

IMPACTOS DOS LIMIARES DE AQUECIMENTO NOS COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO PARA MINAS GERAIS

Gabriel de Freitas Moura¹ (IC), Dra. Fabrina Bolzan Martins (PQ)¹, Flávia Fernanda Azevedo Fagundes¹

¹Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI.

Palavras-chave: Acordo de Paris. Temperatura do ar. Precipitação. Deficiência hídrica. Excedente hídrico.

Introdução

A 21ª Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) resultou na formulação do Acordo de Paris, um pacto internacional que visa estabilizar o aquecimento global em níveis seguros, mas ainda sim danoso. O Acordo de Paris visa estabilizar o aumento da temperatura média global entre 1,5°C e abaixo de 2,0°C em relação aos níveis pré-industriais. No entanto, o desafio de conter o aquecimento global dentro desses limites mostra-se cada vez mais árduo. Estudos indicam que, caso não sejam adotadas políticas de controle, o aquecimento global pode atingir 1,5°C entre 2030 e 2052. E caso, os limiares sejam excedidos para 3°C e/ou 4°C, as consequências serão severas e irreversíveis para os ecossistemas naturais (TORRES et al., 2021).

Os aumentos de temperatura do ar têm efeitos desiguais ao redor do mundo, tendo a necessidade de estudos em escalas regionais e locais. No sul de Minas Gerais, por exemplo, projeta-se um aumento de temperatura de até 6°C e padrões de precipitação heterogêneos (DIAS et al., 2024; RIBEIRO et al., 2024). A urbanização desordenada e a falta de infraestrutura, agravam os impactos, gerando enchentes cada vez mais frequentes e danos socioeconômicos (SILVA et al., 2011).

Para avaliar os efeitos regionais dos limiares de aquecimento, são utilizados modelos climáticos como o NEX-GDDP-CMIP6, que têm maior resolução espacial (~25 km) em comparação com o CMIP6 (100-250 km). Modelos como o NEX-GDDP-CMIP6 permitem um entendimento mais detalhes das variações climáticas locais. Sendo assim, nesses períodos podem ser aplicados ferramentas apropriadas de zoneamento, como o balanço hídrico climatológico (BHC) (ALVES et al., 2020; MARTINS et al., 2022; RIBEIRO et al., 2024). Ou seja, os limiares de aquecimento determinados com os MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 quando aplicados no BHC fornecem informações sobre a disponibilidade de água no solo, como evapotranspiração real (ET_r), excedente

hídrico (EXC) e deficiência hídrica (DEF) (ALVES et al., 2020). Dessa forma, o objetivo dessa iniciação científica foi analisar as consequências dos limiares de aquecimento estabelecidos pelo Acordo de Paris (1,5°C e 2°C), assim como limiares de 3°C e 4°C, na disponibilidade hídrica da microrregião sul de Minas Gerais.

Metodologia

A área de estudo abrange diversas cidades do sul de Minas Gerais, e as microrregiões do como Alfenas, Andrelândia, Camanducaia, Campos Gerais, Delfinópolis, Guaxupé, Itajubá, Passos, Poços de Caldas, Pouso Alegre, Santa Rita do Sapucaí, São Lourenço, São Sebastião do Paraíso, São Thomé das Letras e Varginha, localizada entre as latitudes 19,5° S e 23° S e longitudes 45° O e 46,5° O (Figura 1). A região possui relevância econômica, agrícola e cultural.

