

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

CMIP5 versus CMIP6: qual o impacto das duas versões de modelos climáticos nas projeções para a duração da fase de muda em espécies perenes de interesse comercial?

Atila de Oliveira (IC)¹, Fabrina Bolzan Martins (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Fase de muda. Modelos climáticos. Projeções climáticas.

Introdução

Minas Gerais possui mais de 2,2 milhões ha de área plantada com espécies florestais (IBÁ, 2024) e vem se destacando na expansão do cultivo de oliveira. No entanto, o estado é vulnerável às projeções de aumento de temperatura, que indicam aumentos de até +5 °C até o final do século XXI (Dias et al., 2024). Nesse sentido, as fases iniciais de desenvolvimento de espécies florestais e agrícolas, como a duração da fase de muda (DFM), são as mais sensíveis, podendo afetar a germinação, emergência e vigor das mudas (Nahar et al., 2015; Goraya et al., 2017).

Para avaliar o impacto das projeções climáticas no desenvolvimento inicial de espécies, utilizam-se modelos de desenvolvimento como o linear Filocrono (FIL) e o não linear Wang & Engel (WE) (Fagundes et al., 2023), acoplados a modelos de circulação geral (MCGs), como os da NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP), que aplica *downscaling* estatístico para reduzir vieses e melhorar as simulações e projeções (Thrasher et al., 2022).

Apesar do crescente uso do NEX-GDDP em estudos de temperatura (Guo et al., 2022; Kamruzzaman et al., 2021), são inexistentes estudos que comparem os conjuntos NEX-GDDP-CMIP5 e NEX-GDDP-CMIP6 na simulação do desenvolvimento inicial.

Dessa forma, este estudo comparou a DFM simulada e projetada para 13 espécies perenes, sendo 7 nativas, 4 exóticas e 2 cultivares de oliveira, no município de Itajubá, Minas Gerais, utilizando sete MCGs de cada conjunto do NEX-GDDP-CMIP5 e NEX-GDDP-CMIP6, aplicados aos modelos FIL e WE, previamente calibrados e validados em estudos anteriores.

Metodologia

Os dois modelos utilizados (FIL e WE), estimam a DFM em três etapas: i) cálculo da taxa de aparecimento foliar diária (TAF); ii) determinação do número final de folhas (NFF) de cada espécie; iii) obtenção da DFM, correspondendo ao número de dias entre a data de emergência e a conclusão da fase de muda,

correspondente ao dia em que cada espécie atingiu seu NFF (Tabela 1). Para isso, é fundamental a inserção das três temperaturas cardinais de cada espécie: temperatura basal (Tb), ótima (Tot) e máxima (TB) (Tabela 1).

Para cada espécie, empregou-se o modelo de desenvolvimento com melhor desempenho descrito na literatura, com seu coeficiente específico (Tabela 1).

Tabela 1 – Espécies, modelos de desenvolvimento de melhor desempenho, coeficientes de cada espécie, temperaturas cardinais (basal, ótima e máxima; Tb, Tot e TB, respectivamente) e número final de folhas (NFF) de cada espécie

Espécie	Modelo	Coefficiente	Tb	Tot	TB	NFF
<i>A. peregrina</i>	FIL	172,41379	10,3	23	45,5	12
<i>B. orellana</i>	FIL	49,26108	12	18,4	46,4	20
<i>C. myrianthum</i>	WE	0,1867	11,4	18,1	36,6	20
<i>C. citriodora</i>	WE	0,23370	8,7	17,1	41,3	20
<i>C. antisiphilitica</i>	WE	0,0923	13	20	48,4	20
<i>E. grandis</i>	WE	0,41070	10	27	36	25
<i>E. saligna</i>	WE	0,31800	8	25	35	25
<i>E. urophylla</i>	WE	0,30780	11,5	17,1	40,5	20
<i>L. ferrea</i>	WE	0,18290	12,8	20,7	46,3	20
<i>O. E. cv</i>	WE	0,27039	10,5	16,1	37,8	20
Arbequina						
<i>O. E. cv. MGS</i>	FIL	17,04739	11	14,7	37,8	20
ASC315						
<i>P. regnelli</i>	WE	0,0741	13,7	21,5	43,4	10
<i>P. guajava</i>	FIL	43,10159	10,9	17,3	51,2	20

No modelo FIL, o coeficiente é 1/a; e no WE, é a TAF máxima (TAF_{MAX}), expressa em folhas por dia.

