ANÁLISE DE PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA DO AR EM CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS (CMIP6) PARA O MUNICÍPIO DE LAGARTO/SE

Arivânia Bandeira Rodrigues [1] ; Diego Cezar dos Santos Araujo [2]& Vanine Elane Menezes de Farias [3]

RESUMO - Este artigo analisa as projeções climáticas futuras de precipitação e temperatura (máxima e mínima) para o município de Lagarto (SE) de 2015 a 2100, sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 do CMIP6. Os dados foram obtidos da base PROJENE, utilizando a Média Multi-Modelo corrigida pelo método *Quantile Delta Mapping* (QDM). Os resultados indicam redução nos totais pluviométricos anuais e achatamento da normal climatológica na quadra chuvosa (maio a julho), encurtando o período úmido efetivo. Paralelamente, projeta-se um aquecimento contínuo: no cenário SSP5-8.5, as temperaturas máximas médias superam 34 °C e as mínimas ultrapassam 25 °C no final do século, intensificando o estresse térmico diurno e noturno. A combinação entre o déficit de precipitação e o aumento da evapotranspiração potencial agrava o déficit hídrico regional. Conclui-se que o panorama de aridização projetado impõe riscos críticos à segurança hídrica e à agricultura local, evidenciando a urgência de integrar esses cenários ao planejamento estratégico municipal e à formulação de políticas públicas adaptativas.

ABSTRACT– This paper analyzes future climate projections of precipitation and temperature (maximum and minimum) for the municipality of Lagarto (SE) from 2015 to 2100, under the CMIP6 SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. The data were obtained from the PROJENE database, utilizing the Multi-Model Mean corrected by the Quantile Delta Mapping (QDM) method. The results indicate a reduction in annual rainfall totals and a flattening of the climate normal during the rainy season (May to July), shortening the effective wet period. Concurrently, continuous warming is projected: in the SSP5-8.5 scenario, average maximum temperatures exceed 34 °C and minimums surpass 25 °C by the end of the century, intensifying both daytime and nighttime thermal stress. The combination of the precipitation deficit and increased potential evapotranspiration aggravates the regional water deficit. It is concluded that the projected aridification outlook imposes critical risks to water security and local agriculture, highlighting the urgency of integrating these scenarios into municipal strategic planning and the formulation of adaptive public policies.

Palavras-Chave – Projeções climáticas; PROJENE; Semiárido nordestino

1- INTRODUÇÃO

As mudanças na intensidade e frequência do clima têm alterado significativamente os padrões de precipitação e temperatura, influenciando diretamente o regime hidrológico e a gestão das bacias hidrográficas (Son et al., 2020). Relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

[1]) Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares (HU-Brasil), Lagarto- Sergipe, 81 999169963, arivania_@hotmail.com;
[2]) Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, Pernambuco, 81 98815-1111 e diego.caraujo@ufpe.br;
[3]) Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Sertânia, Pernambuco, 83 98732-9645. vanine.menezes@ufpe.br;

(IPCC) apontam um aumento na frequência e intensidade de extremos climáticos atribuídos às mudanças do clima (IPCC, 2014; IPCC, 2022), e projetam que as regiões com menor capacidade de adaptação, como o Semiárido com a Caatinga, serão as mais afetadas. Nesse contexto, o Nordeste brasileiro destaca-se como uma das regiões mais sensíveis às mudanças climáticas, com projeções que indicam até 22% de redução de chuvas até o final deste século (IPCC, 2022).

Essa vulnerabilidade é acentuada no atual Semiárido brasileiro, que abrange aproximadamente 1,3 milhão de km², 1.477 municípios IBGE (2022) sendo formado por partes dos estados do MA, PI, CE, RN, PB, PE, AL, SE, BA, MG e ES e engloba grande parte do Bioma Caatinga (IBGE, 2022). Marcado por alta variabilidade climática, precipitações médias anuais entre 300 e 800 mm e temperaturas de 24°C a 28°C, o ecossistema local é altamente sensível à perda de chuvas e ao aumento da temperatura. A aridização do semiárido e a diminuição de vazões fluviais projetadas para as próximas décadas representam riscos críticos para a segurança hídrica. O Relatório de Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos do Brasil (ANA, 2024) projetam que a disponibilidade hídrica pode cair mais de 40% em bacias do Nordeste até 2040, com aumento de rios intermitentes.

No Estado de Sergipe, estudos indicam tendência de queda nos valores anuais de chuva em todo o território, com aumento significante nos extremos de temperaturas máximas e mínimas (Castelhano & Pinto, 2022). Mais recentemente, Silva et al. (2025) documentaram que, entre os períodos 1961–1990 e 1981–2010, houve redução na precipitação total em Sergipe, enquanto a temperatura média aumentou na região Nordeste.

