



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Modelagem hidrológica de cenários futuros de mudanças do clima e uso da terra nas bacias hidrográficas dos rios Pajeú e Capibaribe

Vagner de Souza Felix¹, Alfredo Ribeiro Neto²

¹Doutor em Engenharia Civil, Membro da Pós-graduação em Geoprocessamento, Universidade Federal do ABC, Universidade Aberta do Brasil – UAB, 09210-580, Santo André, SP – Brasil, vagner.felix@ufabc.edu.br. ²Professor Doutor, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, 50740530 - Recife, PE – Brasil, alfredo.ribeiro@ufpe.br.

Artigo recebido em 19/03/2026 e aceito em 25/06/2026

RESUMO

Esta pesquisa teve o objetivo de analisar a influência de cenários futuros de clima e LULC (do inglês, land use and land cover) nas bacias hidrográficas do rio Pajeú/PE e do rio Capibaribe/PE em relação ao regime de vazão e processos hidrológicos. Para tanto, foi utilizado o modelo hidrológico MGB. Os cenários climáticos futuros adotados foram as projeções do modelo climático regional Eta/CPTEC aninhado a modelos de circulação global (cenário RCP 4.5). Os cenários futuros LULC foram definidos com a utilização do modelo Land Change Modeler, tendo como ponto de partida as classificações de cobertura vegetal e uso e ocupação da terra desenvolvidas pelo projeto Mapbiomas. Os resultados mostraram que a parametrização do modelo pode influenciar no aumento ou redução dos volumes de vazão e nos processos hidrológicos em relação aos cenários LULC. Houve diminuição significativa na vazão de cheia (Q10) na rodada do MGB-Eta-MIROC para a bacia hidrográfica do Pajeú e Capibaribe. A rodada MGB-Eta-BESM projeta considerável elevação da Q10 para ambas as bacias hidrográficas. A rodada MGB-Eta-CANESM projeta diminuição da vazão de cheia para as duas bacias hidrográficas. A rodada MGB-Eta-HADGEM prevê elevação da Q10 e significativa diminuição da Q90 para Pajeú e diminuição para Capibaribe.

Palavras-chave: cenários de uso da terra. Impactos das mudanças climáticas. Semiárido.

Hydrological modeling of future climate and land use change scenarios in the Pajeú and Capibaribe river basins.

ABSTRACT

This research aimed to analyze the influence of future climate and LULC (land use and land cover) scenarios on the flow regime and hydrological processes in the Pajeú/PE and Capibaribe/PE river basins. For this purpose, the MGB-IPH hydrological model was applied. The future climate scenarios adopted were based on projections from the regional climate model Eta/CPTEC nested in global circulation models (RCP 4.5 scenario). Future LULC scenarios were defined using the Land Change Modeler, with initial conditions derived from vegetation cover and land use/land cover classifications developed by the MapBiomas project. The results showed that model parameterization can influence the increase or reduction of streamflow volumes and hydrological processes in relation to LULC scenarios. A significant decrease in peak flow (Q10) was observed in the MGB-Eta-MIROC run for both the Pajeú and Capibaribe river basins. The MGB-Eta-BESM run projects a considerable increase in Q10 for both basins. The MGB-Eta-CANESM run projects a decrease in peak flow for both basins. Finally, the MGB-Eta-HADGEM run projects an increase in Q10 and a significant decrease in Q90 for the Pajeú basin, as well as a decrease in Q90 for the Capibaribe basin.

Keywords: Land use scenarios. Impacts of climate change. Semi-arid.

Introdução

Simulações demonstram que as mudanças na variabilidade climática são globais, afetando uma ampla gama de variáveis físicas e ecológicas, em múltiplas escalas espaciais e temporais, o que reforça a necessidade de incorporar tais variações nos modelos de impacto climático (Deser et al., 2021). Além disso, mudanças na variabilidade são tão ou mais importantes quanto as mudanças nas médias climáticas quando se trata da ocorrência de eventos extremos, como chuvas intensas. A atuação simultânea da variabilidade e da média do clima contribui para a intensificação desses eventos extremos (Madsen, Olesen e Christensen, 2023).

Embora a variabilidade seja uma componente conhecida na dinâmica climática, seu impacto, mesmo dentro de limites esperados, pode ter reflexos significativos nas mais diversas atividades humanas. Isso ocorre, por exemplo, na disponibilidade de água para a indústria alimentícia e agricultura. Nesse contexto, em projeções de cenários de aquecimento global, a disponibilidade de “green water” (água proveniente da chuva armazenada no solo) se tornará cada vez mais escassa: sob +1,5 °C e +3 °C de aquecimento, essa escassez afetará a produção agrícola para 1,23 bilhão e 1,45 bilhão de pessoas, respectivamente, impactando diretamente a indústria alimentícia e a agricultura global (He e Rosa, 2023). Esse impacto também é sentido na produção de energia e na indústria do gás (Dai et al., 2016).

Em relação à segurança hídrica para o abastecimento humano, as mudanças climáticas elevam os riscos em muitas regiões por meio da redução da disponibilidade de água, degradação da sua qualidade e aumento da frequência de eventos de seca e inundação (IPCC, 2022).

Alterações no clima, sobretudo extremos de temperatura e precipitação, têm impactos diretos no uso da terra, reduzindo rendimentos agrícolas e levando a flutuações expressivas de ano (NCA, 2023).

Além disso, o desmatamento das florestas causa alterações na precipitação e, consequentemente, ocorrem maiores flutuações da temperatura, há um menor valor de evapotranspiração e menor teor de umidade do solo em camadas profundas (Niu et al., 2020; Zhang et al., 2022; Meng et al., 2024). Alterações do uso e ocupação da terra e cobertura vegetal ocasionam o aumento da temperatura, criando ilhas de calor (Masullo e Rangel, 2012; García-Pablo et al., 2021).

O uso intensivo da terra, como monoculturas e desmatamento, contribui com cerca de 70 % das emissões totais de gases de efeito estufa e 23 % das emissões antropogênicas de CO₂, CH₄ e

N₂O, segundo estudo sobre interações clima-terra no Jalapão (IPCC, 2019; Silva et al., 2020).

Os estudos sobre mudanças climáticas têm mostrado que diversas bacias hidroclógicas funcionam como fonte adicional de pressão na demanda de água para irrigação, por meio da elevação nos níveis de evapotranspiração de referência como consequência da elevação de temperatura, agravado, ainda, pela modificação nos padrões espaço-temporais de precipitação, modificando os padrões de evapotranspiração e dinâmica da vegetação (De Roos et al., 2022; Xiong e Yang, 2024; Pang et al., 2024; Ding et al., 2024).

A elevação da temperatura em determinadas regiões analisadas e o resultado da modelagem hidroclógica podem acarretar alterações do escoamento superficial, nos valores de evapotranspiração e umidade (Santos, 2019; Vergasta et al., 2021).

Nesse contexto, os cenários futuros de clima desenvolvidos pelo IPCC servem como dados de entrada para modelos climáticos terrestres e apresentam melhores resultados para escalas continentais. E os cenários futuros de clima resultantes das simulações dos modelos climáticos terrestres são utilizados para alimentar modelos climáticos regionais, que preveem alterações nos regimes de precipitação pluviométricas a depender do cenário climático utilizado (Gürbüz e Apaydin, 2024; Jena et al., 2024; Lee et al., 2025).

Os cenários futuros de mudanças climáticas apontam para situações severas para diversas bacias hidrográficas localizadas no território brasileiro (Vergasta et al., 2021; Brasil, 2022; Trata Brasil, 2022; Silva et al., 2024).

