidão ao cultivo através de três notas (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Faixas e notas de aptidão com base na deficiência hídrica e temperatura

para o eucalipto.

Aptidão	Limiar hídrico (DH, mm)*	Limiar térmico (°C)**	Nota
Adequado	< 309	15,3 - 30,4	1
Restrito	309 - 334	8,5 - 15,2 e 30,5 - 38,7	2
Inadequado	> 334	< 8,5 ou > 38,7	3

* Limiar hídrico é dado pela deficiência hídrica, calculada através do balanço hídrico climatológico (detalhamento em 2.2.3); ** Limiar térmico é dado pelas temperaturas cardinais específicas para o eucalipto (detalhamento em 2.2.3).

As notas (1 a 3) foram convertidas em porcentagem de aptidão (PA), calculadas separadamente para o limiar hídrico (PA_{DH} , %) e térmico (PA_{TEMP} , %):

$$\begin{cases} \text{Se } N = 1 \text{ ou } N = 2, PA = 100/2N \\ \text{Se } N = 0, PA = 0\% \end{cases} \quad (2.3)$$

Em que: PA – Porcentagem de aptidão para cada limiar (hídrico: DH, e térmico: Temp);
N – Nota da classe de aptidão (Tabela 2.2).

Posteriormente, as classes de aptidão (Tabela 2.3) foram obtidas pelo somatório da PA calculada separadamente para o limiar hídrico (PA_{DH} , %) e térmico (PA_{TEMP} , %) (Eq. 2.4), resultando em diferentes classes de aptidão ao cultivo do eucalipto, desde ZA totalmente adequada (100%), quando ambos limiares são adequados, à totalmente inadequada (0%), quando ambos limiares são inadequados.

$$ZA = PA_{DH} + PA_{TEMP} \quad (2.4)$$

Tabela 2.3 – Classes de aptidão para o zoneamento de aptidão climática para o eucalipto baseadas nas porcentagens de aptidão para os limiares hídrico, dado pela deficiência hídrica (DH), e térmico, dado pelas temperaturas cardinais (Temp).

Nota ⁽¹⁾		Aptidão		PA		ZA	Classe
Limiar hídrico	Limiar térmico	Limiar hídrico	Limiar térmico	Limiar hídrico	Limiar térmico		
1	1	Adequada	Adequada	50%	50%	100%	Totalmente adequada
1	2	Adequada	Restrita	50%	25%	75%	Adequada
1	3	Adequada	Inadequada	50%	0%	50%	Regular
2	1	Restrita	Adequada	25%	50%	75%	Adequada
2	2	Restrita	Restrita	25%	25%	50%	Regular
2	3	Restrita	Inadequada	25%	0%	25%	Restrita
3	1	Inadequada	Adequada	0%	50%	50%	Regular
3	2	Inadequada	Restrita	0%	25%	25%	Restrita
3	3	Inadequada	Inadequada	0%	0%	0%	Inadequada

Adaptada de Luppi et al. (2014) e Tavares et al. (2018). ⁽¹⁾ Notas atribuídas ao limiar hídrico (DH) e térmico (Temp) (detalhes na Tabela 2.2); PA = porcentagem de aptidão; ZA = somatório da porcentagem da aptidão entre os limiares hídrico e térmico.

2.2.3. Definição dos limiares hídrico e térmico para cultivo do eucalipto

O limiar hídrico foi definido pela deficiência hídrica anual (DH, mm ano⁻¹), resultante do balanço hídrico climatológico (BHC) e da capacidade de água disponível no solo (CAD, mm) (detalhamento em 2.2.4). Se $DH < CAD$ a área é considerada adequada ao cultivo do eucalipto, se $CAD < DH < CAD + 25$ mm a área é restrita, e se $DH > CAD (+25$ mm) a área é inapta. O acréscimo de 25mm foi baseado nas recomendações de Sedyama et al. (2001), Assad et al. (2013) e Santos et al. (2017).

O limiar térmico (Temp) (Tabela 2.4) foi estabelecido pelo intervalo interquartil das temperaturas cardinais de desenvolvimento das quatro espécies de eucalipto de maior destaque. As temperaturas cardinais representam os limiares mínimo (Tb, °C), ótimo (Tot, °C) e máximo (TB, °C) dentro dos quais as espécies se desenvolvem (MARTINS et al., 2007; FREITAS et al., 2017; FREITAS e MARTINS et al., 2019).

Tabela 2.4. Temperaturas cardinais (Tb, Tot e TB) de desenvolvimento para as quatro espécies de eucalipto de maior destaque no setor florestal brasileiro.

Espécie	Tb (°C)	Tot (°C)	TB (°C)	Referências
<i>Eucalyptus grandis</i>	8,3	24,4	38,3	Almeida et al. (2004); Silva (2006); Guimarães et al. (2007); Martins et al., (2007); Borges et al (2012); Londero et al. (2015); Almeida e Sands (2016); Freitas et al. (2017); Costa e Streck (2018); Oliveira et al. (2018); Correia et al. (2019)
<i>Corymbia citriodora</i>	8,1	23,3	39,6	
<i>Eucalyptus urophylla</i>	8,6	23,3	39,4	
<i>Eucalyptus saligna</i>	8,0	23,8	38,7	
Mediana	8,5	23,7	38,7	

Tb = temperatura abaixo da qual o desenvolvimento é desprezível; Tot = temperatura em que ocorre o máximo desenvolvimento; TB = temperatura acima da qual o desenvolvimento é desprezível (MARTINS et al., 2007; FREITAS et al., 2017).

O intervalo interquartil entre o 1º (25%) e 3º (75%) quartil foi considerado adequado, enquanto que abaixo da Tb (8,5°C) e acima da TB (38,7°C) foi considerado inadequado. Os intervalos entre Tb e 1º quartil, e, entre o 3º quartil e TB foram

considerados restritos. Dessa forma, se $15,3^{\circ}\text{C} < T_m < 30,4^{\circ}\text{C}$, a área é considerada adequada ao cultivo de eucalipto, se $8,5^{\circ}\text{C} < T_m \leq 15,3^{\circ}\text{C}$ ou se $30,4^{\circ}\text{C} \leq T_m < 38,7^{\circ}\text{C}$ a área é considerada restrita, e se $T_m \leq 8,5^{\circ}\text{C}$ ou $T_m \geq 38,7^{\circ}\text{C}$ a área é inapta.

2.2.4. Evapotranspiração de referência, balanço hídrico climatológico e capacidade de água disponível

Primeiramente a evapotranspiração de referência (ET_o , mm dia^{-1}) foi estimada pelo método de Abtew (1996) (Eq. 2.5) por ser o método de escala diária que considera variáveis que mais estão relacionadas com a ET_o , como a R_s e T_{max} (ABTEW, 1996; ANTONOPOULOS E ANTONOPOULOS, 2017). Além disso, resultados obtidos por Monteiro (2020) demonstraram que é um método eficiente na estimativa da ET_o em todo o território brasileiro (MONTEIRO, 2020).

$$ET_o = \frac{0,01786 R_s T_{\text{max}}}{\lambda} \quad (2.5)$$

Em que: ET_o = Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); R_s = Radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); T_{max} = Temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$); λ = calor latente de vaporização = $2,4418 \text{ MJ kg}^{-1}$.

Como a ET_o expressa a demanda evaporativa da atmosfera, independentemente do tipo de cultura, estágio de desenvolvimento e práticas de manejo (BERTI et al., 2014; JERSZURKI et al., 2019) foi necessário multiplicá-la pelo coeficiente da cultura (K_c) para obter a ET_o para o eucalipto. O K_c representa a demanda hídrica do eucalipto em determinado estágio de desenvolvimento (ALLEN et al., 1998). Neste estudo, considerou o valor de K_c como 1,15, seguindo as recomendações de Allen et al. (1998), Tatagiba et al. (2015) e Freitas et al. (2020).

Para o cômputo do BHC foi utilizado o método proposto por Thornthwaite e Mather (1955, 1957) e simplificado por Pereira (2005). Este método fornece a disponibilidade de água no solo por meio de três extratos: evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DH) e excedente hídrico (EXC) em nível regional (SENTELHAS et al., 2008; SANTOS et al., 2017; ALVES et al., 2020). O BHC requer como dado de entrada as médias climatológicas mensais de T_m , Pr e ET_o , as quais foram calculadas para o CP, FP e FD, além da capacidade de água disponível (CAD) para o eucalipto. Para detalhamento de todas as etapas dos cálculos realizados no BHC, consulte Pereira (2005), Sentelhas et al. (2008), Santos et al., (2017) e Alves et al. (2020).

