PROJEÇÕES DE ARIDEZ NO NORDESTE DO BRASIL SOB O CENÁRIO SSP2-4.5: UMA ANÁLISE DE CONCORDÂNCIA MULTIMODELO

Victor Rodrigues Shiraishi 1 [1] ; Daniel Henrique Marco Detzel [2]

Palavras-Chave – Índice de Aridez, Concordância multimodelo, Mudanças Climáticas

INTRODUÇÃO

A aridez é uma caraterística do clima que estabelece uma relação entre precipitação e evapotranspiração potencial, ou seja, avalia o déficit hídrico de uma região. Com o intuito de avaliar a aridez, o Plano de Ação de Combate à Desertificação das Nações Unidas adotou, em 1977, o Índice de Aridez baseado na metodologia de Thornthwaite (1948), ajustado por Penman (1948), sendo posteriormente utilizado na publicação *Map of the World Distribution of Arid Regions* (UNESCO, 1979). Esse índice auxilia estudos para identificar, localizar ou delimitar regiões com déficit de recurso hídrico, afetando diretamente o uso da terra para atividades como agricultura ou pecuária, a longo prazo, levado à desertificação (Stadler, 1987). Sua aplicação ainda permanece, como demonstrado no mapeamento de índice de aridez para o Brasil, que identificou, pela primeira vez, a ocorrência de uma região árida no território brasileiro, no norte da Bahia, com base em dados climáticos do período 1990-2020 (Tomasella; Cunha; Marengo, 2023).

As mudanças climáticas, com base nas projeções de cenários futuros do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), tendem a intensificar a aridez em zonas semiáridas, tornando essas regiões progressivamente mais secas ao longo do século XXI (HUANG et al., 2016). A América do Sul figura entre as regiões mais afetadas por processos de desertificação, com cerca de 10% de seu território, aproximadamente 200 milhões de hectares já impactados, com tendência de agravamento em cenários futuros (VERGARA et al., 2015). Nesse contexto, insere-se o Semiárido Brasileiro, região que abriga mais de 28 milhões de habitantes (IBGE, 2010), configurando-se como a zona semiárida mais populosa do mundo.

Neste estudo, utiliza-se a base de dados CLIMBra (Ballarin et al.,2023), composta por projeções climáticas futuras de dez modelos do CMIP6 sob o cenário SSP2-4.5, para o cálculo do Índice de Aridez (IA). A partir das variáveis meteorológicas disponibilizadas, precipitação, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar, aplica-se a equação de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) para estimar a evapotranspiração de referência (ETo). A análise concentra-se no Nordeste, região onde se verifica a maior expressão espacial das zonas árida e semiárida do país. O emprego de múltiplos modelos climáticos permite avaliar a concordância entre as projeções, identificando regiões de maior robustez ou incerteza nas estimativas de aridez. Com isso, busca-se caracterizar a evolução espacial do déficit hídrico no Nordeste ao longo do século XXI, subsidiando análises sobre os impactos das mudanças climáticas nessa região.

MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Dados utilizados

Foram utilizadas projeções climáticas futuras do conjunto multimodelo CMIP6, disponibilizadas pela base de dados CLIMBra (Ballarin et al.,2023) sob o cenário de emissões SSP2-

1) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, UFPR, victor.shiraishi@ufpr.br
2) Departamento de Hidráulica e Saneamento, UFPR, detzel@ufpr.br

4.5. A base CLIMBra fornece dados diários *bias*-corrigidos para o Brasil no período 2015–2100, com resolução espacial de 0,25°. Foram empregados dez modelos climáticos: ACCESS-ESM1-5, CMCC-ESM2, EC-EARTH3, INM-CM4-8, INM-CM5, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2, MRI-ESM2 e NorESM2-MM. As variáveis utilizadas foram: temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa, velocidade do vento a 2 m, radiação solar líquida na superfície e precipitação.

2.2 Evapotranspiração de referência e Índice de Aridez

A evapotranspiração de referência (ET_0) foi calculada pelo método Penman-Monteith (Allen et al., 1998). O Índice de Aridez (IA) foi calculado como a razão entre a precipitação acumulada e a ETo acumulada no período:

$$IA = \frac{\sum P}{\sum E\,T_0} \quad (1)$$

Conforme a TABELA 1, a classificação mais usada internacionalmente é a da UNEP/UNCCD (adotada também pelo CEMADEN e INPE no Brasil):

Tabela 1- Classificação do Índice de Aridez

Classificação	Índice de Aridez (IA)
Árido	0,05 - 0,20
Semiárido	0,21 – 0,50
Subúmido seco	0,51 – 0,65
Úmido	> 0,65

Fonte: Resolução CONAMA Nº 238 (1997)

2.3 Análise de concordância multimodelo e margens de Tolerância

O IA foi calculado individualmente para cada um dos dez modelos em três períodos de 30 anos: 2020–2049, 2050–2079 e 2080–2100. Para avaliar a robustez das projeções, foi quantificado o número de modelos que projetam IA abaixo de um determinado limiar em cada célula da grade. Além do limiar exato de 0,20, foram consideradas margens de tolerância de 5% (IA < 0,25) e 10% (IA < 0,30) acima do limiar árido, de modo a incorporar a incerteza inerente às projeções e à própria classificação.

