XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE
XVIII ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

MODELAGEM HIDROLÓGICA SOB MUDANÇA CLIMÁTICA NA ÁREA DA CAATINGA DA BACIA DO RIO IPOJUCA

Arisvaldo Vieira Méllo Júnior[1]; Silvana Susko Marcellini[2] ; Lina Maria Osorio Olivos[3]; Rogério Moreira Chagas[4] ; André Schardong[5]; Flávia Ribeiro dos Santos Jacobsem[6] & Gabriel Anísio dos Santos Soares[7]

RESUMO – Este estudo avalia os resultados da aplicação do modelo hidrológico distribuído RUBEM Hydrological (Rainfall-Runoff Balance Enhanced Model) na região da Caatinga da bacia do rio Ipojuca. Como dados de entrada do modelo foram utilizadas as séries de projeção climática do modelo regional Eta-MIROC5 (cenário RCP 4.5), com correção de viés. A partir dessas projeções, as simulações hidrológicas foram efetuadas para três horizontes temporais: curto (2026–2036), médio (2037–2053) e longo prazo (2054–2070). Por fim, os impactos sobre a dinâmica hídrica da bacia foram quantificados com base no comportamento das curvas de permanência de vazão e na análise integrada das variáveis de precipitação, escoamento superficial, evapotranspiração e recarga do aquífero para cada cenário simulado.

ABSTRACT–This study assesses the results of applying the distributed hydrological model RUBEM (Rainfall-Runoff Balance Enhanced Model) in the Caatinga region of the Ipojuca River basin. As model input data, climate projection series from the Eta-MIROC5 regional model (RCP 4.5 scenario) with bias correction were used. Based on these projections, hydrological simulations were performed for three temporal horizons: short-term (2026–2036), medium-term (2037–2053), and long-term (2054–2070). Finally, the impacts on the basin's water dynamics were quantified based on the behavior of flow duration curves and the integrated analysis of precipitation, surface runoff, evapotranspiration, and aquifer recharge variables for each simulated scenario.

Palavras-Chave – Mudanças Climáticas, Modelagem hidrológica distribuída, Bioma Caatinga

[1]) Escola Politécnica da USP, Av. Prof. Almeida Prado, 83, Travessa do Biênio, Prédio das Engenharias Civil e Ambiental, Cidade Universitária, São Paulo, SP, CEP 05508-070. Cel. (11)99534-7674, arisvaldo@usp.br.
[2]) Laboratório de Sistemas de Suporte à Decisão, Escola Politécnica da USP, Av. Prof. Almeida Prado, 83, Travessa do Biênio, Prédio das Engenharias Civil e Ambiental, Cidade Universitária, São Paulo, SP, CEP 05508-070. silvana.marcellini@gmail.com.
[3]) Idem. limaos90@gmail.com.
[4]) Idem. rogchagas@gmail.com.
[5]) Idem. andreschardong@gmail.com.
[6]) Idem. jacobsem@gmail.com.
[7]) Idem. gabriel.gass@gmail.com.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais representam um dos maiores desafios para a gestão sustentável dos recursos hídricos no século XXI, com impactos potencialmente severos sobre regiões semiáridas. No Nordeste brasileiro, a região da Caatinga caracteriza-se por uma altíssima vulnerabilidade socioambiental, decorrente de seu regime de chuvas predominantemente torrencial, elevados índices de evapotranspiração e solos rasos sobre o embasamento cristalino (Pernambuco, 2010).

No bioma Caatinga, a condição climática natural é de pronunciado estresse hídrico com baixas taxas de estoques de carbono (PBMC, 2014). Projeções climáticas indicam uma significativa redução das chuvas e aumento da variabilidade nos padrões de precipitação resultando em secas mais intensas e frequentes e em profundas alterações no funcionamento deste ecossistema. Segundo Mendonça e Danni-Oliveira (2007), Silva e Souza (2018), Nóbrega et al. (2022), Valdez et al. (2022) e Tomasella et al. (2025), essas mudanças podem desencadear o processo de desertificação da Caatinga, seja pelas mudanças climáticas em andamento, seja pela própria ação humana, especialmente a agropecuária e as queimadas

Diante de cenários que apontam para o aumento na frequência de eventos extremos de seca e alterações nos padrões de precipitação, compreender como essas variações atmosféricas irão se propagar pelo ciclo hidrológico local torna-se uma tarefa urgente e complexa.