No modelo FIL, a TAF é dada por (Martins et al., 2023):

$$TAF_{FIL} = a \times STd$$

Em que: TAF_{FIL} = taxa diária de aparecimento de folhas dado pelo modelo FIL (folhas dia⁻¹), a = coeficiente angular da regressão linear entre TAF e STd (folhas por °C dia), STd = soma térmica diária (°C dia) calculada por (Martins et al., 2023):

$$STd = \begin{cases} 0, & \text{quando } Tas < Tb \text{ ou } Tas > TB \\ (Tas - Tb), & \text{quando } Tb \leq Tas \leq Tot \\ \frac{(Tot - Tb) \times (TB - Tas)}{(TB - Tot)}, & \text{quando } Tot < tas \leq TB \end{cases}$$

Em que: Tas = temperatura média diária do ar, Tb, Tot e TB = temperaturas cardinais (basal, ótima e máxima, respectivamente) para o desenvolvimento inicial das espécies.

No modelo WE a TAF diária é dada por (Fagundes et al., 2021):

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

$$TAF_{WE} = TAF_{max} \times f(t)$$

Em que: TAF_{WE} = taxa diária de aparecimento de folhas dado pelo modelo WE (folhas dia⁻¹), TAF_{MAX} = taxa diária máxima de aparecimento de folhas, $f(t)$ = função beta de temperatura (de 0 a 1):

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

Em que: α = coeficiente de $f(t)$, dado por: $\alpha = \ln 2 / \ln \left[\frac{T_B - T_b}{T_{ot} - T_b} \right]$.

Os valores de T_{as} foram extraídos dos MCGs para o ponto de grade mais próximo ao município de Itajubá-MG (22°24'46.43" S, 45°26'48.94" W).

Foram utilizados sete MCGs do NEX-GDDP-CMIP5 (ACCESS1-0, CanESM2, GFDL-CM3, IPSL-CM5A-LR, MIROC5, MPI-ESM-MR e MRI-CGCM3) e seus correspondentes do NEX-GDDP-CMIP6 (ACCESS-CM2, CanESM5, GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2-LR e MRI-ESM2-0), todos com resolução espacial de 0,25° latitude/longitude. A DFM para cada espécie foi simulada para o clima presente (CP; 1980–2005) e projetada para o futuro distante (FD; 2075–2100) em dois cenários de emissões para o NEX-GDDP-CMIP5 (RCP4.5 e RCP8.5) e dois para o NEX-GDDP-CMIP6 (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

Para análise, a DFM foi simulada para o CP com os dados observacionais de Xavier et al. (2016), com resolução espacial de 0,25° (latitude/longitude). A identificação do modelo com menor viés na simulação da DFM no CP foi feita com base na comparação das médias das DFM calculadas a partir dos dois conjuntos do NEX-GDDP com os dados observados provenientes de Xavier et al. (2016). Para isso, aplicou-se o teste de Scott-Knott a 95% de significância, considerando a média das 12 datas de emergência.

Para avaliar o impacto do aquecimento global na DFM de cada cultivar, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) em esquema trifatorial, considerando 12 datas de emergência, dois períodos (CP e FD) e os dois cenários de emissão de cada conjunto (RCP4.5 e RCP8.5 para o NEX-GDDP-CMIP5; SSP2-4.5 e SSP5-8.5 para o NEX-GDDP-CMIP6). A ANOVA foi conduzida separadamente para cada espécie, com base nas médias das projeções geradas pelos sete MCGs de cada conjunto, visando reduzir a influência das incertezas associadas aos modelos climáticos (Fagundes et al., 2021). A comparação de médias também foi realizada pelo teste de Scott-Knott a 95% de significância.

Resultados e discussão

3.1 Mudanças futuras na temperatura

São projetados aumentos graduais na T_{as} (Figura 1) em Itajubá, sendo maiores nos cenários mais intensos de emissões (RCP8.5/SSP5-8.5). O NEX-GDDP-CMIP5 projetou aquecimento de +2,5°C (RCP4.5) a +5°C (RCP8.5), enquanto o NEX-GDDP-CMIP6 entre +2,5°C (SSP2-4.5) a +6°C (SSP5-8.5), com menor variabilidade entre MCGs quando comparadas ao NEX-GDDP-CMIP5.