A CAD refere-se ao limite máximo de armazenamento de água no solo disponível ao eucalipto, sendo dependente, principalmente, do tipo de solo e do comprimento radicular (SANTOS et al. 2017, CORREIA et al., 2019). Devido à lacuna de informações referente ao comprimento radicular de cada espécie de eucalipto e informações de solo específicas para todo o território brasileiro, optou-se pela definição de valores médios de comprimento radicular e de tipos de solos na definição da CAD. Foi adotado o comprimento radicular efetivo de 300 cm para o eucalipto (CHRISTINA et al., 2017; ELLI et al., 2020a,b; FREITAS et al., 2020). Além disso, na tentativa de representar a taxa de armazenamento de água para todos os solos do Brasil foram considerados valores de taxa de armazenamento de três tipos de solos padrões (ELLI et al., 2020a,b; FREITAS et al., 2020): i) solos argilosos ($1,52 \text{ mm cm}^{-1}$); ii) solos francos ($0,97 \text{ mm cm}^{-1}$), e iii) solos arenosos ($0,60 \text{ mm cm}^{-1}$). Com isso, o valor de CAD adotado foi de 309 mm.

2.2.5. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento de aptidão climática para o eucalipto no Brasil

O impacto das mudanças climáticas foi analisado em duas etapas: i) considerando as mudanças nas variáveis Pr (mm ano^{-1}), Rs ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), Tm ($^{\circ}\text{C}$), Tmax, ETo (mm ano^{-1}) e DH (mm ano^{-1}), e, ii) considerando alterações no zoneamento de aptidão climática. Na etapa i, o termo ‘mudanças’ refere-se à diferença entre os valores médios das variáveis projetadas no FP e FD (RCP 4.5 e 8.5) e o respectivo valor médio para o CP. Na etapa ii, foi considerada a porcentagem de aptidão climática obtida para o CP, FP e FD. Em ambas etapas (i e ii) foi considerada somente a média do conjunto (*ensemble*) de todos os MSTs, a fim de reduzir possíveis incertezas geradas individualmente por cada MST (ELLI et al., 2020a).

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Clima presente: validação das simulações para o clima presente

Embora haja maior proximidade e melhor representatividade nas simulações para a Tm e Tmax (Figura 2.1 C, D e Tabela 2.5) e maior variabilidade para a Pr e Rs (Figura 2.1 A, B Tabela 2.5), o *ensemble* dos MSTs reproduziu adequadamente o comportamento temporal de todas variáveis para todo o território brasileiro, reduzindo a

amplitude gerada individualmente pelos MSTs. No caso da Pr, as simulações dos STs foram mais secas que os dados disponibilizados por Xavier et al., (2016), com tendência de subestimativa em todo o território brasileiro em todos os meses do ano, com maior magnitude no Norte (entre 4 e 8 mm dia⁻¹) e em março (~1,66 mm dia⁻¹). No caso da Rs, o comportamento dos MSTs foi oposto, ou seja, de superestimativa entre 1 a 5 MJ m⁻² dia⁻¹, com maior magnitude em algumas porções da região Norte e nos meses de fevereiro – março e setembro – outubro (~4 MJ m⁻² dia⁻¹). No entanto, o pior desempenho dos MSTs na simulação da Pr e Rs foi semelhante ao observado por Guimarães et al. (2013), Silveira et al. (2013), Sales et al., (2015), Reboita et al. (2018), Alves et al., (2020) e Monteiro (2020), sendo um resultado esperado, pois ambas são variáveis difíceis de serem simuladas pelos MST, uma vez que dependem de diversos processos dinâmicos e termodinâmicos da atmosfera (LIMBERGER e SILVA, 2018; LLOPART et al., 2020). De qualquer forma, o viés da Pr diária é inferior a 8 mm dia⁻¹ (Figura 2.1, A) e da Rs é inferior a 5 MJ m⁻² dia⁻¹ (Figura 2.1, C), o que justifica a utilização do *ensemble* das variáveis (Pr, Rs, Tm e Tmax) na estimativa da ETo e no cômputo do BHC.

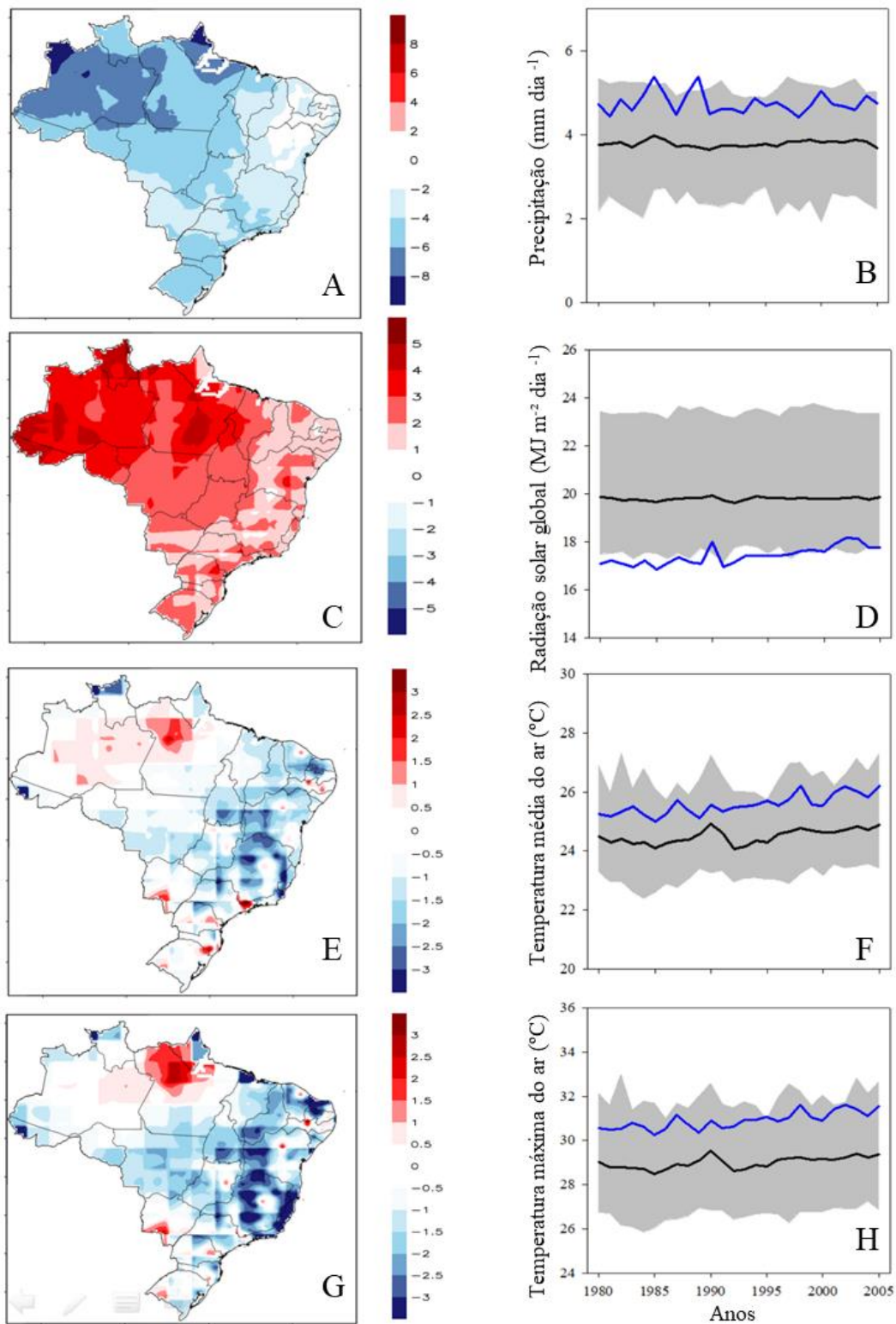


Figura 2.1 – Distribuição espacial (à esquerda) e temporal (à direita) do viés entre os valores simulados pelo *ensemble* (à esquerda) e MSTs (à direita) e os dados disponibilizados por Xavier et al., (2016) para o clima presente (1980-2005) para todo o território brasileiro considerando os valores diários de precipitação acumulada (painel A e B, mm dia⁻¹), radiação solar global (painel C e D, MJ m⁻² dia⁻¹), temperatura média do ar (painel E e F, °C) e temperatura máxima do ar (painel G e H, °C). Linha preta em

negrito representa o *ensemble* dos nove modelos do sistema terrestre (MST), linha azul representa os dados disponibilizados por Xavier et al., (2016). Os valores em escala de cinza representam o comportamento de cada MST.

