

EFEITOS CLIMÁTICOS FUTUROS NA DISTRIBUIÇÃO POTENCIAL DE *COFFEA ARABICA* NO BRASIL UTILIZANDO FERRAMENTAS DE MODELAGEM

Marinaldo Loures Ferreira¹, Renan Batista Queiroz², Gildriano Soares de Oliveira³, André Medeiros de Andrade⁴, Débora Sampaio mendes⁵, Marcelo Coutinho Picanço⁶ e Ricardo Siqueira da Silva⁷

¹UFVJM, marinaldo.loures@ufvjm.edu.br; ²INCAPER, batistaufv@gmail.com; ³UFVJM, gildriano.oliveira@ufvjm.edu.br;

⁴UFVJM, andre.medeiros@ufvjm.edu.br; ⁵UFVJM, debora.sampaio@ufvjm.edu.br; ⁶UFV, picanco@ufv.br e ⁷UFVJM, ricardo.ufvjm@gmail.com

RESUMO

O Brasil, principal produtor mundial de café, enfrenta desafios devido ao aquecimento global e mudanças nos padrões de precipitação. Este estudo desenvolve o modelo CLIMEX para avaliar a adequação climática para *Coffea arabica* no Brasil, considerando o clima atual e as projeções para 2030, 2050, 2070 e 2100, com base no modelo climático CSIRO-Mk3.0 para os cenários SRES A1B e A2. As projeções mostram uma redução significativa das áreas adequadas para o cultivo, com até 70,5% tornando-se inadequadas em 2100 no cenário A1B e 79,2% no cenário A2. Os resultados ajudarão a criar estratégias para mitigar os impactos das mudanças climáticas sobre a produção de café no país, que emprega mais de 8 milhões de pessoas.

Palavras-chave — adequação climática, modelagem climática, clima tropical, cenários futuros.

ABSTRACT

Brazil, the world's leading coffee producer, faces challenges due to global warming and changes in precipitation patterns. This study uses the CLIMEX model to assess the climatic suitability for Coffea arabica in Brazil, considering the current climate and projections for 2030, 2050, 2070, and 2100, based on the CSIRO-Mk3.0 climate model for the SRES A1B and A2 scenarios. The projections show a significant reduction in suitable areas for cultivation, with up to 70.5% becoming unsuitable by 2100 under the A1B scenario and 79.2% under the A2 scenario. The results will help develop strategies to mitigate the impacts of climate change on coffee production in the country, which employs over 8 million people.

Key words — climatic suitability, climate modeling, tropical weather future scenarios.

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e seus impactos na agricultura tem motivado diversos estudos focados na adaptação de culturas [1]. O Brasil, maior produtor mundial de café [2], enfrenta desafios significativos devido ao aquecimento global e às mudanças nos padrões de chuva [3]. Investigação sobre as características climáticas de

Diamantina, em Minas Gerais, revelou tendências de aumento na temperatura mínima entre 1973 e 2022 [4]. Também há estudos em que foi observada uma redução na precipitação no Cerrado, com uma inclinação média de -15,41 mm ano⁻¹ [5]. O aumento da temperatura do ar tem impacto mais negativo na produção de café do que a diminuição da precipitação [3]. Assim, torna-se importante desenvolver estratégias para mitigar esses efeitos e garantir a sustentabilidade da produção cafeeira no Brasil.

Este estudo visa utilizar o software CLIMEX para prever a adequação climática presente e futura de *C. arabica* no Brasil, baseando-se nas projeções de mudanças climáticas para 2050, 2070 e 2100, nos cenários SRES A1B e A2. O modelo CLIMEX mede o impacto das mudanças climáticas projetadas integrando parâmetros bioclimáticos específicos da espécie em estudo com dados climáticos históricos e futuros [6].

