



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

**Produtividade do eucalipto no Brasil dirigida pelos novos
cenários do IPCC**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Rafael Gonçalves Xavier

Itajubá, MG, Brasil

2023

Produtividade do eucalipto no Brasil dirigida pelos novos cenários do IPCC

por

Rafael Gonçalves Xavier

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

Orientadora: Fabrina Bolzan Martins
Coorientadora: Flávia Fernanda Azevedo Fagundes

Itajubá, MG, Brasil
2023

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Monografia

Produtividade do eucalipto no Brasil dirigida pelos novos cenários do IPCC

elaborada por

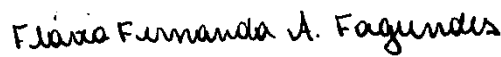
Rafael Gonçalves Xavier

Como requisito parcial para a obtenção do grau de

Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **FABRINA BOLZAN MARTINS**
Data: 27/10/2023 08:46:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>
Fabrina Bolzan Martins, Dra. (UNIFEI)
(Orientadora)


Flávia Fernanda Azevedo Fagundes, Msc. (UNIFEI)
(Coorientadora)


André Luiz dos Reis, Msc. (UNIFEI)


Cássia Gabriele Dias, Msc. (UNIFEI)

Itajubá, 10 de outubro de 2023

AGRADECIMENTOS

Quero expressar minha profunda gratidão a todos aqueles que desempenharam um papel fundamental na minha jornada até aqui:

A Deus, por todas as bênçãos concedidas e por ser minha base para superar todas as dificuldades que encontrei na graduação. A minha família, Maria Helena e Letícia, pelo amor incondicional, pelo apoio em todos os momentos difíceis e desafiadores (e foram vários) e pelo incentivo, pois sou o primeiro de toda a minha família a ingressar em uma Universidade Federal, e agora, quase me formando, sei que nada disso teria sido possível sem vocês.

Agradeço à minha orientadora, Dra. Profa. Fabrina Bolzan Martins, por todas as orientações, ensinamentos, paciência, confiança e incentivo. Desde o meu primeiro semestre da graduação ela acreditou e viu potencial em mim, e isso foi fundamental para meu amadurecimento e crescimento dentro da profissão que escolhi para minha vida. Obrigado pelas reuniões, empenho, amizade, áudios, preocupação, por me tirar da minha zona de conforto e por me fazer acreditar na minha capacidade, sempre elogiando minha escrita e me incentivando a aprender programação, o que sempre foi meu grande medo. Enfim, obrigado, obrigado e obrigado!

Agradeço também a minha coorientadora e amiga, Flávia Fagundes, pela parceria, disposição, apoio, ensinamentos e, principalmente, pelos conselhos nos momentos complicados em que tudo estava um caos. À minha grande rede de apoio da graduação: À Cássia e ao Alysson, pela amizade e auxílio em programação. Ao professor André Reis e ao Vitor Hugo Marrafon, por sempre estarem à disposição para esclarecer minhas dúvidas e prestar auxílio na revisão dos scripts.

A todos os meus amigos da graduação, em especial ao meu trio: Thales, Pedro Lucas e Guilherme, foi um privilégio dividir meus dias com vocês, obrigado pelas risadas, parceria e amizade, com certeza essa etapa da minha vida tem um pouquinho de vocês em cada parte. A meus amigos do ensino médio, Yasmin, Ana Cristina, Maria Júlia, Débora, Aline, Glaysom e Patricki, obrigado por me acompanharem nessa loucura que é a vida de universitário.

Agradeço também ao corpo docente do curso de Ciências Atmosféricas e da UNIFEI pelo profissionalismo e empenho em transmitir os conhecimentos. A todos os funcionários do IRN, por proporcionarem condições adequadas para estudar. Por fim, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão das bolsas (ID 126759/2022-7 e ID 133002/2023-3) e por fornecer investimento à pesquisa.

*À minha família,
Maria Helena, Letícia e Carlos Roberto (†)*

“E tudo que pedirdes em oração, crendo, recebereis - Mateus 21:22”

RESUMO

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

Produtividade do eucalipto no Brasil dirigida pelos novos cenários do IPCC

AUTOR: Rafael Gonçalves Xavier
ORIENTADORA: Fabrina Bolzan Martins
COORIENTADORA: Flávia Fernanda Azevedo Fagundes
Local e Data da Defesa: Itajubá, 10 de outubro de 2023.

As projeções de aumentos na temperatura do ar e alterações no regime de precipitação ao longo do século XXI podem aumentar a deficiência hídrica (DEF) e, consequentemente, impactar na produtividade do eucalipto, o qual é o gênero florestal economicamente mais importante do mundo. Diante disso, esse trabalho de conclusão de curso objetiva identificar e avaliar os impactos inerentes das projeções climáticas na produtividade potencial (PP), real (PR) e na quebra de produtividade (QP) do eucalipto no Brasil. Para atingir esses objetivos foi utilizado o modelo de produtividade (MZA-FAO) da FAO (do inglês, *Food and Agriculture Organization*) previamente calibrado e validado para o eucalipto no Brasil. Foram utilizados dados diários de temperatura mínima (T_{min} , °C), temperatura média (T_{med} , °C) e temperatura máxima (T_{max} , °C) do ar, radiação solar global (R_s , MJ m⁻² dia⁻¹) e precipitação (P , mm dia⁻¹) provenientes de 16 modelos de circulação geral (MCGs) do NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6) da nova geração do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6). As simulações de produtividade foram realizadas para o clima presente (CP, 1989-2014) e as projeções em dois períodos futuros, denominados futuro próximo (FP, 2035-2060) e distante (FD, 2075-2100), considerando dois cenários distintos de forçantes radiativas (SSP3-7.0 e SSP5-8.5). Devido aos aumentos da temperatura do ar entre ~1,5 °C e ~6,0 °C, juntamente com mudanças heterogêneas na P e na DEF, o cultivo de eucalipto para fins econômicos será inviável na região Nordeste ($PR < 50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $QP > 90\%$). Já nas regiões Norte, Sul e partes do Sudeste e Centro-Oeste o cultivo de eucalipto poderá ocorrer. Medidas adaptativas serão necessárias, principalmente nos locais onde haverá maior redução da PR, incluindo seleção e introdução de genótipos tolerantes a condições de estresse térmico e hídrico, aprimoramento das técnicas de manejo do solo e realização de subsolagens mais profundas, aplicação de irrigação suplementar, e a adoção de controle biológico para lidar com o aumento de pragas e doenças.

Palavras-chave: Deficiência hídrica. Medidas adaptativas. MZA-FAO. NEX-GDDP-CMIP6. Temperatura do ar.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Localização dos estados com maior produção de eucalipto no Brasil. Base de dados: IBÁ (2022)..... 14
- Figura 2** - Representação esquemática das etapas de cálculo do MZA-FAO calibrado para o eucalipto..... 20
- Figura 3** - Ciclo anual da temperatura do ar (mínima, média e máxima, °C), radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) e precipitação (mm mês^{-1}) para as cinco regiões do Brasil simulados por 16 MCGs do NEX-GDDP-CMIP6, *ensemble mean* e dados observados de Xavier et al. (2016) para o clima presente (1989 – 2014), e distribuição espacial do viés médio obtido pelo *ensemble mean* dos MCGs e dados observados. Painéis A-F = temperatura mínima do ar, Painéis G-L = temperatura média do ar, Painéis M-R = temperatura máxima do ar, Painéis S-X = radiação solar global, Painéis Y-DD = precipitação acumulada mensal..... 27
- Figura 4** - Mudanças projetadas (futuro menos clima presente) para a temperatura mínima do ar ($T_{\min}$, °C) (A,B,C,D), temperatura média do ar (T_{med} , °C) (E,F,G,H), temperatura máxima do ar ($T_{\max}$, °C) (I,J,K,L), radiação solar global (R_s , $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) (M,N,O,P), precipitação acumulada anual (P , mm ano^{-1}) (Q,R,S,T), evapotranspiração da cultura acumulada anual (ET_c , mm ano^{-1}) (U,V,W,X) e deficiência hídrica acumulada anual (DEF , mm ano^{-1}) (Y,Z,AA,BB) projetadas para o futuro (FP, 2035-2060 e FD, 2075-2100) no SSP3-7.0 e SSP5-8.5. As figuras foram geradas considerando o *ensemble mean* dos 16 MCGs do NEX-GDDP-CMIP6..... 29
- Figura 5** - Produtividade potencial acumulada do eucalipto no Brasil simulada no clima presente (CP, 1989-2014) e projetada para o futuro (FP, 2035-2060 e FD, 2075-2100) pelo MZA-FAO para os dois cenários (SSP3-7.0 e SSP5-8.5)..... 32
- Figura 6** - Produtividade real acumulada do eucalipto no Brasil simulada no clima presente (CP, 1989-2014) e projetada para o futuro (FP, 2035-2060 e FD, 2075-2100) pelo MZA-FAO para os dois cenários (SSP3-7.0 e SSP5-8.5) 34

Figura 7 - Quebra de produtividade (%) simulada no clima presente (CP, 1989-2014) e projetada para o futuro (FP, 2035-2060 e FD, 2075-2100) para os dois cenários (SSP3-7.0 e SSP5-8.5)	37
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores do coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (K_y , adimensional) utilizados para cada mês da rotação do eucalipto..... 22

Tabela 2 - Função de penalização por ocorrência de geada (f_{frost}) em função da idade..... 22

Tabela 3 - Função de penalização por deficiência hídrica (f_{wd}) 23

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

3-PG - *Physiological Principles in Predicting Growth*

APSIM - *Agricultural Production Systems Simulator*

BHSc - Balanço hídrico sequencial da cultura

CABALA - *CARbon BALAnce*

CAD - Capacidade de água disponível

Cc - Correção para o índice de colheita

CIAF - Correção para o índice de área foliar

CMIP3 - *Coupled Model Intercomparison Project Phase 3*

CMIP5 - *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*

CMIP6 - *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*

CO₂ - Dióxido de carbono

CORDEX - *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*

CP - Clima presente

Cr - Correção para a taxa de respiração

CRAS - Capacidade de retenção de água no solo

cTc = Coeficiente de correção relativo à fixação de CO₂ em dias claros

cTn = coeficiente de correção relativo à fixação de CO₂ em dias nublados

$\left(\frac{d}{D}\right)^2$ = Correção para a distância relativa Terra-Sol

DEF - Deficiência hídrica

DEFac - Déficit hídrico acumulado mensal

DPV - Déficit de pressão de vapor

ETc - Evapotranspiração da cultura

ETo - Evapotranspiração de referência

ETr - Evapotranspiração real

FAO - *Food and Agriculture Organization*

Fb - Produtividade fotossintética de matéria seca

Fbc - Fotossíntese bruta de em períodos com céu claro

Fbn - Fotossíntese bruta de em períodos com céu nublado

FD - Futuro distante

f_{frost} - Função de penalização de geada

Forest-DNDC - *Forest-DeNitrification-DeComposition*

FP - Futuro próximo

f_{wd} - Função de penalização por déficit hídrico

G'DAY - *Generic Decomposition And Yield*

GLDAS-2 - *NASA Global Land Data Assimilation System Version 2*

H - Ângulo horário do nascer do sol

IAF - Índice de área foliar

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores

IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*

Kc - Coeficiente da cultura

Ky - Coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico

LDAS - *Land Data Assimilation System*

MBP - Modelos baseados em processos

MCG - Modelo de circulação geral

MZA-FAO - Modelo da Zona Agroecológica

n - Insolação

N - Fotoperíodo

$\frac{n}{N}$ - Razão de insolação

ND - Número de dias da rotação

NDA - Número do dia do ano

NEX-GDDP-CMIP6 - *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections*

P - Precipitação

PP - Produtividade potencial

PPa - Produtividade potencial acumulada

PR - Produtividade real

PRa - Produtividade real acumulada

Q0 - Radiação solar no topo da atmosfera

QP - Quebra de produtividade

r - Coeficiente de correlação de Pearson

RCP - *Representative Concentration Pathways*

Rs - Radiação solar global

SSP - *Shared Socioeconomic Pathways*

TCC - Trabalho de conclusão de curso

Tmax - Temperatura máxima

Tmed - Temperatura média

Tmin - Temperatura mínima

VM - Viés médio

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

Zr - Comprimento efetivo do sistema radicular

λ - Calor latente de vaporização (MJ kg^{-1})

δ - Declinação solar (graus)

$\phi(r)$ - Latitude (radianos)

$\delta(r)$ - Declinação solar (radianos)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. MATERIAL E MÉTODOS	17
2.1. DADOS CLIMÁTICOS	17
2.2. DADOS EDÁFICOS	18
2.3. DESCRIÇÃO DO MODELO MZA-FAO	18
2.3.1 <i>Coefficientes de sensibilidade ao déficit hídrico</i>	21
2.3.2 <i>Funções de penalização de geada e déficit hídrico</i>	22
2.4. CAPACIDADE DE ÁGUA DISPONÍVEL, EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA E BALANÇO HÍDRICO SEQUENCIAL DA CULTURA	23
2.5. QUEBRA DE PRODUTIVIDADE	24
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
3.1. VALIDAÇÃO DOS MODELOS CLIMÁTICOS PARA O CLIMA PRESENTE	25
3.2. PROJEÇÕES PARA AS VARIÁVEIS QUE ALIMENTAM O MODELO DE PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO	28
3.3. IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DO EUCALIPTO NO BRASIL	31
3.4. QUEBRAS DE PRODUTIVIDADE E MEDIDAS DE ADAPTAÇÃO NO CLIMA FUTURO	36
4. CONCLUSÃO	39
5. REFERÊNCIAS	40
ANEXO	52

1. INTRODUÇÃO

O eucalipto (*Eucalyptus* sp.) é o gênero florestal economicamente mais importante do mundo, com um total de 25 milhões de hectares plantados (FLORENCIO et al., 2022; MARTINS et al., 2022). Características como alta adaptabilidade em diferentes condições edafoclimáticas (ELLI et al., 2020a; MARTINS et al., 2022), rápido crescimento (CÂMARA et al., 2020; MARTINS et al., 2022), rotação de colheita curta (ZHANG et al., 2023) e versatilidade de usos (PALMA et al., 2021; ABREU et al., 2022), atrelado ao amplo conhecimento em relação a silvicultura (GONÇALVES et al., 2013), têm impulsionado o plantio em mais de 100 países (MYBURG et al., 2014; ELLI et al., 2019a; NOLETO-DIAS et al., 2023), especialmente na América do Sul (GONÇALVES et al., 2013; MARTINS et al., 2014; RESQUIN et al., 2020).

O Brasil é líder mundial em área plantada e produtividade de eucalipto, com valor médio de $38,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (IBÁ, 2022). A área de cultivo é de aproximadamente 7,6 milhões de hectares, ~78,5% da área destinada à florestas plantadas (FERRAZ et al., 2019; ABREU et al., 2022; NOLETO-DIAS et al., 2023). Dentre os estados com maior plantio de eucalipto destacam-se Minas Gerais (30%), Mato Grosso do Sul (14%), São Paulo (13%), Bahia (8%), Rio Grande do Sul (8%) e Paraná (6%), sendo que os demais representam juntos 21% da produção brasileira (IBÁ, 2022) (Figura 1).

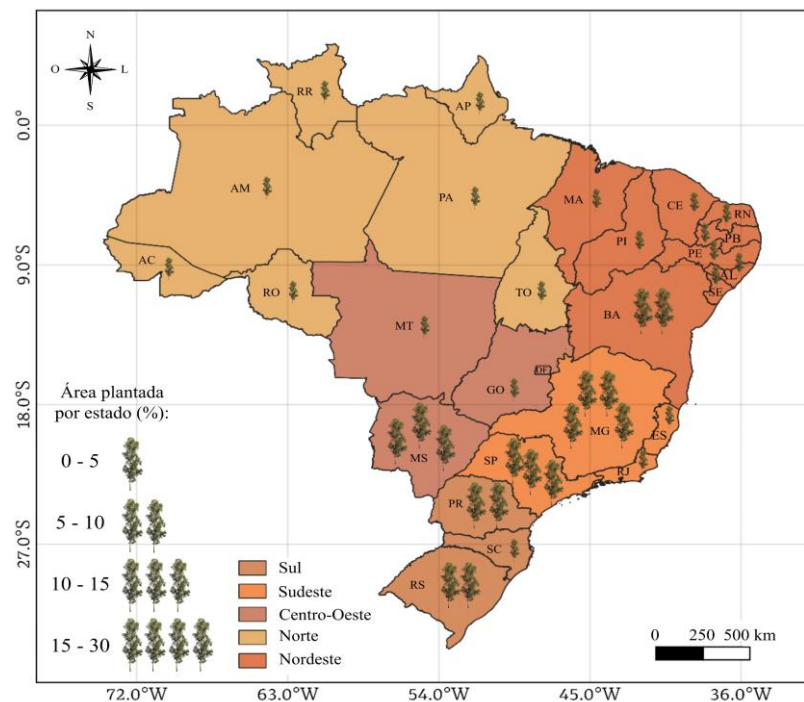


Figura 1 - Localização dos estados com maior produção de eucalipto no Brasil. Base de dados: IBÁ (2022).

A produtividade do eucalipto é penalizada principalmente pelos fatores abióticos como disponibilidade hídrica e variabilidade climática, como alterações de temperatura e radiação (GONÇALVES et al., 2013; JESUS et al., 2015; ALVARES et al., 2017; ELLI et al., 2017; HUBBARD et al., 2020). Temperaturas fora dos limites adequados (de 8,5 °C a ~40 °C) (FREITAS et al., 2017; SCOLFORO et al., 2019a; FLORÊNCIO et al., 2022) e deficiência hídrica prolongada ou intermitente (CÂMARA et al., 2020; FREITAS et al., 2021; ABREU et al., 2022; FLORÊNCIO et al., 2022; MARTINS et al., 2022) são os dois maiores limitantes para a produtividade do eucalipto no Brasil.