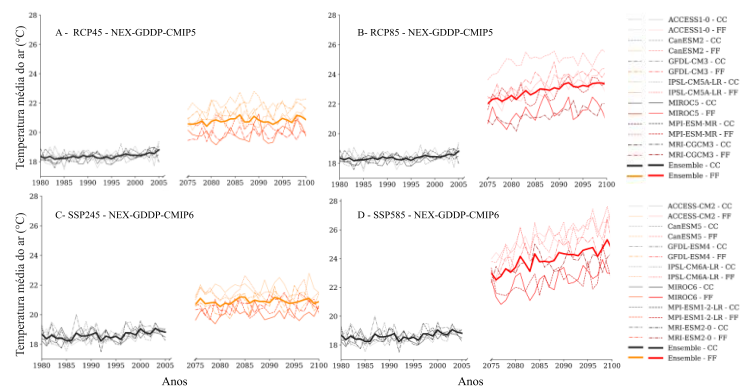


Figura 1. Mudanças projetadas na temperatura média do ar (°C) para o clima presente (1980–2005) e futuro distante (2075–2100), obtidas a partir de sete Modelos de Circulação Geral (MCGs) do NEX-GDDP-CMIP5, sob os cenários de concentração representativa RCP4.5 e RCP8.5 (painéis A e B), e de sete MCGs do NEX-GDDP-CMIP6, sob os cenários socioeconômicos (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) (C e D). As linhas em negrito representam a média do conjunto (*ensemble mean*) dos modelos climáticos.

3.2 Comparação da DFM entre os modelos NEX-GDDP-CMIP5 e CMIP6 no CP

No conjunto de MCGs do NEX-GDDP-CMIP6, quatro modelos apresentaram desempenho excelente (categoria “a” no teste Scott-Knott em ≥ 5 espécies com dados estatisticamente iguais aos simulados com os dados de Xavier et al., 2016): MRI-ESM2-0, GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-LR e IPSL-CM6A-LR. O MRI-ESM2-0 foi o mais preciso, com excelente desempenho para oito espécies (*B. orellana*, *C. myrianthum*, *C. citriodora*, *E. saligna*, *O. europaea* cv. aréquina, *O. europaea* cv. MGS ASC315, *P. regnellii* e *P. guajava*), seguido pelo GFDL-ESM4, com seis espécies (*B. orellana*, *E. grandis*, *E. saligna*, *O. europaea* cv. MGS ASC315, *P. regnellii* e *P. guajava*). Já no conjunto de MCGs do NEX-GDDP-CMIP5, apenas o IPSL-CM5A-LR atingiu classificação excelente para cinco espécies (*C. antisyphilitica*, *E. saligna*, *E. urophylla*, *L. ferrea* e *P. regnellii*). De forma geral, os modelos CMIP6 demonstraram maior precisão

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

e robustez na simulação da DFM em Itajubá.

3.3 Impactos das projeções climáticas na DFM considerando os modelos NEX-GDDP-CMIP5 e NEX-GDDP-CMIP6

A avaliação dos impactos das projeções climáticas na DFM identificou três padrões distintos entre as treze espécies analisadas. O primeiro grupo, com aumento da DFM, inclui *Olea europaea* cv. MGS ASC315 (+1 a +47 dias no CMIP5; +3 a +45 no CMIP6), *O. europaea* cv. Arbequina (+3 a +22; +3 a +23), *Citharexylum myrianthum* (+1 a +24; +1 a +24), *Corymbia citriodora* (+2 a +14; +2 a +14) e *Eucalyptus urophylla* (+1 a +14; +1 a +13).

O segundo grupo, com redução da DFM, é composto por *A. peregrina* (-34 a -70; -28 a -74), *E. saligna* (-8 a -50; -7 a -46) e *E. grandis* (-14 a -82; -12 a -77). Esse desenvolvimento acelerado pode comprometer a qualidade da muda, pois a redução da DFM, sem que haja tempo suficiente para a formação adequada de estruturas essenciais, pode resultar em espécies frágeis e menos resistentes a estresses ambientais futuros.

O terceiro grupo não apresentou padrão de mudança consistente ao longo do ano e períodos, com variações dependentes do mês de simulação da emergência. *B. orellana* apresentou aumento (+6 a +30; +5 a +28) de agosto a novembro e redução (-3 a -38; -4 a -31) de dezembro a julho. *C. antisyphilitica* teve aumento (+1 a +12; +2 a +11) de agosto a novembro e redução (-7 a -19; -8 a -20) de dezembro a julho. *L. ferrea* apresentou aumento moderado (+1 a +7; +1 a +5) de setembro a janeiro e redução (-5 a -24; -7 a -26) de março a agosto. *P. regnellii* aumentou (+1 a +6; +1 a +5) de outubro a dezembro e reduziu (-3 a -41; -4 a -39) de fevereiro a setembro. *P. guajava* mostrou aumentos (+4 a +25; +2 a +24) de agosto a dezembro e reduções (-2 a -20; -2 a -17) de fevereiro a julho.