Para a Tm e Tmax, as simulações dos modelos foram ligeiramente mais quentes que os dados disponibilizados por Xavier et al. (2016) nos meses da primavera (SON, VM = +0,54°C para Tm e +0,62°C para Tmax) e mais frias nos demais meses, especialmente em junho (VM = -1,35°C para Tm e -1,69°C para Tmax) e abril (VM = -1,27°C para Tm e -1,68°C para Tmax) (Tabela 2.5). Com relação ao padrão espacial, o comportamento é semelhante para Tm e Tmax, com subestimativa em quase todo Sudeste, Nordeste e Centro-oeste e superestimativa na região Norte, especialmente no estado do Pará (Figura 2.1, E,G).

Tabela 2.5 – Validação entre o conjunto de dados de precipitação, radiação solar global, temperatura média e temperatura máxima do ar obtido pelo *ensemble* dos nove modelos do sistema terrestre e os dados disponibilizados por Xavier et al. (2016) para todo território brasileiro (1980-2005).

Meses do ano	Precipitação (mm dia ⁻¹)		Radiação solar global (MJ m ⁻² dia ⁻¹)		Temperatura média do ar (°C)		Temperatura máxima do ar (°C)	
	RQME	VM	RQME	VM	RQME	VM	RQME	VM
Janeiro	2,09	-0,90	2,56	2,04	1,22	-0,71	1,74	-1,22
Fevereiro	3,05	-1,16	3,14	2,17	1,51	-0,77	2,17	-1,32
Março	2,64	-1,66	3,29	2,77	1,48	-0,85	1,99	-1,26
Abril	1,62	-1,20	2,54	2,34	1,55	-1,27	1,98	-1,68
Mai	1,28	-1,08	2,69	2,56	1,52	-1,32	1,82	-1,62
Junho	1,26	-0,79	2,72	2,60	1,62	-1,35	2,01	-1,69
Julho	1,06	-0,42	2,54	2,47	1,35	-0,87	1,82	-1,25
Agosto	0,63	-0,11	2,89	2,80	1,37	-0,37	1,72	-0,69
Setembro	0,84	-0,53	4,13	3,99	1,52	0,62	1,60	0,77
Outubro	1,07	-0,66	3,70	3,56	1,27	0,77	1,44	0,96
Novembro	0,89	-0,29	2,99	2,87	0,67	0,22	0,86	0,15
Dezembro	1,09	-0,29	2,66	2,53	0,81	-0,51	1,14	-0,87

*RQME = raiz do quadrado médio do erro, dado por: $RQME = [\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 / N]^{0,5}$ ** VM = Viés médio, dado por: $VM = N^{-1} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)$ (MARTINS et al., 2014). Em que E_i = *ensemble* das variáveis simuladas pelos MSTs (1980-2005); O_i = valores das variáveis disponibilizadas por Xavier et al. (2016). N = número de observações.

2.3.2. Clima futuro: alterações nas variáveis e na deficiência hídrica no solo

A figura 2.2 apresenta as distribuições espaciais das projeções de Pr, Rs, Tm e Tmax, ETo e DH para o futuro próximo (2021-2050) e futuro distante (2071-2100) para o RCP 4.5 8.5. As projeções indicam padrões espaciais similares, porém mais intensos no FD e no RCP 8.5 (Figura 2.2).

São projetadas mudanças heterogêneas na Pr no território brasileiro, com redução da Pr na região Norte ($\approx -200 \text{ mm ano}^{-1}$ no FD), aumento na região Sul ($\approx +300 \text{ mm ano}^{-1}$) e na parte nordeste do Sudeste ($\approx +100 \text{ mm ano}^{-1}$) e tendência indefinida no Nordeste e Centro-Oeste. Além disso, exceto para a região Sul ($\sim -0,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), são projetados aumentos da Rs em praticamente todo o território brasileiro, com maior intensidade nas regiões Norte ($+0,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), parte do Centro-Oeste ($+0,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), e centro do Sudeste ($+0,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) (Figura 2.2, E,F,G,H). Ademais, são projetados aumentos crescentes da Tm e Tmax em todo território brasileiro, com padrão espacial similar entre as duas variáveis e intensificado no FD e RCP 8.5 (Figura 2.2, I,J,K,LM,N,O,P). Os menores aumentos são projetados no Sul e litoral do Nordeste, com aumentos entre $1,5^{\circ}\text{C}$ (RCP 4.5) e $3,5^{\circ}\text{C}$ (RCP 8.5) no FD, enquanto os maiores aumentos são projetados nas regiões Norte, Centro-Oeste e parte do Sudeste, podendo chegar a 4°C (RCP 4.5) e 6°C (RCP 8.5) no FD (Figura 2.2 I,J,K,LM,N,O,P).

Diante destes aspectos, o Norte, Centro-Oeste e parte oeste do Sudeste são as regiões brasileiras mais críticas de mudanças climáticas, devido às alterações mais intensas e persistentes ao longo do século XXI, com aumentos de Rs, Tm e Tmax e redução da Pr. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Guimarães et al. (2016), Lyra et al. (2017), Gondim et al. (2018), Llopart et al. (2019) e Sousa et al. (2019) os quais foram realizados para diferentes regiões do Brasil e América do Sul. Cabe ressaltar que todos os autores utilizam diferentes modelos para as projeções climáticas e, especialmente Lyra et al. (2017), Llopart et al. (2019) e Sousa et al. (2019) utilizam dados de projeções climáticas oriundos de modelos regionais e, mesmo assim, estão coerentes com o presente estudo. Além disso, está de acordo com as projeções apresentadas no IPCC AR5 (IPCC, 2013).