Como as plantações de eucalipto estão se expandindo para áreas consideradas *hotspots* de mudanças climáticas persistentes como centro-oeste e nordeste (FLORÊNCIO et al., 2022; MARTINS et al., 2022), há uma preocupação sobre os possíveis impactos que as projeções climáticas podem exercer na produtividade e qualidade do eucalipto. Alterações nos padrões de precipitação, como reduções em latitudes baixas e aumentos em latitudes altas, e aumentos na temperatura do ar (~6°C) projetadas para o território brasileiro (LLOPART et al., 2020; AVILA-DIAZ et al., 2020; ORTEGA et al., 2021; FLORÊNCIO et al., 2022) poderão ser responsáveis por estresses hídricos e térmicos, culminando, em uma série de mudanças fisiológicas, anatômicas e morfológicas (de curto a longo prazo) que podem reduzir a produtividade do eucalipto (ELLI et al., 2020a; FREITAS et al., 2021; NOLETO-DIAS et al., 2023). Portanto, avaliar os impactos das projeções climáticas na produtividade do eucalipto no Brasil é essencial para reduzir as vulnerabilidades do setor florestal e orientar medidas adaptativas eficazes para lidar com tais impactos.

A melhor forma de avaliar o impacto das projeções climáticas na produtividade é acoplando as saídas dos modelos climáticos de circulação geral (MCGs) em modelos de produtividade (ELLI et al., 2020a; PALMA et al., 2021). Dentre os MCGs, o conjunto de modelos integrantes do NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6) derivam das saídas do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) com *downscaling* estatístico (THRASHER et al., 2022). Os MCGs do NEXGDDP-CMIP6 são o estado da arte em termos de modelos climáticos e combinam cenários socioeconômicos (do inglês *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs)) com forçantes radiativas (do inglês *Representative Concentration Pathways* (RCPs)) (RIAHI et al., 2017; O'NEILL et al., 2017; ALMAZROUI et al., 2021) em uma escala mais refinada (MARTINS et al., 2023).

Os modelos de produtividade diferem-se em função dos dados de entrada, parâmetros estruturais, interface, níveis de simulação dos processos dinâmicos (tais como partição de biomassa, fotossíntese e respiração) e consideram os efeitos do clima, solo e manejo (WEI et

al., 2018; ELLI et al., 2019a,b). Dentre os diversos modelos para estimar a produtividade do eucalipto, destacam-se: 3-PG (*Physiological Principles in Predicting Growth*; LANDSBERG e WARING, 1997), PROMOD (BATTAGLIA e SANDS, 1997), Forest-DNDC (LI et al., 2000), CABALA (*Carbon Balance*; BATTAGLIA et al., 2004), G'DAY (*Generic Decomposition And Yield*; COMINS e MCMURTRIE, 1993; MARSDEN et al., 2013), APSIM (*Agricultural Production Systems Simulator*; MCCOWN et al., 1996; HOLZWORTH et al., 2014) e MZA-FAO (*Agroecological Zone Model Food and Agriculture Organization*; DOORENBOS e KASSAM, 1994; FREITAS et al., 2020). Em comum, todos os modelos necessitam de calibrações prévias para posteriormente serem alimentados por dados dos MCGs.

O MZA-FAO possui vantagens comparado aos modelos acima mencionados, pois i) inclui variáveis de entrada de fácil disponibilidade nos MCGs do NEX-GDDP-CMIP6, ii) possui código aberto permitindo que as simulações (e projeções) de produtividade sejam realizadas para qualquer coordenada, o que é uma vantagem em estudos de macroescala e iii) foi calibrado para o Brasil para diferentes genótipos e híbridos de eucalipto (FREITAS et al., 2020, 2021).

Apesar de necessários, estudos que avaliam o impacto das projeções climáticas na produtividade do eucalipto são escassos (ELLI et al., 2020a). No Brasil, os poucos estudos existentes foram realizados para escala local (ELLI et al., 2020a) ou regional (ALMEIDA et al., 2009; BAESSO et al., 2010). Por exemplo, Elli et al. (2020a) avaliou os impactos das projeções climáticas na produtividade do eucalipto em oito localidades brasileiras utilizando a nova geração do modelo APSIM. No entanto, os dados projetados de radiação solar global, umidade relativa e velocidade do vento, que são variáveis de entrada no modelo APSIM, não foram utilizadas. Tais variáveis permaneceram inalteradas em condições futuras. Ou seja, Elli et al. (2020) utilizou somente as projeções de temperatura do ar e precipitação de 10 MCGs do CMIP5 para alimentar o APSIM no futuro. Como mudanças na radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento são projetadas no Brasil em cenários climáticos futuros (DE JONG et al., 2019; PENNA et al., 2021; REBOITA et al., 2018), espera-se que os dados projetados para essas variáveis sejam utilizados para alimentar o modelo, e assim reduzir as incertezas nas projeções de produtividade. Portanto, os potenciais impactos das projeções climáticas na produtividade do eucalipto em todo o território brasileiro ainda são desconhecidos e não foram projetadas considerando os novos MCGs do NEX-GDDP-CMIP6.

Dadas as razões mencionadas, duas questões permanecem não respondidas: (i) As projeções climáticas poderão afetar a produtividade do eucalipto ao longo do século XXI? (ii) Caso a produtividade seja afetada, quais serão as áreas brasileiras mais impactadas? Para

responder essas questões, esse trabalho de conclusão de curso (TCC) objetivou analisar as alterações na produtividade potencial (PP), produtividade real (PR) e quebra de produtividade (QP) no Brasil, através do modelo MZA-FAO, impulsionadas pelos mais novos MCGs e cenários do IPCC, e propor medidas de adaptação efetivas para lidar com as possíveis ameaças.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Dados climáticos

Foram utilizados dados diários de 16 MCGs do NEX-GDDP-CMIP6. Os dados incluem temperatura mínima (T_{min} , °C), temperatura média (T_{med} , °C) e temperatura máxima (T_{max} , °C) do ar próximo à superfície, radiação solar global (R_s , MJ m⁻² dia⁻¹) e precipitação (P , mm dia⁻¹) para cada ponto de grade do território brasileiro. O banco de dados do NEX-GDDP-CMIP6 é fornecido pelo *Climate Analytics Group* e *NASA Ames Research Center* e disponibilizado pelo portal *NASA Center for Climate Simulation* (NCCS) (disponível em: <https://nex-gddp-cmip6.s3.us-west-2.amazonaws.com/index.html#NEX-GDDP-CMIP6/>). Os 16 MCGs utilizados foram: ACCESS-CM2, ACCESS-ESM1-5, CanESM5, CMCC-ESM2, EC-Earth3, EC-Earth3-Veg-LR, GFDL-ESM4, INM-CM4-8, INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0, NorESM2-LM e NorESM2-MM, escolhidos por possuírem dados para todas as variáveis utilizadas neste estudo, não apresentarem lacunas, e pelo bom desempenho em capturar os padrões climáticos para o Brasil (THRASHER et al., 2022; DIAS et al., 2023). Todos os MCGS do NEX-GDDP-CMIP6 possuem uma grade mais refinada (0,25° em latitude/longitude), sendo capazes de representar melhor as características geograficamente diversas e indicados para estudos que necessitam de melhor resolução (QIU et al., 2020; THRASHER et al., 2022).

A produtividade do eucalipto (detalhada no item 2.3) foi simulada para o clima presente (CP, 1989-2014), e projetada para dois períodos futuros: futuro próximo (FP, 2035-2060) e futuro distante (FD, 2075-2100). As projeções foram realizadas usando dois cenários: SSP3-7.0, que apresenta grandes desafios de adaptação e mitigação (RIAHI et al., 2017), com emissões que podem desencadear um forçamento radiativo de 7,0 W m⁻² no FD (O'NEILL et al., 2016), e o SSP5-8.5, que apresenta baixos desafios à adaptação combinados com grandes desafios de mitigação, com emissões capazes de produzir um forçamento radiativo de 8,5 W m⁻² no FD (O'NEILL et al., 2016). As simulações e projeções da produtividade (detalhada no item 2.3) foram realizadas individualmente para cada MCG e, posteriormente, obtido a média (*ensemble mean*) da produtividade dos 16 MCGs.

Previamente, os dados de Tmin, Tmed, Tmax, Rs e P dos 16 MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 foram validados para o CP pela comparação com os dados disponibilizados por Xavier et al. (2016) (disponível em: <https://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA>), os quais possuem alta resolução espaço-temporal, pois derivam de interpolações de dados observados de estações meteorológicas (FAGUNDES et al., 2021; MONTEIRO et al., 2021) e possuem resolução compatível com os MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 (0,25° em latitude/longitude) (XAVIER et al., 2016). Esse procedimento foi realizado a fim de avaliar a confiabilidade dos MCGs em simular os padrões de Tmin, Tmed, Tmax, Rs e P. As estatísticas usadas na validação foram: coeficiente de correlação de Pearson (r) (Equação 1) (SNEDECOR e COCHRAN, 1989) e viés médio (VM) (Equação 2) entre os dados do *ensemble mean* e os dados observados por Xavier et al. (2016).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2)}} \quad (1)$$

$$VM = \bar{S} - \bar{O} \quad (2)$$

Em que: S_i = valores diários das variáveis (Tmin, Tmed, Tmax, Rs e P) simuladas pelos 16 MCGs, O_i = valores diários observados das variáveis (Tmin, Tmed, Tmax, Rs e P) fornecidos por Xavier et al. (2016), ambos para o CP, $\bar{S}$ = valores médios do conjunto de dados simulados, $\bar{O}$ = valores médios do conjunto de dados observados, n = número de dados.

2.2. Dados edáficos

Para determinar a capacidade de retenção de água no solo (CRAS, mm cm⁻¹) foi utilizado dados de textura do solo disponibilizados pela NASA *Global Land Data Assimilation System Version 2* (GLDAS-2), por meio do portal *Land Data Assimilation System* (LDAS) (disponível em: <https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/soils>). Por brevidade, as classes texturais do banco de dados foram agrupadas em três grupos principais (BATTISTI e SENTELHAS, 2019; ELLI et al., 2020a, 2020b; FLORÊNCIO et al., 2022): (i) solos predominantemente arenosos com baixa CRAS (0,60 mm cm⁻¹), (ii) solos predominantemente francos com média CRAS (0,97 mm cm⁻¹) e (iii) solos predominantemente argilosos com alta CRAS (1,52 mm cm⁻¹).

2.3. Descrição do modelo MZA-FAO

O MZA-FAO é um modelo matemático fisiológico desenvolvido por Doorenbos e Kassam (1979) com base no modelo teórico De Wit (1965), que simula a fotossíntese bruta em escala diária de acordo com o mecanismo de fixação de carbono e a interação da planta com as

variáveis meteorológicas (FREITAS et al., 2021). Primeiramente é simulada a produtividade potencial (PP, $\text{Kg ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$) e em seguida a produtividade real (PR, $\text{Kg ha}^{-1} \text{dia}^{-1}$). Neste estudo foi utilizado o MZA-FAO previamente calibrado e validado para o eucalipto por Freitas et al. (2020). O passo a passo das etapas de cálculo da PP e PR pode ser visualizado na Figura 2.

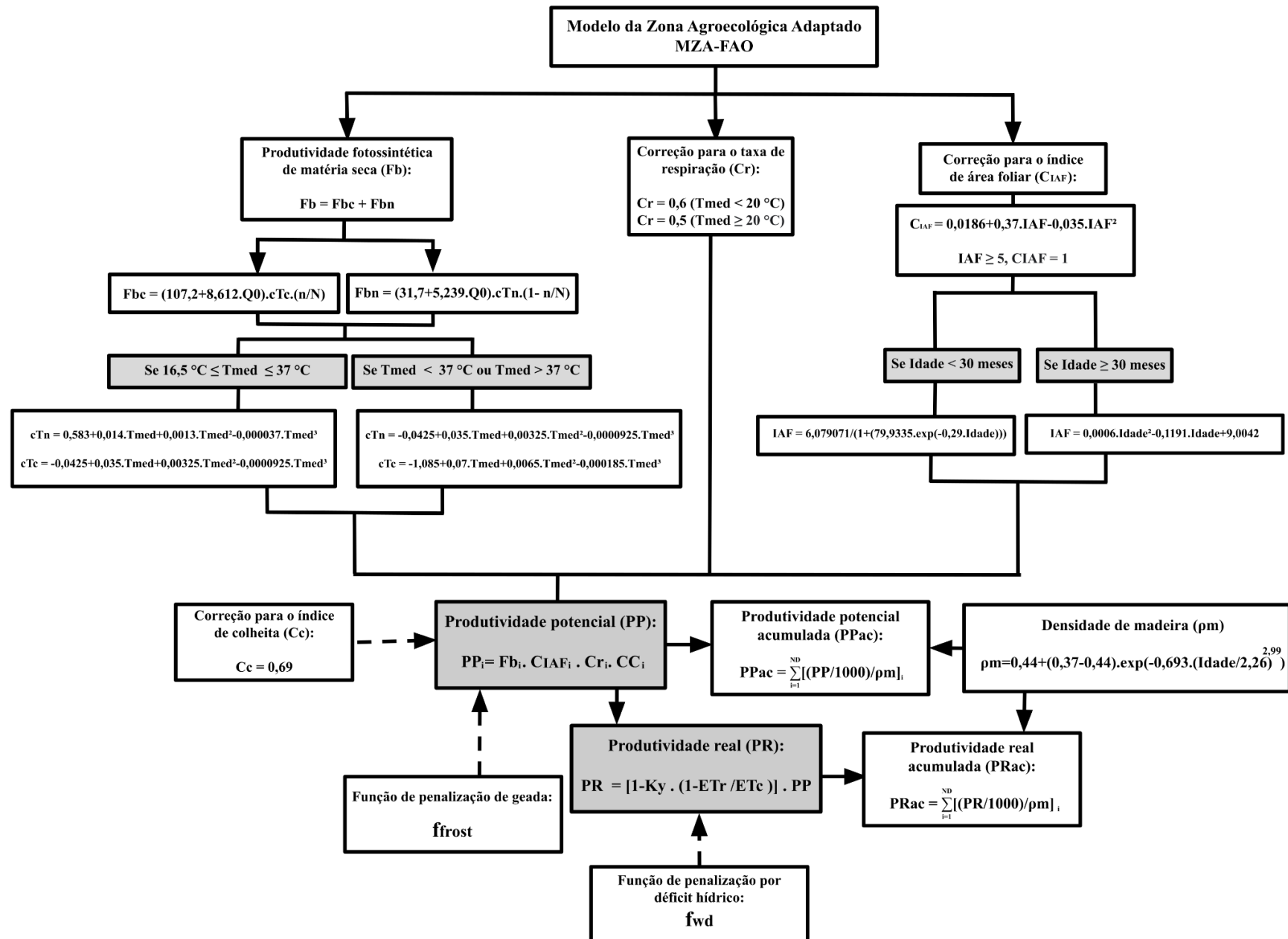


Figura 2 - Representação esquemática das etapas de cálculo do MZA-FAO calibrado para o eucalipto.

Em que: F_b = produtividade fotossintética de matéria seca ($\text{Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), F_{bc} = fotossíntese bruta em períodos com céu claro ($\text{Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), F_{bn} = fotossíntese bruta em períodos com céu nublado ($\text{Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), T_{med} = temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), Q_0 = radiação solar global no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$), cTc = coeficiente de correção relativo à fixação de CO_2 em dias claros, cTn = coeficiente de correção relativo à fixação de CO_2 em dias nublados, n/N = razão de insolação, dada por $\frac{n}{N} = \frac{\left(\frac{R_s}{Q_0}\right)^{-0,25}}{0,5}$, Cr = correção para a taxa de respiração, $CIAF$ = correção para o índice de área foliar, IAF = índice de área foliar, Cc = correção para o índice de colheita, K_y = coeficientes de sensibilidade ao déficit hídrico (detalhado no item 2.3.1), ETr = Evapotranspiração real (mm mês^{-1}) ETc = Evapotranspiração da cultura (mm mês^{-1}), ρ_m = densidade da madeira (t m^{-3}), f_{frost} = função de penalização de geada (detalhado no item 2.3.2), f_{wd} = função de penalização por déficit hídrico (detalhado no item 2.3.2), I_{idade} = meses da rotação do eucalipto desde o plantio ($I=1$) à colheita ($I=84$ meses) ($1 = \text{janeiro}, 2 = \text{fevereiro}, \dots, 13 = \text{janeiro}, \dots, 84 = \text{dezembro}$), i = i -ésimo dia do ciclo, ND = número de dias da rotação, PP = produtividade potencial ($\text{Kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$), PPa = produtividade potencial acumulada ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$), PR = produtividade real ($\text{Kg ha}^{-1} \text{ mês}^{-1}$) e, PRa = produtividade real acumulada ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$).

A radiação solar global no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$) foi obtida por:

$$Q_0 = \frac{0,0864}{\pi} \cdot 1367 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot [(H \cdot \sin\phi(r) \cdot \sin\delta(r)) + (\cos\phi(r) \cdot \cos\delta(r) \cdot \sin H)] \quad (3)$$

Em que: $\left(\frac{d}{D}\right)^2$ = distância relativa terra-sol, dada por: $\left(\frac{d}{D}\right)^2 = 1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{NDA \cdot 360}{365}\right)$, δ = declinação solar (graus), dada por: $\delta = 23,45 \cdot \sin\left[360 \cdot \left(\frac{284 + NDA}{365}\right)\right]$, NDA = Número do dia do ano (1 a 365), H = ângulo horário do nascer do sol, dado por: $H = \arccos[-1 \cdot (\text{tg}\phi(r) \cdot \text{tg}\delta(r))]$, $\phi(r)$ = latitude em radianos, $\delta(r)$ = declinação solar em radianos.

O eucalipto possui ciclo de 7 anos (84 meses). Ou seja, todas as etapas de cálculo do MZA-FAO são realizadas diariamente desde a data de plantio ($I = \text{mês } 1$) até a colheita ($I = \text{mês } 84$) para cada um dos 16 MCGs do NEX-GDDP-CMIP6. Dessa forma, as simulações e projeções do MZA-FAO foram realizadas para cada ano no CP, FP e FD nos dois SSPs (3-7.0 e 5-8.5) considerando vinte rotações consecutivas de ciclos de sete anos. Por brevidade, a data

de plantio foi fixada em 01 de janeiro de cada ano (no CP, FP e FD). Por exemplo, para o CP foi realizada a primeira simulação em 01/01/1989, com término em 31/12/1995, a segunda simulação de 01/01/1990 a 31/12/1996, enquanto a última simulação foi realizada de 01/01/2008 a 31/12/2014. De forma similar, as projeções para o FP em ambos SSPs (3-7.0 e 5-8.5) foram iniciadas em 01/01/2035 à 31/12/2041 (1ª rotação) e finalizadas em 01/01/2054 à 31/12/2060 (20ª rotação), e para ao FD foram iniciadas em 01/01/2075 à 31/12/2081 (1ª rotação), e finalizadas em 01/01/2094 a 31/12/2100 (20ª rotação).