A concordância entre modelos no limiar de IA, conforme a TABELA 1, não decorre apenas da dispersão entre GCMs, mas também da própria estrutura do cálculo de ETo (Penman-Monteith), que combina não linearmente cinco variáveis climáticas independentes (cada uma projetada por um GCM). Isso acaba por amplificar erros em vez de cancelá-los, somando-se a simplificações estruturais (G = 0, z = 0 m) que deslocam o ETo absoluto de forma sistemática e igual para todos os modelos. Como o IA é a razão entre precipitação e ETo, qualquer viés em ETo se transmite inversamente ao índice. Esse acoplamento entre incerteza climática e incerteza metodológica justifica reportar os resultados sob margens de tolerância e contagem de concordância, em vez de tratar o IA como valor determinístico.

RESULTADOS

A Figura 1 sintetiza a concordância entre os 10 modelos CMIP6 quanto à classificação de aridez do Nordeste do Brasil, em três margens de tolerância sobre o limiar de aridez (0%, IA < 0,20; 5%, IA <0,25; 10%, IA < 0,30) e três janelas temporais de 30 anos (2020-2049, 2050-2079,

2080-2100). A cor de cada célula representa o número de modelos, entre 0 e 10, que projetam IA inferior ao limiar correspondente, constituindo uma medida direta de concordância inter-modelos. Sob o limiar estrito (IA < 0,20), a concordância é praticamente nula ao longo de todo o século: nenhuma célula do domínio atinge consenso de pelo menos 3 modelos (30%) em 2020-2049 ou 2050-2079, e apenas em 2080-2100 surge uma área de 55,8 × 10³ km² com esse grau mínimo de concordância, sem que em nenhum período ao menos metade dos modelos concorde entre si.