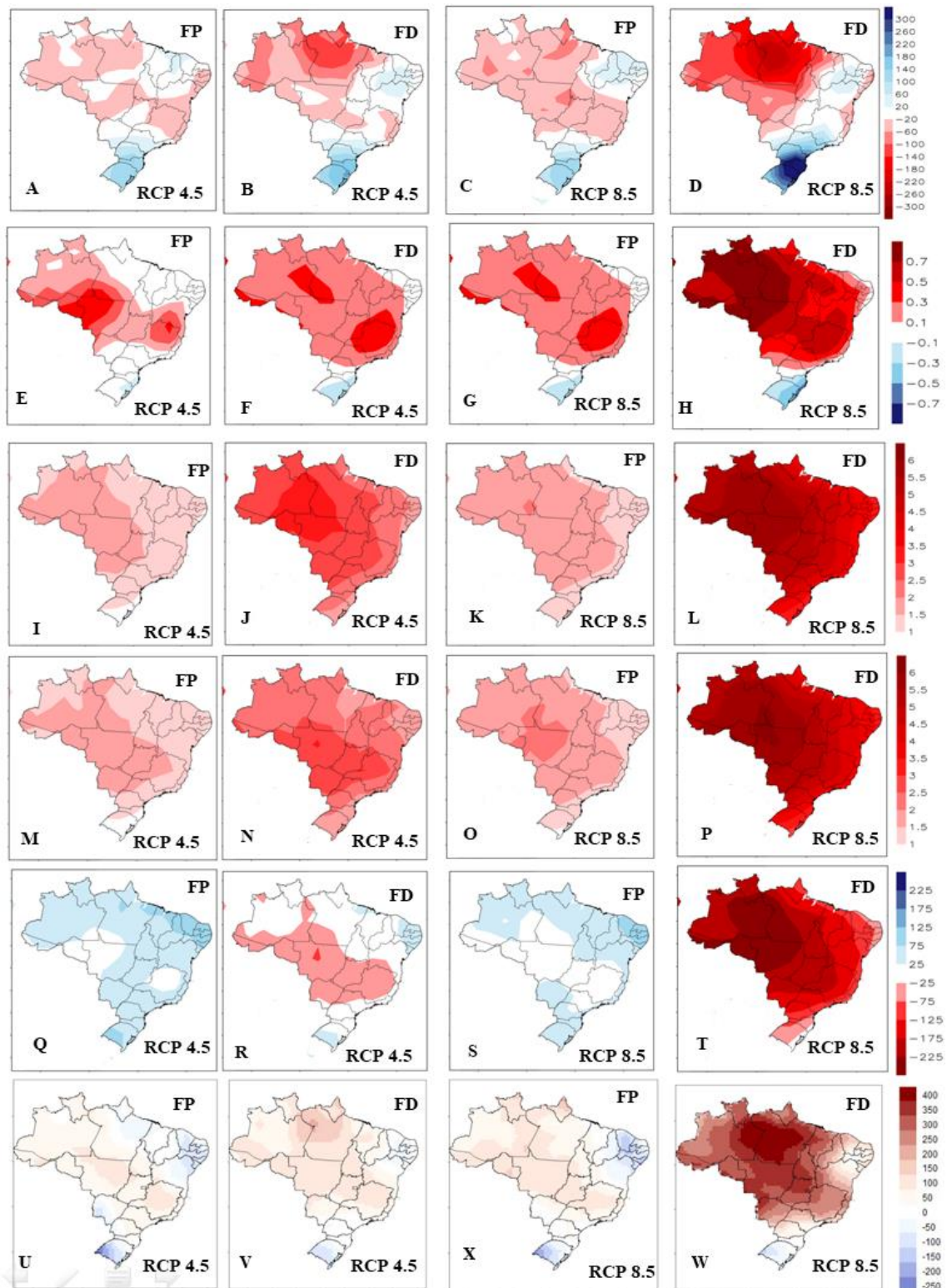


Figura 2.2 - Projeção de mudança para precipitação acumulada anual (Pr , mm ano^{-1}) (A,B,C,D), radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) (E,F,G,H), temperatura média (T_m , $^{\circ}\text{C}$) (I,J,K,L), temperatura máxima do ar (T_{max} , $^{\circ}\text{C}$) (M,N,O,P), evapotranspiração de referência acumulada anual (ET_o , mm ano^{-1}) (Q,R,S,T) e deficiência hídrica acumulada anual (mm ano^{-1}) (U,V,X,W) projetadas para o futuro próximo (FP, 2021-2050) e futuro

distante (FD, 2071-2100) para a forçante radiativa RCP 4.5 e RCP 8.5. As figuras foram geradas considerando o *ensemble* dos nove modelos do sistema terrestre.

As alterações heterogêneas projetadas para a Pr e Rs, associadas ao aumento da Tm e Tmax, repercutirão em mudanças na ETo (Figuras 2.2, Q,R,S,T), no BHC, na DH (Figura 2.2 U,V,X,W) e conseqüentemente no zoneamento de aptidão climática (item 2.3.3). De maneira geral, as diferenças positivas de ETo e DH seguem os padrões observados para a Rs, Tm e Tmax, enquanto as diferenças negativas seguem os padrões observados para a Pr. Ou seja, locais onde há a associação entre aumento na Rs, Tm e Tmax e redução na Pr, há aumentos na ETo e DH.

Observa-se padrão espacial distinto de mudanças na ETo entre o FP e FD. Enquanto no FP é projetada pequena redução (em torno de $+45 \text{ mm ano}^{-1}$) da ETo no Sul e no litoral do Nordeste em ambos RCPs (4.5 e 8.5), no FD projeta-se aumento da ETo, com maior intensidade no Norte ($+225 \text{ mm ano}^{-1}$), parte central do Centro-Oeste ($+175 \text{ mm ano}^{-1}$) e parte norte do Sudeste ($+175 \text{ mm ano}^{-1}$). O padrão espacial de redução da ETo no FP segue às projeções de redução da Pr e Rs, principalmente no Sul e litoral do Nordeste. Embora a redução da ETo projetada no FP esteja na contramão do que é esperado, ou seja, de aumento da ETo acompanhando o aumento da Tm e redução da Pr, tal tendência também foi observada por Fan et al., (2016), Gao et al. (2017), Lin et al. (2018), Liu et al., (2018) e Monteiro (2020) para localidades da China e Brasil, respectivamente. A tendência de redução da ETo pode ocorrer devido (MONTEIRO, 2020): i) incertezas e diferenças nas projeções climáticas entre os MSTs, ii) incertezas sobre as contribuições que cada variável exerce dentro do processo de evapotranspiração; iii) incertezas sobre a influência e peso da variável umidade do solo no processo de evapotranspiração, e iv) incertezas sobre a relação entre redução da umidade do solo e limitações da ETo.

Já para o FD, as projeções indicam um aumento da ETo em quase todo território brasileiro, principalmente no RCP 8.5 (Figura 2.2, R,T), sendo mais intenso ($+225 \text{ mm ano}^{-1}$) no Norte e Centro-Oeste. Ou seja, exatamente nas regiões em que são projetados os maiores aumentos de Rs e Tmax (Tm) e maior redução da Pr.

Valores positivos e com maior magnitude de DH são projetados no FD e RCP 8.5 e nas regiões Norte e parte do Centro Oeste, com aumentos de até 400 mm ano^{-1} no FD (Figura 2.2, W). Por outro lado, na região Sul é projetada redução da DH, em torno de 100 mm ano^{-1} , com maior intensidade (-150 mm ano^{-1}) na parte mais ocidental da região Sul e no FP em ambos RCPs (RCP 4.5 e 8.5). Neste local, apesar do aumento da

T_m ($\sim 1,5^\circ\text{C}$) e T_{max} ($\sim 1,5^\circ\text{C}$), as projeções indicam redução da R_s ($0,5 \text{ Mj m}^{-2}\text{dia}^{-1}$), Pr (250 mm ano^{-1}) e da ET_o no FP (-45 mm ano^{-1}) (Figura 2.2, Q,R,S,T).

Nas áreas em que são projetadas concomitantemente redução da Pr e aumentos da R_s , T_m e T_{max} , são observados aumentos da ET_o , que por sua vez altera a demanda atmosférica impactando no aumento da DH . Isso ocorre com maior magnitude no FD (RCP 8.5) em praticamente todo território brasileiro, com exceção do Sul e parte da região Nordeste. Esses aumentos na DH são impulsionados principalmente pelo aumento da T_m (Figura 2.2 J,L), da ET_o (Figura 2.2 R,T) e redução da Pr (Figura 2.2, B,D), especialmente na região Norte. Portanto, as regiões Norte e Centro-Oeste se mostram mais vulneráveis às projeções climáticas, podendo prejudicar o cultivo do eucalipto que está em expansão nessas duas regiões (IBÁ, 2019).

2.3.3. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento de aptidão climática do eucalipto no Brasil

Atualmente, as áreas de maior plantação do eucalipto são localizadas no Sudeste, especialmente em Minas Gerais (24%) e São Paulo (17%), Centro-Oeste especialmente no Mato Grosso do Sul (16%), Nordeste, mais precisamente na Bahia (11%), e Sul, principalmente no Paraná (5%) (IBÁ, 2019; HUBBARD et al., 2020). Apesar de possuir menor representatividade, os cultivos no Norte ($<5\%$) do país, como no estado do Pará, estão em expansão (IBÁ, 2019), devido à ampliação das novas fronteiras agrícolas e florestais (ZILLI et al., 2020). Dessa forma, para analisar o impacto das mudanças climáticas no zoneamento de aptidão ao cultivo do eucalipto, optou-se por mostrar o padrão espacial das porcentagens e classes de aptidão, simuladas para o clima presente (1980-2005) e projetadas para os dois períodos futuros (FP e FD) e RCPs (4.5 e 8.5). Para isto, foi considerando o *ensemble* dos nove MST (Figura 2.3).

Considerando o clima presente (1980-2005) as áreas são majoritariamente regulares (82%), adequadas (5%) e totalmente adequadas (13%) ao cultivo do eucalipto (Figuras 2.3 e 2.4). As áreas adequadas ou totalmente adequadas ao eucalipto concentram-se atualmente na região Sul, parte da região Sudeste, compreendendo os estados de São Paulo e sul de Minas Gerais, sul do Mato Grosso do Sul e uma pequena parte da região Norte; enquanto as áreas regulares cobrem as demais regiões. Das áreas regulares para o clima presente, o fator mais restritivo foi a DH ($DH > 334 \text{ mm ano}^{-1}$), uma vez que não foram simulados valores de T_m acima (e abaixo) da T_B (T_b) para o

eucalipto ($T_b = 8,5^\circ\text{C}$ e $T_B = 38,7^\circ\text{C}$).