2.3.1 Coeficientes de sensibilidade ao déficit hídrico

O coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (K_y) foi obtido mensalmente considerando o estágio de crescimento do eucalipto usando os valores calibrados por Freitas et al., (2020) (Tabela 1).

Tabela 1 - Valores do coeficiente de sensibilidade ao déficit hídrico (K_y , adimensional) utilizados para cada mês da rotação do eucalipto.

Meses	Média dos valores de K_y
1	1,4
10	1,3
30	1,7
60	1,3
84	1,0

Fonte: Adaptada de Freitas et al. (2020)

2.3.2 Funções de penalização de geada e déficit hídrico

A ocorrência de geada afeta negativamente o eucalipto (HIGA e WREGGE, 2010), limitando o desenvolvimento, crescimento e potencial produtivo. Por isso, foi utilizada a função de penalização de geada (f_{frost}) desenvolvida por Freitas et al. (2020), na qual penaliza a PP de forma multiplicativa, isto é $PP = PP_i \cdot f_{\text{frost}}$, desde $i=1$ até $i=730$ dias (2 anos), devido à menor tolerância do eucalipto a baixas temperaturas durante esse período. Os valores de f_{frost} são demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Função de penalização por ocorrência de geada (f_{frost}) em função da idade.

Temperatura mínima diária (T_{min} , °C)	f_{frost}
--	--------------------

$0 \leq T_{\min} \leq 2$	0,99
$-2 \leq T_{\min} < 0$	0,98
$-3 \leq T_{\min} < -2$	0,96
$-4 \leq T_{\min} < -3$	0,95
$T_{\min} < -4$	0,93

Fonte: Adaptada de Freitas et al. (2020)

A deficiência hídrica também afeta negativamente o eucalipto. O MZA-FAO calibrado para o eucalipto, considera a penalização por deficiência hídrica através da multiplicação de f_{wd} (Tabela 3) por PR, isto é $PR = PR_I \cdot f_{wd}$, desde $I=1$ até $I=84$ meses.

Tabela 3 - Função de penalização por deficiência hídrica (f_{wd})

Déficit hídrico acumulado mensal (DEFac, mm mês ⁻¹)	f_{wd}
$0 \leq \text{DEFac} \leq 100$	1,00
$101 \leq \text{DEFac} \leq 150$	0,93
$151 \leq \text{DEFac} \leq 200$	0,86
$201 \leq \text{DEFac} \leq 250$	0,83
$251 \leq \text{DEFac} \leq 300$	0,76
$\text{DEFac} > 300$	0,70

Fonte: Adaptada de Freitas et al. (2020)

2.4. Capacidade de água disponível, evapotranspiração de referência e balanço hídrico sequencial da cultura

A capacidade de água disponível (CAD, mm) foi obtida para cada ponto de grade pelo produto entre o comprimento efetivo do sistema radicular (Z_r , cm) do eucalipto e a CRAS (detalhado no item 2.2). O Z_r do eucalipto é variável ao longo do período de crescimento e foi obtido por Freitas et al. (2020):

$$Z_r = \begin{cases} 10, & \text{para } I = 1 \\ 85,264 \cdot \ln(I) + 10, & \text{para } 1 < I \leq 30 \\ 300, & \text{para } 30 < I \leq 84 \end{cases} \quad (4)$$

Em que: I = idade (em meses) do eucalipto.

Neste estudo, a evapotranspiração de referência (ET_o, mm dia⁻¹) foi estimada utilizando o método de Abtew (1996) (Equação 5) devido a simplicidade nos cálculos e a excelente performance espaço-temporal na estimativa da ET_o em todo o território brasileiro (MONTEIRO et al., 2021).

$$ET_o = \frac{0,01786.R_s.T_{max}}{\lambda} \quad (5)$$

Em que: ET_o = evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹); R_s = radiação solar global (MJ m⁻² dia⁻¹); T_{max} = temperatura máxima (°C); λ = calor latente de vaporização = 2,4418 MJ kg⁻¹.

O balanço hídrico sequencial da cultura (BHSc) para o eucalipto foi calculado de acordo com o método de Thornthwaite e Mather (1955, 1957), com as inicializações propostas por Dourado-Neto et al. (2010). Esse método requer como dados de entrada os valores mensais de P acumulada (mm mês⁻¹), a evapotranspiração da cultura (ET_c, mm mês⁻¹) e a CAD (mm). A P acumulada e a ET_c foram calculadas a partir dos dados diários. A ET_c diária foi obtida pelo produto entre a ET_o e o coeficiente de cultura (K_c) (ALLEN et al., 1998).

Os valores de K_c são dependentes do estágio de crescimento do eucalipto, sendo obtidos por Freitas et al. (2020):

$$K_c = \begin{cases} 0,5, & \text{se IAF} < 1,5 \\ 0,2011.IAF - 0,0075, & \text{se IAF} \geq 1,5 \end{cases} \quad (6)$$

Em que: IAF = índice de área foliar, obtido por:

$$IAF = \begin{cases} \frac{6,079071}{1+(79,9335 \cdot \exp(-0,29 \cdot I))}, & \text{se } I < 30 \\ 0,0006 \cdot I^2 - 0,1191 \cdot I + 9,0042, & \text{se } I \geq 30 \end{cases} \quad (7)$$

Em que: I = idade (em meses) do eucalipto.

2.5. Quebra de produtividade

A quebra de produtividade (QP, %) refere-se à diferença entre a PRa e PPa, devido a perdas decorrentes da geada e deficiência hídrica (ELLI et al., 2020b). Com isso, seu potencial máximo de produção não é atingido, resultando em redução na produtividade final. A QP (Equação 8) foi calculada para o CP, FP e FD (nos dois SSPs), considerando o *ensemble mean* dos MCGs, por:

$$QP = \left[1 - \frac{PRa}{PPa} \right] \cdot 100 \quad (8)$$

Em que: QP = quebra de produtividade (%), PPa = produtividade potencial acumulada (m³ ha⁻¹), PRa = produtividade real acumulada (m³ ha⁻¹), sendo ambas obtidas no final da rotação, ou seja, no I=84 meses.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Validação dos modelos climáticos para o clima presente

A performance de cada MCG e o *ensemble mean* foi analisada em duas etapas: i) individualmente para cada região (Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste) do domínio de estudo (Figura 1), por meio da análise climatológica mensal entre os dados simulados e observados e pelos valores de r , e ii) espacialmente para todo o domínio considerando o *ensemble mean* dos 16 MCGs e os dados observados. Todos os MCGs foram capazes de representar o comportamento mensal e sazonal das variáveis, com destaque para as variáveis Tmin, Tmed e Tmax. A Tmin (Figuras 3 A-E), Tmed (Figuras 3 G-K) e Tmax (Figuras 3 M-Q) possuem alto valor de correlação, principalmente para as regiões Sul e Sudeste ($r \sim 0,99$), com destaque para os modelos ACCESS-ESM1-5, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0 e NorESM2-LM.

Mesmo com os altos valores de r ($0,86 < r < 0,99$), houve pequena superestimativa nos valores diários de Tmin (Figura 3F), Tmed (Figura 3L) e Tmax (Figura 3R) principalmente na região Centro-Oeste (até 4 °C), centro-sul de Minas Gerais (até 2 °C) e na porção sudoeste da região Norte (até 2 °C). Valores elevados de VM para Tmin, Tmed e Tmax, especialmente na região Centro-Oeste podem estar associados a dificuldade dos MCGs em representar com precisão a atuação de diferentes sistemas meteorológicos sobre a região, como complexos convectivos de mesoescala e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (REBOITA et al., 2010; SANTOS et al., 2022). Além disso, a menor cobertura de dados observados devido ao menor número de estações meteorológicas disponíveis nesta região (SANTOS et al., 2023) pode impactar na ocorrência de vieses sistemáticos. Já na região Sudeste do Brasil, os vieses podem ser atribuídos à representação menos precisa da temperatura nos MCGs em locais com topografia complexa (ALMAZROUI et al., 2021; ORTEGA et al., 2021; WU et al., 2023).

Os MCGs tendem a superestimar a Rs com maior magnitude na região litorânea do Brasil desde o Sul ao Nordeste, e subestimar a P com maior magnitude na região Norte. No entanto, o viés de Rs não ultrapassa $5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (Figura 3X), e -1 a -3 mm mês^{-1} de P (Figura 3DD). O desempenho mais modesto dos MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 em simular a Rs e P foi semelhante ao encontrado por Rivera e Arnould (2020), utilizando 14 MCGs do CMIP6, Ortega et al. (2021), utilizando 49 MCGs do CMIP5 e 33 do CMIP6, Florêncio et al. (2022), utilizando 9 MCGs do CMIP5, e Oliveira et al. (2023), utilizando 50 MCGs do CMIP6, o que

é esperado, pois ambas as variáveis são mais complexas de serem simuladas pelos MCGs devido a múltiplos processos atmosféricos envolvidos (LLOPART et al., 2020).

Os vieses negativos de P são majoritariamente localizados na região Norte ($\sim 3 \text{ mm mês}^{-1}$) e podem estar relacionados a muitos fatores como: i) dificuldades dos modelos em simular a localização e intensidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) (ORTEGA et al., 2021; FERREIRA et al., 2023), ii) má representação dos processos de convecção cumulus, iii) interação biosfera-atmosfera na floresta tropical (TORRES e MARENGO, 2013; LLOPART et al., 2020; FLORÊNCIO et al., 2022) e iv) menor cobertura de dados observados devido menor número de estações meteorológicas disponíveis nesta região (FLORÊNCIO et al., 2022; MONTEIRO et al., 2021). Além disso, há uma tendência de superestimativa de até 2 mm mês^{-1} em locais entre o estado do Mato Grosso e o sul de Minas Gerais, região que sofre influência da ZCAS (PENNA et al., 2021; REBOITA et al., 2022).

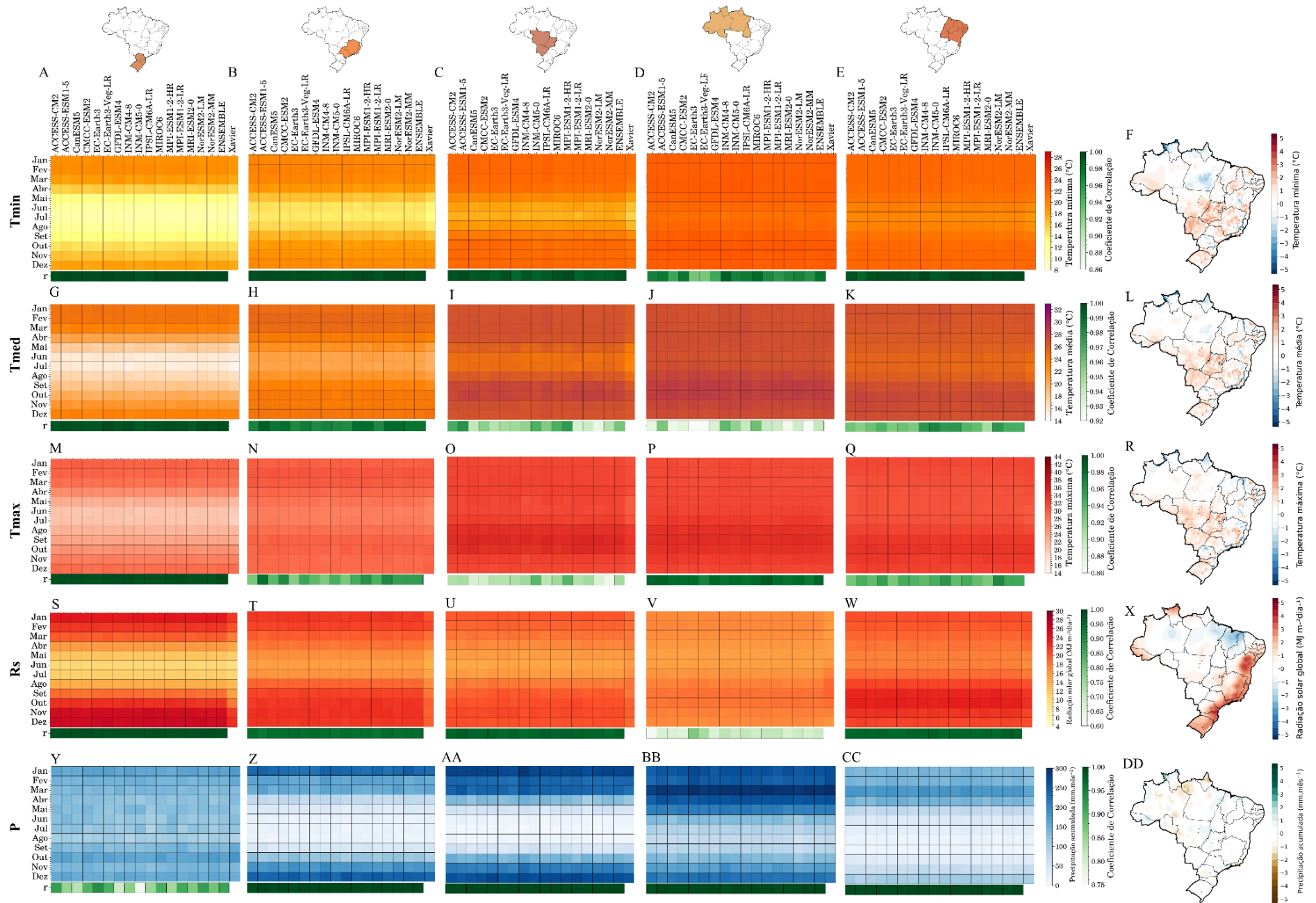


Figura 3 - Ciclo anual da temperatura do ar (mínima, média e máxima, °C), radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) e precipitação (mm mês^{-1}) para as cinco regiões do Brasil simulados por 16 MCGs do NEX-GDDP-CMIP6, *ensemble mean* e dados observados de Xavier et al. (2016) para o clima presente (1989 – 2014), e distribuição espacial do viés médio obtido pelo *ensemble mean* dos MCGs e dados observados. Painéis A-F = temperatura mínima do ar, Painéis G-L = temperatura média do ar, Painéis M-R = temperatura máxima do ar, Painéis S-X = radiação solar global, Painéis Y-DD = precipitação acumulada mensal.

3.2. Projeções para as variáveis que alimentam o modelo de produtividade do eucalipto

A figura 4 mostra a distribuição espacial das mudanças (futuro menos clima presente) para as variáveis Tmin, Tmed, Tmax, Rs, P, ETc e DEF para o FP e FD em ambos os SSPs (3-7.0 e 5-8.5). Existem variações em termos da magnitude das mudanças projetadas, dado as diferenças no forçamento radiativo entre os SSPs, no entanto os padrões são similares, sendo mais intensos no SSP5-8.5.

São projetados aumentos de Tmin de até 5 °C (Figuras 4A-D), Tmed até 5,5 °C (Figuras 4E-H) e Tmax de até 6 °C (Figura 4I-L) em todo o território brasileiro. Os maiores aumentos de Tmed concentram-se nas regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste, podendo atingir +1,5 °C (SSP3-7.0) no FP e +5,5 °C (SSP5-8.5) no FD, e os menores aumentos são projetados nas regiões Sul e Nordeste, com valores entre +1,0 °C (SSP3-7.0) no FP e +4,0 °C (SSP5-8.5) no FD. Com relação a Rs (Figuras 4M-P), exceto para a região Sul ($\sim -0,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) o padrão espacial é semelhante ao encontrado para Tmin, Tmed e Tmax, com projeções de aumentos mais intensas nas regiões Norte ($\sim +0,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), Centro-Oeste ($\sim +0,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$), centro do Sudeste ($\sim +0,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) e na porção sul do Nordeste ($\sim +0,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$). Já nas regiões litorâneas do Nordeste e do Sudeste, as projeções indicam tendências indefinidas, ou seja, sem projeções de aumento e redução na Rs. O aumento da Rs em grande parte do território brasileiro e diminuição no extremo sul do país é consistente com o que foi encontrado por De Jong et al. (2019).

Ao analisar as projeções de P (Figuras 4Q-T), nota-se que as mudanças são mais intensas no FD e SSP5-8.5. Observam-se padrões heterogêneos de mudanças, com aumento na região Sul (até $+250 \text{ mm ano}^{-1}$), e redução na região Norte (até -300 mm ano^{-1}), partes do Centro-Oeste e Sudeste (até -200 mm ano^{-1}), e parte litorânea da Nordeste e Sudeste (até -250 mm ano^{-1}), ao longo do século XXI. A redução da precipitação na região Norte se deve ao

possível enfraquecimento dos ventos alísios de nordeste até o final do século XXI, reduzindo a quantidade de umidade transportada do oceano para o continente (REBOITA et al., 2021).