Essas alterações em macro e mesoescala transferem uma pressão imediata para o nível municipal. No município de Lagarto, localizado no centro-sul de Sergipe e inserido na região semiárida, as anomalias climáticas podem representar uma ameaça direta ao abastecimento de água urbano e rural, à viabilidade da agricultura familiar e à manutenção da biodiversidade da Caatinga. Tais riscos reforçam a necessidade de um planejamento estratégico que quantifique os impactos esperados, orientando decisões sobre o uso do solo, o manejo de recursos hídricos e o dimensionamento de infraestruturas hidráulicas urbanas resilientes (Noor et al., 2018).

Para fundamentar essas estratégias de mitigação e adaptação, o uso de projeções climáticas futuras é indispensável, pois fornece aos tomadores de decisão os cenários necessários para o planejamento a longo prazo (Nashwan e Shahid, 2020). É essencial conhecer a magnitude da variabilidade climática local para prever a ocorrência de secas mais frequentes ou mudanças na sazonalidade hídrica.

Diante do exposto, o presente artigo tem como objetivo analisar as projeções climáticas futuras de precipitação e temperatura para o município de Lagarto (SE), compreendendo o período de 2015 a 2100. A avaliação é conduzida sob diferentes trajetórias socioeconômicas e de emissões de gases de efeito estufa, focando especificamente nos cenários SSP2-4.5 (intermediário) e SSP5-8.5 (pessimista), visando fornecer uma base científica para a formulação de políticas públicas e a gestão adaptativa dos recursos hídricos locais.

2- METODOLOGIA

2.1 - Área de estudo

A área de estudo compreende o município de Lagarto, situado na região centro-sul do estado de Sergipe, Nordeste do Brasil, entre as coordenadas 10º55'02" de latitude Sul e 37º39'00" de longitude Oeste, com uma altitude média de 183 metros (Figura 1).

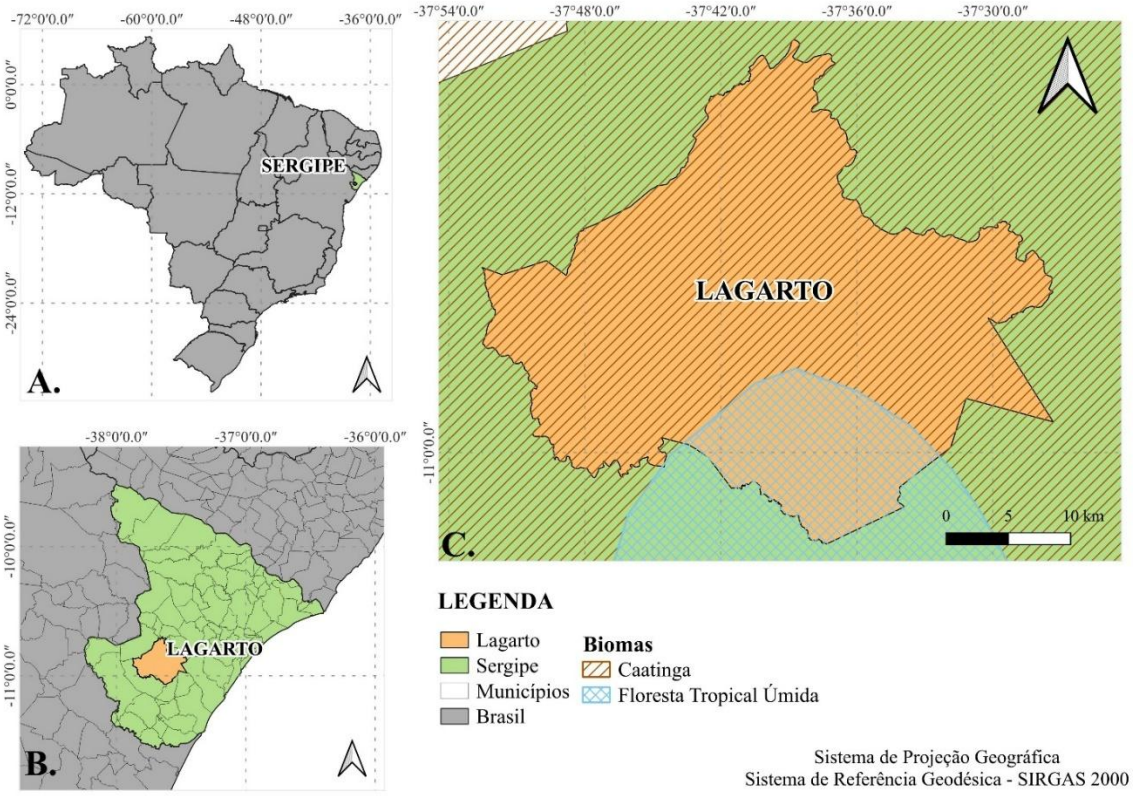


Figura 1 – Localização do município de Lagarto-SE, Brasil.