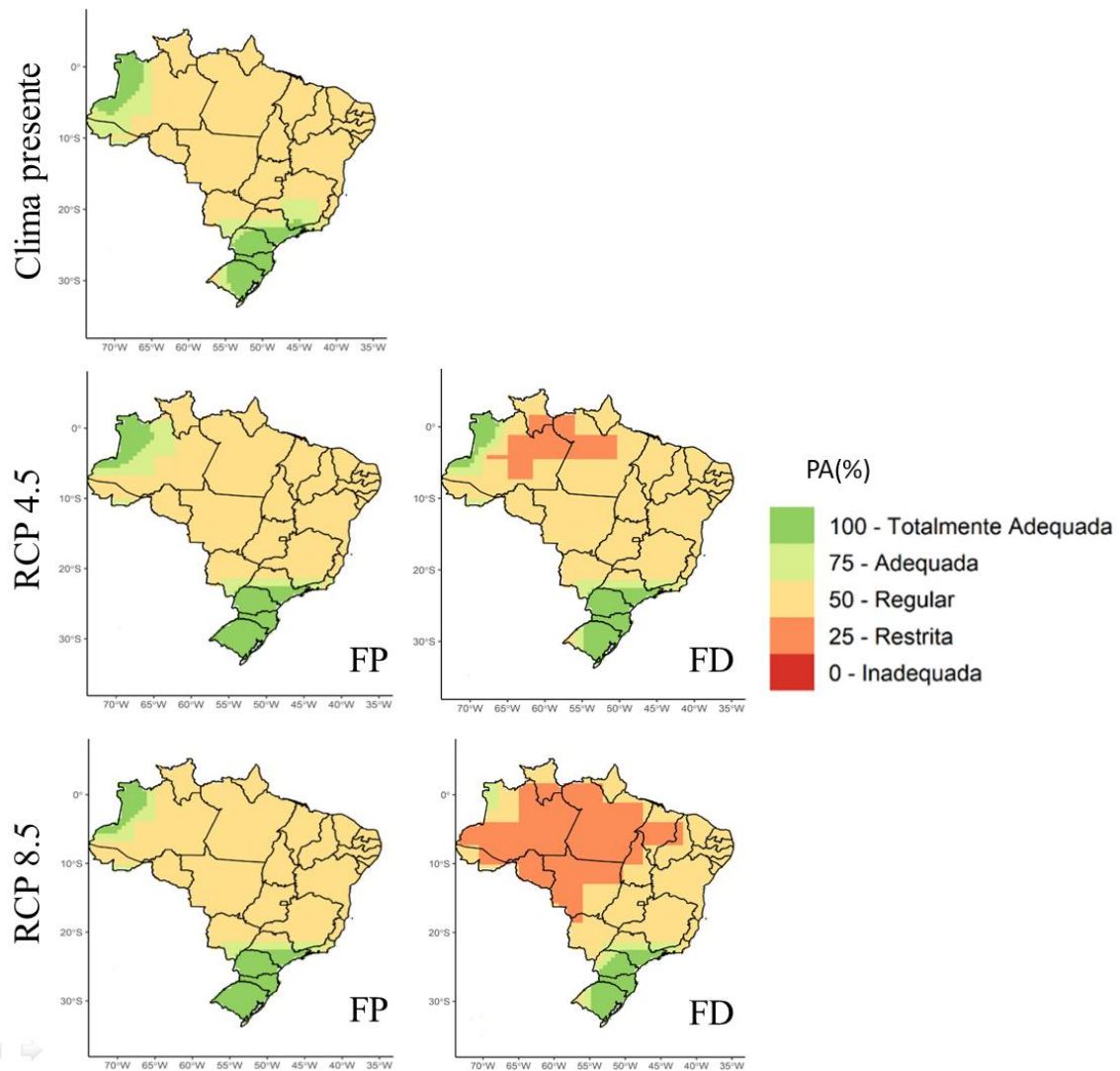


Figura 2.3 - Zoneamento de aptidão climática para o cultivo de eucalipto no Brasil simulado para o clima presente (1980-2005) e projetado para o futuro próximo (2021-2050) e futuro distante (2071-2100), considerando as duas forçantes radiativas (RCP 4.5 e 8.5).

De maneira geral, as projeções não indicam alterações consideráveis no zoneamento de aptidão climática para cultivo do eucalipto no Brasil no FP (2021-2050) em ambos RCPs comparada ao clima presente, devido, principalmente, as alterações mais suaves na T_m e DH em curto prazo (Figura 2.2, I,K,U,X). Ainda considerando o FP, há um pequeno aumento das áreas totalmente adequadas ao cultivo do eucalipto, em ambos RCPs (RCP 4.5 e 8.5), de $\sim 3\%$ (Figura 2.4). Esse ligeiro aumento ocorre especialmente na região Sul onde são projetados os menores aumentos da T_m ($< 2^\circ\text{C}$) (Figura 2.2, I,K) e aumentos da precipitação acumulada ($\sim 200\text{ mm ano}^{-1}$) (Figura 2.2, A,C).

No entanto, no final do século XXI (FD, 2071-2100) nota-se redução das áreas totalmente adequadas ou adequadas, entre 3% (RCP 4.5) e 7% (RCP 8.5) ao cultivo do eucalipto comparado ao clima presente. Além disso, há redução das áreas regulares, entre 12% (RCP 4.5) e 39% (RCP 8.5) e surgimento de áreas restritas ao cultivo, com proporções variando entre 15% (RCP 4.5) e 47% (RCP 8.5) (Figuras 2.3 e 2.4). A redução das áreas regulares e surgimento de áreas restritas no FD, principalmente no RCP 8.5, é governada pelos aumentos significativos da T_m (Figura 2.2,J,L) e intensificação da DH nas regiões Norte e Centro-Oeste. Nessas regiões, as projeções na T_m ($>33^\circ\text{C}$) são predominantemente maiores que a faixa ótima de desenvolvimento ($15,3 - 30,4^\circ\text{C}$) (Tabela 2.4). Além disso, a DH excede o limiar máximo de DH ($\text{DH} > 334 \text{ mm ano}^{-1}$) em praticamente todo Norte e Centro-Oeste (Tabela 2.4).

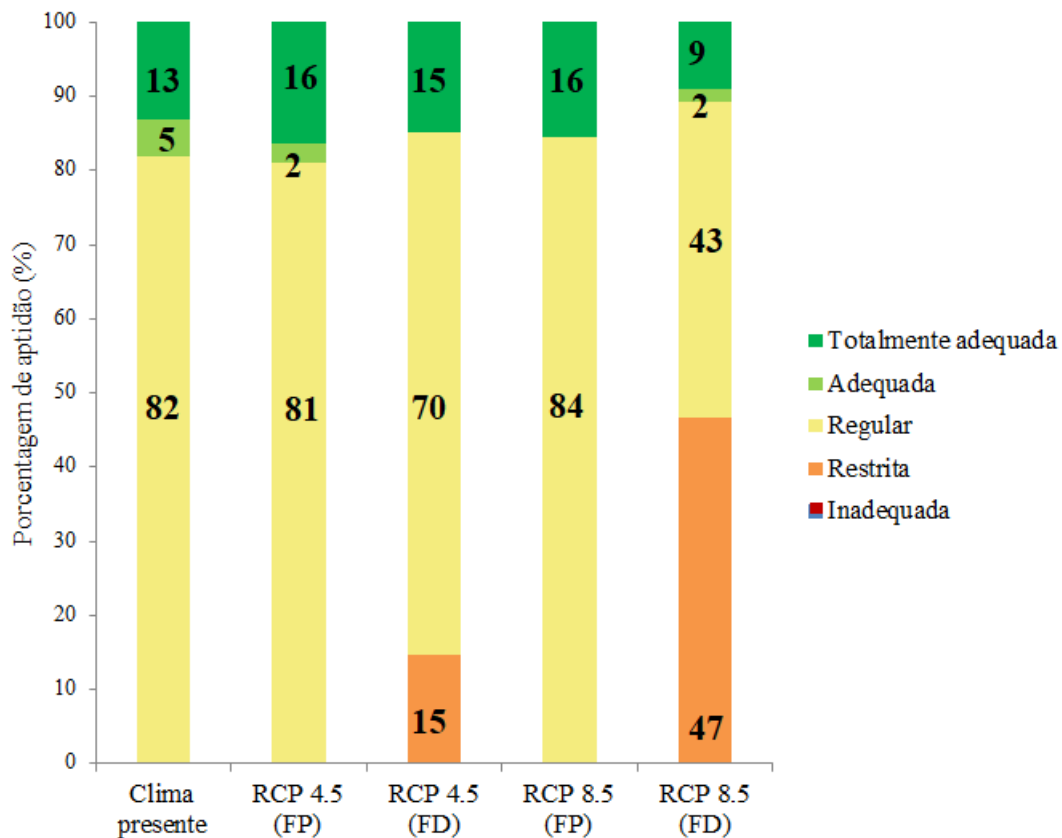


Figura 2.4 - Porcentagem e classes de aptidão ao cultivo do eucalipto no Brasil simulada para o clima presente (1980-2005) e projetada para o futuro próximo (2021-2050) e futuro distante (2071-2100) para ambos cenários de forçante radiativa (RCP 4.5 e 8.5).