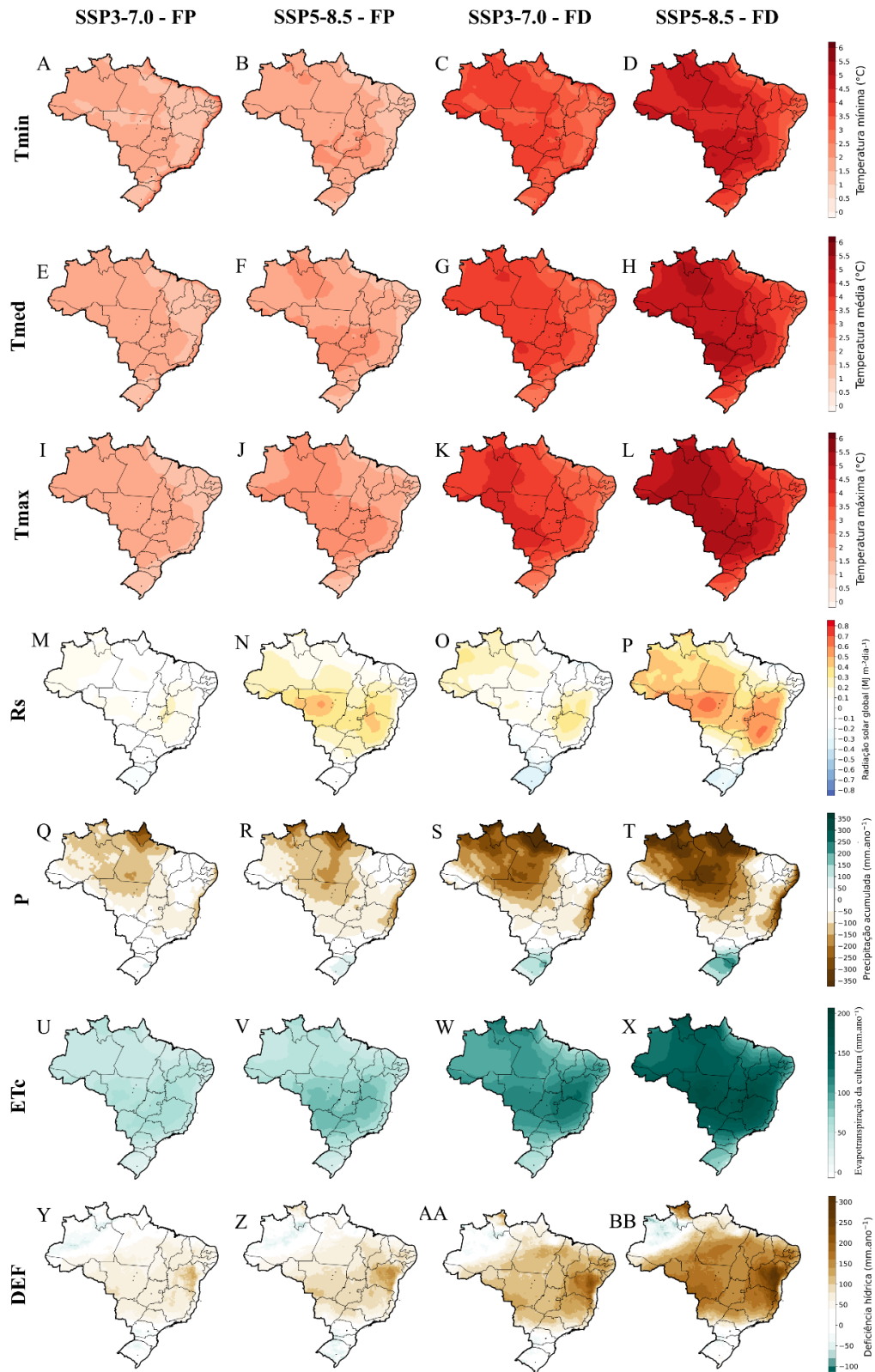


Figura 4 – Mudanças projetadas (futuro menos clima presente) para a temperatura mínima do ar (T_{min} , °C) (A,B,C,D), temperatura média do ar (T_{med} , °C) (E,F,G,H), temperatura máxima do ar (T_{max} , °C) (I,J,K,L), radiação solar global (R_s , MJ m⁻² dia⁻¹) (M,N,O,P), precipitação acumulada anual (P , mm ano⁻¹) (Q,R,S,T), evapotranspiração da cultura acumulada anual (ET_c , mm ano⁻¹) (U,V,W,X) e deficiência hídrica acumulada anual (DEF , mm ano⁻¹) (Y,Z,AA,BB) projetadas para o futuro (FP, 2035-2060 e FD, 2075-2100) no SSP3-7.0 e SSP5-8.5. As figuras foram geradas considerando o *ensemble mean* dos 16 MCGs do NEX-GDDP-CMIP6.

Os padrões de projeções para R_s e P , atrelado aos aumentos de T_{min} , T_{med} e T_{max} para todo o Brasil, irão refletir em mudanças na ET_c (Figuras 4U-X), na DEF (Figuras 4Y-BB) e, conseqüentemente, na PP e PR (item 3.3). Com relação a ET_c , nota-se que o padrão espacial é semelhante ao encontrado para as variáveis T_{min} , T_{med} e T_{max} . Observa-se aumento da ET_c em todo o país no FP, variando entre $\sim +60$ mm ano⁻¹ (SSP3-7.0) e $\sim +90$ mm ano⁻¹ (SSP5-8.5), principalmente na região Centro-Oeste, norte de Minas Gerais e sudoeste da Bahia, sendo intensificado no FD. No FD os aumentos da ET_c entre $\sim +100$ mm ano⁻¹ (SSP3-7.0) e $\sim +180$ mm ano⁻¹ (SSP5-8.5) são observados principalmente nas regiões Norte, Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste.

Quanto à DEF , são projetados aumentos entre $\sim +60$ mm ano⁻¹ (FP e SSP3-7.0) e $\sim +270$ mm ano⁻¹ (FD e SSP5-8.5), principalmente sobre a região Nordeste. A ocorrência de valores elevados de DEF na região Nordeste ocorre, principalmente, devido à escassez de chuvas e às altas temperaturas, o que também foi observado por alguns autores, como: Marengo et al. (2017); Nascimento et al. (2023); Martins et al. (2022) e Aparecido et al. (2023). Por outro lado, na região Sul e em partes da região Norte, são projetadas reduções na DEF na ordem de ~ -60 mm ano⁻¹ em ambos os cenários e períodos. Dessa forma, em regiões onde há projeções simultâneas de aumento da T_{min} , T_{med} , T_{max} e R_s , e diminuição da P , são encontrados acréscimos na ET_c , o que, conseqüentemente, induz um aumento da DEF .

De forma geral, três padrões acoplados emergem no Brasil ao analisar DEF e ET_c em conjunto com as variáveis P e T_{min} , T_{med} e T_{max} , principalmente no SSP5-8.5. O primeiro padrão acoplado é para locais com maiores magnitudes de aumento de DEF (ou seja, centro oeste do Brasil e principalmente na Bahia), resultante de uma combinação de aumentos de T_{min} , T_{med} e T_{max} (entre 3 a 6 °C), ET_c (>120 mm ano⁻¹) e redução de P (até 300 mm ano⁻¹). O segundo padrão é para localidades com pouca ou nenhuma mudança na DEF (ou seja, a maior parte da região Sul). Nessas regiões, o aumento de ET_c (em SSP5-8.5), causado pelo aumento de T_{min} , T_{med} e T_{max} (entre 3 a 4 °C), é compensado por aumentos projetados em P

(até +250 mm ano⁻¹). Por fim, um terceiro padrão é encontrado no noroeste do Amazonas, com diminuição da DEF (~ -50 a -100 mm ano⁻¹), mesmo com projeções de aumento da Tmin, Tmed e Tmax (entre 3,5 e 6 °C) e da ETc (entre 100 e 160 mm ano⁻¹)

Dessa forma, as regiões Norte, Centro-Oeste e Sudeste são as mais vulneráveis às projeções climáticas, devido às alterações projetadas de Tmin, Tmed, Tmax, Rs e P ao longo do século XXI. Esse resultado é semelhante às projeções encontradas por outros autores utilizando diferentes bases de dados, por exemplo, Florêncio et al. (2022) utilizando o *ensemble mean* de 9 MCGs do CMIP5, Llopart et al. (2020) utilizando 3 MCGs e 8 modelos climáticos regionais do *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX), Medeiros et al. (2022) utilizando 40 MCGs do CMIP3, CMIP5 e CMIP6, e Ferreira et al. (2023) utilizando 8 MCGs do CMIP6 com *downscaling* estatístico.

3.3. Impacto das mudanças climáticas na produtividade do eucalipto no Brasil

Para analisar o impacto das projeções climáticas na PPa e PRa do eucalipto, optou-se por mostrar o padrão espacial do *ensemble mean* dos 16 MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 simulados no CP e projetados no futuro (FP e FD) nos dois SSPs (3-7.0 e 5-8.5). A abordagem modelo a modelo pode ser consultada nos anexos 1 e 2.

A PPa e PRa do eucalipto, simulada no CP e projetada nos períodos futuros (FP e FD) com o MZA-FAO, são fortemente condicionadas pelas regiões brasileiras em que estão localizadas, devido, principalmente, às contrastantes variações meteorológicas existentes em diferentes áreas do país. Considerando a PPa (Figura 5) nota-se que no CP os valores estão majoritariamente concentrados na faixa entre 550 e 800 m³ ha⁻¹. As áreas mais produtivas localizam-se nas regiões Nordeste (~ 750 m³ ha⁻¹), Sudeste (~ 700 m³ ha⁻¹) e parte da região Centro-Oeste (~ 650 m³ ha⁻¹), compreendendo os estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul.

Em geral, as projeções não indicaram mudanças expressivas no comportamento da PPa no FP comparado com o CP, exceto por uma diminuição mais pronunciada na porção central do estado do Amazonas na ordem de -25 m³ ha⁻¹ (Anexo 3) em ambos os SSPs (3-7.0 e 5-8.5). Essa sutil redução na PPa no FP decorre das mudanças menos pronunciadas de Tmin (Figura 4A, B), Tmed (Figura 4E, F), Tmax (Figura 4I, J) e Rs (Figura 4M, N) projetadas. Ainda sobre o FP, observa-se um ligeiro aumento na PPa sobre os estados de Minas Gerais e Goiás (Anexo 3A, B), devido, principalmente, ao aumento da Rs ($\sim +0,4$ MJ m⁻² dia⁻¹) e da Tmed (~ 2 °C) projetado, especialmente no SSP5-8.5 (Figura 4M, N). No entanto, vale ressaltar que nem

sempre o aumento da temperatura resulta em um aumento da produtividade, a menos que esse aumento seja moderado e acompanhado por um aumento substancial da precipitação (GUSTAFSON et al., 2017).

No FD, são projetadas redução mais aparentes na PPa do eucalipto nas regiões Norte ($\sim 100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), Centro-Oeste ($\sim 75 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) e partes da região Nordeste ($\sim 50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), englobando os estados do Maranhão e Piauí, comparado com o CP (Anexo 3C, D). A redução da PPa sobre essas regiões é governada principalmente pelas projeções de aumento da T_{min} (Figura 4A, B), T_{med} (Figura 4E, F), T_{max} (Figura 4I, J) (até $+6 \text{ }^\circ\text{C}$). Esse aumento das temperaturas pode ocasionar estresses térmicos nas plantações de eucalipto, uma vez que os valores ultrapassam a faixa ideal para o crescimento e desenvolvimento da espécie (ELLI et al., 2020a), refletindo na redução da PPa.

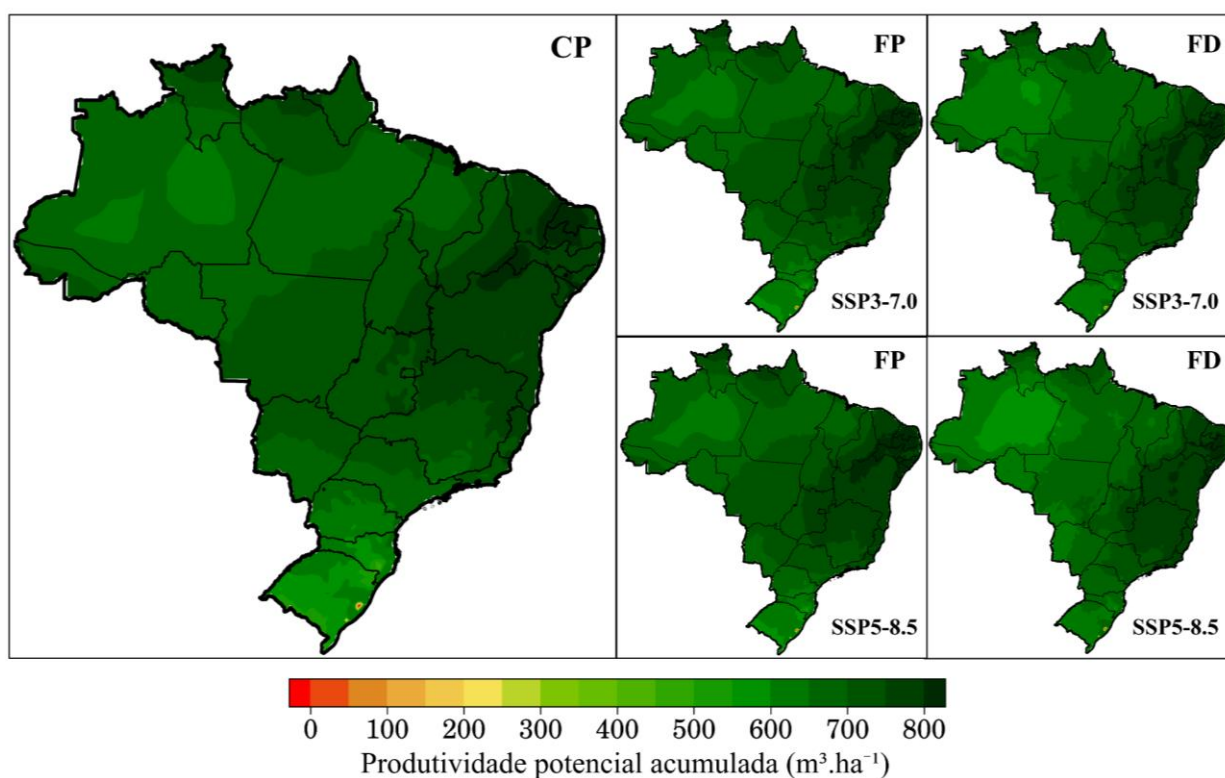


Figura 5 - Produtividade potencial acumulada do eucalipto no Brasil simulada no clima presente (CP, 1989-2014) e projetada para o futuro (FP, 2035-2060 e FD, 2075-2100) pelo MZA-FAO para os dois cenários (SSP3-7.0 e SSP5-8.5).

A PRa (Figura 6) apresentou valores menores e mais variáveis entre as regiões em comparação com a PPa, devido, principalmente, às mudanças heterogêneas da DEF no Brasil. No CP os valores são inferiores a $500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, sendo que 64,5% da PRa concentra-se na faixa

entre 0 e 250 m³ ha⁻¹ (Figura 6 e Anexo 4) e 35,5% entre 250 e 500 m³ ha⁻¹ (Figura 6 e Anexo 4). As áreas de maior produtividade no CP estão localizadas na região Sudeste (~500 m³ ha⁻¹), abrangendo os estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo e centro-sul de Minas Gerais. Além disso, também se encontram em partes da região Centro-Oeste (~450 m³ ha⁻¹), principalmente nos estados do Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e sul de Goiás, bem como em algumas áreas da região Norte (~450 m³ ha⁻¹), compreendendo os estados do Acre, Rondônia, Roraima e centro-sul da Amazonas e Pará. Ao contrário do padrão observado na PPa, na região Nordeste foram registrados valores de P_{Ra} próximos de 0 em alguns estados, como é o caso do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco e no extremo norte da Bahia. Outros locais com valores de P_{Ra} baixos localizam-se sobre a região Sul (~250 m³ ha⁻¹), no norte do estado do Amazonas (~100 m³ ha⁻¹) e Minas Gerais (~150 m³ ha⁻¹), Bahia (~100 m³ ha⁻¹) e Amapá (~250 m³ ha⁻¹).

Com relação ao FP a porcentagem de área entre 0 e 250 m³ ha⁻¹ sofreu um aumento de 3,7% (SSP3-7.0) e 4,7% (SSP5-8.5) (Figura 6 e Anexo 4), sugerindo uma redução ainda mais pronunciada da P_{Ra} comparado com o CP. Essa diminuição mais aparente é observada nas regiões Centro-Oeste (~-50 m³ ha⁻¹) e Nordeste (~-50 m³ ha⁻¹), principalmente sobre os estados do Mato Grosso e Bahia (Anexo 3), não havendo grandes diferenças entre os SSPs. Essa redução da P_{Ra} nestes locais ocorre devido ao padrão acoplado entre o aumento da DEF (Figura 4Y, Z) (~+100 mm ano⁻¹), Rs (Figura 4M, N) (~+0,5 MJ m⁻² dia⁻¹), T_{med} (Figura 4E, F) (~+2 °C) e ET_c (Figura 4U, V) (~+80 mm ano⁻¹), e redução da P (Figura 4Q, R) (~-100 mm ano⁻¹). Além disso, projeta-se um aumento da P_{Ra} sobre a região Sul (~+100 m³ ha⁻¹), governado pelo aumento de P (~+100 mm ano⁻¹) e diminuição da Rs (~-0,3 MJ m⁻² dia⁻¹), e sobre o norte do estado do Amazonas (~+50 m³ ha⁻¹), efeito da redução da DEF (~-60 mm ano⁻¹), ambos mais intensificados no SSP5-8.5.

No FD, observa-se uma redução da área entre 250 e 500 m³ ha⁻¹ em relação ao CP, com percentuais de decréscimo de 8,7% (SSP3-7.0) e 12,7% (SSP5-8.5). A região Nordeste apresenta valores de P_{Ra} ainda mais baixos do que no FP (> 100 m³ ha⁻¹), uma vez que as projeções de DEF ficam ainda mais intensas (~+250 mm ano⁻¹) (Figura 4AA-BB) nesse período. O estado brasileiro mais impactado pelas projeções climáticas é a Bahia, onde observa-se reduções da P_{Ra} entre -150 m³ ha⁻¹ e -200 m³ ha⁻¹ (Anexo 3). Os maiores valores de P_{Ra} são observados no sul de Minas Gerais (~350 m³ ha⁻¹), São Paulo (~400 m³ ha⁻¹) e Paraná (~400 m³ ha⁻¹). Na faixa litorânea que se estende desde o leste da Bahia até o Rio de Janeiro os altos valores de P_{Ra} (~400 m³ ha⁻¹) coincidem com a tendência indefinida da Rs (Figura 4 O, P) e com a diminuição da P (até -300 mm ano⁻¹) neste local (Figura 4S, T).

Além disso, em grande parte das regiões Norte e Centro-Oeste a PRa assume valores entre 150 e 250 m³ ha⁻¹, indicando condições diferentes das observadas no sul da região Sudeste e na região Sul. Isso ocorre devido às projeções intensas de aumento da Rs (até +0,7 MJ m⁻² dia⁻¹) (Figura 4O, P), Tmed (até +5 °C) (Figura 4G,H), ETc (até +150 mm ano⁻¹) (Figura 4W, X) e DEF (até +160 mm ano⁻¹), atrelado a redução substancial da P nas regiões Norte (~-350 mm ano⁻¹) e Centro-Oeste (~-150 mm ano⁻¹) (Figura 4S,T).