Essas alterações impostas ao meio ambiente produzem efeitos biofísicos reais que podem desestabilizar a segurança hídrica, produzindo grandes impactos sobre a manutenção da vida humana e serviços necessários para sustentar a vida no ecossistema.

Além disso, é importante analisar os impactos dos cenários climáticos desenvolvidos pelos modelos de circulação global (MCG), modelos de sistema terrestres e modelos climáticos regionais para compreender quais são os possíveis impactos desses cenários sob os processos hidroclógicos e, até mesmo, verificar se as previsões climáticas realizadas por esses modelos são realmente plausíveis.

Desse modo, o objetivo geral desta pesquisa foi analisar a influência de cenários futuros de clima e uso e cobertura da terra (LULC, do Inglês land use and land cover) na bacia hidrográfica do rio Pajeú-PE e na bacia hidrográfica do rio Capibaribe-PE em relação à vazão e processos hidroclógicos.

Material e métodos

Área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido em duas bacias hidrográficas localizadas no estado de Pernambuco (Figura 1). A escolha dessas bacias fundamenta-se na presença de condições

climáticas distintas no território pernambucano, caracterizado por um gradiente que varia de regiões úmidas no litoral a condições semiáridas no interior do estado. Estudos indicam que o estado de Pernambuco apresenta significativa variabilidade climática, com predomínio de clima semiárido no interior e de condições climáticas mais úmidas nas regiões litorâneas e no Agreste (Medeiros et al., 2018; Medeiros et al., 2022)

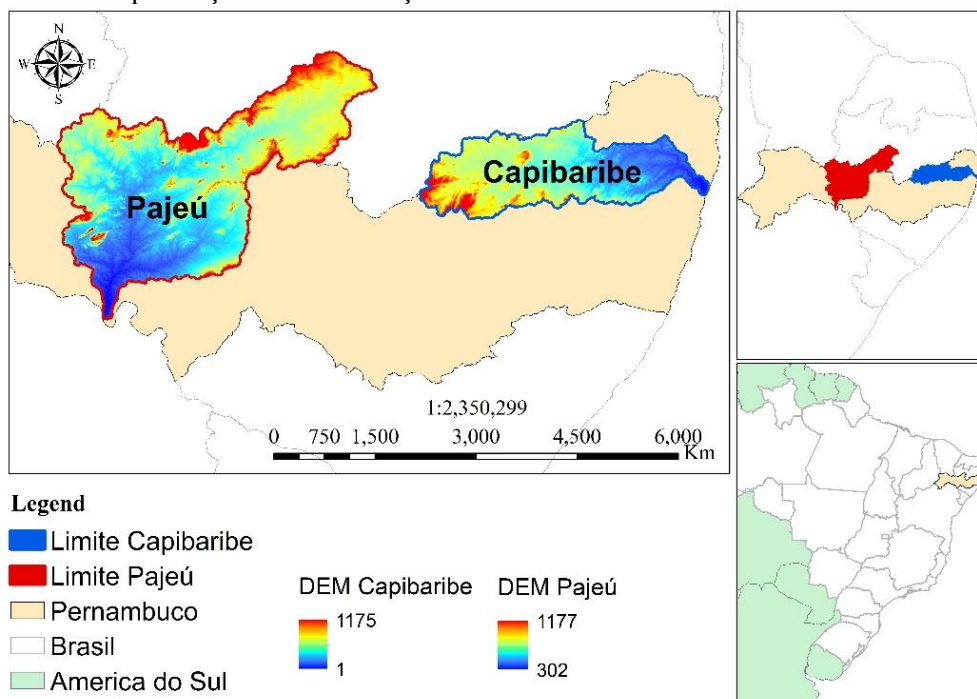


Figura 1. Mapa de localização das bacias hidrográficas do Rio Pajeú e Capibaribe.

Nesse contexto, a bacia hidrográfica do rio Capibaribe apresenta variação climática ao longo de sua extensão, com influência de condições mais úmidas próximas ao litoral e características semiáridas em suas porções mais interiores. Por outro lado, a bacia hidrográfica do rio Pajeú está inserida predominantemente em região de clima semiárido, caracterizada por baixos índices pluviométricos e elevada variabilidade das chuvas (Nascimento et al., 2021; Lima et al., 2016).

A escolha dessas bacias permitiu comparar o comportamento hidrológico em diferentes contextos climáticos, possibilitando avaliar a influência dos cenários de clima nas variáveis hidrológicas em ambientes contrastantes.

Bacia hidrográfica do rio Pajeú – PE

A bacia hidrográfica do rio Pajeú (Figura 1) é a maior do estado de Pernambuco, apresentando área de 16.838,70 km², o que

correspondendo a 17% da área do Estado (Pernambuco, 2022). Sua área de drenagem abrange 27 municípios. O rio principal é o Pajeú, afluente da margem esquerda do São Francisco, que nasce na serra do Balanço, município de Brejinho – PE, a uma altitude de 800 m, aproximadamente, nos limites entre Pernambuco e Paraíba, percorrendo uma distância de 347 km da nascente até sua foz, no lago de Itaparica.

Toda a rede hidrográfica da bacia, incluindo-se o rio principal, apresenta um regime sazonal intermitente, com a interrupção do curso no período de estiagem, apresentando precipitações pluviométricas bastante irregulares. Seu curso margeia as cidades de Itapetim, Tuparetama, Ingazeira, Afogados da Ingazeira, Carnaíba, Flores, Calumbi, Serra Talhada e Floresta.

Seus afluentes principais são: pela margem direita, os riachos Tigre, Barreira, Brejo, São Cristóvão e Belém; e, pela margem esquerda, os riachos do Cedro, Quixabá, São Domingos, Poço Negro e do Navio.

O período chuvoso se estende de fevereiro a maio, condicionado pelo deslocamento anual da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal sistema atmosférico que atua nessa área (INMET, 2023; APAC, 2025).

O clima predominante na área da bacia é o BShw segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, caracterizado por um clima semiárido quente com chuvas de primavera-verão. No entanto, em alguns trechos de terras altas, onde a umidade é maior devido à diminuição da evaporação proporcionada por temperaturas mais amenas e favorecendo a formação de chuvas orográficas, o clima muda, sendo essas áreas classificadas como tropicais úmidas e semiúmidas.

A precipitação total pode variar de 300 a 1200 mm, com os maiores valores ocorrendo no Alto Pajeú, enquanto os menores valores acumulados anuais são encontrados nas áreas próximas ao Rio São Francisco; portanto, a semiaridez é muito pronunciada (Assis, 2015).

A bacia hidrográfica do rio Pajeú possui um grau de suscetibilidade à desertificação com dominância das classes de “média” e “alta suscetibilidade”, sendo a retirada da cobertura vegetal o atributo de maior gravidade ao desenvolvimento do processo (Ferreira et al., 2014).

Bacia hidrográfica do rio Capibaribe-PE

A bacia hidrográfica do Rio Capibaribe localiza-se ao norte-oriental do Estado de Pernambuco (Figura 1). O Rio Capibaribe nasce na serra do Jacará, na divisão dos municípios de Jataúba e Poção, percorrendo cerca de 250 km até sua foz. Possui 74 afluentes e banha 42 municípios pernambucanos.

O curso da bacia hidrográfica pode ser dividido em três partes: o alto e o médio curso, situados no Polígono das Secas, em que o rio apresenta regime intermitente, e o baixo curso, quando se torna perene, a partir do município de Limoeiro, no agreste do Estado.