Os cenários SRES A1B (com projeção de aumento de 2,8 °C na temperatura global) e A2 (projeção de aumento de 3,4 °C) refletem diferentes trajetórias socioeconômicas e emissões de gases de efeito estufa, conforme descrito no quarto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Paralelamente, o modelo climático CSIRO-Mk3.0 (CS) utiliza uma média de 30 anos de temperaturas mínimas e máximas mensais, umidade relativa e precipitação total.

Assim, este estudo contribuirá para entender os impactos das mudanças climáticas na distribuição de *C. arabica* no Brasil e fornecerá informações essenciais para a formulação de políticas agrícolas e estratégias de adaptação. A utilização do CLIMEX para modelar a adequação climática de *C. arabica* pode servir como base para futuras pesquisas e ações de mitigação dos impactos climáticos no setor cafeeiro brasileiro.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Distribuição atual de *Coffea canephora* no Brasil

As regiões do Brasil onde o café arábica é cultivado foram identificadas a partir da base de dados do Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA, com ano base de 2022 [7], bem como de fontes da literatura. Em seguida, imagens de satélite dessas regiões foram analisadas para determinar a localização precisa das plantações de café por meio de

inspeção visual utilizando a interface do *Google Earth Engine* com imagens do Sentinel-2. Foram mapeados 763 pontos de cultivo de café arábica (Figura 1), onde cada ponto representa um município produtor. O cultivo do café arábica no Brasil, em sua maioria, ocorre em áreas com altitudes acima de 500 m [8].

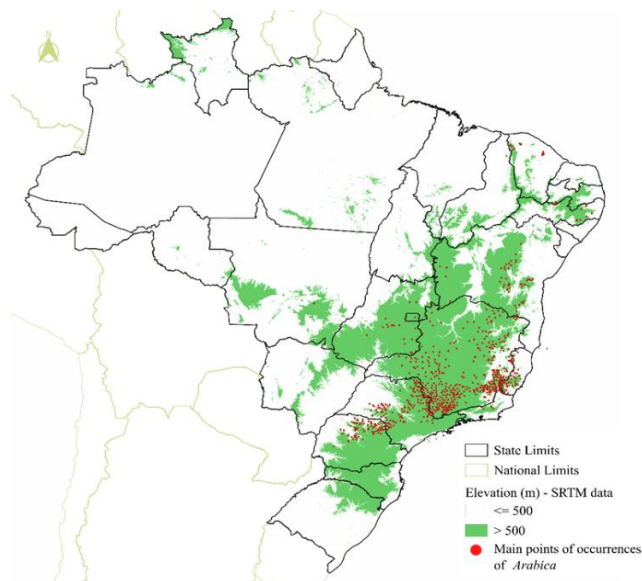


Figura 1. Distribuição das localidades de cultivo de *Coffea arabica* no Brasil.

2.2. Configuração de parâmetros CLIMEX

Os parâmetros para o modelo CLIMEX foram estabelecidos com base na literatura e na distribuição atual de *Coffea arabica* no Brasil, garantindo que o modelo refletisse com precisão as áreas onde a cultura é encontrada.

Para a temperatura, definimos um limite inferior (DV0) de 10 °C, com a temperatura ótima inferior (DV1) em 18 °C e a temperatura ótima superior (DV2) em 25 °C. O limite superior de temperatura (DV3) foi fixado em 33 °C [10], [11].

No que diz respeito à umidade, estabelecemos o limite inferior (SM0) em 0,25, o índice ideal de umidade inferior (SM1) em 0,6, a umidade ideal superior (SM2) em 1,2, e o limite superior de umidade (SM3) em 2,0 [12], [13].

Para o estresse por frio, o índice de estresse foi definido em 10 °C (TTCS), e o acúmulo de estresse pelo frio (THCS) foi ajustado para -0,0001/semana [12].

O limite de temperatura para estresse térmico (TTHS) foi estabelecido em 37 °C, onde a planta ainda consegue manter seu desempenho fotossintético. A taxa de acumulação de estresse térmico (TTHS) foi fixada em 0,002/semana [14], [11], [12].