Nesse contexto, os modelos hidrológicos distribuídos emergem como ferramentas computacionais indispensáveis para a análise de cenários futuros. Diferente dos modelos conceituais globais (ou concentrados), que tratam a bacia hidrográfica como uma unidade homogênea, os modelos distribuídos operam de forma espacializada, simulando fisicamente os processos do balanço hídrico em escala de célula ou pixel. Essa característica permite capturar a heterogeneidade espacial do uso e cobertura do solo, das classes pedológicas e da topografia. Consequentemente, tornam-se capazes de prever com maior precisão espacial onde e como ocorrerão as alterações no escoamento superficial, na evapotranspiração real e na recarga líquida dos aquíferos, traduzindo previsões climáticas globais em respostas hidrológicas locais detalhadas.

Assim, o acoplamento de modelos climáticos regionais (MCRs) a modelos hidrológicos distribuídos viabiliza a quantificação dos impactos sobre a disponibilidade de água com alta resolução espacial e temporal. Essa abordagem detalhada não apenas subsidia a comunidade científica no entendimento das dinâmicas ecológicas e hídricas da Caatinga, mas também fornece aos gestores públicos dados fundamentais para o planejamento de estratégias de adaptação, mitigação e conservação de bacias hidrográficas estratégicas face aos novos cenários climáticos do planeta.

2. ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Ipojuca (Unidade de Planejamento Hídrico UP3 de Pernambuco) abrange uma área total de aproximadamente 3.435 km², estendendo-se desde o Agreste/Sertão (nascente em Arcoverde, a cerca de 900 m de altitude) até o litoral sul do estado. Desta área, aproximadamente 2.410 km² são cobertos pelo bioma da Caatinga na bacia do rio Ipojuca, da nascente, na serra do Pau d´Arco, em Arcoverde, até o médio curso desse rio. O bioma Caatinga e suas zonas de transição ecológica dominam as porções do Alto e Médio Ipojuca, inseridas no semiárido pernambucano.

3. METODOLOGIA

Para este estudo foi utilizado o modelo hidrológico distribuído RUBEM Hydrological (Rainfall-Runoff Balance Enhanced Model), (Méllo Júnior et al., 2022), cujo processo hidrológico é baseado em balanço de água no solo em cada pixel, e vazão total calculada após composição de fluxo resultante acumulado, conforme direção de fluxo da rede de drenagem estabelecida pelo modelo digital de elevação (MDE). Para essa análise foram considerados 3 cenários de simulação projetados para os seguintes períodos: (a) curto prazo, que inclui o período de janeiro de 2026 a dezembro de 2036; (b) Médio prazo, para o período de janeiro de 2037 a dezembro de 2053 e (c) Longo prazo, para o período de janeiro de 2054 a dezembro de 2070.

3.1 Dados Utilizados

O cenário projetado é caracterizado por um horizonte de cálculo de longo prazo, que envolvem alterações dos dados climatológicos e hidrológicos decorrentes das mudanças climáticas globais e do uso da terra, caracterizado pela cobertura vegetal e o NDVI.

Os dados históricos de chuva e de vazão foram obtidos da ANA (2020) e da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), para o período de 1963 a 2018, que passaram por um processo de consistência. Os dados meteorológicos históricos foram obtidos no INMET (2020).

Os dados meteorológicos e de chuva futuros, considerados na modelagem, projetados até 2070, foram obtidos dos modelos regionais de mudanças climáticas (MCR ETa), disponíveis para a América do Sul, gerados pelo CPTEC/INPE na resolução de 20 km (Chou et al., 2014), para o seguinte modelo climático global: MIROC5 - *Model for Interdisciplinary Research on Climate* (Watanabe et al., 2010). Billerbeck et al. (2021) aplicaram uma modelagem para correção de viés dos dados de chuva dos MCRs, e uma análise multicritério para selecionar o modelo que melhor

representa o regime pluviométricos em cada bacia, com base em um coeficiente estatístico para medir a performance dos modelos climáticos tomando-se como critério as chuvas médias, máximas e mínimas mensais e anuais. Os cenários climáticos projetados adotados foram os Representative Concentration Pathways (RCP 4.5 e RCP8.5) que refletem os caminhos para atingir um forçamento radioativo específico de 4,5 e 8,5 W m-2, respectivamente, até o ano 2100. Eles representam um cenário intermediário e um cenário de alta emissão em termos de forçamento de radiação (Moss et al., 2010). Na área de estudo foi utilizado o Eta-MIROC5 RCP4.5, com correção de viés.