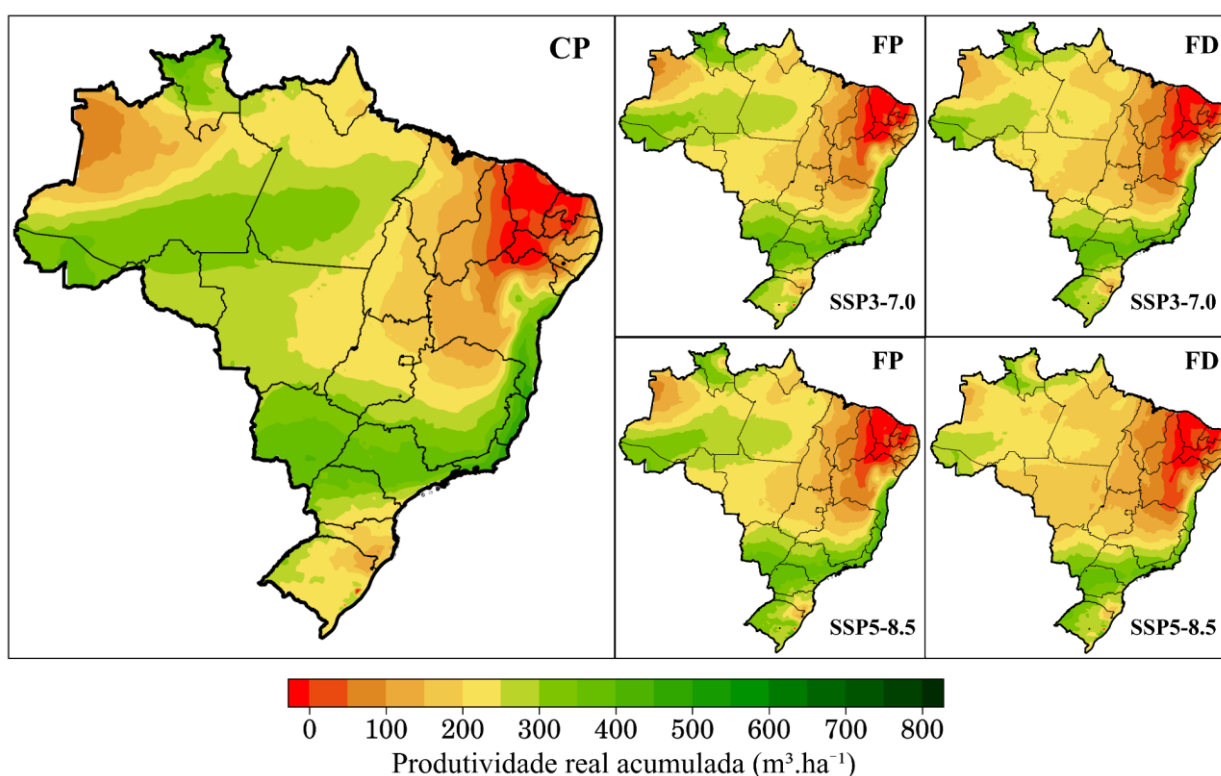


Figura 6 - Produtividade real acumulada do eucalipto no Brasil simulada no clima presente (CP, 1989-2014) e projetada para o futuro (FP, 2035-2060 e FD, 2075-2100) pelo MZA-FAO para os dois cenários (SSP3-7.0 e SSP5-8.5).

Projeções menos intensas de aumento da temperatura (Tmin, Tmed e Tmax) e Rs no Sul e Sudeste do Brasil, associadas a aumentos da P (Figura 4), resultam em menores perdas de água por ETc, levando a reduções na DEF (~-60 mm ano⁻¹). Essa tendência resulta em uma maior disponibilidade de água no solo, contribuindo, por consequência, para um aumento na PRa nessas regiões (Figura 6). No entanto, nas regiões Norte, Centro-Oeste e na porção noroeste do Nordeste, incluindo a nova fronteira agroflorestal, conhecida como MATOPIBA, que é o acrônimo referente a região composta pelos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia (FLORÊNCIO et al., 2022; BATISTA et al., 2023), são projetados aumentos consideráveis na

Tmax de até $\sim +6$ °C (SSP5-8.5 – FD) e redução da P (~ -250 mm ano⁻¹). Essas alterações irão refletir no aumento da ETc ($\sim +160$ mm ano⁻¹) e da DEF ($\sim +200$ mm ano⁻¹), o que gera uma redução da PRa. Diversas pesquisas realizadas no Brasil e em diferentes partes do mundo também confirmaram os impactos negativos da DEF no desenvolvimento e na produtividade do eucalipto (HUBBARD et al., 2010; BINKLEY et al., 2017; ELLI et al., 2019b; SCOLFORO et al., 2019b).

Mesmo com a predominância de impactos negativos no Brasil, alguns estudos mostraram padrões semelhantes ao encontrado, com aumentos na produtividade do eucalipto em locais da região Sul (ELLI et al., 2020a). Isso pode ser atribuído ao metabolismo do eucalipto, uma vez que é uma planta C3, o qual depende tanto do CO₂ presente na atmosfera quanto da disponibilidade de água para conduzir as reações de fotossíntese (BOOTH, 2017; ELLI et al., 2020a; MARTINS et al., 2022). Assim, devido à ausência de projeções de DEF (Figura 4Y, Z, AA, BB) e com temperaturas que se mantêm dentro dos limites adequados para o eucalipto (8,5 °C a ~ 40 °C) (FREITAS et al., 2017), acompanhadas de um aumento na concentração de CO₂ (RIAHY et al., 2017), é possível notar um aumento na produtividade nesta região. Esses resultados estão em concordância com o zoneamento agroclimático do eucalipto identificado por Florêncio et al. (2022).

Além disso, os altos valores de PRa encontrado no FP e FD próximo à costa atlântica do Brasil (Figura 6), abrangendo áreas dos estados do Espírito Santo, Bahia, Rio de Janeiro e Minas Gerais, concorda com o encontrado por Almeida et al. (2009) utilizando o modelo 3PG. Os autores examinaram os impactos das projeções climáticas na produtividade do eucalipto na região costeira e os resultados mostraram altas taxas de produtividade para 2030 e 2050. No estudo realizado por Caldeira et al. (2020), utilizando o modelo 3-PG, foram obtidos valores de PRa variando de 325 a 565 m³ ha⁻¹ para o estado de Rondônia entre os anos de 1980 a 2016. Esses resultados são coerentes com os encontrados, visto que os valores no estado para o CP são superiores a 300 m³ ha⁻¹.

A região Nordeste possui grande potencial agrícola (APARECIDO et al., 2022), no entanto, tem enfrentado a intensificação de extremos climáticos, como secas e déficits hídricos (MORAES et al., 2023; SILVA et al., 2023), condições desfavoráveis para o estabelecimento e manejo de plantações de eucalipto (GONÇALVES et al., 2017; VALVERDE et al., 2023). Além disso, a expansão do plantio de eucalipto para o MATOPIBA (BEZERRA et al., 2023) pode se tornar inviável (MARTINS et al., 2022), visto que os aumentos projetados de Tmed irão alterar as condições climáticas e vegetativas da região (APARECIDO et al., 2023), comprometendo assim a produtividade e o desenvolvimento agroeconômico do local.

De maneira geral, altas temperaturas são responsáveis por causar diminuição nos processos fotossintéticos e aumento da fotorrespiração (SLOT e WINTER, 2017; GAVRICHKOVA et al., 2019; ELLI et al., 2020a), principalmente em espécies pertencentes ao metabolismo C3, como o eucalipto. Além disso, temperaturas elevadas, podem resultar em estresses fisiológicos e aumento do déficit de pressão de vapor (DPV), ocasionando incrementos na evapotranspiração potencial e no déficit hídrico (PAN et al., 2015; COSTA e STRECK, 2018; PIROVANI et al., 2018; ELLI et al., 2020a; HUBBARD et al., 2020). Nesse sentido, os efeitos combinados dos estresses de temperatura e déficit hídrico limitam as trocas gasosas (transpiração e captação de CO₂ para a realização da fotossíntese) (CREEK et al., 2018; ELLI et al., 2020b; ABREU et al., 2022), gerando uma redução na condutância estomática (SÁ e TAMBARUSSI, 2023) e um desequilíbrio na relação fotorrespiração/fotossíntese (CORREIA et al., 2018; FAGUNDES et al., 2021; MARTINS et al., 2022). Tais alterações modificam os processos fisiológicos (PIROVANI et al., 2018), reduzindo a produtividade (ELLI et al., 2020a; BOOTH, 2017; GONÇALVES et al., 2017), área foliar e produção de biomassa (MASEDA e FERNÁNDEZ, 2016) do eucalipto.

3.4. Quebras de produtividade e medidas de adaptação no clima futuro

A distribuição espacial da QP (%) do eucalipto no Brasil é mostrada na figura 7. No CP, a maior parte do território brasileiro (66,58%) apresenta valores de QP entre 50% e 70%. Os maiores valores de QP são observados na região Nordeste (> 90%), onde a DEF impõe sérias restrições ao plantio de eucalipto, compreendendo os estados do Ceará, Piauí, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco, norte de Minas Gerais (~70%), e em partes das regiões Norte (~85%) e Sul (~70%) do Brasil. Em contrapartida, os menores valores são simulados na Região Sudeste (~40%), parte das regiões Centro-Oeste (~45%), Norte (~50%) e leste do estado da Bahia (~30%).

No FP o padrão espacial das projeções de QP não diferem do observado no CP, no entanto a quebra é mais intensificada nos estados do Mato Grosso (~75%), Bahia (~85%) e Minas Gerais (~75%), e uma diminuição de até ~-25% na QP é observada na região Sul, como resultado dos padrões acoplados de DEF, Rs, Tmed, P e ETc projetados (itens 3.2). Semelhante a PPa e PRa, para a QP no FP não há grandes distinções observadas entre os SSPs. No FP, no cenário SSP3-7.0, 66,02% do território brasileiro apresenta valores de QP situados na faixa de 50% a 70%. Já no cenário SSP5-8.5, essa proporção equivale a 64,29%. Por fim, no FD, a maior parte do Brasil apresenta valores de QP situados, novamente, na faixa entre 50% e 70%,

alcançando 64,43% (62,16%) no SSP3-7.0 (SSP5-8.5). A área com quebras superiores a 90% aumenta, compreendendo praticamente toda a região Nordeste e norte de Minas Gerais. As regiões Centro-Oeste e Norte apresentaram majoritariamente QP superiores a 70%, e na região Sul os valores oscilam entre 40% e 70%.

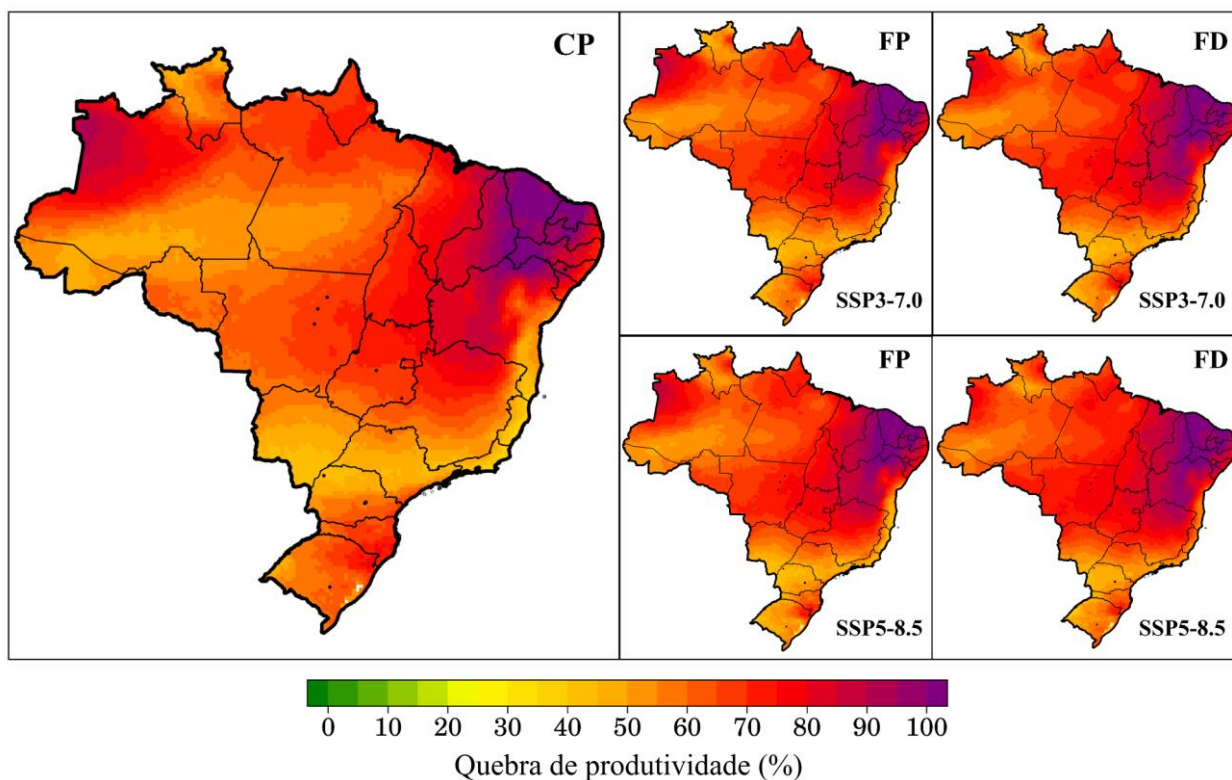


Figura 7 - Quebra de produtividade (%) simulada no clima presente (CP, 1989-2014) e projetada para o futuro (FP, 2035-2060 e FD, 2075-2100) para os dois cenários (SSP3-7.0 e SSP5-8.5).

Dessa forma, observa-se que as maiores QP ocorrem em regiões caracterizadas por níveis moderados a intensos de DEF. Alguns estudos como Elli et al. (2019b) e Freitas et al. (2021) mostraram que o déficit hídrico representa a principal causa da quebra de produtividade do eucalipto no Brasil, o que comprova o padrão identificado, consolidando a relação entre a DEF e os impactos negativos na produção de eucalipto.

Outro problema que pode ser potencializado com as mudanças climáticas, e consequentemente afetar a produtividade do eucalipto, é a ocorrência de pragas e doenças (GONÇALVES et al., 2013; ELLI et al., 2020a; RESQUIN et al., 2020; MARTINS et al., 2022; FLORÊNCIO et al., 2022; MOTA et al., 2022; HUTAPEA et al., 2023). Sob estresse térmico e hídrico, o eucalipto é suscetível aos ataques de pragas como o *Leptocybe invasa* (calcídeo de

eucalipto) (SILVA et al., 2020; CARVALHO et al., 2022; FLORÊNCIO et al., 2022; PURETZ et al., 2022; ROCHA et al., 2023), o *Costalimaita ferruginea* (besouro amarelo) (DIAS et al., 2017; VASCONCELOS et al., 2022), a *Phoracantha semipunctata* e *Phoracantha recurva* (broca do eucalipto) (SEATON et al., 2015; FLORÊNCIO et al., 2022), o *Gonipterus platensis* (Marelli) (gorgulho-do-eucalipto) (VALENTE et al., 2017; JORDAN et al., 2021; RIBEIRO et al., 2023, SÁ e TAMBARUSSI et al., 2023), o *Thaumastocoris peregrinus* (percevejo-bronzeado) (FLORÊNCIO et al., 2022; SÁ e TAMBARUSSI, 2023) e o *Ctenarytaina eucalypti* (psilídeo eucalipto) (GONÇALVES et al., 2013; FLORÊNCIO et al., 2022; SÁ e TAMBARUSSI, 2023). Com relação às doenças que mais acometem as plantações desta espécie destacam-se a *Austropuccinia psidii* (ferrugem) (SILVA et al., 2022; SILVA e ASIEGBU, 2023), o *Botrytis cinerea* (mofo-cinza) (SÁ e TAMBARUSSI, 2023; SILVA e ASIEGBU, 2023), o *Chrysosporthe cubensis* e/ou *Botryosphaeria dothidea* (cancro) (WINGFIELD et al., 2017; SÁ e TAMBARUSSI, 2023; SILVA e ASIEGBU, 2023) e manchas foliares causadas por fungos do gênero *Calonectria* spp. (SCHULTZ et al., 2015; SILVA e ASIEGBU, 2023), *Mycosphaerella* e *Teratosphaeria* (SMITH et al., 2018; ANDJIC et al., 2019; PASSADOR et al., 2021).

Por isso, deverão ser adotadas estratégias de controle biológico, como a introdução de inimigos potenciais naturais (predadores ou parasitóides) (FLORÊNCIO et al., 2022; MARTINS et al., 2022), ou a utilização de medidas não ambientalmente amigáveis, como aplicação de inseticidas como Acetamiprid, Tiacloprid, Tiamethoxam, Lambda-cialotrina e Carbosulfano (MACHADO et al., 2016; DALLACORT, 2020; FLORÊNCIO et al., 2022, MARTINS et al., 2022).

Como resultado, medidas adaptativas para enfrentar os aumentos da temperatura, redução da P e aumento da DEF devem ser empregadas para minimizar as vulnerabilidades das plantações de eucalipto e mitigar as perdas em sua produtividade. Nas áreas em que a deficiência hídrica é elevada (acima de 200 mm ano⁻¹), e consequentemente a PRa é baixa, deverão ser adotadas: i) escolha de genótipos tolerantes a temperaturas elevadas (MATUSICK et al., 2016; ELLI et al., 2020a; NÓIA JÚNIOR et al., 2020; FLORÊNCIO et al., 2022; GARCÍA et al., 2023), como *E. grandis* x *E. camaldulensis*, *E. tereticornis* x *E. brassiana*, *E. urophylla* x *E. tereticornis* e *E. urophylla* x *E. grandis* (GONÇALVES et al., 2017; HAKAMADA et al., 2020; BARBOSA et al., 2023); ii) migração das plantações para áreas de estresse reduzido (térmico e hídrico) (HUBBARD et al., 2020; SONDERMANN et al., 2022); iii) práticas de conservação do solo para aprimorar a infiltração de água e o crescimento das raízes (REICHERT et al., 2021a; REICHERT et al., 2023), como a irrigação suplementar (REIS

et al., 2021; FLORÊNCIO et al., 2022) por gotejamento e uma subsolagem mais profunda (REICHERT et al., 2021b); e, iv) diversificação em plantios comerciais de eucalipto (VASCONCELOS et al., 2022), uma vez que o plantio de culturas homogêneas em larga escala pode favorecer a proliferação e o ataque de insetos e pragas (MAFIA et al., 2014), o que será mais severo no futuro (HUTAPEA et al., 2023).