Para o estresse seco, definimos o nível de umidade do solo (SMDS) em 0,2 e a taxa de acúmulo de estresse seco (HDS) como -0,015/semana. O parâmetro de estresse úmido (SMWS) foi definido como 2,0, com uma taxa de acúmulo de estresse úmido (HWS) de 0,001/semana [12], [13].

Ajustamos o PDD do modelo para 2.720 °C dias. O modelo também considerou um cenário de irrigação de 4 mm/dia ao longo do ano, especialmente para os meses sem precipitação.

2.3. Calibração e validação do modelo

O modelo CLIMEX para *Coffea arabica* foi ajustado mediante 763 pontos de ocorrência no território brasileiro (Figura 1) e dados bioclimáticos específicos da cultura. Para representar o cenário climático atual, utilizamos os dados da grade CliMond 30' de 1980 a 2010 (30 anos, centrados em 1995) [9].

2.4. Dados climáticos e cenários

Os dados meteorológicos utilizados para o modelo CLIMEX foram obtidos do CliMond (<https://www.climond.org/>, acessado em 11 de junho de 2024). Esses dados correspondem a informações climáticas de grade 30' (CM30_1995H_V2).

Para estimar o efeito potencial das alterações climáticas na distribuição de *C. arabica* nos anos 2050, 2070 e 2100, utilizamos o modelo climático global CSIRO-Mk3.0 (CS) para os cenários SRES A1B e A2 do Centro de Pesquisa Climática da Austrália.

3. RESULTADOS

As áreas previstas pelo modelo com alta adequação ao desenvolvimento da espécie (20,1% do território brasileiro), incluem 93,3% dos pontos reais de ocorrência (Figura 2).

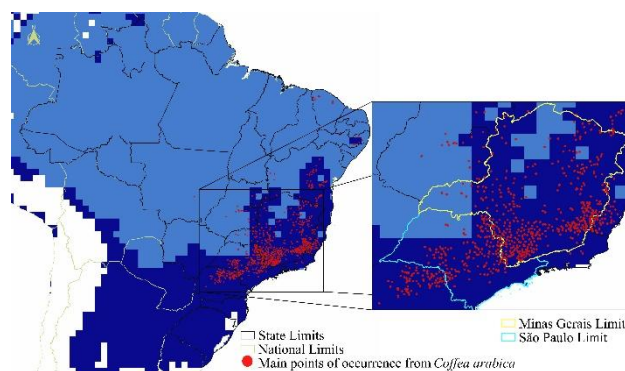


Figura 2. Distribuição atual e potencial de *Coffea arabica* no Brasil. Validação das regiões com base no Índice Ecológico (IE) para o cenário climático atual. Áreas inadequadas em branco (EI = 0), adequação em ciano (0 < EI < 30) e alta adequação em azul (EI <= 30). A região destacada corresponde à maior concentração de Arabica no país.

Já as áreas previstas como adequadas (79,6% do território brasileiro), incluem os 6,7% restantes dos demais pontos reais de ocorrência. Assim, o elevado percentual de concordância com a área de validação mostrou que o modelo é altamente

confiável. Nosso modelo indica grandes áreas na região de Minas Gerais com alta adequação para o cultivo de *C. arabica*. Minas Gerais, sendo o estado com a maior produção

de café do Brasil, corresponde à previsão do modelo de áreas ideais para essa cultura.