Com uma extensão territorial de 968,921 km² (IBGE, 2024), Lagarto consolida-se como o terceiro maior município do estado em área. Do ponto de vista demográfico, o município abriga uma população de 101.579 habitantes (IBGE, 2022), sendo considerado um dos principais produtores estaduais de feijão, mandioca e laranja, além de possuir forte atuação na pecuária de corte e na produção de tabaco.

2.2 – Dados Climáticos e correção de viés

A fim de analisar as alterações climáticas, extremos climáticos e seus efeitos na hidrologia, foram empregados dados climáticos provenientes dos modelos climáticos globais do CMIP6. Os dados foram obtidos a partir da base de dados corrigidos da PROJENE (Projeções de Dados Climáticos para o Nordeste) (Araujo *et al*., 2026), desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa NERHIS (Núcleo de Estudos de Recursos Hídricos do Semiárido) que realizaram o processo de extração da plataforma *Earth System Grid Federation* (ESGF), cobrindo o período histórico e as projeções futuras (2015 a 2100) sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5.

O cenário SSP2-4.5 apresenta desafios moderados em termos de mitigação e adaptação, associados ao desenvolvimento contínuo de recursos de combustíveis fósseis em escala global. O cenário SSP 5-8.5 indica desafios mais significativos em relação à mitigação e sugere uma abordagem menos pronunciada para a adaptação às mudanças climáticas (Gebrechorkos *et al*., 2023).

A PROJENE disponibiliza 10 (dez) Modelos de Circulação Global (MCGs) (ACCESS-CM2, GFDL-CM4, GFDL-ESM4, HadGEM3-GC31-LL, INM-CM4-8, IPSL-CM6A-LR, MIROC6, MPI-ESM1-2, NESM3 e NorESM2-MM) e a Média Multi-Modelo (MMM) desse conjunto, todos reamostrados para resolução comum de 0,25° × 0,25°. A estratégia da PROJENE de adotar o *ensemble* (MMM), segue as recomendações do IPCC (Herger et al., 2018), consolidando-se como uma métrica robusta e cenário de referência primário para o planejamento estratégico. Essa abordagem reduz as incertezas inerentes ao sinal da mudança climática, cujo risco seria elevado caso se utilizasse um único modelo isolado.

Como referência observacional para o período histórico e correção de viés, foi utilizado o *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BR-DWGD) (Xavier et al., 2022), com resolução também de 0,25°. A padronização temporal incluiu atribuição de calendário completo a todos os modelos, com os dias ausentes preenchidos como NaN para garantir a continuidade cronológica das séries de longo prazo.

O método para correção de viés selecionado foi o *Quantile Delta Mapping* (QDM), caracterizado por sua capacidade de preservar a mudança relativa ou absoluta projetada em cada quantil, combinando a eficiência do *Quantile Mapping* (QM) com robustez superior na preservação do sinal de mudança climática (Cannon et al., 2015). A correção foi configurada como multiplicativa para precipitação e aditiva para temperatura, com agrupamento por mês (*time.month*) para preservar a sazonalidade regional. O período histórico foi dividido em treinamento (1961–1995) e validação independente (1996–2014). O processamento foi executado em Python com o repositório *xclim*.

3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 - Projeções Interanuais e Alterações na Normal Climatológica da Precipitação

A análise da série temporal anual das projeções de precipitação para o município de Lagarto-SE (Figura *2*) evidencia uma clara alteração no regime hídrico do município para as próximas décadas. O período histórico (observado até 2014) apresenta uma variabilidade natural com volumes anuais oscilando predominantemente entre 1.000 mm e 1.350 mm, evidenciado também no documento Informações Básicas Municipais (abril/2022). No entanto, ao analisar as projeções até o ano de 2100, observa-se uma tendência geral de redução nos acumulados anuais em ambos os cenários avaliados.