Dessa forma, à medida que as projeções climáticas traçam um panorama adverso para o cultivo de eucalipto no Brasil, a velocidade e efetividade na aplicação das medidas adaptativas assumem um papel proeminente para a manutenção da produtividade no futuro. As estratégias de adaptação, anteriormente destacadas, não apenas fornecem uma base sólida para embasar decisões, como também ampliam consideravelmente a capacidade de enfrentar as mudanças iminentes. O equilíbrio entre ações proativas e responsivas não apenas garantirá a continuidade viável dos plantios de eucalipto, mas também fortalecerá a resiliência do setor diante das complexidades ambientais futuras.

4. CONCLUSÃO

São projetados aumentos na temperatura do ar (mínima, média e máxima), radiação solar global e redução na precipitação, impactando nos padrões de evapotranspiração da cultura e deficiência hídrica. As alterações mais expressivas são observadas no futuro distante do cenário pessimista (SSP5-8.5), principalmente sobre as regiões Norte, Centro-Oeste e Nordeste. Ao longo do século XXI essas mudanças podem aumentar, impactando diretamente nas regiões produtoras de eucalipto no Brasil.

A região com redução máxima da produtividade potencial e real abrange a maior parte do Nordeste, incluindo a nova fronteira agroflorestal brasileira, o MATOPIBA, onde se projeta aumentos da temperatura do ar acima de 3,5 °C e a deficiência hídrica é superior a 160 mm ano⁻¹. Já as regiões Norte, Sul e partes do Sudeste e Centro-Oeste são aquelas que poderão ocorrer o cultivo de eucalipto.

Além disso, independente do período analisado, a maior parte do território brasileiro apresenta valores de QP concentrados na faixa entre 50% a 70%. Dessa forma, os achados deste estudo indicam que, na região Nordeste, o cultivo para fins comerciais no futuro poderá ser inviável ($PR < 50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ e $QP > 90\%$).

As regiões Sul e Sudeste do Brasil, com exceção do estado de Santa Catarina e a porção norte de Minas Gerais, serão aquelas com menor impacto negativo das projeções climáticas, sendo escolhidas para implantações futuras de eucalipto no Brasil. Nestas regiões, ainda serão

necessárias medidas adaptativas para reduzir as vulnerabilidades dos locais mais afetados, como a escolha de genótipos tolerantes a temperaturas elevadas e a situações de estresse hídrico, e técnicas de manejo do solo, como a irrigação suplementar e a subsolagem mais profunda.

5. REFERÊNCIAS

ABREU, M.C.; SOARES, A.A.V.; FREITAS, C.H.; MARTINS, F.B. Transpiration and growth responses by *Eucalyptus* species to progressive soil drying. **Journal of Forestry Research**, v. 33, n. 5, p. 1529-1543, 2022.

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-FAO Irrigation and Drainage Paper 56. **FAO**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ALMAZROUI, M.; ASHFAQ, M.; ISLAM, M.N.; RASHID, I.U.; KAMIL, S.; ABID, M.A.; O'BRIEN, E.; ISMAIL, M.; REBOITA, M.R.; SÖRENSON A.A.; ARIAS, P.A.; ALVEZ, L. M.; TIPPETT M.K.; SAEED, S.; HAARSMA, R.; DOBLAS-REYES, F.J.; SAEED, S.; KUCHARSKI, F.; NADEEM, I.; SILVA-VIDAL, Y.; RIVERA, J.A.; EHSAN, M.A.; MARTÍNEZ-CASTRO, D.; MUÑOZ, Á. G.; ALI, Md. A.; COPPOLA, E.; SYLLA, M.B. Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. **Earth Systems and Environment**, v. 5, n. 2, p. 155-183, 2021.

ALMEIDA, A.C.; SANDS, P.J.; BRUCE, J.; SIGGINS, A.W.; LERICHE, A.; BATTAGLIA, M.; BATISTA, T.R. Use of a spatial process-based model to quantify forest plantation productivity and water use efficiency under climate change scenarios. **In: 18th World IMACS/MODSIM Congress**. Cairns, Australia. p. 1816-1822, 2009.

ALVARES, C.A.; SENTELHAS, P.C.; MATTOS, E.M.; MIRANDA, A.C.; MORAES, W.B.; SILVA, P.H.M.; FURTADO, E.L.; STAPE J.L. Climatic favourability zones for *Eucalyptus* rust in Brazil. **Forest Pathology**, v. 47, n. 1, p. e12301, 2017.

ANDJIC, V.; CARNEGIE, A.J.; PEGG, G.S.; HARDY, G.E.S.J.; MAXWELL, A.; CROUS, P.W.; PÉREZ C.; WINGFIELD, M.J.; BURGESS, T.I. 23 years of research on *Teratosphaeria* leaf blight of *Eucalyptus*. **Forest Ecology and Management**, v. 443, p. 19-27, 2019.

APARECIDO, L.E.O.; LORENÇONE, P.A.; LORENÇONE, J.A.; MENESES, K.C.; MORAES, J.R.S.C.; FARIAS, M.F. Soil water seasonal and spatial variability in Northeast Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, v. 24, n. 5, p. 6136-6152, 2022.

APARECIDO, L.E.O.; DUTRA, A.F.; LORENÇONE, P.A.; NETO, F.A.; LORENÇONE, J.A.; LEITE, M.R.L. Climate change in MATOPIBA region of Brazil: a study on climate extremes in agriculture. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 153, p. 87-100, 2023.

AVILA-DIAZ, A.; BENEZOLI, V.; JUSTINO, F.; TORRES, R.; WILSON, A. Assessing current and future trends of climate extremes across Brazil based on reanalyses and earth system model projections. **Climate Dynamics**, v. 55, n. 5-6, p. 1403-1426, 2020.

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, p. 335-344, 2010.

BARBOSA, D.L.A.; LEITE, A.M.P.; OLIVEIRA, M.L.R.; FREITAS, D.A.; BRITO, B.G.S.; LANA, A.M.Q.; SANTOS, L.D.T.; VELOSO, A.L.C.; FRAZÃO, L.A. Biotic and abiotic factors influencing the initial growth of *Eucalyptus* within agrosilvopastoral systems in the Brazilian Cerrado. **Agroforestry Systems**, v. 97, n. 1, p. 1-11, 2023.

BATISTA, M.L.B.; ALVES, J.S.; ALVES, C.L.B.; ANDRÉ, D.M. Análise fatorial e espacial da modernização agrícola no MATOPIBA. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 61, n. 3, p. e261413, 2023.

BATTAGLIA, M.; SANDS, P. Modelling site productivity of *Eucalyptus globulus* in response to climatic and site factors. **Functional Plant Biology**, v. 24, n. 6, p. 831-850, 1997.

BATTAGLIA, M.; SANDS, P.; WHITE, D.; MUMMERY, D. CABALA: a linked carbon, water and nitrogen model of forest growth for silvicultural decision support. **Forest Ecology and Management**, v. 193, n. 1-2, p. 251-282, 2004.

BATTISTI, R.; SENTELHAS, P.C. Characterizing Brazilian soybean-growing regions by water deficit patterns. **Field Crops Research**, v. 240, p. 95-105, 2019.

BEZERRA, A.O.; PAZ, D.A.; SALLES, J.S.J. Territorialização do capital agroflorestal sobre o uso da terra na Região Tocantina do Maranhão. **Revista de Geografia Agrária**, v. 18, n. 49, p. 140-164, 2023.

BINKLEY, D.; CAMPOE, O.C.; ALVARES, C.; CARNEIRO, R. L.; CEGATTA, I.; 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, n. 4, p. 208-215, 2017.

CALDEIRA, D.R.M.; ALVARES, C.A.; CAMPOE, O.C.; HAKAMADA, R.E.; GUERRINI, I.A.; CEGATTA, I.R.; STAPE, J.L. Multisite evaluation of the 3-PG model for the highest phenotypic plasticity *Eucalyptus* clone in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 462, p. 117989, 2020.

CÂMARA, A.P.; VIDAURRE, G.B.; OLIVEIRA, J.C.L.; PICOLI, E.A.T.; ALMEIDA, M.N.F.; ROQUE, R.M.; FILHO, M.T.; SOUZA, H.J.P.; OLIVEIRA, T.R.; CAMPOE, O.C. Changes in hydraulic architecture across a water availability gradient for two contrasting commercial *Eucalyptus* clones. **Forest Ecology and Management**, v. 474, p. 118380, 2020.

CARVALHO, M.A.F.; PINTO, I.O.; SARMENTO, M.I.; CARVALHO, P.H.N.; SILVA, R.S.; ROCHA, J.P.L.; SARMENTO, R.A. Assessment performance of *Eucalyptus* clones attacked

by the recent invasion of *Leptocybe invasa* (Hymenoptera: Eulophidae): Implications to invasion pest management. **Journal of Asia-Pacific Entomology**, v. 25, n. 3, p. 101939, 2022.

COMINS, H.N.; MCMURTRIE, R.E. Long-Term Response of Nutrient-Limited Forests to CO₂ Enrichment; Equilibrium Behavior of Plant-Soil Models. **Ecological Applications**, v. 3, n. 4, p. 666-681, 1993.

CORREIA, B.; HANCOCK, R.D.; AMARAL, J.; GOMEZ-CADENAS, A.; VALLEDOR, L.; PINTO, G. Combined drought and heat activates protective responses in *Eucalyptus globulus* that are not activated when subjected to drought or heat stress alone. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 819, 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.2, p.1263–1279, 2018.

CREEK, D.; BLACKMAN, C.J.; BRODRIBB, T.J.; CHOAT, B.; TISSUE, D.T. Coordination between leaf, stem, and root hydraulics and gas exchange in three arid-zone angiosperms during severe drought and recovery. **Plant, Cell & Environment**, v. 41, n. 12, p. 2869-2881, 2018.

DALLACORT, S. **Controle químico de larvas de *Leptocybe invasa* (Hymenoptera: Eulophidae) em mudas de eucalipto e efeito no parasitoide *Quadrastichus mendeli* (Hymenoptera: Eulophidae)**. 2020. 63f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu-SP, 2020.

DE JONG, P.; BARRETO, T.B.; TANAJURA, C.A.S.; KOULOLOUKOUI, D.; OLIVEIRA-ESQUERRE, K.P.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E.A. Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model. **Renewable energy**, v. 141, p. 390-401, 2019.

DE WIT, C. T. Photosynthesis of leaf canopies. **Agricultural Research Reports**, n. 663, p.1-56, 1965.

DIAS, T.K.R.; PIRES, E.M.; SOUZA, A.P.; TANAKA, A.A.; MONTEIRO, E.B.; WILCKEN, C.F. The beetle *Costalimaita ferruginea* (Coleoptera: Chysomelidae) in *Eucalyptus* plantations in transition area of Amazon and Cerrado Biomes. **Brazilian Journal of Biology**, v. 78, p. 47-52, 2017.

DIAS, C.G., MARTINS, F.B., MARTINS, M.A. Climate risks and vulnerabilities of the Arabica coffee in Brazil under current and future climates considering new CMIP6 models. **Science of The Total Environment**, p. 167753, 2023.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1979. 193p. (FAO Irrigation and Drainage, Paper 33).

DOURADO-NETO, D.; LIER, Q.de.J.V.; METSELAAR, K. *et al.* General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. **Scientia Agricola**, v. 67, n. 1, p. 87-95, 2010.

ELLI, E.F.; CARON, B.O.; BEHLING, A.; ELOY, E.; SOUZA, V.Q.; SCHWERZ, F.; STOLZLE, J.R. Climatic factors defining the height growth curve of forest species. **iForest-Biogeosciences and Forestry**, v. 10, n. 3, p. 547, 2017.

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, 2019a.

ELLI, E.F.; SENTELHAS P.C.; FREITAS C.H.; CARNEIRO R.L.; ALVARES C.A. Assessing the growth gaps of *Eucalyptus* plantations in Brazil—Magnitudes, causes and possible mitigation strategies. **Forest Ecology and Management**, v. 451, p. 117464, 2019b.

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, p. 118365, 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, p. 106325, 2020b.

FAGUNDES, F.F.A.; REIS, F.Y.S.; MARTINS, F.B. A model for predicting the initial development of two native forest species under current and future climates. **Environmental and Experimental Botany**, v. 192, p. 104662, 2021.

FERRAZ, S.F.B.; RODRIGUES, C.B.; GARCIA, L.G.; ALVARES, C.A.; LIMA, W.P. Effects of *Eucalyptus* plantations on streamflow in Brazil: Moving beyond the water use debate. **Forest Ecology and Management**, v. 453, p. 117571, 2019.

FERREIRA, G.W.S.F.; REBOITA, M.S.; RIBEIRO, J.G.M.; SOUZA, C.A. Assessment of Precipitation and Hydrological Droughts in South America through Statistically Downscaled CMIP6 Projections. **Climate**, v. 11, n. 8, p. 166, 2023.

FLORÊNCIO, G.W.L.; MARTINS, F.B.; FAGUNDES, F.F.A. Climate change on *Eucalyptus* plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 188, p. 115538, 2022.

FREITAS, C.H.; 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.; 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, p. 759-776, 2020.

FREITAS, C.H.; ELLI, E.F.; SENTELHAS, P.C. On-farm assessment of eucalypt yield gaps—a case study for the producing areas of the state of Minas Gerais, Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 65, n. 10, p. 1659-1673, 2021.

GARCÍA, L.Y.; RUBILAR, R.; VALVERDE, J.C.; EMHART, V.; BASCUÑAN, L.; MEDINA, A.; BOZO, D. Morphological, physiological and carbon balance response of *Eucalyptus* genotypes under water stress. **New Forests**, p. 1-17, 2023.

GAVRICHKOVA, O.; SCARTAZZA, A.; GUIDOLOTTI, G.; KUZYAKOV, Y.; LEONARDI, L.; MATTIONI, M.; NAWROCKA, J.; PALLOZZI, E.; SKWAREK, M.; TOMCZYŃSKA, 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.

GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; HIGA, A.R.; SILVA, L.D.; ALFENAS, A.C.; STAHL, J.; FERRAZ, S.F.B.; LIMA, W.P.; BRANCALION, P.H.S.; HUBNER, A.; BOUILLET, J.D.; LACLAU, J.; NOUVELLON, Y.; EPRON, D. 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.; ÁLVARES, C.A.; ROCHA, H.T.; BRANDANI, C.B.; HAKAMADA, R. Eucalypt plantation management in regions with water stress. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 79, n. 3, p. 169-183, 2017.

GUSTAFSON, E.J.; MIRANDA, B.R.; BRUIJN, A.M.G.; STURTEVANT, B.R.; KUBISKE, M.E. Do rising temperatures always increase forest productivity? Interacting effects of temperature, precipitation, cloudiness and soil texture on tree species growth and competition. **Environmental modelling & software**, v. 97, p. 171-183, 2017.

HAKAMADA, R.E.; HUBBARD, R.M.; STAPE, J.L.; LIMA, W.P.; MOREIRA, G.G.; FERRAZ, S.F.B. Stocking effects on seasonal tree transpiration and ecosystem water balance in a fast-growing *Eucalyptus* plantation in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 466, p. 118149, 2020.

HIGA, R.C.V.; WREGGE, M.S. Zoneamento climático de *Eucalyptus grandis* para a região Sul do Brasil. Embrapa, 2010. 20 p.

HOLZWORTH, D.P.; HUTH, N.I.; DEVOIL, P.G.; ZURCHER, E.J.; HERRMANN, N.I.; MCLEAN, G.; CHENU, K.; van OOSTEROM, E.J.; SNOW, V.; MURPHY, C.; MOORE, A.D.; BROWN, H.; WHISH, J.P.M.; VERRALL, S.; FAINGES, J.; BELL, L.W.; PEAKE, A.S.; POULTON, P.L.; HOCHMAN, Z.; THORBURN, P.J.; GAYDON, D.S.; DALGLIESH, N.P.; RODRIGUEZ, D.; COX, H.; CHAPMAN, S.; DOHERTY, A.; TEIXEIRA, E.; SHARP, J.; CICHOTA, R.; VOGELER, I.; LI, F.Y.; WANG, E.; HAMMER, G.L.; ROBERTSON, M.J.; DIMES, J.P.; WHITBREAD, A.M.; HUNT, J.; REES, H.V.; MCCLELLAND, T.; CARBERRY, P.S.; HARGREAVES, J.N.G.; MACLEOD, N.; MCDONALD, C.; HARSDORF, J.; WEDGWOOD, S.; KEATING, B.A. APSIM—evolution towards a new generation of agricultural systems simulation. **Environmental Modelling & Software**, v. 62, p. 327-350, 2014.

HUBBARD, R.M.; STAPE, J.; RYAN, M.G.; ALMEIDA, A.C.; ROJAS, J. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 9, p. 1714-1721, 2010.

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, p. 118407, 2020.

HUTAPEA, F.J.; WESTON, C.J.; MENDHAM, D.; VOLKOVA, L. Sustainable management of *Eucalyptus pellita* plantations: A review. **Forest Ecology and Management**, v. 537, p. 120941, 2023.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual IBÁ**. São Paulo, 2022.

JESUS, G.L.de.; SILVA I.R.; ALMEIDA, L.F.J.; SANTOS, M.A.; LEITE, F.P.; NEVES, J.C.L. Produtividade do eucalipto, atributos físicos do solo e frações da matéria orgânica influenciadas pela intensidade de tráfego e resíduos de colheita. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1190-1203, 2015.

JORDAN, C.; SANTOS, P.L.D.; OLIVEIRA, L.R.D.S.; DOMINGUES, M.M.; GÊA, B.C.C.; RIBEIRO, M.F.; MASCARIN, G.M.; WILCKEN, C.F. Entomopathogenic fungi as the microbial frontline against the alien *Eucalyptus* pest *Gonipterus platensis* in Brazil. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 7233, 2021.

LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H.A. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, v. 95, n. 3, p. 209-228, 1997.

LI, C.; ABER, J.; STANGE, F.; BUTTERBACH-BAHL, K.; PAPEN, H. A process-orientated model of N₂O and NO emissions from forest soils: 1. Model development. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 105, n. D4, p. 4369-4384, 2000.

LLOPART, M.; REBOITA, M.S.; ROCHA, R.P. Assessment of multi-model climate projections of water resources over South America CORDEX domain. **Climate Dynamics**, v. 54, p. 99-116, 2020.

MACHADO, D.N.; COSTA, E.C.; GARLET, J.; BOSCARDIN, J.; PEDRON, L.; PERINI, C.R.; BOLZAN, L. Insecticides Assessment on *Thaumastocoris peregrinus* (Hemiptera: Thaumastocoridae) Bronze Bug Control in Laboratory Conditions. **Floresta e Ambiente**, v. 23, p. 245-250, 2016.