Esta bacia hidrográfica apresenta uma área de 7.454,88 km², e possui grande importância quando se refere ao abastecimento público, porém efluentes domésticos, industriais e agroindustriais são despejados em seu leito.

Apenas para contextualizar a importância da bacia hidrográfica do rio Capibaribe, na zona metropolitana encontram-se municípios como Recife que é uma grande metrópole e 32% de sua área encontra-se nos limites da bacia. Ainda na zona da metropolitana encontram-se os

municípios de Camaragibe, Moreno e São Lourenço da mata.

A vegetação é bastante diversificada, apresentando paisagens incluídas nos biomas Caatinga e Mata Atlântica, com grande diversidade de solos e relevo sinuoso. Apresenta, também, grande intervenção humana, devido ao domínio da monocultura da cana-de-açúcar na Zona da Mata e cultura de algodão no Agreste (Pernambuco, 2022).

Pela sua abrangência regional (Agreste, Mata e Litoral) a bacia hidrográfica do rio Capibaribe exibe um ambiente complexo no qual se evidenciam contrastes climáticos, de relevo, de solos e de cobertura vegetal, além dos socioeconômicos, que exigem um modelo de gestão hídrica e ambiental que atenda às suas peculiaridades sub-regionais e locais (Pernambuco, 2022).

A precipitação na bacia hidrográfica apresenta alta variabilidade, com valores anuais entre 600 a 2400mm. Sendo influenciada, principalmente, pelos sistemas atmosféricos zona de convergência intertropical e ondas de leste. Os totais anuais apresentam uma média de 1133 mm, com o aumento das medições nos postos mais próximos ao litoral. Os totais anuais precipitados apresentaram uma média de 1133,59 mm, com o aumento da precipitação na medida em que os postos se aproximam do litoral (Pernambuco, 2010).

O modelo MGB

O MGB (software livre) é um modelo hidrológico distribuído para grandes bacias desenvolvido por Collischonn (2001) e bem descrito também em Collischonn et al. (2007). O modelo é composto pelos módulos de evapotranspiração, balanço de água no solo, escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo, e propagação na rede de drenagem.

O balanço de água no solo é realizado utilizando uma metodologia baseada na geração de escoamento superficial por excesso de capacidade de armazenamento, porém com uma relação probabilística entre a umidade do solo e a fração de área de solo saturada.

Na presente pesquisa, foi utilizada a versão do modelo que realiza a modelagem da propagação da vazão pela rede de drenagem através do método de Muskingum – Cunge. Um dos modelos simplificados mais importantes de escoamento em rios continua sendo o modelo de Muskingum, proposto por McCarthy em 1939 (Tucci, 2005). Esse modelo foi modificado por

Cunge, em 1969, para que os seus parâmetros K e X variassem no tempo, de acordo com a vazão a ser propagada. Essa versão passou a ser conhecida como modelo Muskingum-Cunge não linear (MCNL) (Pontes; Collischonn, 2015).

As bacias hidrográficas foram discretizadas em minibacias. Cada minibacia é dividida em unidade de resposta hidrológica (URH), que são definidas de acordo com os tipos de solos e de uso e ocupação da terra. O balanço de armazenamento do solo é realizado de forma independente para cada URH.

A quantidade de URH a ser utilizada pelo o modelo leva em consideração as análises físicas e ambientais da bacia hidrográfica. Sendo, em seguida, definidos grupos resultantes da combinação das características do uso da terra, tipo de solo e cobertura vegetal, formando as URHs. Que são caracterizadas por uma série de parâmetros fixos e calibráveis.

O modelo MGB-IPH utiliza dois tipos de parâmetros, os fixos e calibráveis. Os parâmetros fixos são: Albedo, resistência superficial, altura da vegetação e o índice de área foliar (IAF).

Os parâmetros calibráveis são: armazenamento de água no solo (W_m), o parâmetro da relação de armazenamento e saturação de água no solo (b), parâmetro de drenagem sub-superficial (K_{int}), o parâmetro de escoamento subterrâneo (K_{bas}), limite de armazenamento para haver fluxo ascendente ou descendente (W_c), parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo (C_b), parâmetro para calibração da propagação superficial nas células (C_s), parâmetro para calibração da propagação sub-superficial nas células (C_i).

Definição dos parâmetros fixos e calibráveis

Os valores desses parâmetros foram definidos a partir dos parâmetros utilizados por Felix e Paz (2016), que desenvolveram a modelagem hidrológica para uma porção da bacia hidrográfica do rio Piancó – PB, uma vez que as áreas em estudo na presente pesquisa apresentam características físicas e hidrológicas semelhantes às áreas de estudo dos autores supracitados.

A modelagem das bacias hidrográficas foi calibrada utilizando um único conjunto de parâmetros para cada bacia, com o objetivo de evitar que o modelo atribuisse diferentes valores de parâmetros para uma mesma classe de URH em diferentes sub-bacias. Assim, embora cada bacia hidrográfica possua seu próprio conjunto de parâmetros, a calibração não foi realizada de forma individualizada por sub-bacia.

Além disso, o critério adotado para definir os valores do parâmetro W_m foi que vegetações de maior porte tendem a se desenvolver melhor em solos mais profundos (Ruggiero et al., 2006; Galindo et al., 2008; Silva et al., 2015; Menezes, 2016), incluindo a vegetação de caatinga, que, a depender da profundidade do solo, poderá apresentar estrato arbustivo ou vegetação de médio a grande porte.

Esse critério foi adotado como um fator norteador no momento de atribuir valores aos parâmetros do modelo, uma vez que os solos, após serem reclassificados em Unidades de Resposta Hidrológica, apresentaram classificações semelhantes (rasos ou profundos).

Essa decisão também contribui para que o modelo apresente resultados mais semelhantes aos relatados na literatura: a presença de vegetação natural tende a diminuir os níveis de escoamento superficial devido ao aumento da infiltração e da retenção de água no solo, enquanto sua supressão por atividades como pastagem, agricultura e urbanização favorece o aumento do escoamento superficial (Neill et al., 2009; Kirchner et al., 2020; Feng et al., 2023; Kumar et al., 2025; Jiang et al., 2025; Leite et al., 2026).

Além disso, é preciso levar em consideração que o modelo MGB gera escoamento superficial a partir do excedente hídrico no solo, à medida que a capacidade de armazenamento de água é atingida, processo diretamente influenciado pelo tipo de uso e ocupação da terra, que interfere na infiltração, retenção e armazenamento de água no solo.

Dados de entrada do modelo para o modelo MGB

Para utilização do modelo, foram levantados dados topográficos, fluviométricos, precipitação pluviométrica, clima, uso e ocupação da terra e tipo de solo. Os dados topográficos foram obtidos a partir do modelo digital de elevação do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com resolução espacial de 30 metros para a discretização do modelo em minibacias, obtido por meio da base de dados CGIARC-SI (Consortium for Spatial Information).

Para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, foram utilizados dados de 38 estações pluviométricas disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC). Três foram as estações fluviométricas utilizadas, Flores, Floresta e Serra Talhada, todas disponibilizadas pela ANA. Os dados meteorológicos foram obtidos no Instituto

Nacional de Meteorologia (INMET), sendo selecionada a estação meteorológica de Cabrobó.

Para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe foram utilizadas 44 estações pluviométricas (ANA e APAC) e quatro foram as estações fluviométricas utilizadas: Paudalho, Limoreiro, Salgadinho e Toritama. Os dados meteorológicos foram obtidos no INMET, sendo selecionada a estação meteorológica de Surubim.