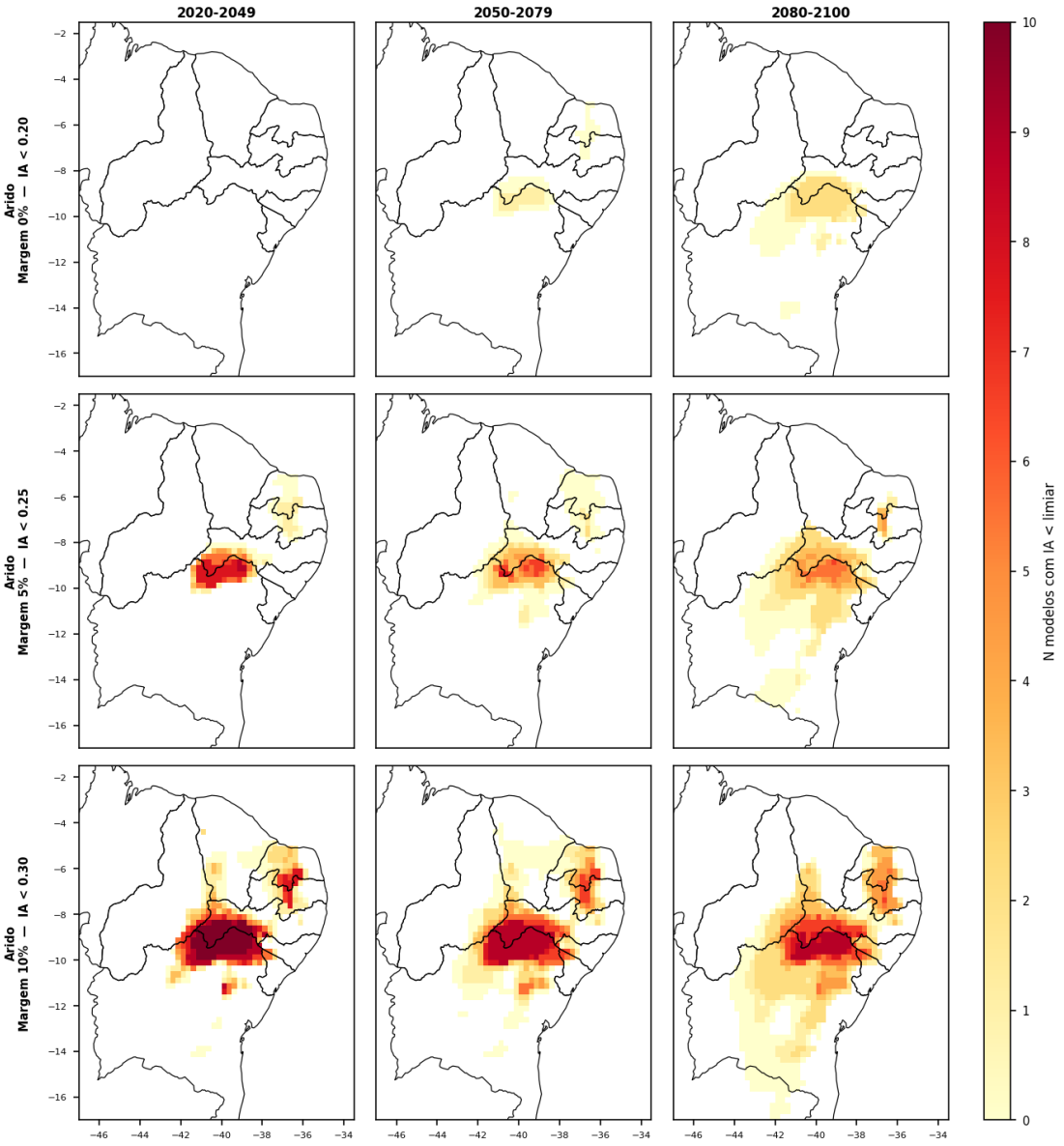


Figura 1 : Número de modelos CMIP6 (de um total de 10) que projetam Índice de Aridez abaixo do limiar árido com margens de tolerância de 0% (IA < 0,20), 5% (IA < 0,25) e 10% (IA < 0,30) para os períodos 2020–2049, 2050 2079 e 2080–2100, sob o cenário SSP2-4.5. Linhas em preto indicam os limites estaduais do Nordeste brasileiro.

Ao elevar a margem para 5 pontos percentuais (IA < 0,25), a área com concordância mínima (≥3 modelos) cresce de 52,8 × 10³ km² (2020–2049), para 69,6 × 10³ km² (2050–2079) e 154,4 × 10³ km² (2080–2099), enquanto a área de alta concordância (≥7 modelos) decresce de 27,5 × 10³ km² (2020–2049), para 9,2 × 10³ km² (2050–2079) e 0,8 × 10³ km² (2080–2099), e a unanimidade permanece nula em todos os períodos. O mesmo padrão se repete, amplificado, na margem de 10% (IA < 0,30): a área com concordância mínima quase dobra, passando de 178,4 × 10³ km² (2020–2049) para 200,5 × 10³ km² (2050–2079) e 320,2 × 10³ km² (2080–2099); a área com concordância

intermediária (≥5 modelos) permanece relativamente estável, variando de 130,8× 10^3 km² para 131,6 × 10^3 km² e 140,8 × 10^3 km² nos respectivos períodos; a área de alta concordância (≥7 modelos) decresce de 103,3 × 10^3 km² para 72,6 × 10^3 km² e a concordância total, presente em 50,5 × 10^3 km² no primeiro período, desaparece completamente a partir de 2050–2079.

CONCLUSÕES

Este estudo revela dois padrões complementares que devem ser lidos em conjunto. O primeiro é um sinal de aridificação progressiva: independentemente do limiar adotado, a área com concordância mínima entre os modelos (≥3 de 10) cresce monotonicamente do primeiro para o último período, indicando que o ensemble sinaliza expansão da aridez ao longo do século XXI. O segundo padrão, aparentemente contraditório, é o de divergência crescente sob limiares estritos: a em 100% ocorre apenas no primeiro período e apenas sob o limiar mais amplo (IA < 0,30, cobrindo 50,5 × 10^3 km²), desaparecendo completamente a partir de 2050–2079. Isso indica que, à medida que o clima se afasta das condições presentes, os modelos convergem quanto à direção da mudança, pois todos projetam expansão da aridez, mas divergem quanto à sua extensão espacial, posicionando de forma distinta os limites entre as zonas de transição.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. (1998). *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome/Italy, 300 p.

BALLARIN, A. S.; SONE, J. S.; GESUALDO, G. C.; SCHWAMBACK, D.; REIS, A.; ALMAGRO, A.; WENDLAND, E. C. (2023). "CLIMBra - Climate Change Dataset for Brazil". *Scientific Data*, v.10, p.47.

HUANG, J.; YU, H.; GUAN, X.; WANG, G.; GUO, R. (2016). "Accelerated dryland expansion under climate change". *Nature Climate Change*, v.6, p.166–171.

IBGE (2010). Censo Demográfico. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro/RJ.

PENMAN, H. L. (1948). "Natural evaporation from open water, bare soil and grass". *Proceedings of the Royal Society of London*, Series A, v.193, p.129-145.

STADLER, S. J. (1987). "Aridity Indexes", in *The Encyclopedia of Climatology*. Org. por Oliver, J. E. e Fairbridge, R. W., ed. Van Nostrand Reinhold Company, New York/USA, pp.102-107.

THORNTHWAITE, C. W. (1948). "An Approach toward a Rational Classification of Climate". *Geographical Review*, v.38, p.55-94.

TOMASELLA, J.; CUNHA, A. P. M. A.; MARENGO, J. A. Nota Técnica: Elaboração dos Mapas de Índice de Aridez e Precipitação Total Acumulada para o Brasil. Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN) / Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2023.

UNESCO (1979). *Map of the World Distribution of Arid Regions*. MAB Technical Notes 7, Paris/France.

VERGARA, W.; GALLARDO LOMELI, M.; FRANCO CHUAIRE, S. (2015). Initiative 20x20: A landscape restoration movement rises in Latin America and the Caribbean. World Resources Institute. Disponível em: https://www.wri.org/insights/initiative-20x20-landscape-restoration-movement-rises-latin-america-and-caribbean.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro concedido a esta pesquisa.