O modelo digital de elevação (MDE) utilizado foi NASADEM - Digital Elevation Model National Aeronautics and Space Administration (LP DAAC, 2018). Os dados sobre classes do solo foram obtidos do Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2018). Os dados de cobertura do solo foram obtidos do Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo do Brasil – MapBiomas da coleção 4, período de 2000 a 2018. Também foi utilizado o índice de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI (Jensen, 2009), para auxiliar a caracterização da superfície e servir de entrada para o modelo hidrológico. Segundo os dados do MapBiomas, coleção 4, a área de estudo apresenta em torno de 40% de formação savânica, 55% de pastagem e o restante está distribuído entre formação florestal, campestre, mosaico de agricultura e pastagem, área urbana e água.

A projeção da cobertura do solo para as simulações dos cenários projetados foi determinada baseando-se numa maior ou menor tolerância à perda de solo, estimada variando os fatores de cobertura (C) e erosividade da chuva (R) da Equação Universal (USLE). O fator R foi determinado com a chuva projetada pelo MCR, para o cenário climático RCP 4.5, caracterizado por apresentar estabilização climática moderada que assume a implementação de políticas globais de mitigação para limitar a emissão de gases de efeito estufa, e uma redução de 5% da perda de solo em relação à 2018, (Méllo Júnior et al., 2023). O cenário é favorável à conservação do solo e ao reflorestamento e válido a partir de 2035.

3.2 Modelagem Hidrológica

O modelo hidrológico distribuído *RUBEM Hydrological* (*Rainfall-Runoff Balance Enhanced Model*), (Méllo Júnior et al., 2022). O *RUBEM* foi desenvolvido com uma estrutura para processos físicos, buscando representar as heterogeneidades espaço-temporal das variáveis de solo, uso da terra, topografia, vegetação e clima, usando dados de sensoriamento remoto para identificar os padrões de balanço hídrico do solo, por meio da evapotranspiração, interceptação, fluxo de base, fluxo lateral, recarga e escoamento. O modelo usa nove parâmetros que foram calibrados utilizando dados

históricos da bacia do rio Ipojuca, aplicando-se um algoritmo *Differential Evolution* (Storn e Price, 1997). Foi aplicado o índice de desempenho de Nash e Sutcliffe (1970) para avaliar os resultados da calibração em todos os postos fluviométricos utilizados. A integração da variabilidade espaço-temporal de variáveis edáficas, de cobertura vegetal e climáticas em modelos hidrológicos distribuídos viabiliza uma análise robusta e aprofundada na gestão de recursos hídricos.

3.3 Resultados

Os resultados das simulações hidrológicas na porção da Caatinga pertencente à bacia do rio Ipojuca, abrangendo os cenários de curto (jan./2026 a dez/2036), médio (jan./2037 a dez/2053) e longo prazo (jan./2054 a dez/2070), são apresentados conforme a seguinte estrutura: (a) hidrogramas das vazões simuladas; (b) curvas de permanência das vazões; e (c) mapas de precipitação (dado de entrada), evapotranspiração, recarga e escoamento superficial, correspondentes aos meses mais seco e mais úmido identificados em cada cenário. A Figura 1 apresenta o comportamento das vazões em cada cenário simulado. É possível identificar que o mês mais seco é observado no cenário de curto prazo, com uma vazão de 15,3 m³/s, no mês de novembro de 2026. Em contrapartida, o pico máximo de vazão de toda a série histórica simulada é identificado no cenário de médio prazo, com uma vazão de 114 m³/s, no mês de abril de 2044.