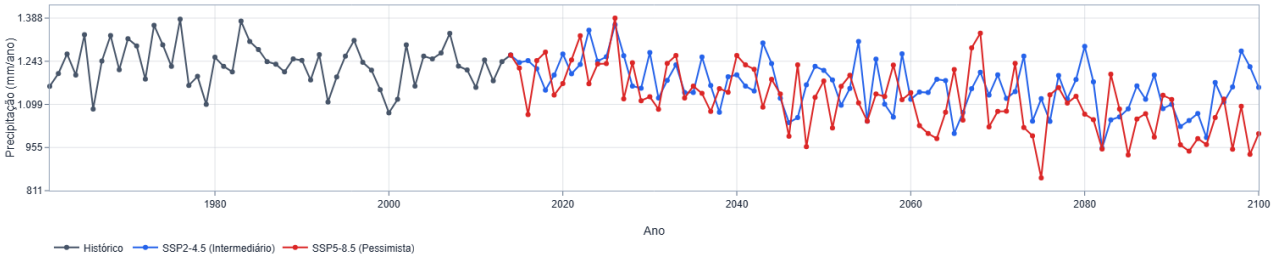


Figura 2 - Projeções interanuais de precipitação total (mm/ano) para o município de Lagarto-SE sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (2015-2100) em comparação ao período histórico (1961-2014).

No cenário intermediário (SSP2-4.5), a precipitação projeta uma leve tendência de decréscimo, mantendo uma alta variabilidade interanual, mas com os volumes totais frequentemente situando-se abaixo da média histórica. Já no cenário pessimista (SSP5-8.5), a redução do volume precipitado é substancialmente mais severa. A partir da segunda metade do século (pós-2050), o cenário SSP5-8.5 indica um agravamento das condições de déficit hídrico, com anos extremos apresentando volumes anuais significativamente reduzidos, chegando a valores próximos ou inferiores a 900 mm/ano (como observado nas décadas de 2070 e 2090). Esse comportamento sugere um aumento na frequência e na intensidade de anos secos extremos ao final do século sob uma trajetória de altas emissões.

Além da redução do volume total anual, as mudanças climáticas projetam impactos diretos na distribuição mensal das chuvas (Figura *3*). O ciclo climatológico histórico de Lagarto é bem definido, com a quadra chuvosa concentrada entre os meses de março e julho, atingindo seu pico máximo no mês de maio (aproximadamente 195 mm/mês), seguido por um período de estiagem mais acentuado entre setembro e dezembro.

As projeções indicam um achatamento da curva durante o período chuvoso. Em ambos os cenários futuros (SSP2-4.5 e SSP5-8.5), nota-se uma supressão dos volumes de precipitação exatamente nos meses de maior recarga hídrica (maio a julho). No cenário SSP5-8.5, essa redução é mais agressiva: o pico de maio sofre uma queda expressiva, e a precipitação nos meses de junho e

julho é notavelmente inferior à média histórica. Adicionalmente, o período seco (agosto a novembro) registra anomalias negativas persistentes.

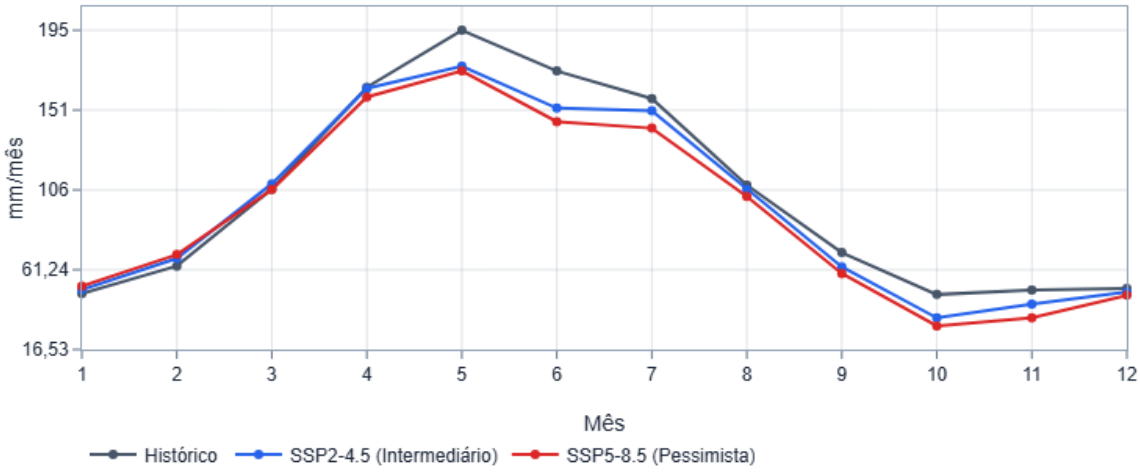


Figura 3 - Normal climatológica da precipitação (mm/mês) para o município de Lagarto-SE: histórico e projeções futuras (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

Entre 2023 e 2025, Sergipe registrou períodos de seca grave nos territórios do Alto Sertão, Médio Sertão e Agreste Central, incluindo Lagarto, com expansão da seca moderada para grave em municípios do Leste Sergipano e Baixo São Francisco (Semac, 2025). O efeito combinado da redução do volume anual com a atenuação da normal climatológica mensal aponta para um encurtamento do período úmido efetivo em Lagarto.