As unidades de respostas Hidrológicas (URHs) foram definidas a partir do cruzamento dos mapas de uso e ocupação da terra disponibilizados pelo projeto MapBiomias (Sousa et al. 2020) com o mapa de tipos de solos produzido pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa).

É importante relatar que os mapas de uso e ocupação da terra do MapBiomias foram utilizados como bases para definição dos cenários futuros de LULC, o que será relatado posteriormente. A seguir, será abordado a respeito da definição das URHs, através do cruzamento dos mapas Mapbiomias com o mapa de tipo do solo disponibilizado pela Embrapa.

Definição das unidades de respostas hidrológicas (URH) e definição e validação dos Cenários futuros LULC

O mapa de tipo de solo utilizado é resultante de um Zoneamento Agroecológico do Estado de Pernambuco (ZAPE), que foi desenvolvido pela Secretaria de Produção Rural e Reforma Agrária de Pernambuco em convênio com a Embrapa Solos UEP Recife, com escala de 1:100.000

(<http://www.uep.cnps.embrapa.br/zape/#>).

Após atualização dos tipos de solos de acordo com a nova nomenclatura, foi realizado o cruzamento do mapa de tipo de solo com a classificação de uso e ocupação da terra desenvolvida pelo projeto MapBiomias (Souza et al., 2020).

Para definição dos cenários futuros LULC, foi utilizada a classificação de uso e ocupação da terra desenvolvida pelo projeto MapBiomias (Souza et al., 2020), que utiliza processamento em nuvem e classificadores automatizados desenvolvidos e operados a partir da plataforma Google Earth Engine para gerar uma série histórica de mapas anuais de cobertura e uso da terra do Brasil.

Desse modo, foram selecionados dois mapas de cobertura e uso da terra, sendo o primeiro referente ao ano de 1985 e o segundo ao ano de 2017. A escolha do ano de 1985 justifica-

se por representar o início da série histórica padronizada disponibilizada pelo projeto MapBiomias, além de estar inserido no período de calibração do modelo hidrológico, permitindo maior consistência na integração entre dados observados e simulados.

O ano de 2017 foi selecionado por representar um período consolidado de alterações no uso e cobertura da terra ao longo da série histórica analisada, possibilitando a avaliação das mudanças acumuladas ao longo de mais de três décadas. Essa abordagem permite comparar cenários contrastantes de ocupação do solo, garantindo uma análise consistente dos impactos das transformações antrópicas sobre o regime hidrológico das bacias estudadas.

Estes mapas serviram de base para o desenvolvimento de cenários futuros de uso e ocupação da terra que foram desenvolvidos com o auxílio do Land Change Modeler (LCM) integrado ao software de SIG TerrSET.

No entanto, o modelo MGB-IPH foi calibrado e validado utilizando a URH referente ao ano de 1985, sendo o conjunto de parâmetros posteriormente aplicado aos cenários futuros para as bacias hidrográficas dos rios Pajeú e Capibaribe, cada uma com seu respectivo conjunto de parâmetros.

O LCM mensura mudanças de cobertura e uso da terra considerando perdas e ganhos de área por classe de uso da terra e propõe uma previsão de uso e cobertura da terra identificando as áreas com persistência e de transição de uma classe n para uma p (Uddin et al. 2015; Eastman, 2016).

Para tanto, foi adotado o método MLP Neural Network disponível no LCM, que é o mais indicado, uma vez que não requer intervenções do usuário, e por fornecer informações detalhadas sobre a contribuição das variáveis explicativas (Olmedo et al., 2013; Eastman, 2016; Xavier; Silva, 2018; Estoque et al., 2019; Folharini; Oliveira, 2020).

A partir do mapa do Mapbiomias do ano de 2017, foram realizadas as previsões de dois cenários futuros de uso e ocupação da terra para as bacias hidrográficas dos rios Pajeú e Capibaribe para o ano de 2055 (o ano foi escolhido em função da disponibilidade de dados dos cenários futuros de clima que se estende de 2041 a 2070).

Em ambos os cenários futuros de uso e ocupação da terra optou-se por adotar um critério mais pessimista, ou seja, considerando que existe mais intervenções antrópicas, porém considerando as possíveis transições de classes de uso e ocupação da terra de cenários observados de

modo a seguir o padrão de evolução espaço-temporal do uso e ocupação da terra nos cenários observados.

Para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, o cenário futuro 1 foi definido com o critério de que o LCM deve realizar transição de área com vegetação do tipo caatinga e pastagem para agricultura. O cenário 2 considera a transição de vegetação do tipo caatinga para pastagem e agricultura. Além disso, foi considerado como cenário ideal, em termos de conversão da vegetação natural, o cenário de uso e ocupação da terra referente ao ano de 1985, uma vez que este apresenta pouca intervenção humana e baixo nível de urbanização.

Vale salientar que não foram consideradas as previsões de cenários futuros de uso e ocupação da terra com áreas urbanas, pois o LCM utiliza o critério de potencial de transição de classes, ou seja, quanto maior a área ocupada por uma classe de uso e ocupação da terra, maior será a probabilidade desta classe evoluir em termos de área ocupada.

Nesse sentido, para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, de acordo com as informações do projeto Mapbiomas, houve pouca evolução de área urbanizada para a região em estudo até o ano de 2017, resultando, em simulações realizadas com o LCM que apresentaram pouca probabilidade de existir um grau de urbanização elevado na bacia hidrográfica do rio Pajeú no horizonte de 50 anos futuros.

Para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe, o mesmo critério foi selecionado. Porém, em relação aos cenários futuros, o cenário 1 considerou a transição de vegetação caatinga para pastagem e agricultura e o cenário 2 considerou a transição de caatinga e floresta para agricultura. Como a proposta é comparar os resultados da modelagem nas bacias, também não foi considerado cenários futuros com aumento da área ocupada por infraestrutura urbana para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe. No entanto, em ambas as bacias hidrográficas, existe a classe urbana.

A partir dos cenários futuros de uso e ocupação da terra, foi realizado o cruzamento destes com o mapa de tipo de solo atualizado com o objetivo de desenvolver as URHs do Modelo MGB-IPH.

Para validar o resultado obtido com o LCM a acurácia da classificação foi medida utilizando o coeficiente Kappa, esse coeficiente é uma medida da concordância entre as amostras da cena e aquelas derivadas através da classificação da imagem de sensoriamento remoto. Essa medida

considera todos os elementos da matriz de erros ou de confusão, excluindo a concordância que ocorre por acaso (Rosenfield; Fitzpatrick-Lins, 1986; Stehman, 1996). A Equação 1 representa o índice Kappa (k) foi desenvolvida por Cohen (1960).

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^c x_{ii} - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^c x_{i+} x_{+i}} \quad (1)$$

Em que n é a quantidade total de amostras; c é o número de classes; $\sum_{i=1}^c x_{ii}$ é o somatório dos valores da linha i e da coluna i; x_{i+} é a soma da linha i e x_{+i} a soma da coluna i da matriz de confusão.

A validação do LCM para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe apresentou índice Kappa de 0,82, classificado como excelente, segundo Landis e Koch (1977). E a validação do LCM para a bacia hidrográfica do rio Pajeú apresentou uma resposta semelhante ao dado observado, com um índice Kappa de 0,89, que segundo Landis e Koch (1977) é considerado como excelente.

Definição dos cenários futuros de clima.