Na comparação entre cenários, *C. citriodora*, *E. grandis*, *E. urophylla* e *O. europaea* (MGS ASC315 e Arbequina) não apresentaram diferenças significativas entre RCP4.5 e SSP2-4.5, ou entre RCP8.5 e SSP5-8.5, indicando que a intensidade do aquecimento é o principal fator de variação da DFM. As demais espécies mostraram diferenças em pelo menos uma data de semeadura.

Dessa forma, estratégias de manejo adaptativo são essenciais e recomendadas em climas futuros. Ajustes nas datas de semeadura para períodos menos quentes, controle microclimático (temperatura, umidade, luz, ventilação) e práticas como irrigação suplementar, sombreamento, fertilização controlada, aclimação gradual e manejo fitossanitário intensificado (Costa e

Streck, 2018; Grzelak et al., 2024) deverão ser adotadas nos viveiros para melhor desenvolvimento das mudas das treze espécies estudadas.

Conclusões

(i) São projetados aumentos na temperatura média do ar até o final do século XXI em Itajubá (entre +2 °C no RCP4.5 e SSP2-4.5 e +5,5 °C no SSP5-8.5).

(ii) Os MCGs do NEX-GDDP-CMIP6, especialmente MRI-ESM2-0, GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-LR e IPSL-CM6A-LR, mostraram resultados estatisticamente similares aos dados observados para a maioria das espécies, enquanto apenas o modelo IPSL-CM5A-LR do NEX-GDDP-CMIP5 alcançou desempenho comparável.

(iii) As espécies *Olea europaea* (cv. MGS ASC315 e Arbequina), *C. myrianthum*, *C. citriodora* e *E. urophylla* apresentaram aumento da DFM. Já *A. peregrina*, *E. saligna* e *E. grandis* apresentaram redução. As espécies *B. orellana*, *C. antisyphilitica*, *Libidibia ferrea*, *P. regnellii*, e *P. guajava* não apresentaram tendências claras de aumento ou redução da DFM.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI – pelo ambiente acadêmico e pela infraestrutura adequada que possibilitaram a realização deste trabalho. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – pela concessão da bolsa de pesquisa ao primeiro autor. Ao mestrando em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Rafael Gonçalves Xavier, pela coorientação no desenvolvimento deste trabalho e pela disponibilização dos dados utilizados.

Referências

COSTA, Daniele Barbosa da; STRECK, Nereu Augusto. Duração da fase de mudas em eucalipto simulada em cenários de aumento de temperatura. *Ciência Florestal*, v. 28, n. 03, p. 1263-1270, 2018.

DIAS, Cássia Gabriele; MARTINS, Fabrina Bolzan; MARTINS, Minella Alves. Climate risks and vulnerabilities of the Arabica coffee in Brazil under current and future climates considering new CMIP6 models. *Science of the Total Environment*, v. 907, p. 167753, 2024.

FAGUNDES, Flávia Fernanda Azevedo et al. Modeling the initial development dynamics for two native Brazilian forest tree species. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, v. 97, n. 2, p. 295-308, 2024.

FAGUNDES, Flávia Fernanda Azevedo; DA SILVA REIS,

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Fernando Yuri; MARTINS, Fabrina Bolzan. 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.

GORAYA, Gurpreet Kaur et al. Rapid injuries of high temperature in plants. **Journal of Plant Biology**, v. 60, n. 4, p. 298-305, 2017.

GRZELAK, Monika; PACHOLCZAK, Andrzej; NOWAKOWSKA, Karolina. Challenges and insights in the acclimatization step of micropropagated woody plants. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)**, v. 159, n. 3, p. 72, 2024.

GUO, Hai et al. Evaluation and comparison of CMIP6 and CMIP5 model performance in simulating the runoff. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 149, n. 3, p. 1451-1470, 2022.

IBÁ, 2024. Indústria brasileira de árvores: Relatório 2024. São Paulo, Brasil.

NAHAR, Kamrun et al. Plant responses and tolerance to high temperature stress: role of exogenous phytoprotectants. In: **Crop production and global environmental issues**. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 385-435.

MARTINS, Fabrina Bolzan et al. 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.

THRASHER, Bridget et al. NASA global daily downscaled projections, CMIP6. **Scientific data**, v. 9, n. 1, p. 262, 2022.