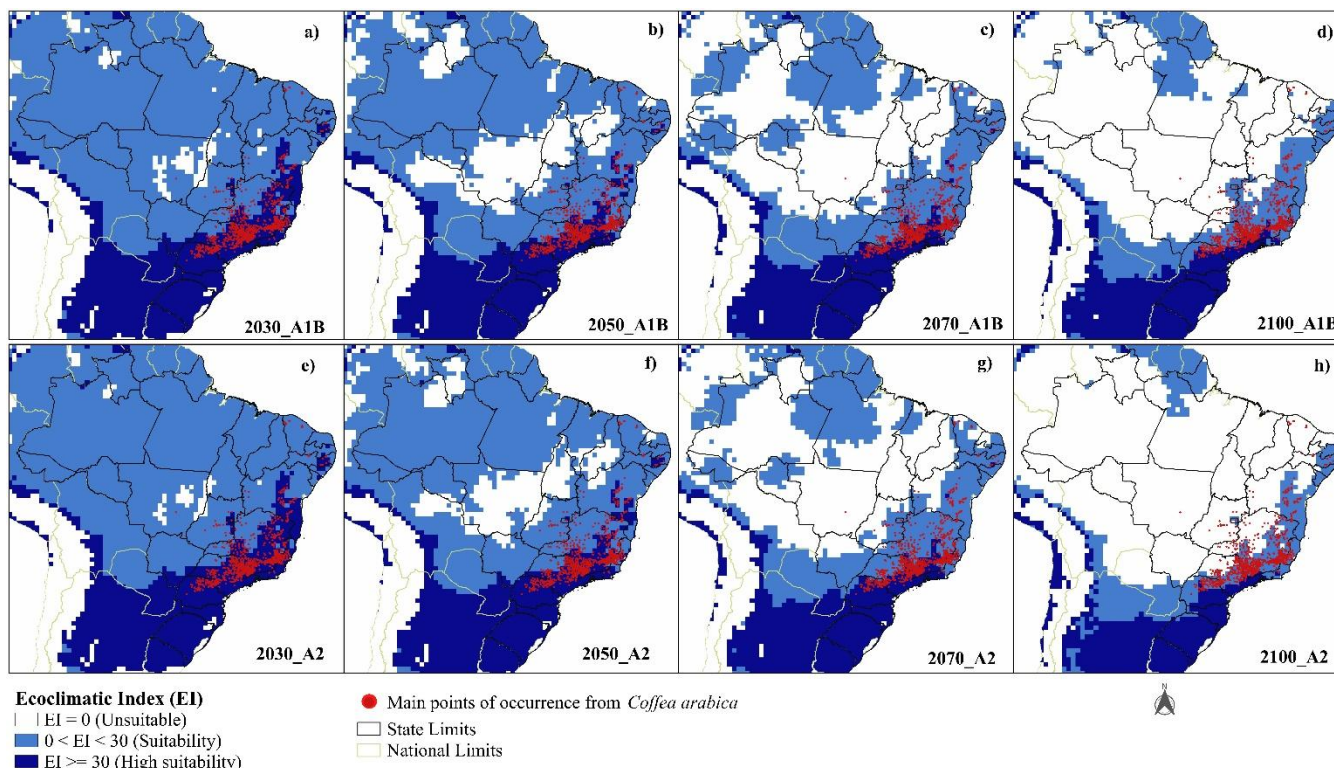


Figura 3. Índice Ecolimático (EI) para o cultivo de *Coffea arabica* no Brasil projetado utilizando o CLIMatic indEX (CLIMEX) e o CSIRO-Mk3.0, para os cenários SRES A1B e A2 nos anos de 2030, 2050, 2070 e 2100.

Em relação ao clima atual, as previsões do CS para 2030, 2050, 2070 e 2100 projetam um cenário desafiador para a cultura do *C. arabica* no Brasil. Tanto no cenário A1B quanto no A2, observa-se uma crescente diminuição das áreas adequadas para o cultivo ao longo dos anos (Figura 3), enquanto a proporção de áreas inadequadas aumenta substancialmente.

A análise dos dados do cenário A1B mostra que em 2030, apenas 4,1% das áreas são consideradas totalmente inadequadas para o cultivo de *C. arabica*, mas 79,1% das áreas possuem uma adequação marginal (Figura 4).

Em 2050, a situação piora consideravelmente, com 20% das áreas tornando-se inadequadas e apenas 12,6% permanecendo adequadas. Esse padrão se intensifica ainda mais em 2070 e 2100, quando quase metade das áreas (45,1%) e mais de dois terços (70,5%), respectivamente, são consideradas inadequadas para o cultivo do café arábica.