Os cenários climáticos futuros adotados foram as projeções do Eta/CPTEC RCP 4.5, um modelo climático regional que usa a saída de GCMs como condição de contorno para reduzir a escala dos cenários de mudanças climáticas (Chou et al., 2011). As saídas do modelo Eta/CPTEC foram obtidas na plataforma Projeta.

Optou-se por selecionar o cenário RCP 4.5 por ser um cenário com condições climáticas mais amena em comparação com o cenário RCP 8.5 que também foi utilizado como dados de entrada do modelo Eta/CPETC. Além disso, para o período selecionado, os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 não apresentam tanto diferença em relação a precipitação pluviométrica e temperatura, que são as variáveis mais sensíveis para a modelagem. É possível saber mais sobre o modelo e os cenários oriundos em Chou et al. (2014a); Chou et al. (2014b) e Lyra (2017).

Os GCMs usados no downscaling foram o Brazilian Earth System Model (BESM), o Canadian Earth System Model versão 2 (CanESM2), o Hadley Center Global Environment Model versão 2 (HadGEM2-ES) e o Model for Interdisciplinary Research on Climate versão 5 (MIROC5).

Após o downscaling com o modelo Eta, os dados de saída são referidos como Eta-BESM,

Eta-CanESM, Eta-HadGEM e Eta-MIROC. Os dados selecionados para a simulação hidrológica foram precipitação total (mm), temperatura do ar a 2m acima da superfície terrestre (C°), pressão atmosférica na superfície terrestre (hPa), velocidade do vento a 10 m (m/s), a radiação incidente na superfície da Terra (W/m²) e umidade relativa.

A correção do viés de precipitação foi realizada de acordo com Bárdossy e Pegram (2011), e as demais variáveis foram corrigidas pelo método delta-change (Adam et al., 2017). É importante relatar que foi realizada uma alteração no código fonte do MGB-IPH para que o modelo passe a considerar a variável saldo de radiação ao invés da variável insolação para o cálculo da evapotranspiração potencial com o método de Penman-Monteith.

Para compatibilizá-lo com o horizonte temporal do cenário LULC (ano 2055), as simulações abrangeram o período de 2041-2070. Os fluxos simulados com o modelo MGB-IPH usando esses dados são referidos como MGB-Eta-BESM, MGB-Eta-CanESM, MGB-Eta-HadGEM e MGB-Eta-MIROC.

Os resultados das simulações dos cenários climáticos e LULC futuros foram comparados com as simulações do cenário climático baseline e também com as simulações do MGB-IPH alimentando com dados observados no mesmo período do baseline (1961-1990). Além disso, as análises dos resultados foram realizadas considerando as vazões médias mensais de longo prazo, mínimas, máximas, de cheia (Q10) e de estiagem (Q90) de cada rodada do modelo.

Resultados e discussão

Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Pajeú e Capibaribe – calibração e validação

Observa-se que o modelo MGB representou satisfatoriamente a dinâmica temporal das vazões nas bacias dos rios Pajeú e Capibaribe (Figura 2 e 3) reproduzindo adequadamente a sazonalidade hidrológica e os principais eventos de cheia observados.

Para a bacia do rio Pajeú, os coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS) variaram entre 0,70 e 0,89 durante as etapas de calibração e validação, indicando bom desempenho na simulação das vazões.

De modo geral, os hidrogramas simulados acompanharam satisfatoriamente os períodos de ascensão, recessão e os principais picos de vazão observados, embora algumas discrepâncias tenham sido verificadas em eventos extremos e nas vazões de estiagem.

Na bacia do rio Capibaribe, o desempenho do modelo apresentou maior variabilidade entre as estações fluviométricas analisadas. Em algumas estações foram obtidos valores de NS superiores a 0,80, evidenciando elevada capacidade preditiva do modelo, enquanto em outras foram observadas dificuldades na representação de determinados eventos hidrológicos, especialmente durante a etapa de validação.

Apesar dessas diferenças, os resultados demonstram que o MGB foi capaz de representar os padrões hidrológicos predominantes das bacias estudadas, constituindo uma ferramenta adequada para a avaliação dos impactos das mudanças climáticas e das alterações de uso e cobertura da terra.

Resultados semelhantes têm sido reportados em outras bacias semiáridas brasileiras utilizando o modelo MGB, como observado por Felix e Paz (2016), Beserra (2016), Araújo (2017), Silva e Medeiros (2018) e Andrade Neto (2022).

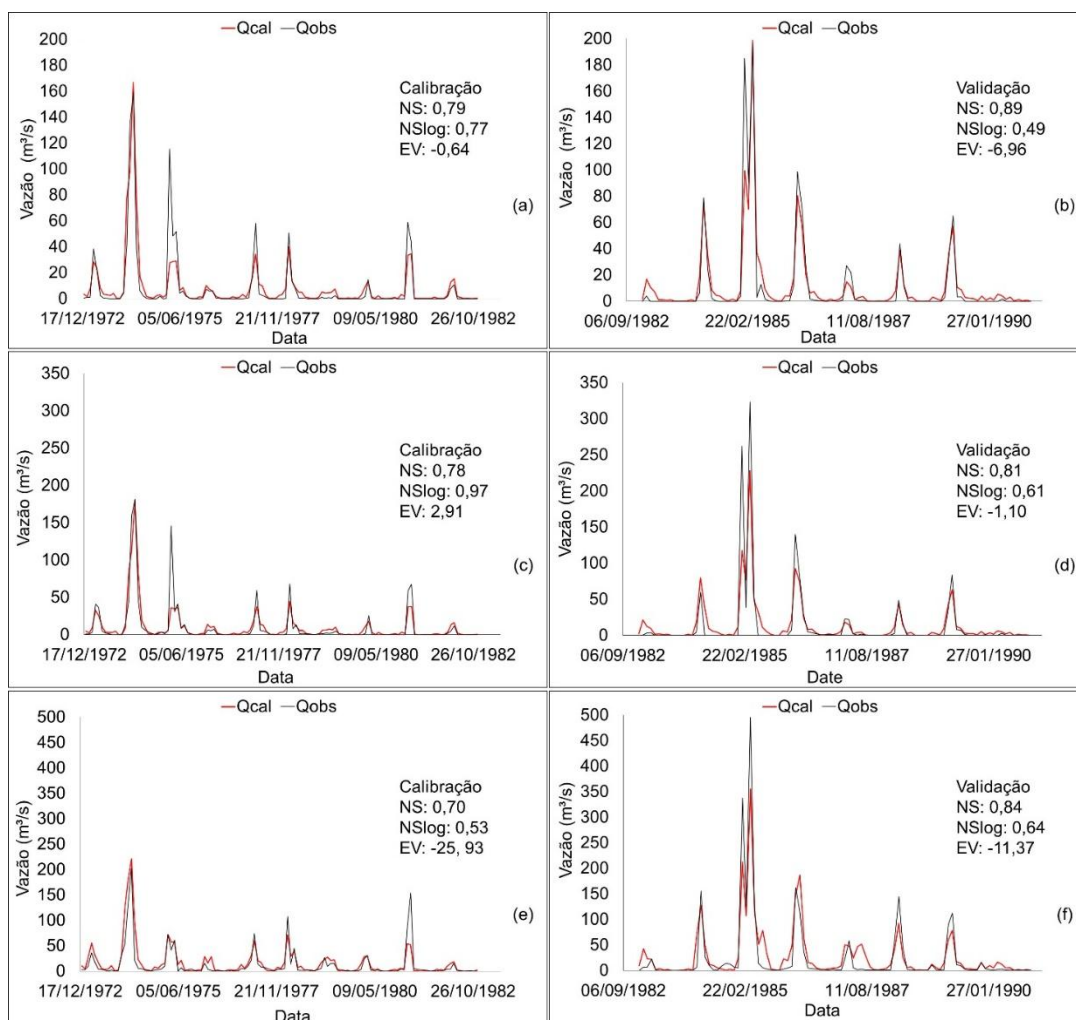


Figura 2: Hidrograma da calibração e validação nas estações fluviométricas de Flores (a e b), Serra talhada (c e d) e Floresta (e e f) na bacia hidrográfica do rio Pajeú. E estatística na calibração e validação do modelo MGB.