O surgimento das áreas restritas, nas quais há inadequação em uma das condições (DH ou Temp), é governado primariamente pelo aumento da DH no final do

século XXI (FD) ($>334 \text{ mm ano}^{-1}$). Apesar das projeções da T_m serem inferiores a T_B das espécies ($38,7^\circ\text{C}$) os aumentos consideráveis de até $\sim 6^\circ\text{C}$ (FD e RCP 8.5) nas regiões Norte e Centro-Oeste, são responsáveis por alterar a demanda evaporativa, elevar a E_{To} e refletir diretamente em aumentos na DH (SANTOS et al., 2017; ELLI et al., 2020a). Dessa forma, mesmo que as áreas sejam restritas devido ao aumento da DH , o aumento da temperatura do ar associado aos padrões irregulares na precipitação pode causar desequilíbrio na razão fotossíntese/fotorrespiração (PIROVANI et al., 2018; ELLI et al., 2020b) e alterar as necessidades hídricas do eucalipto (COSTA et al., 2018; ELLI et al., 2020a).

Uma vez que a disponibilidade hídrica é o principal fator limitante da produtividade do eucalipto (COSTA et al., 2018) e a temperatura do ar é o fator abiótico que mais influencia no desenvolvimento (MARTINS et al., 2007; FREITAS et al., 2017; COSTA e STRECK, 2018), as alterações na DH e na T_m irão impactar os processos fisiológicos do eucalipto, gerando uma série de anomalias fenológicas, as quais podem promover a redução progressiva do desenvolvimento, produtividade e qualidade da madeira (BOOTH, 2017; ELLI et al., 2020b).

Condições de T_m acima da faixa ótima para o eucalipto ($15,3 - 30,4^\circ\text{C}$) (Tabela 2.1) reduzem a fotossíntese e aumentam o consumo de energia pelas plantas, que por sua vez eleva os custos de manutenção celular e fotorrespiração (PIROVANI et al., 2018; FLORENCIO et al., 2019). Além disso, o aumento mais intenso da T_m projetado para o FD (Figura 2.2, J,L) irá acarretar no aumento da E_{To} (Figura 2.2, R,T), fazendo com que as plantas percam água mais rapidamente para a atmosfera. Em contrapartida a redução da P_r aumenta a DH , e a oferta de água às plantas acaba sendo inferior à taxa de evapotranspiração (E_{To}). Como consequência há redução das trocas gasosas (transpiração e assimilação de CO_2 para a realização da fotossíntese) (ELLI et al., 2020b), desequilíbrio na razão fotorrespiração/fotossíntese, as quais alteram os processos fisiológicos (PIROVANI et al., 2018).

Exceto nas regiões Sul e parte do Sudeste, é projetada diminuição das áreas adequadas ou totalmente adequadas e aumento das áreas regulares e restritas. Embora não sejam projetadas áreas totalmente inadequadas ao cultivo do eucalipto ao longo do século XXI, o aumento da DH poderá restringir o cultivo do eucalipto, sendo necessária a adoção de estratégias de mitigação contra os efeitos desfavoráveis. Nesse sentido, algumas estratégias de adaptação envolvem o uso de novos híbridos ou clones com híbridos interespecíficos (GONÇALVES et al., 2013), por serem mais resilientes à

deficiência hídrica no solo, revoluções nas técnicas de melhoramento de plantas (molecular e convencional de forma a incorporar as características desejadas), melhoria nas práticas de manejo e condução das mudas dentro de casas de vegetação ou estufas e alterações nos materiais das estufas. Alterações no manejo das mudas, como o uso de sombrite e condução de mudas em estufas teladas (COSTA; STRECK, 2018), podem ser estratégias efetivas para evitar o aumento da temperatura da folha e reduzir a ETo, minimizando os impactos do aumento combinado da Tm e DH. No entanto, o uso de sombrite associado à Tm elevada pode estiolar as mudas e reduzir sua qualidade, o que prejudicaria o pleno estabelecimento das plantas no campo (WILLIANS e DUMROESE, 2014; COSTA e STRECK 2018). Além disso, a irrigação (PIROVANI et al., 2018; FRAGA et al., 2020) é outra possível estratégia para reduzir os impactos negativos no cultivo do eucalipto, principalmente aplicado nos períodos imediatamente posteriores ao plantio (GONÇALVES et al., 2013; ABREU et al., 2015). No entanto, pode ser uma estratégia inviável nas regiões Norte e Centro-Oeste onde são projetados os maiores aumentos (reduções) da DH (precipitação), e que apresentam expansão do cultivo de eucalipto nos últimos anos (IBÁ, 2019).

Ademais, devem ser buscados novos sistemas de cultivo, como plantios sistemas (agro)silvipastoris, que visam integrar (agricultura)pecuária-floresta, otimizando a produção e melhor utilização dos recursos hídricos, além de novas formas de plantio, como a redução do espaçamento entre linhas de plantio, na tentativa de reduzir a ETo e conseqüentemente o consumo hídrico. Tal alternativa vem sendo utilizada em regiões com maior restrição hídrica (CIPRIANI et al., 2015).

2.4.CONCLUSÃO

As projeções climáticas indicam alterações na precipitação, radiação solar global, temperatura do ar (média e máxima), impactando diretamente em alterações nos padrões de evapotranspiração e deficiência hídrica. Tais alterações são mais significativas no final do século XXI e no RCP 8.5, principalmente no Norte e Centro-Oeste, e menos significativas no Sul e Nordeste.

Os padrões projetados de temperatura e de deficiência hídrica tende a ser restritivo ao cultivo do eucalipto somente no final do século XXI (2071-2100). Apenas a região Sul e pequena parte do Sudeste terão áreas totalmente favoráveis ao cultivo de eucalipto considerando a disponibilidade térmica e hídrica. Para as regiões Nordeste, centro do Sudeste e Centro-Oeste o cultivo do eucalipto será regular, enquanto na região

Norte e norte do Centro-Oeste o cultivo será majoritariamente restrito ou regular, de modo que medidas de mitigação e estratégias de adaptação aos cultivos serão necessárias. Como exemplo a utilização de espécies (híbridas e alteradas geneticamente) mais resilientes a deficiência hídrica no solo, e a adoção de técnicas de irrigação, os quais representariam um grande adicional aos custos de operação e manejo florestal.

2.5.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. C.; MARTINS, F. B.; FREITAS, C. H.; PEREIRA, R. A. A.; MELLONI, E. G. P. Valores limítrofes para transpiração, desenvolvimento e crescimento de *Corymbia citriodora* em resposta à deficiência hídrica no solo. **Revista Árvore**, v.39, n.5, p. 841-852, 2015.

ABTEW, W. Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in South Florida. **Water Resources Bulletin**, v.32, n.3, p.465-473, 1996.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 333p. (FAO – Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALMEIDA, A. C; LANDSBERG, J.J.; PETER J. SAND, P.J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1-2, p. 179-195, 2004.

ALMEIDA, C. A.; SANDS, P. J. Improving the ability of 3-PG to model the water balance of forest plantations in contrasting environments. **Ecohydrology**, v. 9, n. 4, p. 610-630, 2015.

ALVES, A. M. D. 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. 1-21, 2020.

ALZATE, S.B.A. **Caracterização da madeira de árvores de clones de *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. grandis* x *E. urophylla***. 2004. 133 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Produtos Florestais) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; LLOPART, M. The state-of-the-art and fundamental aspects of Regional Climate Modeling in South America. **Annals of the New York Academy of Sciences, especial edition: Climate Science**, v.1436, p. 1-23, 2018

ANTONOPOULOS, V. Z.; ANTONOPOULOS, A. V. Daily reference evapotranspiration estimates by artificial neural networks technique and empirical equations using limited input climate variables. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.132, p.86-96, 2017.

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, p.1-8, 2013.

BAESSO, R. C. E.; RIBEIRO, A.; SILVA, M. P. Impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto na região norte do Espírito Santo e sul da Bahia. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 2, p. 335-344, 2010.

BATTAGLIA, M.; BRUCE, J. Direct climate change impacts on growth and drought risk in blue gum (*Eucalyptus globulus*) plantations in Australia. **Australian Forestry**, v. 80, n. 4, p. 216-227.

BERTI, A.; TARDIVO, G.; CHIAUDANI, A.; RECH, F.; BORIN, M. Assessing reference evapotranspiration by the Hargreaves method in north-eastern Italy. **Agricultural Water Management**, v. 140, p. 20-25, 2014.

BINKLEY, D.; CAMPOE, O.C.; ALVARES, C., CARNEIRO, R.L.; CEGATTA, Í.; STAPE, J.L. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay. **Forest Ecology and Management**, v. 405, p. 271–283, 2017.