MAFIA, R.G.; MENDES, J.E.P.; CORASSA, J.D.N. Comparative analysis of outbreaks and damages caused by leaf beetles *Costalimaita ferruginea* (Fabricius, 1801) and *Costalimaita lurida* (Lefèvre, 1891) (Coleoptera: Chrysomelidae) in eucalypt plantations. **Revista Árvore**, v. 38, p. 829-836, 2014.

MARENGO, J.A.; TORRES, R.R.; ALVES, L.M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, p. 1189-1200, 2017.

MARSDEN, C.; NOUVELLON, Y.; LACLAU, JP.; CORBEELS, M.; MCMURTRIE, R.E.; STAPE, J.L.; EPRON, D.; MAIRE, G.L. Modifying the G'DAY process-based model to simulate the spatial variability of *Eucalyptus* plantation growth on deep tropical soils. **Forest Ecology and Management**, v. 301, p. 112-128, 2013.

MARTINS, F.B.; SOARES, C.P.B.; SILVA, G.F. Individual tree growth models for *Eucalyptus* in northern Brazil. **Scientia Agricola**, v. 71, p. 212-225, 2014.

MARTINS, F. B.; BENASSI R. B; TORRES R. R.; NETO F. A. B. Impacts of 1.5 °C and 2 °C global warming on *Eucalyptus* plantations in South America. **Science of The Total Environment**, v. 825, p. 153820, 2022.

MARTINS, F.B.; FLORÊNCIO, G.W.L.; FERREIRA, M.C.; FAGUNDES, F.F.A.; FREITAS, C.H. Predicting seedling development for two commercial forest species under current and future climates: A multi-model assessment. **Forest Ecology and Management**, v. 537, p. 120929, 2023.

MASEDA, P.H.; FERNÁNDEZ, R.J. Growth potential limits drought morphological plasticity in seedlings from six *Eucalyptus* provenances. **Tree physiology**, v. 36, n. 2, p. 243-251, 2016.

MATUSICK, G.; RUTHROF, K.X.; FONTAINE, J.B.; HARDY, G.E.S.J. *Eucalyptus* forest shows low structural resistance and resilience to climate change-type drought. **Journal of Vegetation Science**, v. 27, n. 3, p. 493-503, 2016.

MCCOWN, R.L.; HAMMER, G.L.; HARGREAVES, J.N.G.; HOLZWORTH, D.P.; FREEBAIRN, D.M. APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. **Agricultural systems**, v. 50, n. 3, p. 255-271, 1996.

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

MONTEIRO, A.F.M.; MARTINS, F.B.; TORRES, R.R.; ALMEIDA, V.H.M.; ABREU, M.C.; MATTOS, E.V. Intercomparison and uncertainty assessment of methods for estimating evapotranspiration using a high-resolution gridded weather dataset over Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 146, p. 583-597, 2021.

MORAES, J.B.; WANDERLEY, H.S.; DELGADO, R.C. Areas susceptible to desertification in Brazil and projected climate change scenarios. **Natural Hazards**, v. 116, n. 2, p. 1463-1483, 2023.

MOTA, J.D.S.; BARBOSA, L.R.; MARCHIORO, C.A. Suitable areas for invasive insect pests in Brazil and the potential impacts for *Eucalyptus* forestry. **Pest Management Science**, v. 78, n. 6, p. 2596-2606, 2022.

MYBURG, A. A.; GRATTAPAGLIA, D.; TUSKAN, G. A.; HELSTEN, U.; HAYES, R. D.; GRIMWOOD, J.; JENKINS, J.; LINDQUIST, E.; TICE, H.; BAUER, D.; GOODSTEIN, D. M.; DUBCHAK, I.; POLIAKOV, A.; MIZRACHI, E.; KULLAN, A. R. K.; HUSSEY, S. G.; PINARD, D.; VAN DER MERWE, K.; SINGH, P.; VAN JAARSVELD, I.; SILVA-JUNIOR, O. B.; TOGAWA, R. C.; PAPPAS, M. R.; FARIA, D. A.; SANSALONI, C. P.; PETROLI, C. D.; YANG, X.; RANJAN, P.; TSCHAPLINSKI, T. J.; YE, C. Y.; LI, T.; STERCK, L.; VANNESTE, K.; MURAT, F.; SOLER, M.; SAN CLEMENTE, H.; SAIDI, N.; CASSAN-WANG, H.; DUNAND, C.; HEFER, C. A.; BORNBERG-BAUER, E.; KERSTING, A. R.;

VINING, K.; AMARASINGHE, V.; RANIK, M.; NAITHANI, S.; ELSE, J.; BOYD, A. E.; LISTON, A.; SPATAFORA, J. W.; DHARMWARDHANA, P.; RAJA, R.; SULLIVAN, C.; ROMANEL, E.; ALVES-FERREIRA, M.; KÜLHEIM, C.; FOLEY, W.; CAROCHA, V.; PAIVA, J.; KUDRNA, D.; BROMMONSCHENKEL, S. H.; PASQUALI, G.; BYRNE, M.; RIGAULT, P.; TIBBITS, J.; SPOKEVICIUS, A.; JONES, R. C.; STEANE, D. A.; VAILLANCOURT, R. E.; POTTS, B. M.; JOUBERT, F.; BARRY, K.; PAPPAS, G. J.; STRAUSS, S. H.; JAISWAL, P.; GRIMA-PETTENATI, J.; SALSE, J.; VAN DE PEER, Y.; ROKHSAR, D. S.; SCHMUTZ, J. The genome of *Eucalyptus grandis*. **Nature**, v. 510, n. 7505, p. 356-362, 2014.

NASCIMENTO, R.S.; BORGES, V.P.; MELO, D.C.D. Implications of climate change on water availability in a seasonally dry tropical forest in the Northeast of Brazil. **Revista Ceres**, v. 70, p. 1-11, 2023.

NÓIA JÚNIOR, R.S.; AMARAL, G.C.; PEZZOPANE, J.E.M.; FONSECA, M.D.S.; SILVA, A.P.C.; XAVIER, T.M.T Ecophysiological acclimatization to cyclic water stress in *Eucalyptus*. **Journal of Forestry Research**, v. 31, p. 797-806, 2020.

NOLETO-DIAS, C.; PICOLI, E.A.D.T.; PORZEL, A.; WESSJOHANN, L.A.; TAVARES, J.F.; FARAG, M.A. Metabolomics characterizes early metabolic changes and markers of tolerant *Eucalyptus* ssp. clones against drought stress. **Phytochemistry**, p. 113715, 2023.

OLIVEIRA, D.M.; RIBEIRO, J.G.M.; FARIA, L.F.; REBOITA, M.S. Performance dos modelos climáticos do CMIP6 em simular a precipitação em subdomínios da América do Sul no período histórico. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 01, p. 116-133, 2023.

O'NEILL, B. C.; KRIEGLER, E.; EBI, K. L.; KEMP-BENEDICT, E.; RIAHI, K.; ROTHMAN, D. S.; RUIJVEN, B. J.; VUUREN, D. P.; BIRKMANN, J.; KOK, K.; LEVY, M.; SOLECKI, E. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. **Global environmental change**, v. 42, p. 169-180, 2017.

ORTEGA, G.; ARIAS, P. A.; VILLEGAS, J. C.; MARQUET, P. A.; NOBRE, P. Present-day and future climate over central and South America according to CMIP5/CMIP6 models. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 15, p. 6713-6735, 2021.

PALMA, J.H.N.; HAKAMADA, R.; MOREIRA, G.G.; NOBRE, S.; RODRIGUEZ, L.C.E. Using 3PG to assess climate change impacts on management plan optimization of *Eucalyptus* plantations. A case study in Southern Brazil. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, p. 2708, 2021.

PAN, S.; TIAN, H.; DANGAL, S.R.S.; YANG, Q.; YANG, J.; LU, C.; TAO, B.; REN, W.; OUYANG, Z. Responses of global terrestrial evapotranspiration to climate change and increasing atmospheric CO₂ in the 21st century. **Earth's Future**, v. 3, n. 1, p. 15-35, 2015.

PASSADOR, M.M.; MARUBAYASHI, J.M.; UZZO, R.P.; MARQUES, M.O.M.; CONCEIÇÃO, D.M.; MARQUES, A.P.S.; FURTADO, E.L. Influence of *Mycosphaerella* and *Teratosphaeria* leaf diseases on chemical composition of essential oils of *Eucalyptus globulus* and effect of these essential oils on ascospores germination. **Archives of Microbiology**, v. 203, n. 6, p. 3415-3423, 2021.

PENNA, A.C.; TORRES, R.R.; GARCIA, S.R.; MARENGO, J.A. Moisture flows on Southeast Brazil: Present and future climate. **International Journal of Climatology**, v. 41, p. E935-E951, 2021.

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, p. 405-416, 2018.

PURETZ, B.O.; GONZALEZ, C.J.; MOTA, T.A.; DALLACORT, S.; CARVALHO, V.R.; SILVA, R.M.L.; SERRÃO, J.E.; ZANUNCIO, J.C.; WILCKEN, C.F. *Quadrastichus mendeli* (Hymenoptera: Eulophidae): parasitism on *Leptocybe invasa* (Hymenoptera: Eulophidae) and first record in Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, 2022.

QIU, L.; IM, E.; KWON, H. Categorization of precipitation changes in China under 1.5 °C and 3 °C global warming using the bivariate joint distribution from a multi-model perspective. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 12, p. 124043, 2020.

REBOITA, M.S.; GAN, M.A.; ROCHA, R.P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista brasileira de meteorologia**, v. 25, p. 185-204, 2010.

REBOITA, M.S.; AMARO, T.R.; DE SOUZA, M.R. Winds: intensity and power density simulated by RegCM4 over South America in present and future climate. **Climate Dynamics**, v. 51, p. 187-205, 2018.

REBOITA, M.S.; KUKI, C.A.C.; MARRAFON, V.H.; SOUZA, C.A.; FERREIRA, G.W.S.; TEODORO, T.; LIMA, W.M. South America climate change revealed through climate indices projected by GCMs and Eta-RCM ensembles. **Climate Dynamics**, v. 58, n. 1-2, p. 459-485, 2021.

REBOITA, M.S.; TEODORO, T.A.; FERREIRA, G.W.S.; SOUZA, C.A. Ciclo de vida do sistema de monção da América do Sul: Clima presente e futuro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 01, p. 343-358, 2022.

REICHERT, J.M.; PREVEDELLO, J.; GUBIANI, P.I.; VOGELMANN, E.S.; REINERT, D.J.; CONSENSA, C.O.B.; SOARES, J.C.W.; SRINIVASAN, R. *Eucalyptus* tree stockings effect on water balance and use efficiency in subtropical sandy soil. **Forest Ecology and Management**, v. 497, p. 119473, 2021a.

REICHERT, J.M.; MORALES, C.A.S.; LIMA, E.M.; BASTOS, F.; SAMPIETRO, J.A.; ARAÚJO, E.F.; SRINIVASAN, R. Best tillage practices for early-growth of clonal *Eucalyptus* in soils with distinct granulometry, drainage and profile depth. **Soil and Tillage Research**, v. 212, p. 105038, 2021b.

REICHERT, J.M.; MORALES, B.; LIMA, E.M.; BASTOS, F.; MORALES, C.A.S.; ARAÚJO, E.F. Soil morphological, physical and chemical properties affecting *Eucalyptus* spp. productivity on Entisols and Ultisols. **Soil and Tillage Research**, v. 226, p. 105563, 2023.

REIS, F.Y.S.; MARTINS, F.B.; TORRES, R.R.; FLORÊNCIO, G.W.L.; CASSEMIRO, J.M.; MONTEIRO, V.F.C.; FERREIRA, M.C. Climate change impact on the initial development of tropical forest species: a multi-model assessment. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 145, p. 533-547, 2021.

RESQUIN, F.; DUQUE-LAZO, J.; ACOSTA-MUÑOZ, C.; RACHID-CASNATI, C.; CARRASCO-LETELIER, L.; NAVARRO-CERRILLO, R.M. Modelling current and future potential habitats for plantations of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *E. dunnii* Maiden in Uruguay. **Forests**, v. 11, n. 9, p. 948, 2020.

RIAH, K., Van VUUREN, D. P.; KLIEGER E.; EDMONDS, J.; O'NEILL, B. C.; FUJIMORI, S.; BAUER, N.; CALVIN, K., DELLINK, R.; FRICKO, O.; LUTZ, W., POPP, A.; CUARESMA, J. C.; KC, S.; LEIMBACH, M.; JIANG, L.; KRAM, T.; RAO, S.; EMMERLING J.; EBI, K.; HASEGAWA, T.; HAVLIK, P.; HUMPENÖDER, F.; SILVA, L. A.; SMITH, S.; STEHFEST, E.; DROUET, L.; KREY, V.; LUDERER, G.; HARMSSEN, M.; TAKAHASHI, K.; BAUMSTARK, L.; DOELMAN, J. C.; KAINUMA, M.; KLIMONT Z.; MARANGONI, G.; LOTZE-CAMPEN, H.; OBSERTEINER, M.; TABEAU, A.; TAVONI, M. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. **Global environmental change**, v. 42, p. 153-168, 2017.

RIBEIRO, M.F.; REZENDE, D.A.N.; FREITAS, R.G.; BRITO, M.D.; SOLCE, G.N.; SOUZA, C.D.; BUNERI, I.D.; ZANUNCIO, J.C.; WILCKEN, C.F. First detection of *Gonipterus platensis* (Coleoptera: Curculionidae) and its parasitoid *Anaphes nitens* (Hymenoptera: Mymaridae) in *Eucalyptus* plantations in Minas Gerais, Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 83, p. e271694, 2023.

RIVERA, J.A.; ARNOULD, G. Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: Climatic features and long-term trends (1901–2014). **Atmospheric Research**, v. 241, p. 104953, 2020.

ROCHA, J.P.L.; NUNES, T.V.; RODRIGUES, J.N.; LIMA, N.M.P.; ROCHA, P.A.L.; PINTO, I.O.; SARMENTO, M.I.; ARAÚJO, W.L.; MORAES, C.B.; SARMENTO, R.A. Morphophysiological responses in *Eucalyptus* demonstrate the potential of the entomopathogenic fungus *beauveria bassiana* to promote resistance against the galling wasp *Leptocybe invasa*. **Forests**, v. 14, n. 7, p. 1349, 2023.

SÁ, L.F.; TAMBARUSSI, E.V. Melhoramento Genético como Estratégia de Gestão da Produtividade Florestal. **Revista do Instituto Florestal**, v. 35, n. 1, p. 99-112, 2023.

SANTOS, E.M.D; GAIO, D.C.; PAULO, S.R.; BIUDES, M.S.; MACHADO, N.G.; SANTOS, L.O.F. Detecção dos extremos climáticos e suas relações com os índices oceânicos para quatro estações meteorológicas do estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 03, p. 1180-1195, 2022.

SANTOS, L.O.F.D.; MACHADO, N.G.; BIURDES, M.S.; GELI, H.M.E.; QUERINO, C.A.S.; RUHOFF, A.L.; IVO, I.O.; NETO, N.L. Trends in Precipitation and Air Temperature Extremes and Their Relationship with Sea Surface Temperature in the Brazilian Midwest. **Atmosphere**, v. 14, n. 3, p. 426, 2023.

SCHULTZ, B.; JUNIOR, J.A.S.; AUER, C.G.; SANTOS, A.F. Impacto da mancha foliar causada por *Cylindrocladiumandelabrum* em plantios jovens de *Eucalyptus benthamii* em Rio Negrinho-SC. **Ciência Florestal**, v. 25, p. 307-316, 2015.

SCOLFORO, H.F.; MCTAGUE, J.P.; BURKHART, H.; ROISE, J.; 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, 2019a.

SCOLFORO, H.F.; MCTAGUE, J.P.; BURKHART, H.; ROISE, J.; MCCARTER, J.; ALVARES, C.A.; STAPE, J.L. Stand-level growth and yield model system for clonal eucalypt plantations in Brazil that accounts for water availability. **Forest Ecology and Management**, v. 448, p. 22-33, 2019b.

SEATON, S.; MATUSICK, G.; RUTHROF, K.X.; HARDY, G.E.S.J. Outbreak of *Phoracantha semipunctata* in response to severe drought in a Mediterranean *Eucalyptus* forest. **Forests**, v. 6, n. 11, p. 3868-3881, 2015.

SILVA, P.H.M.; JUNQUEIRA, L.R.; ARAUJO, M.J.; WILCKEN, C.F.; MORAES, M.L.T.; PAULA, R.C. Susceptibility of eucalypt taxa to a natural infestation by *Leptocybe invasa*. **New Forests**, v. 51, p. 753-763, 2020.

SILVA, L.G.; JÚNIOR, W.C.D.J.; PEZZOPANE, J.E.M.; ALVES, F.R.; MORAES, W.B.; PIROVANI, D.B.; GONÇALVES, M.R.; AMARAL, J.F.T.; FILHO, P.A.G.; CURTY, T.A.; CARVALHO, J.R.; SANTOS, A.R.D. Evasive planning for the management of *Eucalyptus* rust *Austropuccinia psidii* for Espírito Santo State, Brazil. **Forests**, v. 13, n. 5, p. 646, 2022.

SILVA, X.; ASIEGBU, F.O. *Eucalyptus* fungal diseases. **Forest Microbiology**, v. 3, p. 313-337, 2023.

SILVA, J.L.B.; MOURA, G.B.A.; SILVA, M.V.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F.; JARDIM, A.M.R.F.; REFATI, D.C.; LIMA, R.C.C.; CARVALHO, A.A.; FERREIRA, M.B.; BRITO, J.I.B.; GUEDES, R.V.S.; LOPES, P.M.O.; NÓBREGA, R.S.; PANDORFI, H.; BEZERRA, A.C.; BATISTA, P.H.D.; JESUS, F.L.F.; SANCHES, A.C.; SANTOS, R.C. Environmental degradation of vegetation cover and water bodies in the semiarid region of the Brazilian Northeast via cloud geoprocessing techniques applied to orbital data. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 121, p. 104164, 2023.

SLOT, M.; WINTER, K. Photosynthetic acclimation to warming in tropical forest tree seedlings. **Journal of Experimental Botany**, v. 68, n. 9, p. 2275-2284, 2017.