Do ponto de vista hidrológico e ambiental, a diminuição dos picos de chuva na quadra chuvosa reduzirá a capacidade de escoamento superficial e de recarga dos aquíferos e rios da região, como a sub-bacia do rio Piauitinga. Essa configuração impõe um cenário de estresse hídrico prolongado, ameaçando a segurança hídrica para o abastecimento e elevando a vulnerabilidade das principais atividades socioeconômicas locais, como a agricultura de sequeiro e a subsistência no bioma Caatinga, que já apresenta perda de cobertura vegetal original, intensificando a erosão do solo e aumento a vulnerabilidade à desertificação.

3.2 - Projeções Interanuais e Alterações na Normal Climatológica da Temperatura Mínima

A análise da série temporal para a temperatura mínima anual (Figura *4*) revela uma tendência contínua de aquecimento para o município de Lagarto ao longo do século XXI. No período histórico, as temperaturas mínimas médias anuais oscilaram predominantemente na faixa de 20,5 °C a 21,8 °C. Contudo, as projeções climáticas indicam um distanciamento progressivo dessa linha de base histórica já a partir das primeiras décadas do século.

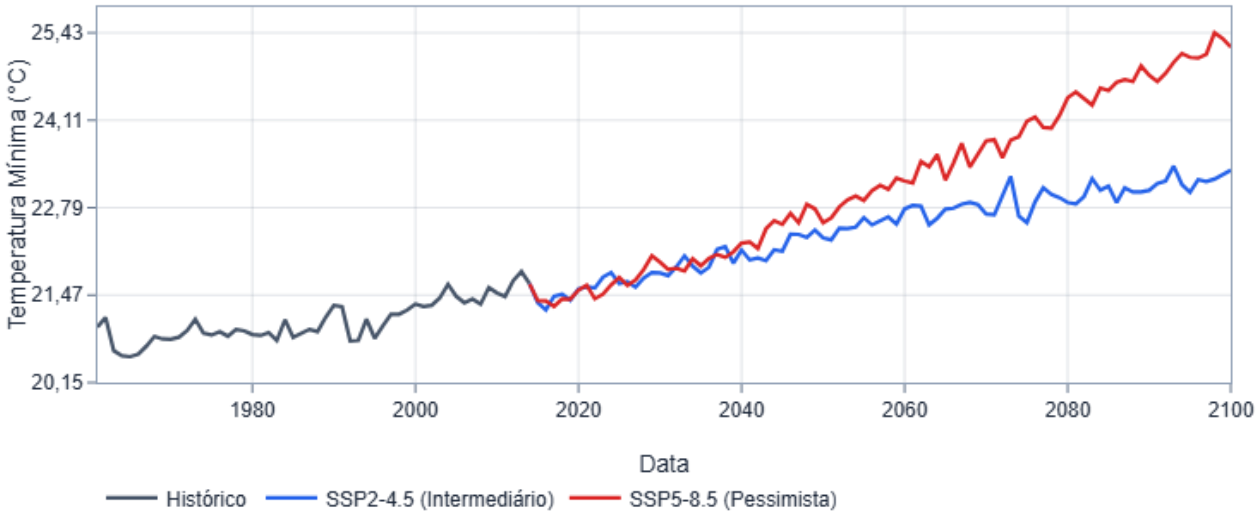


Figura 4 - Projeções interanuais da temperatura mínima média (°C) para o município de Lagarto-SE sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (2015-2100) em comparação ao período histórico.

No cenário intermediário (SSP2-4.5), observa-se um aquecimento gradual que tende a uma estabilização relativa nas últimas décadas do século, com as anomalias positivas elevando a temperatura mínima para a faixa de 23 °C a 23,5 °C até o ano de 2100. Por outro lado, o cenário pessimista (SSP5-8.5) projeta um aumento agressivo e linear. Sob essa trajetória de altas emissões, a temperatura mínima ultrapassa a marca dos 25 °C no final do século, o que representa um aquecimento considerável de aproximadamente 3,5 °C a 4 °C em relação ao histórico. Esse acréscimo acentuado nas temperaturas mínimas indica noites significativamente mais quentes, o que pode agravar o estresse térmico sobre a população e aumentar as taxas de evapotranspiração noturna na região.