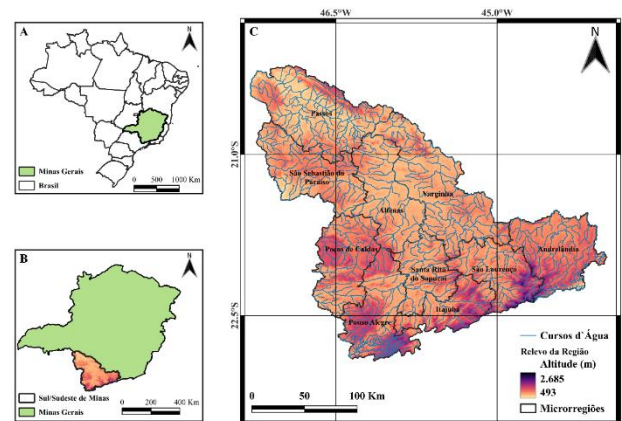


Figura 1 – Localização da Área de estudo

Para o cálculo do BHC Foram utilizados dados diários de temperatura média do ar (T_{as} , °C) e precipitação acumulada (P , mm dia⁻¹) de 30 modelos de dois conjuntos de MCGs: CMIP6 e NEX-GDDP-CMIP6. Os dados do CMIP6 são fornecidos *World Climate Research Programme* e disponibilizados pelo *Earth System Grid data* portal em: <https://cordex.org/data-access/esgf/>, e os do NEX-

GDDP-CMIP6 são fornecidos pelo *Climate Analytics Group* e *NASA Ames Research Center* e disponibilizados pelo *NASA Center for Climate Simulation* (NCCS). Os MCGs do CMIP6 possuem simulações para o período histórico entre 1850 - 2014, enquanto os MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 possuem simulações para 1950 - 2014, e ambos conjuntos possuem projeções para 2015 - 2100. Como os MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 não incluem o período pré-industrial, definimos o período de controle (CP) como 1995 - 2014, que é mesmo período utilizado pelo IPCC AR6.

No estudo, foram utilizados dois cenários climáticos. O SSP2-4.5, considerado intermediário, assume que o desenvolvimento socioeconômico resultará na estabilização das emissões, com um forçamento radiativo de 4,5 W/m² em 2100. Já o SSP5-8.5 é um cenário mais pessimista, no qual a mitigação é negligenciada, e o uso de combustíveis fósseis continua dominante, levando a um forçamento de 8,5 W/m² até o final do século (RIAHI et al., 2017).

Neste estudo, para determinar os períodos de ocorrência e os respectivos padrões de aquecimento (1,5, 2, 3 e 4°C) em relação ao período pré-industrial (1850-1900) serão seguidas a série de passos descritos por Torres et al. (2021), todos baseados na determinação de um período pré-industrial (Figura 2).

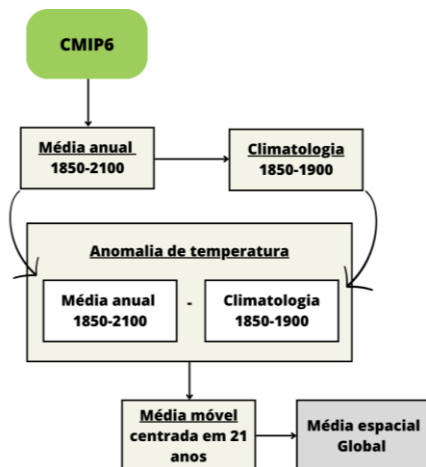


Figura 2 - Metodologia para a determinação do ano o aquecimento médio global

Sendo assim, para identificar os respectivos anos de aumento da temperatura global em 1,5°C, 2°C, 3°C e 4°C, será calculada para cada MCG e SSP uma média espacial global a partir da série de anomalias anuais

suavizadas. Por fim, foi calculada a média (*ensemble mean*) das projeções para os dois SSPs (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

Para o cálculo do BHC optamos por um método que exigisse poucos dados de entrada, e fosse capaz de expressar de forma coerente o armazenamento de água no solo em diferentes climas e quando houvesse mais de uma estação seca por ano (RIBEIRO et al., 2024), por isso foi utilizado a versão do método proposto por Thornthwaite e Mather (1955 e 1957), e simplificado por Pereira (2005), e posteriormente modificado por Dourado-Neto et al. (2010). As etapas metodológicas para cálculo do BHC estão demonstradas na Figura 3, e toda fundamentação teórica e os procedimentos detalhados podem ser encontrados em Alves et al. (2020), Dourado-Neto et al. (2010).