SMITH, A.H.; POTTS, B.M.; RATKOWSKY, D.A.; PINKARD, E.A.; MOHAMMED, C.L. Association of *Eucalyptus globulus* leaf anatomy with susceptibility to *Teratosphaeria* leaf disease. **Forest Pathology**, v. 48, n. 2, p. e12395, 2018.

SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. **Statistical Methods**, 8th ed. Iowa State University Press, Ames, 1989.

SONDERMANN, M.; CHOU, S.C.; LYRA, A.; LATINOVIC, D.; SIQUEIRA, G.C.; JUNIOR, W.C.; GIORNES, E.; LEITE, F.P. Climate change projections and impacts on the *Eucalyptus*

plantation around the Doce River basin, in Minas Gerais, Brazil. **Climate Services**, v. 28, p. 100327, 2022.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, R.J. The water Balance. New Gersey: Laboratory of Climatology, v. 8, 1955, 104 p. (Publication in Climatology).

THORNTHWAITE, C.W., MATHER, J.R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Johns Hopkins University, **Laboratory in Climatology Publications in Climatology**, v. 10, n. 3, 1957.

THRASHER, B.; WANG, W.; MICHAELIS, A.; MELTON, F.; LEE, T.; NEMANI, R. NASA global daily downscaled projections, CMIP6. **Scientific Data**, v. 9, n. 1, p. 262, 2022.

TORRES, R.R.; MARENGO, J.A. Uncertainty assessments of climate change projections over South America. **Theoretical and applied climatology**, v. 112, p. 253-272, 2013.

VALENTE, C.; GONÇALVES, C.I.; REIS, A.; BRANCO, M. Pre-selection and biological potential of the egg parasitoid *Anaphes inexpectatus* for the control of the *Eucalyptus* snout beetle, *Gonipterus platensis*. **Journal of Pest Science**, v. 90, p. 911-923, 2017.

VALVERDE, J.C.; RUBILAR, R.; BARRIENTOS, G.; MEDINA, A.; PINCHEIRA, M.; EMHART, V.; ZAPATA, A.; BOZO, D.; ESPINOZA, Y.; CAMPOE, O.C. Differences in rainfall interception among *Eucalyptus* genotypes. **Trees**, v. 37, p. 1189-1200, 2023.

VASCONCELOS, D.C.; KUNAST, T.B.S.; PIRES, E.M.; CORASSA, J.N. How can global climate change influence the geographic distribution of the *Eucalyptus* yellow beetle? Modeling and prediction for Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 82, p. e265046, 2022.

WEI, L.; ZHOU, H.; LINK, T.E.; KAVANAGH, K.L.; HUBBART, J.A.; DU, E.; HUDAK, A.T.; MARSHALL, J.D. Forest productivity varies with soil moisture more than temperature in a small montane watershed. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.259, p.211-221, 2018.

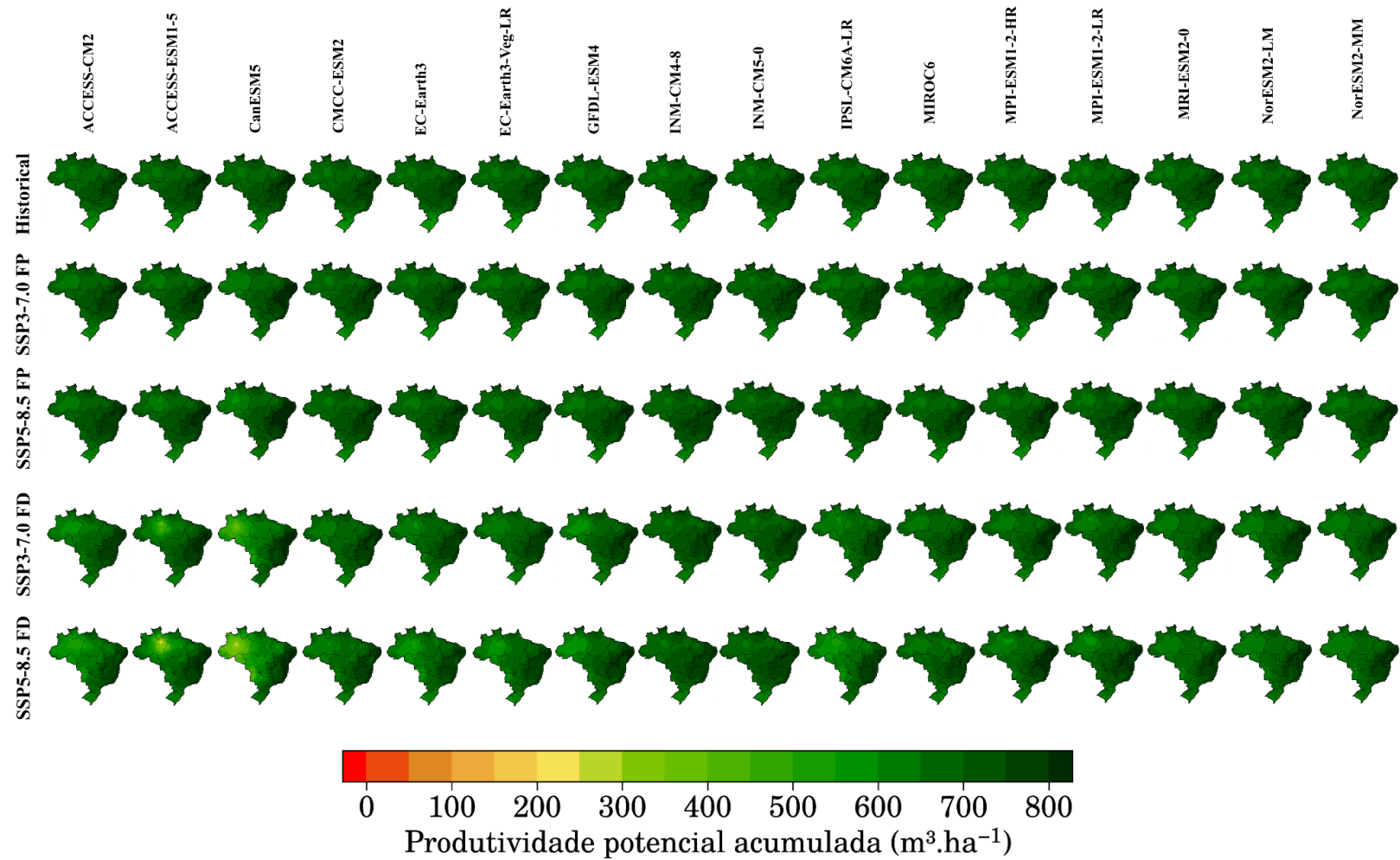
WINGFIELD, M.J.; SLIPPERS, B.; WINGFIELD, B.D.; BARNES, I. The unified framework for biological invasions: a forest fungal pathogen perspective. **Biological Invasions**, v. 19, p. 3201-3214, 2017.

WU, F.; JIAO, D.; YANG, X.; CUI, Z.; ZHANG, H.; WANG, Y. Evaluation of NEX-GDDP-CMIP6 in simulation performance and drought capture utility over China-based on DISO. **Hydrology Research**, v. 54, n. 5, p. 703-721, 2023.

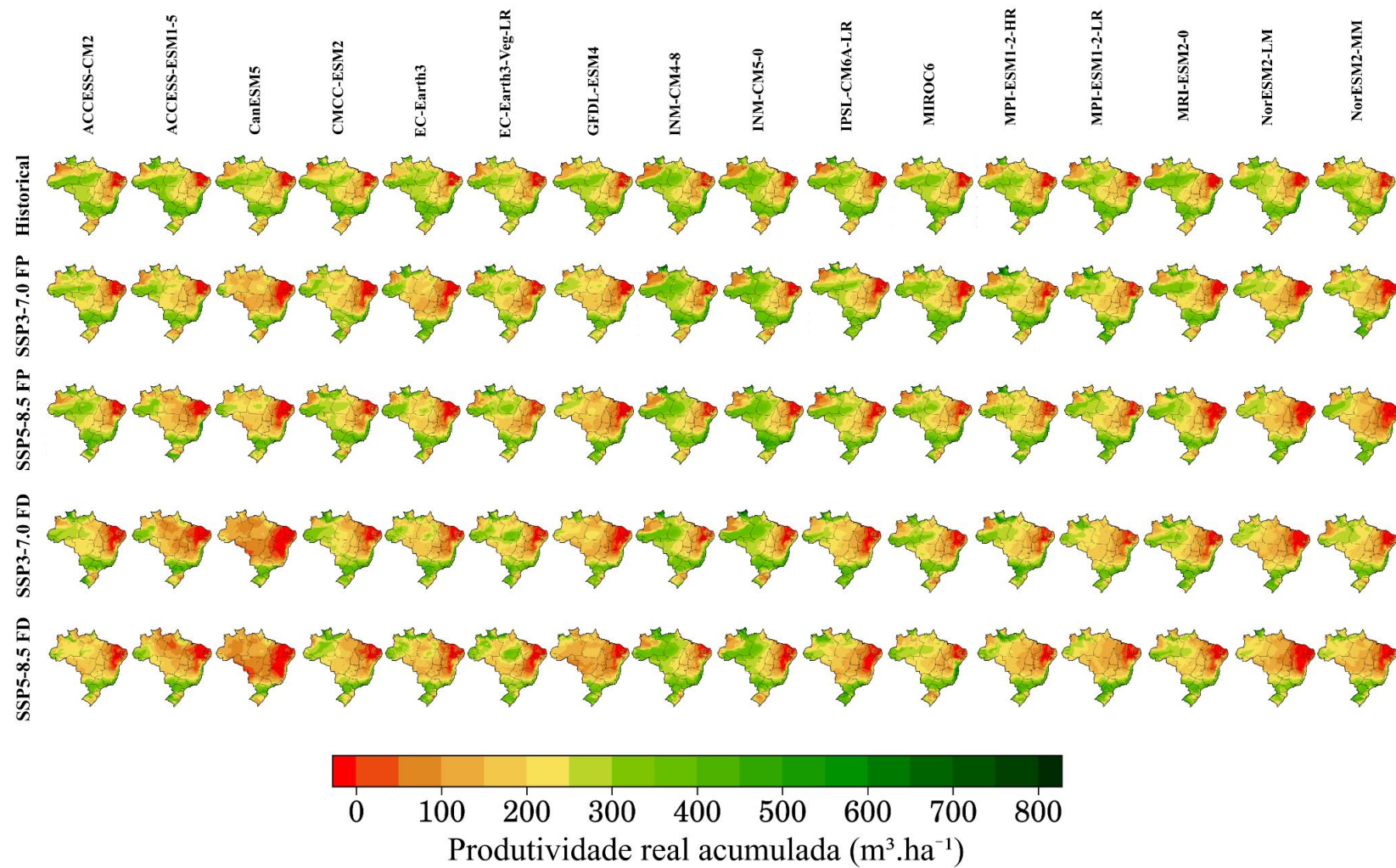
XAVIER, A.C.; KING, C. W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, p. 2644-2659, 2016.

ZHANG, Y.; LU, D.; JIANG, X.; LI, Y.; LI, D. Forest structure simulation of *Eucalyptus* plantation using remote-sensing-based forest age data and 3-PG model. **Remote Sensing**, v. 15, n. 1, p. 183, 2023.

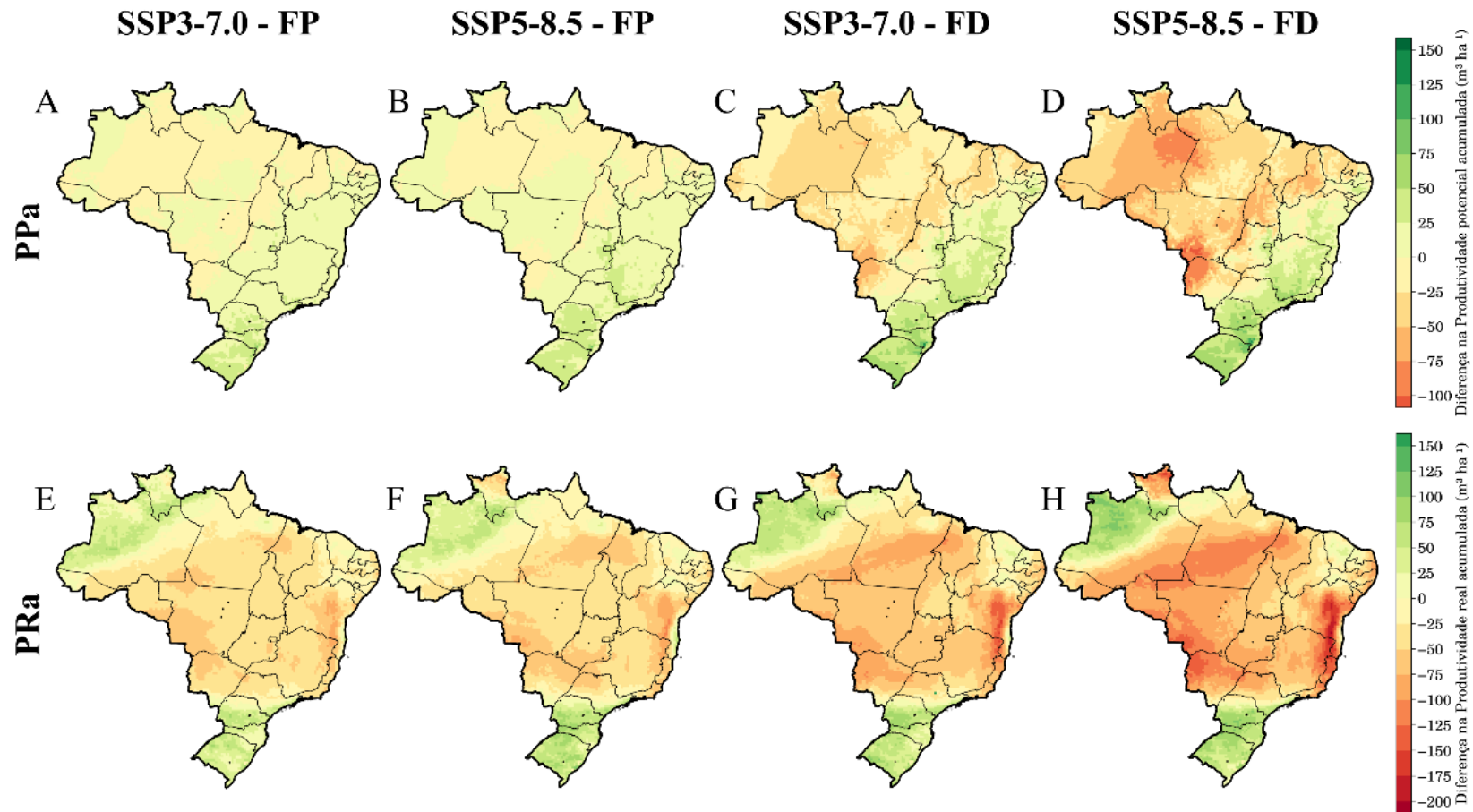
ANEXOS



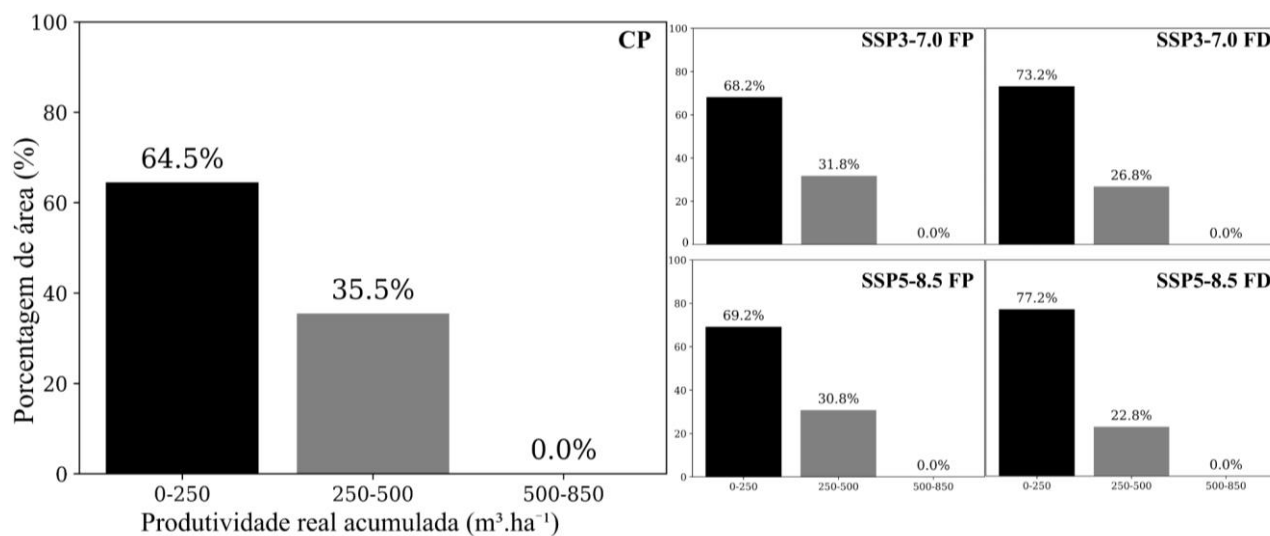
Anexo 1 - Abordagem modelo a modelo da produtividade potencial acumulada do eucalipto no Brasil simulada no clima presente (CP, 1989-2014) e projetada no futuro (FP, 2035-2060 e FD, 2075-2100) para os dois cenários (SSP3-7.0 e SSP5-8.5).



Anexo 2 - Abordagem modelo a modelo da produtividade real acumulada do eucalipto no Brasil simulada no clima presente (CP, 1989-2014) e projetada no futuro (FP, 2035-2060 e FD, 2075-2100) para os dois cenários (SSP3-7.0 e SSP5-8.5).



Anexo 3: Mudanças (futuro menos clima presente) considerando o *ensemble mean* da produtividade potencial acumulada (PPa) (A-D) e da produtividade real acumulada (PRa) (E-H) projetadas no futuro (FP, 2035-2060 e FD, 2075-2100) para os dois cenários (SSP3-7.0 e SSP5-8.5).



Anexo 4 - Distribuição percentual de áreas com produtividade real acumulada de 0 a 250 m³ ha⁻¹, 250 a 500 m³ ha⁻¹ e 500 a 850 m³ ha⁻¹ simulada no clima presente (CP, 1989-2014) e projetada no futuro (FP, 2035-2060 e FD, 2075-2100) para os dois cenários (SSP3-7.0 e SSP5-8.5).