Ao analisar a distribuição climatológica mensal (Figura *5*), constata-se que o padrão sazonal da temperatura mínima é preservado no futuro, porém com um deslocamento (anomalia positiva) em toda a curva ao longo de todos os meses do ano. Historicamente, Lagarto apresenta os maiores valores de temperatura mínima entre janeiro e março (em torno de 22,5 °C) e os menores registros durante o inverno austral, especialmente em julho e agosto (caindo para cerca de 19 °C).

As projeções indicam que não haverá alívio térmico, mesmo nos meses mais frios do ano. No cenário SSP2-4.5, a curva sofre uma elevação quase uniforme de aproximadamente 1,5 °C a 2 °C em todos os meses. O impacto mais severo é notado no cenário SSP5-8.5, onde a temperatura mínima projetada para os meses de "inverno" (julho e agosto) será em torno de 21 °C, um valor que se aproxima das temperaturas típicas de verão do período histórico. Durante o verão projetado sob o cenário SSP5-8.5, as mínimas médias aproximam-se dos 24,7 °C.

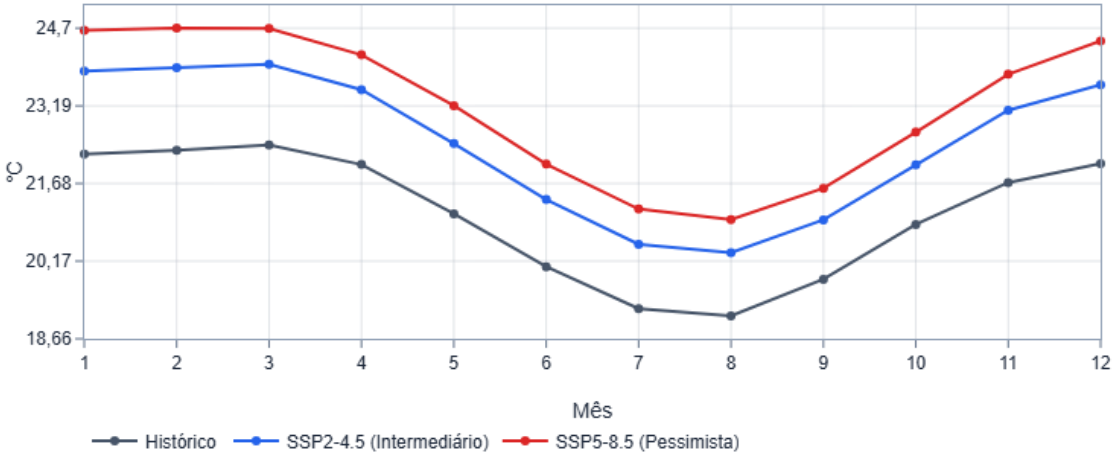


Figura 5 - Normal climatológica da temperatura mínima mensal (°C) para o município de Lagarto-SE: histórico e projeções futuras (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

3.3 - Projeções Interanuais e Alterações na Normal Climatológica da Temperatura Máxima

Acompanhando o comportamento das temperaturas mínimas, a temperatura máxima projeta um cenário de intenso estresse térmico diurno. A série temporal da temperatura máxima anual (Figura *6*), constata um cenário de intenso e contínuo de aquecimento projetado para Lagarto até o final do século XXI. Durante o período histórico, as temperaturas máximas médias anuais variaram na faixa de 28,5 °C a 30 °C. No cenário SSP2-4.5, a tendência alcança valores médios anuais em torno de 31,5 °C no fim do século. Sob o cenário de altas emissões (SSP5-8.5), o aquecimento é ainda mais extremo: as médias anuais superam a marca dos 34 °C na última década de análise, configurando um salto superior a 4 °C em relação ao clima presente.