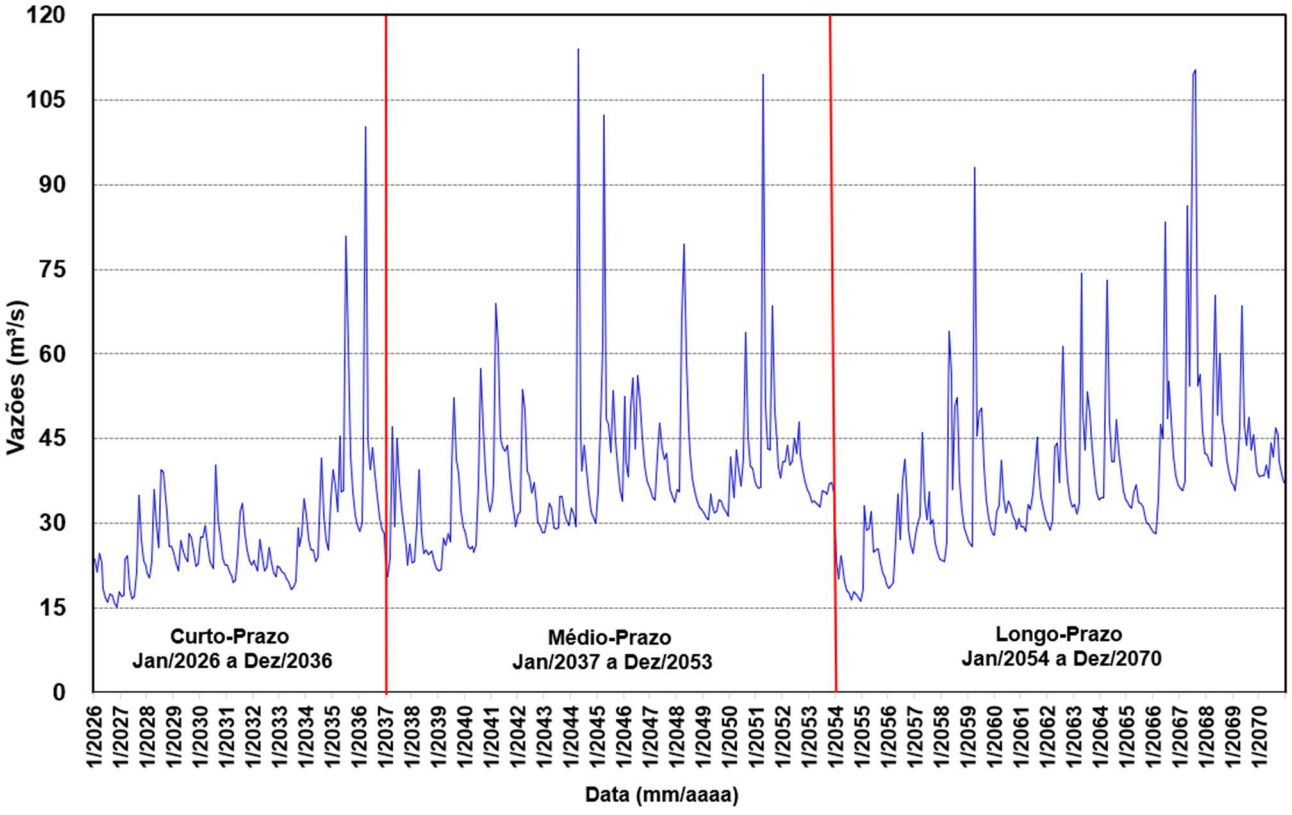
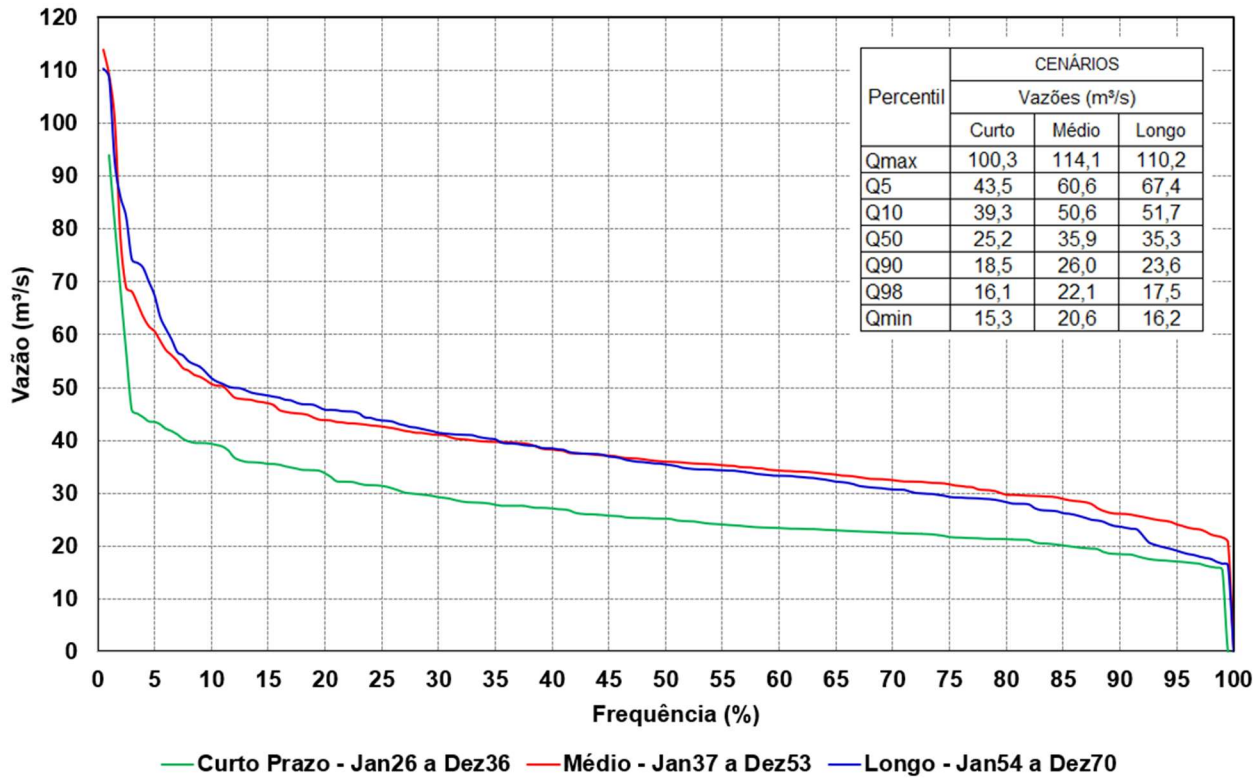