Em comparação com outros modelos hidrológicos que realizaram simulações hidrológicas em bacias hidrográficas de clima semiárido e que fazem uso das mesmas estatísticas para calibração e validação dos modelos, Abbas et al. (2025) apresentaram NS variando de 0,53 a 0,94 com o modelo SWAT para a bacia hidrográfica do Baixo Rio Arkansas no Colorado, EUA. Lyu et al. (2024) encontraram NS variando de 0,60 a 0,78 entre a calibração e validação do modelo WEP-L na simulação da bacia hidrográfica do rio Rio Fenhe que é um importante afluente da Bacia do Rio Amarelo e está localizada em uma região semiárida e semiúmida no noroeste da China.

Ainda nesse sentido, Gorugantula e Kambhammettu (2025), com o modelo SWAT,

encontraram NS variando de 0,2 a 0,69 na bacia hidrográfica do O Rio Krishna, o clima da bacia varia de subúmido no Oeste, a semiárido no Leste, a árido nas partes sul e centro-sul, mostrando que essa bacia hidrográfica apresenta uma grande variabilidade climática, assim como, bacia hidrográfica do rio Capibaribe. Assim como, Ribeiro Neto et al. (2014) realizaram a simulação hidrológica da bacia do rio Capibaribe com modelo MODHAC e encontraram coeficiente de NS variando entre 0,52 e 0,83. Quanto a estatística NSlog, outras aplicações do modelo MGB apresentaram valores de NSlog inferiores aos valores do NS (Felix e Paz, 2016; Brito Neto et al., 2021; Vergasta et al., 2021).

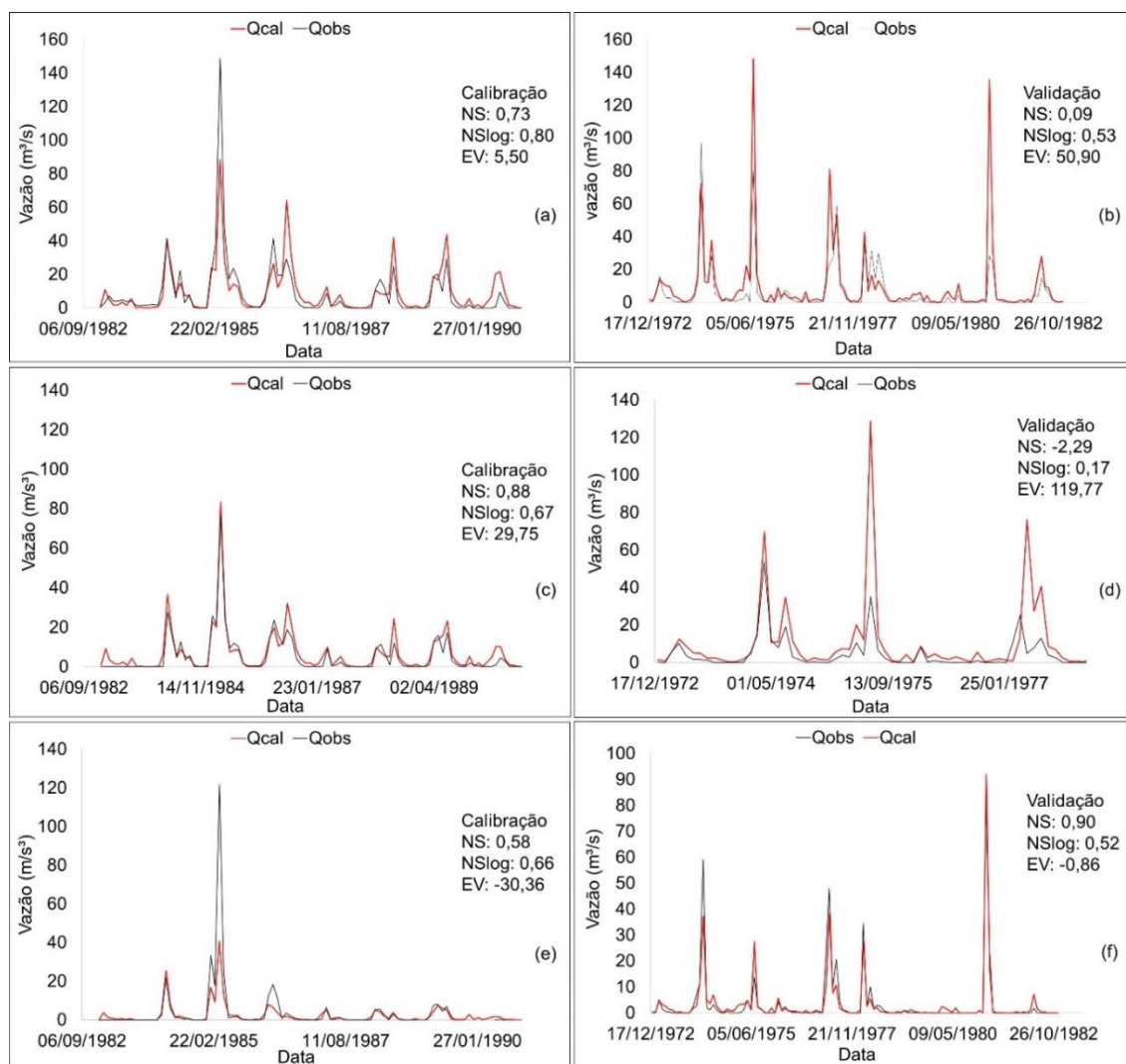


Figura 3: Hidrograma da calibração e validação nas estações fluviométricas de Limoeiro (a e b), Salgadinho (c e d) e Toritama (e e f) na bacia hidrográfica do Cabibaribe. E estatística na calibração e validação do modelo MGB.

Modelagem hidrológica dos cenários LULC

A análise dos cenários de uso e cobertura da terra demonstra que as alterações hidrológicas simuladas pelo modelo MGB estão diretamente relacionadas às mudanças na composição das classes LULC nas bacias hidrográficas dos rios Pajeú e Capibaribe. Os resultados indicam que cenários associados à redução da vegetação natural e expansão de usos antrópicos, principalmente pastagem e agricultura, tenderam a promover aumento da vazão e alterações na dinâmica de umidade do solo.

A Figura 4 apresentam os valores médios de longo prazo da vazão, evapotranspiração real e umidade do solo para cada cenário de uso e ocupação da terra simulado pelo modelo MGB-IPH, considerando o clima do período de calibração (1973 – 1982) para a seção do exutório.

É possível perceber que a vazão foi maior no cenário com menor área florestal (cenário LULC 2) na bacia hidrográfica do rio Pajeú, como pode ser visto na Figura 4(a). Esse resultado é semelhante ao que relata a literatura sobre o tema em questão, ou seja, que áreas ocupadas por pastagem tendem a gerar maior escoamento e vazão quando comparadas a áreas ocupadas por vegetação arbórea (Gênova et al., 2007; Li et al., 2012; Vanzela et al., 2009; Lorenzo, 2011; Lin et al., 2015; Xue et al., 2024; Yan et al., 2015; Liu et al., 2023; Eva et al., 2024).