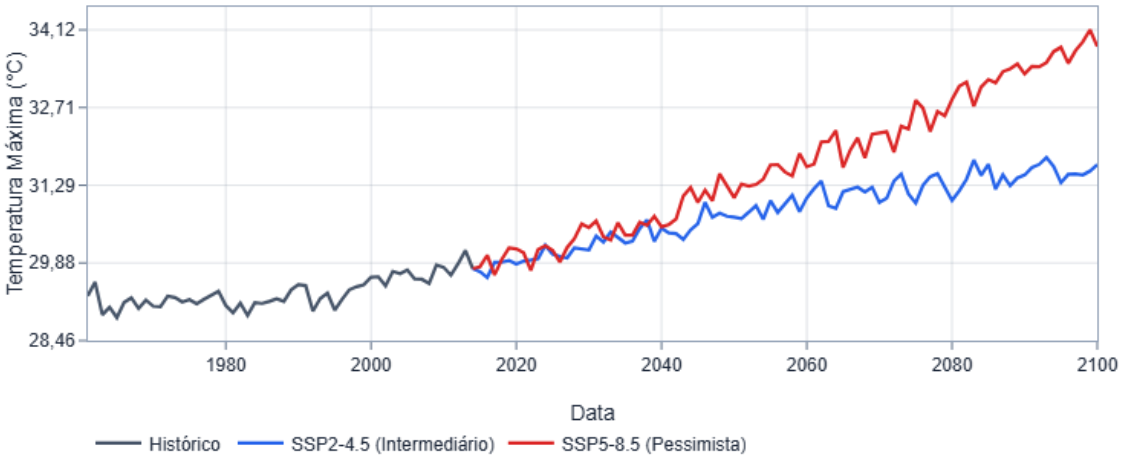


Figura 6 - Projeções interanuais da temperatura máxima média (°C) para o município de Lagarto-SE sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (2015-2100) em comparação ao período histórico.

Ao observar a normal climatológica mensal da temperatura máxima (Figura *7*), constata-se um deslocamento expressivo para temperaturas mais elevadas. Historicamente, os picos de calor concentram-se de janeiro a março (médias de 31 °C a 31,5 °C). Nas projeções do cenário SSP5-8.5, constata-se que até mesmo os meses historicamente mais amenos (julho e agosto) apresentarão

máximas entre 28,5 °C e 29 °C. Durante o período de verão projetado, as médias máximas mensais encostam na marca extrema de 34 °C. Esse aumento na temperatura máxima média indica que a ocorrência de picos diários de calor extremo (ondas de calor) será exponencialmente mais frequente e intensa, impondo riscos severos à saúde pública e à infraestrutura urbana.

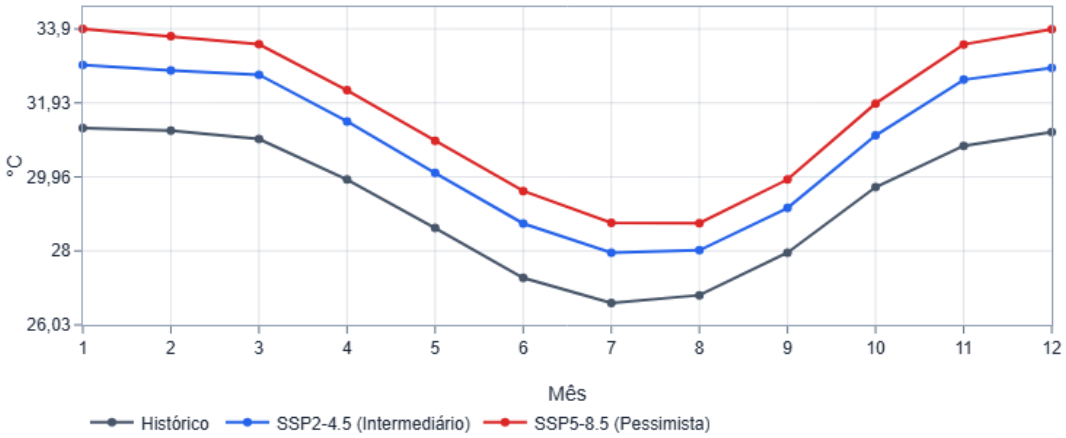


Figura 7 - Normal climatológica da temperatura máxima mensal (°C) para o município de Lagarto-SE: histórico e projeções futuras (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

A elevação simultânea e acentuada nas normais climatológicas das temperaturas máximas e mínimas altera profundamente o balanço de energia na região de Lagarto. Esse aquecimento térmico generalizado atua como um catalisador para a evapotranspiração potencial. Quando associado à redução dos volumes acumulados e ao achatamento da normal climatológica de precipitação (discutidos na Seção 3.1), consolida-se um cenário de forte retroalimentação climática que agrava o déficit hídrico. Na prática, a combinação de dias muito quentes, noites sem alívio térmico e menor recarga pluvial acelera a perda de umidade do solo. Esse panorama eleva severamente o risco de desertificação no bioma Caatinga e impõe desafios cruciais para a resiliência das culturas de sequeiro e para a gestão dos mananciais urbanos.