Figura 1 – Hidrogramas dos Cenários Curto, Médio e Longo na Área da Caatinga na bacia do rio Ipojuca

A Figura 2 apresenta as probabilidades de excedência (curvas de permanência) das vazões simuladas. Como pode ser observado na tabela integrada ao gráfico, o cenário de curto prazo apresenta vazões garantidas sistematicamente inferiores às obtidas nos horizontes de médio e longo prazo. Ademais, os cenários de médio e longo prazos exibem comportamentos muito próximos para Qmax, Q10 e Q50, com variações de -3,4%, 2,1% e -1,6%, respectivamente, e com valores mais elevados para as demais, com destaque para as vazões mínimas, que apresentaram reduções de -21% no longo prazo. De modo geral, os resultados indicam uma maior disponibilidade hídrica na área de estudo nos médio e longo prazos, em comparação ao cenário de curto prazo. As diferenças são mais acentuadas nas vazões máximas para o longo prazo, e nas mínimas para o médio prazo.



Percentil	CENÁRIOS Vazões (m³/s)		
	Curto	Médio	Longo
Qmax	100,3	114,1	110,2
Q5	43,5	60,6	67,4
Q10	39,3	50,6	51,7
Q50	25,2	35,9	35,3
Q90	18,5	26,0	23,6
Q98	16,1	22,1	17,5
Qmin	15,3	20,6	16,2

Figura 2 – Curvas de Permanência das Vazões para os Cenários de Curto, Médio e Longo Prazo

Os resultados da modelagem hidrológica para o mês mais seco (novembro de 2026) ocorrido no curto prazo (Figura 3), e o mais úmido (novembro de 2044) ocorrido no médio prazo (Figura 4). As figuras exibem a distribuição espacial (em mm) das seguintes variáveis: a precipitação projetada (dado de entrada do modelo), o escoamento superficial, a recarga líquida do aquífero e a evapotranspiração.

Observa-se na Figura 3 que, na área de maior precipitação, a recarga e a evapotranspiração são mais elevadas, enquanto o escoamento superficial é significativamente baixo.