No entanto, em Capibaribe a dinâmica foi distinta da observada no rio Pajeú, mostrando influência da parametrização do modelo (Tabela 1 e 2). Embora os cenários futuros também promovam redução da vegetação natural e expansão de áreas agrícolas e de pastagem, os valores dos parâmetros calibráveis apresentam menor contraste entre as classes de uso da terra.

Em relação as variáveis hidrológicas, alterar o LULC pode causar diminuição da evapotranspiração, infiltração, aumento do fluxo de água e escoamento superficial (Samal e Gedam, 2021; Kayitesi et al., 2022; Ali et al., 2025; Shiferaw et al., 2025).

Nesse sentido, foi possível perceber que a modelagem com o cenário LULC 2 apresentou diminuição da evapotranspiração a partir do mês de junho (Figura 4b) na bacia hidrográfica do rio Pajeú. Esse comportamento está associado a diminuição das áreas ocupadas por florestal.

Resultado que está de acordo com o que relata Wei e Zhang (2010): a diminuição de terras florestais contribui significativamente para a redução da evapotranspiração e aumento do fluxo de água do solo e subterrânea.

Sabe-se que o declínio das florestas reduziria a interceptação do dossel e a interceptação de plantas, levando à diminuição da evapotranspiração. A diminuição da vegetação influencia a superfície do solo e a água (Zhang et al., 2012). Como consequência do aumento do desmatamento, a evapotranspiração diminuiu e o escoamento superficial aumenta (Woldesenbet et al., 2017).

Nesse contexto, na bacia do rio Capibaribe a evapotranspiração real apresentou comportamento semelhante entre os cenários simulados, entretanto com elevação no cenário LULC 2 entre os meses de agosto e novembro (Figura 4e).

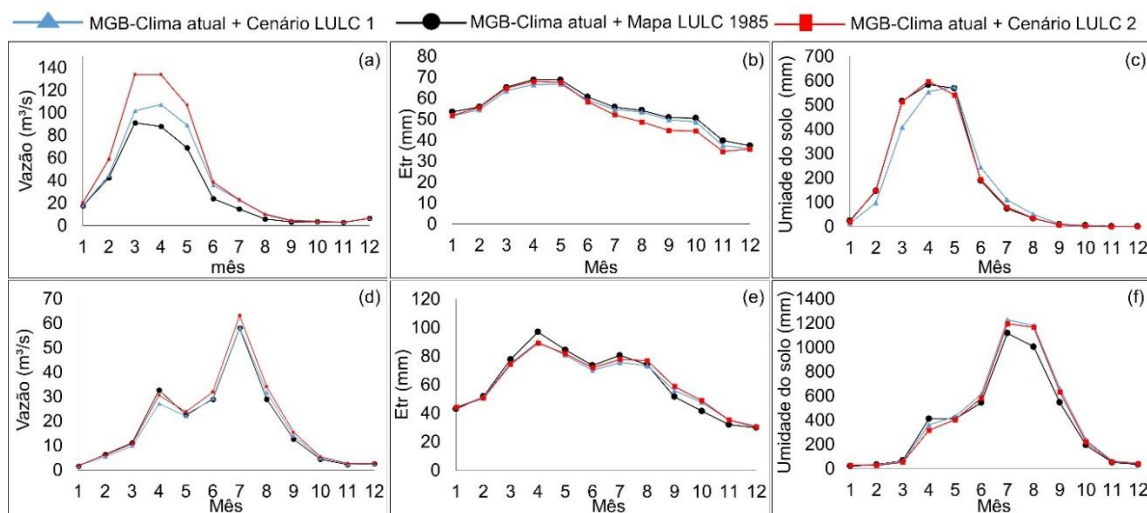


Figura 4. Valores médios de longo prazo no exutório para vazão (a), evapotranspiração real (b) e umidade do solo (c) referentes aos cenários LULC e clima atual (1973–1982) na bacia hidrográfica do rio Pajeú. Valores médios de longo prazo no exutório para vazão (d), evapotranspiração real (e) e umidade do solo (f) referentes aos cenários LULC e clima atual (1973–1982) na bacia hidrográfica do rio Capibaribe.

Em relação à umidade do solo, em Pajeú, o cenário LULC 2 (Figura 4c) apresentou maiores valores durante parte do período analisado, demonstrando que as alterações de uso da terra influenciaram diretamente a dinâmica de armazenamento hídrico no solo. Além disso, percebe-se maior variabilidade dos valores entre os cenários na bacia do rio Pajeú, indicando maior sensibilidade hidrológica às mudanças de cobertura vegetal.

Em Capibaribe a umidade do solo apresentou diferenças moderadas entre os cenários LULC (Figura 4f), com destaque para os maiores valores observados nos cenários associados às alterações de cobertura vegetal (Cenário LULC 1 e 2).

Analisando um pouco mais o resultado obtido para a bacia do rio Capibaribe em relação a

vazão (Figura 4d), percebe-se que esse coincidiu com o resultado encontrado por Sirqueira et al. (2022) para a bacia hidrográfica do rio Sapucaí (MG) com o modelo MGB. Os autores verificaram aumento das vazões que coincide com o aumento da cobertura florestal.

Brito Neto et al. (2021), também com a utilização do modelo MGB, verificaram maiores valores de vazões mensais médias, totais, máximas e mínimas no Rio Pardo no ano de 2016. No estudo, os autores verificaram que houve redução da área ocupada por floresta ao tempo que existiu um aumento das áreas com atividades agropecuárias no período de 2001 a 2016.

Em relação à simulação de diferentes cenários LULC, a literatura é bastante divergente com respeito às alterações negativas ou positivas da vazão com a utilização do modelo MGB. Por

exemplo, Jati (2017) relatou que não encontrou alterações significativas na bacia hidrográfica do rio Curuá-Una, localizado a sudeste de Santarém/Pará com o modelo MGB.

Mehri et al. (2025) observaram que a expansão de terras agrícolas, levou a um aumento do escoamento na saída da bacia hidrográfica. Por outro lado, a restauração de pastagens, resultou em uma redução significativa do escoamento.

Cocconi (2019), também com a utilização do modelo MGB para simulação da bacia hidrográfica Taquari-Antas, constatou que não houve grande variação nos valores de vazão média de longo prazo em diferentes cenários LULC, e que em cenários de maior cobertura vegetal, observam-se decréscimos no escoamento superficial e nas vazões médias de longo período.

Sobre essa temática, Blainski et al. (2017) relatam que essa divergência de resultados sugere que a variabilidade intrínseca das características da bacia hidrográfica poderia definir o grau de dependência em relação ao uso e ocupação da terra, ou seja, isso pode variar de uma bacia para outra.

Vale salientar que essa divergência de resultado também existe com a utilização de outros modelos hidrológicos. Porém, o modelo SWAT tem apresentado, ao menos nas pesquisas encontradas, resultados mais semelhantes entre si, ou seja, que a manutenção da vegetação natural eleva a vazão e a sua substituição por pastagem e agricultura acarreta na diminuição (Baker et al., 2013; Wang et al., 2017; Chen et al., 2020; Ayele et al., 2023; Valencia, 2024).

Entretanto, na presente pesquisa, também foi possível perceber que o grau de evolução do uso e ocupação da terra pode interferir na parametrização do modelo no momento da calibração. Porque quanto maior for a área ocupada por uma classe de uso e ocupação da terra mais essa classe irá apresentar sensibilidade para o modelo MGB. Nesse sentido, para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe a classe floresta ocupa apenas cerca de 10% da área da URH utilizada para calibrar o modelo, ao tempo que pastagem e agricultura, 50% e 30%, respectivamente.