4- CONCLUSÕES

O estudo das projeções climáticas (2015-2100) para Lagarto (SE) evidencia uma trajetória de aquecimento e aridização, agravada severamente no cenário SSP5-8.5. Os resultados indicam uma redução do volume pluviométrico anual podendo comprometer a disponibilidade hídrica local. Concomitantemente, projeta-se uma elevação nas temperaturas, com máximas superando 34 °C e mínimas mais altas, intensificando o estresse térmico diário. A combinação entre o déficit de chuvas e o aumento contínuo da evapotranspiração acelera a perda de umidade do solo, elevando o risco de desertificação da Caatinga e ameaçando a agricultura familiar.

Diante do exposto, destaca-se a necessidade premente de integrar as projeções climáticas ao planejamento estratégico municipal. A formulação de políticas públicas adaptativas, a modernização

das infraestruturas de saneamento e drenagem, o manejo sustentável das demandas hídricas e o fortalecimento de regulamentações, como o Plano Municipal de Arborização Urbana, regulamentado pela Lei nº 1.009/2021, são medidas indispensáveis para mitigar riscos, construir resiliência e garantir a segurança hídrica e socioeconômica face às incertezas climáticas.

AGRADECIMENTOS - Os autores agradecem ao Núcleo de Estudos de Recursos Hídricos do Semiárido (NERHIS) pelo desenvolvimento e disponibilização da base de dados climáticos PROJENE. O agradecimento estende-se ao Hospital Universitário de Lagarto (HUL-UFS), vinculado à Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares (HU-Brasil), pelo constante incentivo ao desenvolvimento científico, à inovação e à qualificação profissional de seu corpo técnico.

REFERÊNCIAS

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. (2024). Impacto da mudança climática nos recursos hídricos no Brasil. Brasília, 96p.

ARAUJO, D. C. dos S; RODRIGUES, A. B.; FARIAS, V. E. M. de; CLAUDINO, C. M. de A; SILVA, C.; RIBEIRO NETO, G.; SILVA, S. F. da; VASCONCELOS, R. (2026). PROJENE: High-Resolution Bias-Corrected Climate Projections Dataset (CMIP6) for Northeast Brazil. Versão 1.1.0. Zenodo, 30 maio 2026. Disponível em: https://doi.org/10.5281/zenodo.20466697. Acesso em: 15.06.2026.

CASTELHANO, F. J.; PINTO, J. E. S. (2022). Tendências e alterações climáticas no Estado de Sergipe, nordeste do Brasil. Revista do Departamento de Geografia, v. 42, e185565.

GEBRECHORKOS, S.; TAYE, M.; BIRHANU, B.; SOLOMON, D.; DEMISSIE, T. (2023). Future changes in climate and hydroclimate extremes in East Africa. Earth's Future, 11(2).

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2022. Semiárido brasileiro: base de dados.

IPCC. (2014). 5th Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland.

IPCC. Sixth Assessment Report (AR6): Climate Change. (2022). Cambridge: Cambridge University Press.

NASHWAN, M. S.; SHAHID, S.; CHUNG, E.-S. (2020). High-resolution climate projections for a densely populated Mediterranean region. Sustainability, 12:3684. https://doi.org/10.3390/su12093684

NOOR, M.; ISMAIL, T.; CHUNG, E.-S.; SHAHID, S.; SUNG, J. H. (2018). Uncertainty in rainfall intensity duration frequency curves of Peninsular Malaysia under changing climate scenarios. Water, 10(12).

SEMAC (Secretaria de Estado do Meio Ambiente de Sergipe). Seca grave se mantém nos territórios de Sergipe. Governo de Sergipe, 21 jan. 2025.

SILVA, A. D. G. DA, LOPES, R. F., FERNANDES, I. W. DE L., PEREIRA, G. V. DE A., SILVA, C. L. C., REIS, J. S., & LUCENA, R. L. (2025). Mudanças climáticas e variabilidade termopluviométrica na região Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira De Climatologia*, *36*(21), 533–559.

SON, C. et al. Climate change impacts on hydrological patterns in tropical basins. Journal of Hydrology, v. 589, p. 125-143, 2020.

XAVIER, A.C.F.; MARTINS, L.L.; RUDKE, A.P.; DE MORAIS, M.V.B.; MARTINS, J.A.; BLAIN, G.C. (2022). Evaluation of Quantile Delta Mapping as a bias-correction method in maximum rainfall dataset from downscaled models in São Paulo state (Brazil). International Journal of Climatology 42(1), pp. 175 – 190. DOI: 10.1002/joc.7238.