No cenário A2, em 2050, a proporção de áreas inadequadas aumenta para 16,4%, e essa tendência continua em 2070, quando quase metade das áreas (49,9%) não será mais adequada. Em 2100, a situação é mais acentuada, com 79,2% das áreas impróprias para o cultivo do café arábica.

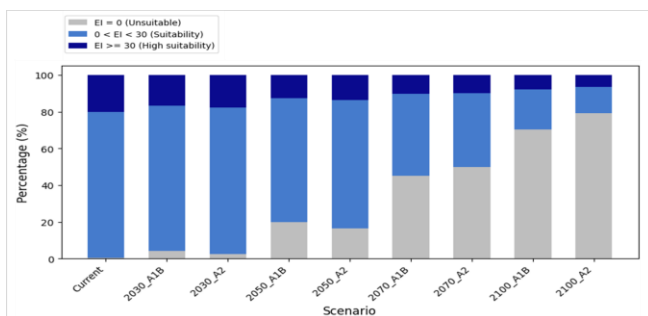


Figura 4. Índice Ecolimático (IE) para o cultivo de *Coffea arabica* no Brasil: cenário atual e projeções futuras (2030, 2050, 2070, 2100) sob os cenários SRES A1B e A2.

4. DISCUSSÃO

As projeções climáticas para os cenários A1B e A2 indicam uma tendência de deterioração das condições climáticas adequadas para o cultivo de café arábica no Brasil (Figuras 3 e 4). No cenário A1B, a adequação das áreas para o cultivo de *C. arabica* diminui drasticamente ao longo do tempo, com 45,1% das áreas tornando-se inadequadas em 2070 e 70,5% em 2100. O cenário A2 segue uma tendência semelhante, com 79,9% das áreas sendo consideradas inadequadas para o cultivo em 2100. Esses resultados corroboram os achados de Bunn et al. [15] utilizando algoritmos de aprendizado de máquina, que preveem a redução de 50% das áreas adequadas

devido ao aumento das temperaturas. De acordo com Koh et al. [17], desde 1974, as temperaturas nos municípios produtores de café no Brasil aumentaram aproximadamente 0,25°C por década.

Independentemente do modelo climático utilizado, os estudos indicam impactos das mudanças climáticas na adequação das áreas para o cultivo de café [16].

Apesar de serem promissoras, estas projeções requerem cautela, pois o modelo CLIMEX considera exclusivamente fatores climáticos [9]. Além disso, os resultados podem variar conforme o modelo climático adotado, uma vez que diferentes modelos apresentam projeções distintas para variáveis como temperatura, precipitação e umidade relativa. É importante destacar que os resultados dessa modelagem são baseados exclusivamente em condições climáticas e não levam em conta fatores não climáticos, como a ocorrência de pragas, doenças, plantas daninhas, tipos de solo e interações bióticas.

5. CONCLUSÕES

Este estudo reforça a importância de entender como as mudanças climáticas podem afetar a produção de *Coffea arabica* no Brasil. Através do modelo CLIMEX, identificamos que as condições atuais são favoráveis, mas as projeções para o futuro trazem preocupações significativas. Até 2100, cenários climáticos como A1B e A2 sugerem uma diminuição substancial das áreas adequadas para o cultivo de café arábica, o que pode impactar profundamente a economia e os meios de subsistência dos produtores, especialmente os pequenos agricultores.

É fundamental buscar estratégias para adaptar as práticas agrícolas no país. A seleção de variedades de café mais resistentes ao calor, o uso de sistemas agroflorestais e uma gestão mais eficiente da água são algumas das soluções que podem ajudar a mitigar os impactos das mudanças climáticas. No entanto, as condições climáticas são apenas uma parte do desafio, outros fatores, como pragas e doenças, também precisam ser considerados.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) e ao Financiador: Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) (APQ-00241-22).