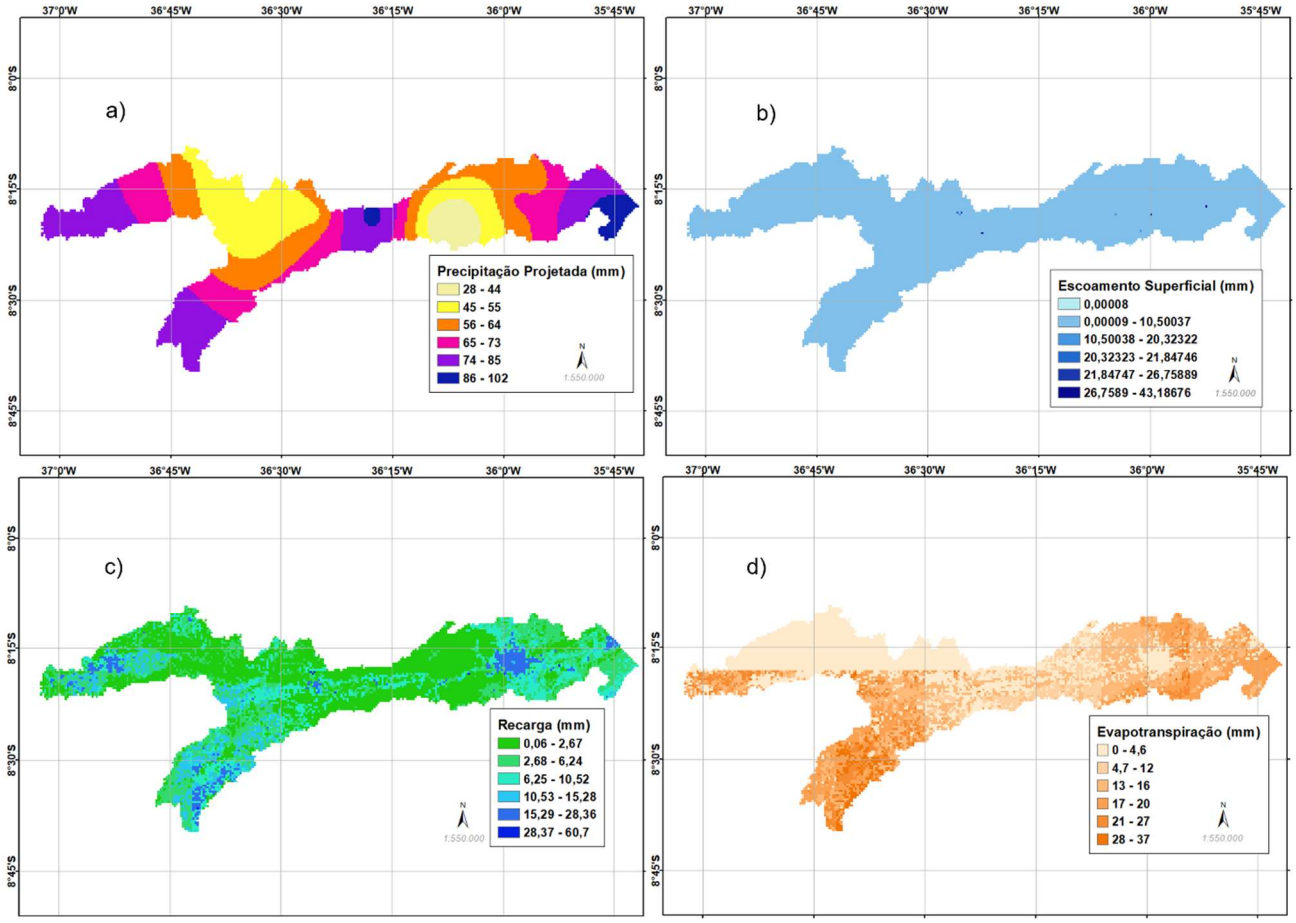


Figura 3 – Precipitação (a), Escoamento Superficial (b), Recarga (c) e Evapotranspiração (d) - Mês mais Seco – Nov/2026.

Por outro lado, a Figura 4 apresenta a distribuição espacial dessas mesmas variáveis para o cenário mais úmido. Nota-se que, embora o comportamento geral se mantenha, a distribuição difere em intensidade e variabilidade espacial, mostrando-se totalmente coerente com o aumento do volume de precipitação projetado para esse mês.

Chou et al. (2014) mostraram que o Eta-MIROC5 consegue capturar satisfatoriamente o padrão de distribuição espacial da chuva e o avanço da retração da umidade no semiárido. No entanto, o modelo tende a superestimar a precipitação no período chuvoso (DJF) e subestimar no período seco (JJA) no interior do Nordeste. A origem desses erros é devido à faixa dupla da Zona de Convergência Intertropical sobre os oceanos Pacífico e Atlântico adjacentes, e as incertezas observacionais. Segundo Guimarães et al. (2016), o nordeste do Brasil é uma região que experimenta variabilidade

climática regida por vários sistemas atmosféricos e oceânicos, o que dificulta ainda mais na representação climática.