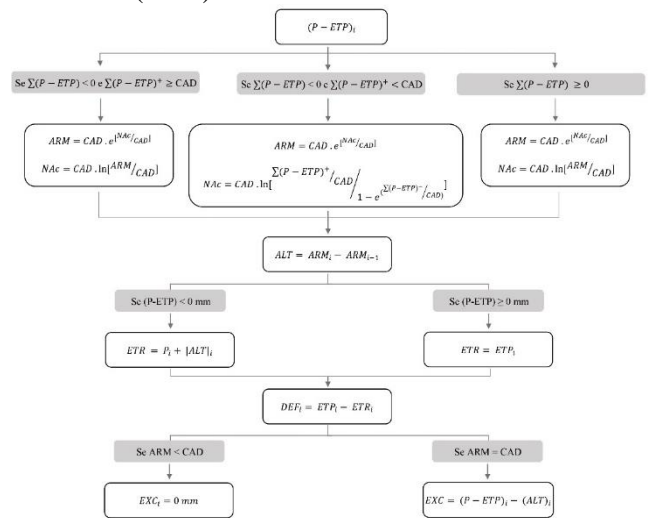


Figura 3 - Passo a passo para calcular o Balanço Hídrico Climático (BHC)

A evapotranspiração potencial (ETP) foi estimada utilizando o método de Thornthwaite, por demonstrar bons resultados na região sul de Minas Gerais (SANTOS et al., 2017), e também por fornece diretamente os valores climatológicos mensais da ETP os quais são essenciais como dados de entrada do BHC. As equações de 1 a 6 foram utilizadas para a determinação da ETP, e estão apresentadas a seguir.

$$ETP = \begin{cases} 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{T_{as}}{I}\right)^a & \text{se } 0 \leq T_{as} \leq 26,5^\circ\text{C} \\ -415,85 + 32,24 \cdot T_{as} - 0,43 \cdot T_{as}^2 & \text{se } T_{as} > 26,5^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

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

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

$$N = \frac{2}{15} \cdot \arccos[-1 \cdot (\text{tg}\varphi \cdot \text{tg}\delta)] \quad (4)$$

$$C_i = \frac{N}{12} \cdot \frac{NDP_i}{30} \quad (5)$$

$$ETP_c = ETP \cdot C_i \quad (6)$$

Resultados e discussão

De maneira geral, foi possível observar que o SSP2-4.5 é responsável pelas projeções atingem o limiar de aquecimento de 1,5°C no ano de 2031. Os demais limiares poderão ser atingidos e nos anos 2051, 2072 e 2084 para 2°C, 3°C e 4°C, respectivamente. E o SSP5-8.5 é responsável pelas projeções atingirem os limiares antecipadamente, equivalente ao ano de 2028 para um aquecimento de 1,5°C, e os anos 2041, 2063 e 2072 para os limiares de aquecimento de 2°C, 3°C e 4°C, respectivamente. Esse resultado é esperado, uma vez que o SSP5-8.5 é um cenário em que há aumentos mais severos das emissões de gases de efeito estufa e temperatura até ao final do século XXI. Ao contrário, no SSP2-4.5 há um aumento de temperatura até meados do século XXI (~2050), e após esse período o aquecimento se estabiliza.

Os padrões espaciais dos valores anuais de ETP, ETr, EXC e DEF para o sul de Minas Gerais nos quatro limiares de aquecimento global e SSPs (SSP2-4.5 e SSP5-8.5), assim como as anomalias em relação ao CP (1995-2014) são mostrados nas Figuras 4 a 7.

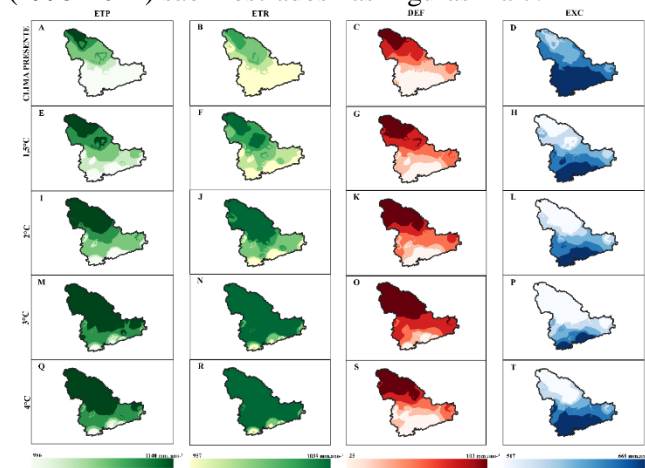


Figura 4 - Padrões espaciais dos valores anuais para o cenário socioeconômico SSP2-4.5.