7. REFERÊNCIAS

[1] H. Wakatsuki, H. Ju, A. D. Farrell, D. Deryng, F. Meza, and T. Hasegawa. Research trends and gaps in climate change impacts and adaptation potentials in major crops, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, v.60: pp.101249, 2023.

[2] Internacional Coffee Organization. Sustainability & Resilience of the Global Value Chain: Towards a Coffee Investment vehicle, London.

[3] L. P. Venancio, R. Filgueiras, E. C. Mantovani, and et al. Impact of drought associated with high temperatures on *Coffea Canephora* plantations: a case study in Espírito Santo State, Brazil, *Scientific Reports*, v.10: pp.19719, 2020.

[4] L. D. C. Santos, L. S. P. Figueiró, and et al. Unveiling Climate Trends and Future Projections in Southeastern Brazil: A Case Study of Brazil's Historic Agricultural Heritage, *Sustainability*, 16(11): pp.4811, 2024.

[5] C. Silva, R. L. Manzione, M. M. Caldas. Net water flux and land use shifts across the Brazilian Cerrado between 2000 and 2019, *Regional Environmental Change*, 23: pp.151, 2023.

[6] R. S. Ramos, L. Kumar, F. Shabani, R. S. Silva, T. A. Araújo, M. C. Picanço. Climate model for seasonal variation in *Bemisia tabaci* using CLIMEX in tomato crops, *Int J Biometeorol*, v.63: pp. 281, 2019.

[7] Brazilian Institute of Geography and Statistics. IBGE System for Automatic Recovery - SIDRA, Municipal Agricultural Production, 2024. <https://sidra.ibge.gov.br/tabela/1613>

[8] M. A. G. Ferrão, E. M. Riva-Souza, and et al. Indicação de cultivares de café arábica para o estado do Espírito Santo e avaliação comparativa com o conilon em altitude elevada, *Circular técnica*, 2021. <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/14341>

[9] D. J. Kriticós, and et al. The potential geographical distribution and phenology of *Bemisia tabaci* Middle East/Asia Minor 1, considering irrigation and glasshouse production, *Bulletin of Entomological Research*, v.110: pp.567-576, 2020.

[10] W. P. Rodrigues, and et al. Long-term elevated air [CO₂] strengthens photosynthetic functioning and mitigates the impact of supra-optimal temperatures in tropical *Coffea arabica* and *C. canephora* species, *Global change biology*, v.22: pp.415-431, 2016.

[11] D. Dubberstein, F. C. Lidon, and et al. Resilient and sensitive key points of the photosynthetic machinery of *Coffea* spp. to the single and superimposed exposure to severe drought and heat stresses, *Frontiers in Plant Science*, v.11: pp.546467, 2020.

[12] J. Jaramillo, E. Muchugu, F. E. Vega, and et al. Some Like It Hot: The Influence and Implications of Climate Change on Coffee Berry Borer (*Hypothenemus hampei*) and Coffee Production in East Africa, *PLoS One*, v.6: pp.24528, 2011.

[13] M. L. Ferreira, V. R. Von dos Santos, and et al. Effects of the climate change scenario on *Coffea canephora* production in Brazil using modeling tools, *Tropical Ecology*, 2024.

[14] F. M. Damatta, R. T. Avila, A. A. Cardoso, and et al. Physiological and agronomic performance of the coffee crop in the context of climate change and global warming: A review, *J. Agric. Food Chem.*, v.66: 2018.

[15] C. Bunn, P. Läderach, et al. A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Climatic Change*, v.129:2015.

[16] Y. Zhu, Y. Liu, Z. Chen, and et al. Assessing the climate change impacts on Coffee arabica cultivation regions in China, *Theor Appl Climatol*, 2024.

[17] I. Koh, R. Garrett, A. Janetos, N. D. Mueller. Climate risks to Brazilian coffee production, *Environmental Research Letters*, v.15: pp.104015, 2020.