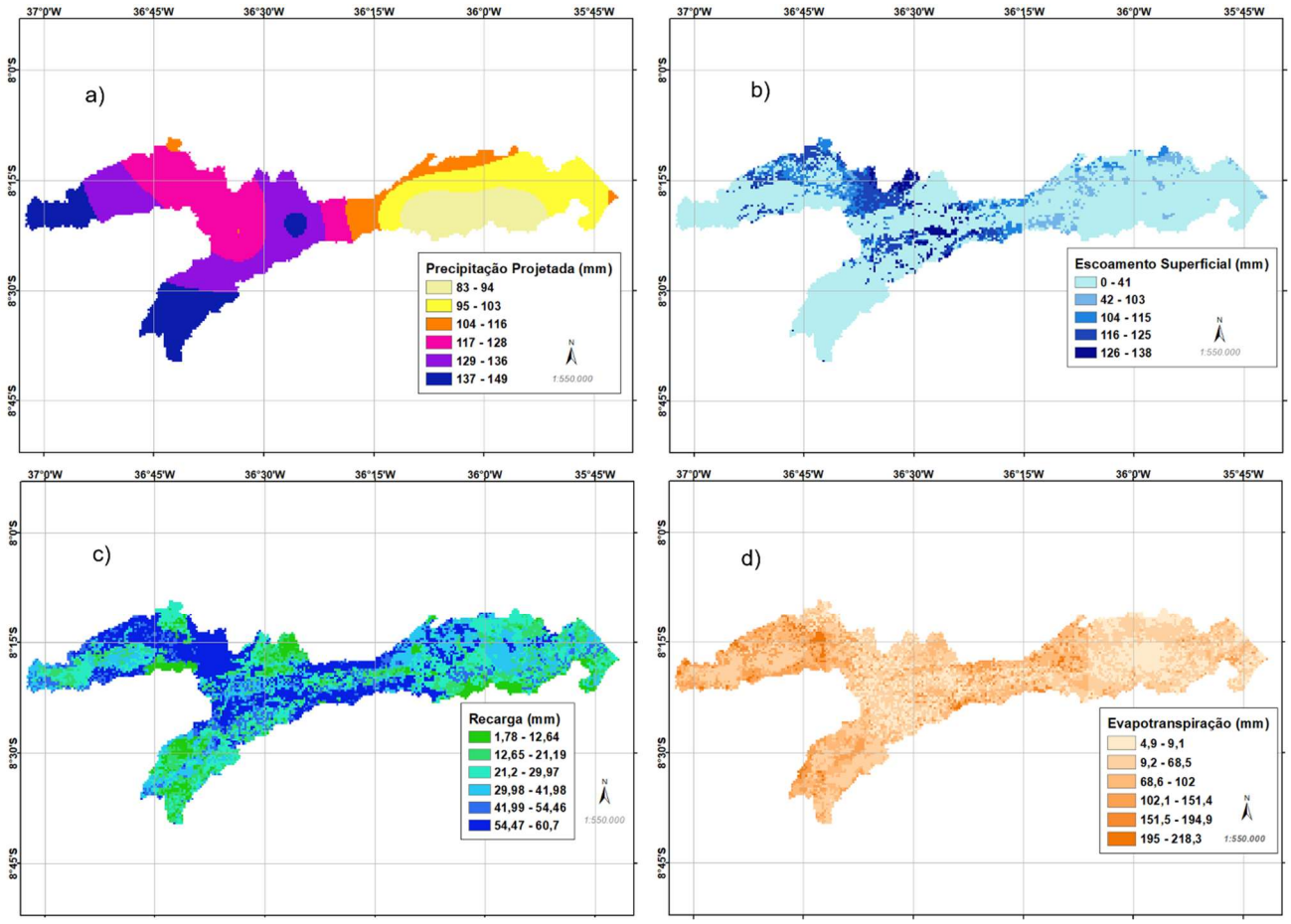


Figura 4 – Precipitação (a), Escoamento Superficial (b), Recarga (c) e Evapotranspiração (d) - Mês mais Úmido-Abr/2044.

4. COMENTÁRIOS

O presente estudo demonstrou a robustez e a aplicabilidade do modelo hidrológico distribuído RUBEM como uma ferramenta estratégica para avaliar os impactos das mudanças climáticas em regiões semiáridas. Ao processar o balanço hídrico de forma espacializada (escala de pixel), o modelo foi capaz de capturar com sensibilidade as nuances e a heterogeneidade da área de estudo, traduzindo as projeções climáticas globais em respostas hidrológicas locais detalhadas ao longo dos horizontes de curto, médio e longo prazo.

As simulações efetuadas tendo como variáveis de entrada as precipitações projetadas pelo modelo Eta-MIROC5 (cenário RCP 4.5) evidenciaram que as variáveis do ciclo hidrológico na região da Caatinga — precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e recarga do aquífero — apresentarão forte variabilidade espacial e flutuações em sua intensidade ao longo das próximas

décadas. As curvas de permanência de vazão geradas consolidam-se como indicadores cruciais para o planejamento hídrico, revelando os períodos de maior vulnerabilidade à escassez e os de maior disponibilidade de água. Além disso, a inclusão de um cenário dinâmico de uso do solo baseado na equação USLE reforçou a importância de integrar a conservação ambiental e o reflorestamento como medidas mitigadoras frente aos eventos climáticos extremos.