BOOTH, T. H. Impacts of climate change on eucalypt distributions in Australia: an examination of a recent study. **Australian Forestry**, v. 80, p. 208-215, 2017.

BOOTH, T. H. Species distribution modelling tools and databases to assist managing forests under climate change. **Forest Ecology and Management**, v. 430, p. 196-203, 2018.

BORGES, J. S.; NEVES, J. C. L.; LOURENÇO, H. M.; BARROS, N. F.; DIAS, S. C. M. Parameterization of the 3-PG model for eucalypt in the region of cerrado in Minas Gerais state. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 3, p. 567-578, 2012.

CAMPANHARO, W.A.; CECÍLIO, R. A.; SPERANDIO, H. V.; JÚNIOR, W. C. J.. PEZZOPANE, J. E. M. Potencial impacto das mudanças climáticas sobre o zoneamento agroclimático para a seringueira no Espírito Santo. **Scientia Forestalis**, v.39, p. 105-116, 2011.

CHOU, S. C.; LYRA, A. A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 512-527, 2014.

CHRISTINA, M.; NOUVELLON, Y.; LACLAU, J. P.; STAPE, J. L.; BOUILLET, J. P.; LAMBAIS, G. R.; LE MAIRE, G. Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. **Functional Ecology**, v. 31, p. 509-519, 2017.

CIPRIANI, H.N.; VIEIRA, A.H.; ROCHA, R.B.; COSTA, J.N.M.; MENDES, A.M.; ARAÚJO, L.V.; VIEIRA JUNIOR, J.R. 2015. **Cultivo do eucalipto para madeira em Rondônia. Sistemas de Produção**, Embrapa: Porto Velho, 85p.

CORREA, H. C. R.; FLORENTIM, E. T. S.; MONTEIRO, F. N.; FALCÃO, K. S.; PANACHUKI, E. Agroclimatic Zoning to species of Eucalyptus Genus in the State of Southern Mato Grosso do Sul. **Research, Society and Development**, v.9, p. e4691210741, 2020.

CORREIA, T. P.; PRADO, D.O.; LYRA, G.B.; ARAÚJO, E.J.G.; LYRA, G.B.; Edaphic-Climatic Zoning of Eucalyptus Species in the Rio de Janeiro State, Brazil. **Floresta Ambiente**, v. 26, e20160369, 2019.

COSTA, C. D. O.; LOPES, A. S.; K. R. M.; ANDRADE, V. D.; C. D. B.; XAVIER, T. A. G. The influence of initial irrigation on the growth of two hybrids of eucalyptus. **Floresta**, v. 49, n. 1, p. 125-132, 2018.

COSTA, D. B.; STRECK, N. A. Duração da fase de mudas em eucalipto simulada em cenários de aumento de temperatura. **Ciência Florestal**, v.28, n.3, p.1263-1270, 2018.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; BENDER, F. D. Impacts and uncertainties of climate change projections on Eucalyptus plantations productivity across Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 474, e118365, 2020a.

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, e106325, 2019.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; HUTH, N.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C.A. Gauging the effects of climate variability on Eucalyptus plantations productivity across Brazil: A process-based modelling approach. **Ecological Indicators**, v. 114, e118365, 2020b.

ELLSWORTH, D.S.; ANDERSON, I.C.; CROUS, K.Y.; ANDERSON, I.C.; CROUS, K.Y., COOKE, J.; DRAKE, J.E.; GHERLEND, A.N.; GIMENO, T.E.; MACDONALD, C.A.; MEDLYN, B.E.; POWELL, J.R.; TJOELKER, M.G.; REICH, P.B. Elevated CO₂ does not increase eucalypt forest productivity on a low-phosphorus soil. **Natural Climate Change**, v. 7, p. 279–282, 2017.

FAN, J.; WU, L.; ZHANG, F.; XIANG, Y.; ZHENG, J. Climate change effects on reference crop evapotranspiration across different climatic zones of China during 1956-2015. **Journal of Hydrology**, v.542, p.923-937, 2016.

FERREIRA, M.C.de; MARTINS, F.B.; FLORENCIO, G.W.L. Cardinal temperatures and modeling the vegetative development of seedlings of guava. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.23, n.11, p. 819-825, 2019.

FLORES, T. B.; ALVARES, C. A.; SOUZA, V. C.; STAPE, J. L. **Eucalyptus no Brasil**. Piracicaba: IPEF, 2016.

FRAGA, M.S.; ULIANA, E.M.; SILVA, D.D.; CAMPOS, F.B.; CALIJURI, M.L.; SANTOS, D.M.S. Climatic zoning for eucalyptus cultivation through strategic decision analysis. **Ambiente e Agua**, v. 13, p. e2119, 2018.

FRAGA,H.; PINTO, J.G.; SANTOS, J.A. Olive tree irrigation as a climate change adaption measure in Alentejo, Portugal. **Agricultural Water Management**, v.237, e105193, 2020.

FREIRE, J. A; RODRIGUES, G. C; TOMÉ, M. Climate Change Impacts on Pinus pinea L. Silvicultural System for Cone Production and Ways to Contour Those Impacts:

A Review Complemented with Data from Permanent Plots. **Forests**, v.10, n.2, p.169-198, 2019.

FREITAS, C. H.; ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C.A. Adaptation, calibration and evaluation of a simple agrometeorological model for wood Eucalyptus productivity estimation. **European Journal of Forest Research**, v.139, n. 5, p. 759-776, 2020.

FREITAS, C. H.; MARTINS, F. B. Thermal requirements and photoperiod influence in the leaf development of two forest species. **Floresta e Ambiente**, v.26, n.4, e20190013 2019.

FREITAS, C. H. DE; MARTINS, F. B.; ABREU, M. C. Cardinal temperatures for the leaf development of *Corymbia citriodora* and *Eucalyptus urophylla* seedlings. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.52, p.283-292, 2017.

GAO, Z.; HE, J.; DONG, K.; LI, X. Trends in reference evapotranspiration and their causative factors in the West Liao River basin, China. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.232, p.106-117, 2017.

GONCALVES, J. L.; ALVARES, C. A.; HIGA, A.; R.; SILVA, L.; D.; ALFENAS, A.; C.; STAHL, J.; FERRAZ, S. F. DE B. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 6-27, 2013.

GUIMARÃES D.; SILVA, G.G.C.; SANS, L.M.A.; LEITE, F.P. Uso do modelo de crescimento 3-PG para o zoneamento do potencial produtivo do eucalipto no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.15, n.2, p.192-197, 2007.

GUIMARÃES, S. O.; COSTA, A. A.; SALES, D. C.; CHAGAS, F.; JÚNIOR, V. Projeções de precipitação dos modelos do CMIP5 para o cenário rcp8.5 sobre o nordeste brasileiro. **Ciência e Natura**, v. 10, p. 490-492, 2013.

HATFIELD, J. L.; & PRUEGER, J. H. Temperature extremes: Effect on plant growth and development. **Weather and Climate Extremes**, v. 10, p. 4–10, 2015.

HUBBARD, R.M.; CARNEIRO, R. L.; CAMPOE, O.; ALVARES, C. A.; FIGURA, M. A.; MOREIRA, G. G. Contrasting water use of two *Eucalyptus* clones across a precipitation and temperature gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 475, e118407, 2020.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual IBÁ**. São Paulo, 2019.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change - Summary for Policymaker. In: STOCKER, T. F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V.; MIDGLEY, P. M. (Eds). **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013.

JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M. de.; SILVA, L. de. C. R. Sensitivity of ASCE-

Penman-Monteith reference evapotranspiration under different climate types in Brazil. **Climate Dynamics**, v. 53, n. 1-2, p. 1-14, 2019.

JONES PW. First- and second-order conservative remapping schemes for grids in spherical coordinates. **Monthly Weather Review**, v. 127, p. 2204–2210, 1999.

LIMBERGER, L., SILVA, M. E. S. Precipitação observada na Amazônia brasileira: redes convencionais e dados da reanálise I do NCEP/NCAR, CRU E GPCC. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 20–37, 2018.

LIN, P.; HE, Z.; DU, J.; CHEN, L.; ZHU, X.; LI, J. Impacts of climate change on reference evapotranspiration in the Qilian Mountains of China: Historical trends and projected changes. **International Journal of Climatology**, v.38, p.2980-2993, 2018.

LIU, Q.; YAN, C.; JU, H.; GARRÉ, S. Impact of climate change on potential evapotranspiration under a historical and future climate scenario in the Huang-Huai-Hai Plain, China. **Theoretical and Applied Climatology**, v.132, p.387-401, 2018.