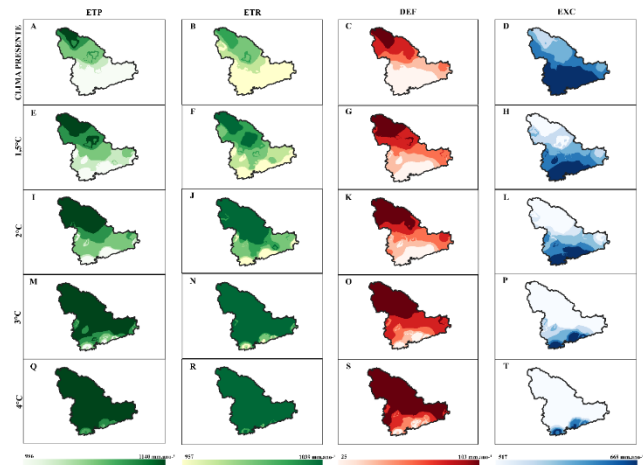


Figura 5 - Padrões espaciais dos valores anuais para o cenário socioeconômico SSP5-8.5.

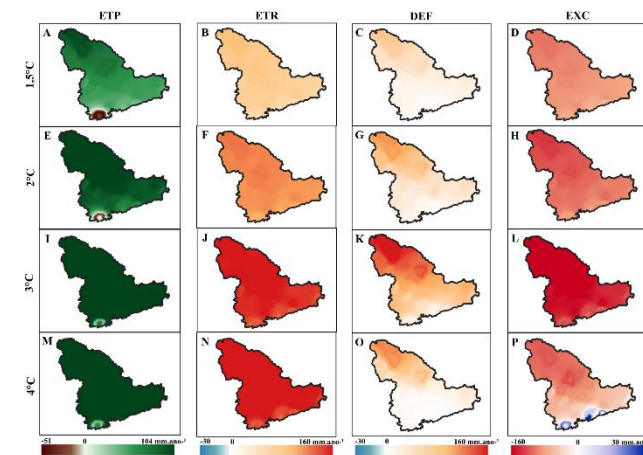


Figura 6 - Diferença entre as projeções com o clima presente para o cenário socioeconômico SSP2-4.5.

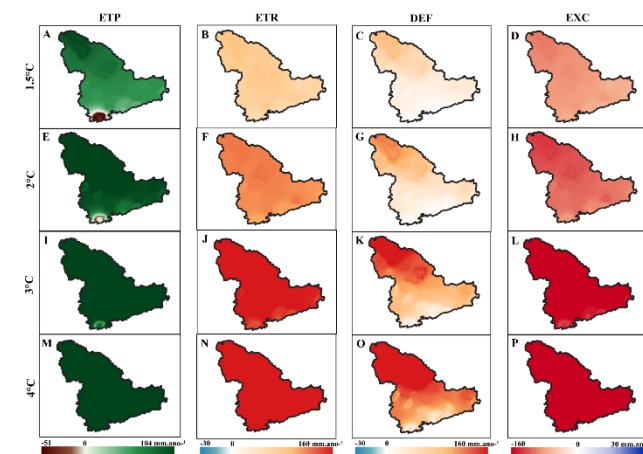


Figura 7 - Diferença entre as projeções com o clima presente para o cenário socioeconômico SSP5-8.5.

Os resultados evidenciam que, em ambos os cenários, à medida que os limiares de aquecimento são atingidos, ocorre uma intensificação em todas as

variáveis do BHC (ETP, ETR, DEF e EXC). Para a região sul de Minas Gerais, a principal diferença entre os cenários está na extensão das áreas impactadas pelas mudanças nas variáveis conforme o aquecimento global avança.

A evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR) aumentam significativamente no sul de Minas Gerais, com valores variando de 597 mm/ano (limiar de 1,5°C) a mais de 1039 mm/ano (limiar de 4°C), especialmente no cenário mais pessimista (SSP5-8.5). O DEF também se intensifica, com áreas afetadas crescendo à medida que o aquecimento global avança. No cenário SSP5-8.5, apenas algumas cidades do extremo sul apresentam DEF inferior a 103 mm/ano, enquanto outras áreas mostram aumentos de até 160 mm/ano. O EXC é reduzido à medida que o aquecimento avança, caindo abaixo de 517 mm/ano em grande parte da região, especialmente no SSP5-8.5. Esses padrões destacam os impactos dos limiares de aquecimento global sobre a disponibilidade hídrica na região, com implicações importantes para a gestão dos recursos hídricos e a necessidade de estratégias de adaptação às mudanças climáticas. A intensificação do estresse hídrico, combinada com a redução do EXC, demanda uma gestão mais eficaz e adaptada às novas condições climáticas projetadas.

Conclusões

Diante do exposto ao longo do presente trabalho, conclui-se que os limiares de aquecimento global estabelecidos pelo Acordo de Paris (1,5°C e 2°C) e os limiares mais severos (3°C e 4°C) impactarão à região sul de Minas Gerais, especialmente no que se refere à disponibilidade hídrica. As projeções indicam uma intensificação do estresse hídrico, com aumento na evapotranspiração (ETP) e déficit hídrico (DEF), ao mesmo tempo que ocorre uma redução no excedente hídrico (EXC). Esses efeitos serão mais acentuados no cenário de emissões SSP5-8.5.

A intensificação das variáveis, como o déficit hídrico é um desafio crítico para a gestão de recursos hídricos na região. A diminuição do EXC pode afetar significativamente a capacidade de recuperação hídrica, aumentando a necessidade de medidas adaptativas e estratégias de mitigação para enfrentar as mudanças climáticas projetadas. Portanto, as informações geradas sobre o zoneamento climático e os cenários de aquecimento global são essenciais para o planejamento das regiões vulneráveis, como o sul de Minas Gerais, permitindo a criação de políticas públicas eficazes para mitigar os impactos climáticos.

Agradecimentos

Ao Programa Institucional de Bolsas da Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais (FAPEMIG), agradeço expressamente pela bolsa PIBIC recebida.

Referências

- ALVES, A. M. M. R.; MARTINS, F. B.; REBOITA, M. S. Balanço hídrico climatológico para Itajubá-MG: cenário atual e projeções climáticas. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.26, p.712-732, 2020.
- DIAS, P. L.; RIBEIRO, C. F.; MARTINS, F. B. Projeções climáticas para o sul de Minas Gerais: implicações das mudanças nos padrões de precipitação e temperatura. **Climatic Change**, v. 162, n. 2, p. 245-261, 2024.
- 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.
- MARTINS, F. B.; BENASSI, R. B.; TORRES, R. R.; BRITO NETO, F.A. 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.
- RIBEIRO, A. F.; MARTINS, F. B.; SANTOS, D. F.; TORRES, R. R.; FAGUNDES, F. F. A. Suitable areas for temperate fruit trees in a Brazilian hotspot area: changes driven by new IPCC scenarios. **European Journal of Agronomy**, v.155, p.127110, 2024.
- SANTOS, D.F.; MARTINS, F.B.; TORRES, R.R. Impacts of climate projections on water balance and implications on olive crop in Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 77-82, 2017.
- SILVA, A. C.; BERG, E. V. D.; HIGUCHI, P.; NUNES, M. H. Dinâmica de uma comunidade arbórea após enchente em fragmentos florestais no sul de Minas Gerais. **Árvore**, v.35, p.381-389, 2011.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. 1957.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The moisture balance. *Publications in climatology*, v. 8, 1955.
- TORRES, R. R.; BENASSI, R. B.; MARTINS, F. B.; LAPOLA, D. M. Projected impacts of 1.5°C and 2°C global warming on temperature and precipitation patterns in South America. **International Journal of Climatology**, v.42, n.3, p.1597-1611, 2021.