Em suma, os resultados obtidos não apenas preenchem uma lacuna científica sobre a modelagem de longo prazo na Caatinga pernambucana, mas também fornecem subsídios técnicos valiosos para órgãos gestores, como a APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima e a ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Os mapas de distribuição espacial e os cenários projetados constituem uma base de dados essencial para o aprimoramento do Plano Diretor da Bacia do Rio Ipojuca, orientando tomadas de decisão voltadas à segurança hídrica, à convivência com o semiárido e à governança sustentável dos recursos hídricos face às mudanças climáticas globais.

REFERÊNCIAS

AIRBUS. (2020). Copernicus DEM: Copernicus Digital Elevation Model Product Handbook, Version: 2.1. 2020. Disponível em <https://doi.org/10.5270/ESA-c5d3d65>. Acesso em 15 mai. 2020.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2020). Hidroweb: Sistemas de informações hidrológicas. Disponível em <http://hidroweb.ana.gov.br/>. Acesso em 15 jun. 2020.

CHOU, S. C. et al. (2014). Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. American Journal of Climate Change, v. 3, n. 5, p. 438-454. http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039

EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. (2018). 5. ed. Brasília: Embrapa Solos, 356 p.

GUIMARÃES, S. O. et al. (2016). Projeções de mudanças climáticas sobre o nordeste brasileiro dos modelos do CMIP5 e do CORDEX. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 31, n. 3, p. 337-365. http://dx.doi.org/10.1590/0102-778631320150150

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. (2020). Banco de dados meteorológicos. Disponível em <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em 15 jun. 2020.

JENSEN, J. R. (2009). Sensoriamento Remoto do Ambiente - Uma Perspectiva em Recursos Terrestres. 2nd ed. Parêntese, São José dos Campos.

LAND PROCESSES DISTRIBUTED ACTIVE ARCHIVE CENTER - LP DAAC. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) at the USGS Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, South Dakota. (2018). Disponível em: https://lpdaac.usgs.gov, acesso em 09/2019.

MENDONÇA, F; DANNI-OLIVEIRA, I.M. (2007). *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 194 p.

MÉLLO JÚNIOR, A.V. et al. (2022). Rainfall runoff balance enhanced model applied to tropical hydrology. Water, v. 14, n. 12, p. 1958. Doi 10.3390/w14121958.

MÉLLO JÚNIOR, A.V.; OLIVOS, L.M.O.; MARCELLINI, S.S. (2023). "Projeção da cobertura do solo por meio da análise difusa do NDVI e da USLE" in Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju. Disponível em < https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=14898>. Acesso em 30 jun. 2025.

MOSS, R.H.; EDMONDS, J.A.; HIBBARD, K.A. et al. (2010). "The next generation of scenarios for climate change research and assessment". Nature 463(7282), pp. 747-756.
NASH, J. E. and SUTCLIFFE, J. V., (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. J. Hydrol. 10:282–290. doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.
NÓBREGA, N.R.R. et al. (2022). Impacto das Mudanças Climáticas na Aridez da Bacia Estendida do rio São Francisco, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 37, n. 2, 185-197. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863710032.
PBMC. (2014). Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas. Eds. Assad, E.D.; Magalhães, A. Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 414 pp.
PERNAMBUCO. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos. Plano hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Ipojuca: Tomo I - Diagnóstico Hidroambiental – Volume 02/03. Executado por Projetec / BRLi. Recife: SRHE, 2010. 189 p. il.
SILVA, A.C.; SOUZA, A.F. (2018). Aridity drives plant biogeographical sub regions in the Caatinga, the largest tropical dry forest and woodland block in South America. PLoS ONE 13(4): e0196130. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0196130.
STORN, R.; PRICE, K. (1997) Differential evolution - A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. J. Global Optimiz, v. 11, pp. 341–359.
TOMASELLA, J. et al. (2025). Changes in the aridity index across Brazilian biomes. *Science of the Total Environment*, 989, 179869. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179869.
VALDEZ, S. et al. (2022). *Manual de boas práticas para recuperação da vegetação nativa em terras indígenas: bioma Caatinga*. Ed. 1. Brasília: FUNAI, 33 p.
WATANABE, M. et al. (2010). Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and climate sensitivity. Journal of Climate, v. 23, n. 23, p. 6312–6335.