LONDERO, E. K.; SCHUMACHER, M. V.; SZYMCZAK, D. A.; ARAÚJO, E. F. Calibração do modelo 3-PG para *Eucalyptus saligna* Smith na região de Guaíba – RS. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 2, p. 293-305, 2015.

LLOPART, M.; DOMINGUES, L. M.; TORMA, C.; GIORGI, F.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Assessing changes in the atmospheric water budget as drivers for precipitation change over two CORDEX-CORE domains. **Climate Dynamics**, 2020.

LLOPART, M.; REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P. da. Assessment of multi-model climate projections of water resources over South America CORDEX domain. **Climate Dynamics**, p.1-18, 2019.

LUPPI, A.S.L.; SANTOS, A.R.; EUGÊNIO, F.C.; BRAGANÇA, R.; PELÚZIO, 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.

LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DEREZYNSKI, C.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and Applied Climatology**, p.1-20, 2017.

MARTINS, F. B.; STRECK, N. A. Aparecimento de folhas em mudas de eucalipto estimado por dois modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1091-1100, 2007.

MARTINS, F.B.; STRECK, N.A.; SILVA, J.C.; MORAIS, W.W.; SUSIN, F.; NAVROSKI, M.C. & VIVIAN, M.A. Deficiência hídrica no solo e seu efeito sobre transpiração, crescimento e desenvolvimento de mudas de duas espécies de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1297-1306, 2008.

MONTEIRO, Ana Flávia Martins. **Evapotranspiração no Brasil: cenário atual e projeções climáticas**. 2020. 100 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá,

Itajubá, 2020.

OLIVEIRA, L. T.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. E. M. Potencial Impacto das Mudanças Climáticas no Zoneamento do Pinus no Espírito Santo. **Floresta e Ambiente**, v.18, p.37-49, 2012.

OLIVEIRA, C.M.M.; DELGADO, R. C.; ARAÚJO, E.J.G.; ALMEIDA, A.Q.; ROSA, T.C.; JÚNIOR, J.F.O. Modelo 3-PG na previsão do potencial produtivo de áreas para plantios comerciais de *Eucalyptus* spp. **Ciência Florestal**, v.28, n.1, p.249-262, 2018.

PEREIRA, A.R. Simplificando o balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, v. 64, p. 311-313, 2005.

PIROVANI, D. B; PEZZOPANE, J. E. M; XAVIER, A. C; PEZZOPANE, J. R. M; JÚNIOR, W. C. J; MACHUCA, M. A. H; SANTOS, G. M. A. D. A; SILVA, S. F; ALMEIDA, S. L. H; PELUZIO, T. M. O; EUGENIO, F. C; MOREIRA, T. R; ALEXANDRE, R. S; SANTOS, A. R. Climate change impacts on the aptitude area of forest species. **Ecological Indicators**, v.95, n.1, p.405-416, 2018.

REBOITA, M. S.; MARRAFON, V. H. A.; LLOPART, M.; DA ROCHA, R. P. Cenários de mudanças climáticas projetadas para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 2, p. 207-224, 2018.

REIS, C.A.F.; ASSIS, T.F.; SANTOS, A.M.; FILHO, E. *Corymbia citriodora*: estado da arte de pesquisas no Brasil. Embrapa, Documentos 255. 2013.

SALES, D.C.; COSTA, A.A.; SILVA, E.M.; VASCONCELOS JÚNIOR, F.C.; CAVALCANTE, A.M.B.; MEDEIROS, S.S.; MARIN, A.M.P.; GUIMARÃES, S.O.; ARAUJO JUNIOR, L.M.; PEREIRA, J.M.R. Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no Nordeste Brasileiro utilizando a técnica de downscaling dinâmico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 4, p. 435-456, 2015.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO-FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Revisão Ampliada[e-book]. Brasília, DF: Embrapa. 2018

SANTOS, D. F. dos.; 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. 77-88, 2017.

SCOLFORO, H F.; MCTAGUE, J. P.; BURKHART, H.; ROISE, J. P.; ALVARES, C. A.; STAPE, J. L. Modeling whole-stand survival in clonal eucalypt stands in Brazil as a function of water availability. **Forest Ecology and Management**, v. 432, p. 1002–1012, 2019.

SEDIYAMA, G. C.; MELO JÚNIOR, 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, p.501-509, 2001.

SENTELHAS, P. C.; SANTOS, D. L.; MACHADO, R. E. Water deficit and water

surplus maps for Brazil, based on FAO Penman-Monteith potential evapotranspiration. **Ambiente & Água**, v.3, p.29-42, 2008.

SILVA, G.G.C. **Nutrição, crescimento e sua modelagem em povoamentos de eucalipto em resposta à disponibilidade de água e nutrientes**. 2006. 119f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MONTEIRO, Ana Flávia Martins. **Evapotranspiração no Brasil: cenário atual e projeções climáticas**. 2020. 100 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2020

SILVEIRA, C.S.; SOUZA FILHO, F.A.; COSTA, A.A.; CABRAL, S.L. Avaliação de desempenho dos modelos do CMIP5 quanto à representação dos padrões de variação da precipitação no século XX sobre a região Nordeste do Brasil, Amazônia e Bacia do Prata e análise das projeções para o cenário RCP8.5. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 317-330, 2013.

TATAGIBA, S. D.; XAVIER, T. M. T.; TORRES, H.; PEZZOPANE, J. E. M.; CECÍLIO, R. A.; ZANETTI, S.S. Determinação da máxima capacidade de retenção de água no substrato para produção de mudas de eucalipto em viveiro. **Floresta**, v. 45, p. 745-754, 2015.

TAVARES, P.S., GIAROLLA, A., CHOU, S.C., SILVA, A.J.P., LYRA, A.A., 2018. 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.; MATHER, J.R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. **Publications in climatology**, v.10, n.3, 1957.

TORRES, R. R.; MARENGO, J. A. Climate change hotspots over South America: from CMIP3 to CMIP5 multi-model datasets. **Theoretical and Applied Climatology**, v.117, p.579-587, 2014.

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

WREGE, M. S.; CARAMORI, P. H.; GARRASTAZU, M. C.; FRITZSONS, E.; PARTALA, A.; CHRISTENSEN, G. L. Plantios florestais com Pinus no Estado do Paraná e os novos cenários definidos pelas mudanças climáticas globais. **Revista do Instituto Florestal**, v. 28, n. 2, p. 159-175, 2016.

WREGE, M. S.; CARAMORI, P. H.; FRITZSONS, E.; CHRISTENSEN, G.L. Agroclimatic zoning for eucalyptus in the state of Paraná and the new scenarios defined by global climate change. **Revista Geama**. v.3, n.4, p 216-228, 2017.

ZILLI, M.; SCARABELLO, M.; SOTERRONI, A. C.; VALIN, H.; MOSNIER, A.; LECLERE, D.; HAVLIK, P.; KRAXNER, F.; LOPES, M.A.; RAMOS, F. M. The impact of climate change on Brazil's agriculture. **Science of The Total Environment**, v. 14, p. 139384, 2020.

ANEXOS

Anexo 1 – Validação entre o conjunto de dados de temperatura média do ar de nove modelos do sistema terrestre regionalizados do NEX-GDDP e dados oriundos de ponto de grade disponibilizados em Xavier et al., (2016) para o período de 1980-2005. Os dados foram extraídos para o ponto de grade mais próximo a Itajubá (22°25'S e 45°27'O).

Modelos	RQME*	(VM)**
ACCESS1-0	2,87	1,02
CCSM4	2,72	1,09
CNRM-CM5	2,79	0,98
EC-EARTH	2,30	1,02
GDFL-CM3	2,61	1,04
IPSL-CM5A-MR	2,86	1,08
MIROC5	2,54	0,92
MPI-ESM-MR	2,77	1,06
MRI-CGCM3	2,84	0,99

*RQME = raiz do quadrado médio do erro, dado por: $RQME = [\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2 / N]^{0,5}$ ** VM = Viés médio, dado por: $VM = N^{-1} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)$ (MARTINS et al., 2014). Em que E_i = valores de T_m simulados para cada MSTs (1980-2005); O_i = valores das variáveis disponibilizadas por Xavier et al. (2016). N = número de observações.

Anexo 2 – Ciclo anual de temperatura média do ar provenientes do banco de dados disponibilizados por Xavier et al., (2016) e simulados por nove modelos sistema terrestre regionalizados do NEX-GDDP para o período de 1980-2005 para Itajubá. Em cinza, dados dos modelos do sistema terrestre, em azul dados disponibilizados por Xavier et al., (2016) e em preto o ensemble dos modelos sistema terrestre.