Tabela 1. Parâmetros calibráveis do modelo para a bacia hidrográfica do rio Pajeú

Classes	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Urbano/raso	200.0	0.12	0.01	4.00	0.67	0.00	0.10
Agricultura/raso	400.0	0.12	0.01	4.00	0.67	0.00	0.10
Pastagem/raso	100.0	0.12	0.01	4.00	0.67	0.00	0.10
Caatinga/raso	2600.0	0.12	0.01	4.00	0.67	0.00	0.10
Caatinga/prof	2800.0	0.12	0.01	4.00	0.67	0.00	0.10
Água	0.0	0.1	0.01	4.00	0.67	0.00	0.10

Tabela 2. Parâmetros calibráveis do modelo para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe

Classes	Wm	b	Kbas	Kint	XL	CAP	Wc
Floresta/profundo	400.0	0.12	0.05	4.00	0.67	0.00	0.10
Caatinga/profundo	200.0	0.13	0.05	4.00	0.67	0.00	0.10
Pastagem/profundo	600.0	0.16	0.05	4.00	0.67	0.00	0.10
Agricultura/profundo	600.0	0.15	0.05	4.00	0.67	0.00	0.10
Urbano/profundo	600.0	0.17	0.05	4.00	0.67	0.00	0.10
Caatinga /raso	100.0	0.13	0.05	4.00	0.67	0.00	0.10
Água	0.0	0.1	0.08	4.00	0.67	0.00	0.10

Por enquanto que na bacia hidrográfica do rio Pajeú a classe caatinga ocupa 60% da área da bacia e agricultura menos que 9% e pastagem cerca de 14% da área da bacia, considerando a UHR utilizada para calibrar o modelo que foi referente ao ano de 1985.

Nesse contexto, qualquer alteração do parâmetro W_m apresenta resposta significativa na calibração do modelo e, conseqüentemente, na elevação ou diminuição da vazão. Foi o caso da aplicação do modelo MGB a bacia do rio Capibaribe, que, por necessidade do modelo, sempre solicitava valores maiores de W_m para pastagem e agricultura e menor valor de W_m para cobertura florestal natural. Situação inversa ocorreu na calibração do modelo para a bacia hidrográfica do rio Pajeú

Esse comportamento sugere estar relacionado à maior representatividade espacial das áreas antropizadas na bacia hidrográfica do rio Capibaribe, influenciando diretamente o processo de calibração do modelo. Dessa forma, a predominância dessas classes na composição das URHs condicionou o ajuste dos parâmetros hidrológicos, levando o modelo a atribuir maiores valores de W_m às classes mais representativas espacialmente, com o objetivo de reproduzir adequadamente o comportamento hidrológico observado da bacia.

Modelagem hidrológica de cenários futuros de clima e LULC

Em relação a simulação de ambas as bacias hidrográficas com dados oriundos dos modelos climáticos, foi possível perceber que em todos os modelos a sazonalidade foi representada de forma satisfatória (Figura 5 e 6).

Resultado semelhante ao encontrado por Silva (2021) relatou que o modelo Eta apresentou desempenho satisfatório na simulação da precipitação e da evapotranspiração na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, especialmente durante a estação chuvosa, evidenciando a capacidade do modelo em representar a sazonalidade climática da região.

Ainda nesse contexto, Rodrigues (2020) destacou que a avaliação das previsões subsazonais do modelo Eta indicou uma representação adequada da sazonalidade da precipitação na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.

Na rodada do MGB-Eta-HADGEM, o comportamento das curvas foram mais ou menos semelhantes, sem muita variação abrupta negativa ou positiva na vazão, a qual se comporta diferente na sessão do MGB-Eta-BESM, apresentando uma

elevação acentuada nas rodadas combinadas com os cenários futuros de clima em comparação com a do modelo com o clima baseline.

Essa variedade de resultados ocorreu, principalmente, em função da diferença dos volumes precipitados entre os modelos. O Eta-HADGEM futuro apresentou maiores volumes de precipitação pluviométrica em comparação ao cenário baseline (Figura 7), sendo esse o motivo de maiores valores da vazão para a bacia hidrográfica do Rio Pajeú na rodada MGB-Eta-HADGEM futuro (Figura 5c).

Embora o modelo Eta-BESM projete aumento da precipitação durante os meses de estiagem (Figura 7a e b), os resultados hidrológicos indicam que esse incremento não se traduz em aumentos expressivos das vazões nesse período (Figura 5a e b). Os maiores impactos são observados durante a estação chuvosa, quando os cenários futuros apresentam elevação das vazões máximas em relação ao cenário de referência. Esse comportamento sugere que a resposta hidrológica da bacia é fortemente controlada pelas características físicas e pelos processos de armazenamento de água, que modulam a conversão da precipitação em escoamento.

Ainda nessa perspectiva, Jati e Silva (2017), ao testarem a sensibilidade do modelo MGB-IPH em relação à alteração nos volumes de precipitação na bacia Caruá-Una, verificaram que a diminuição de 50% das chuvas reduziu a vazão entre 14% a 32% e, o aumento de 50% de chuvas aumentou a vazão em 218,6%, mostrando forte sensibilidade do modelo em relação a alterações positivas ou negativas no regime de precipitação pluviométrica.

Esse resultado é semelhante ao encontrado por Alemayehu et al. (2020) que constaram elevação da precipitação para região árida e semiárida da Etiópia. E ao encontrado por Diki et al. (2015) que verificaram que o modelo HADGEM2-ES projeta um clima mais chuvoso para a África do Sul e para a Nigéria. E também condizendo ao relatado por Chou et al. (2014a) e Haylock et al. (2006), o modelo regional Eta, acoplado ao modelo climático do sistema terrestre HADGEM2-ES, apresentam tendências para condições mais úmidas no período de 1961 a 1990 (período baseline) em grande parte do continente Sul-americano.

Em relação a precipitação pluviométrica para o modelo CanESM2, foi possível perceber que o modelo projetou diminuição da precipitação para ambas as bacias hidrográficas (Figura 7).

Resultado diferente do encontrado por Gebru, Gebreyohannes e Kahsay (2025), que observaram, para a bacia hidrográfica de Giba,

localizada no estado regional de Tigray, norte da Etiópia e de clima semiárido, que a precipitação irá aumentar em todos os três cenários e na maioria das estações fluviométricas analisadas.

Jiménez-Bonilla et al. (2025) observaram que o cenário RCP 4.5 do IPCC apresenta diminuição da precipitação em algumas regiões áridas e semiáridas e um aumento na frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação para lagos permanentes em uma região semiárida da bacia do Mediterrâneo Sudoeste (S Espanha). Mostrando que, mesmo que as bacias hidrográficas apresentem climas semiáridos, os

cenários climáticos apresentam volumes diferentes de precipitação.

Ainda nesse sentido, Molina-Navarro et al. (2016) realizaram a modelagem hidrológica para avaliar os impactos das mudanças climáticas em uma região semiárida agrícola, na bacia do rio Guadalupe, no México. Os autores constataram impactos perceptíveis das mudanças climáticas no fluxo dos rios, com reduções de escoamento em torno de -45% no curto prazo, mas até -60% no longo prazo. Os principais fatores para isso são a redução da precipitação, além de uma crescente perda de água, em porcentagem, via evapotranspiração.

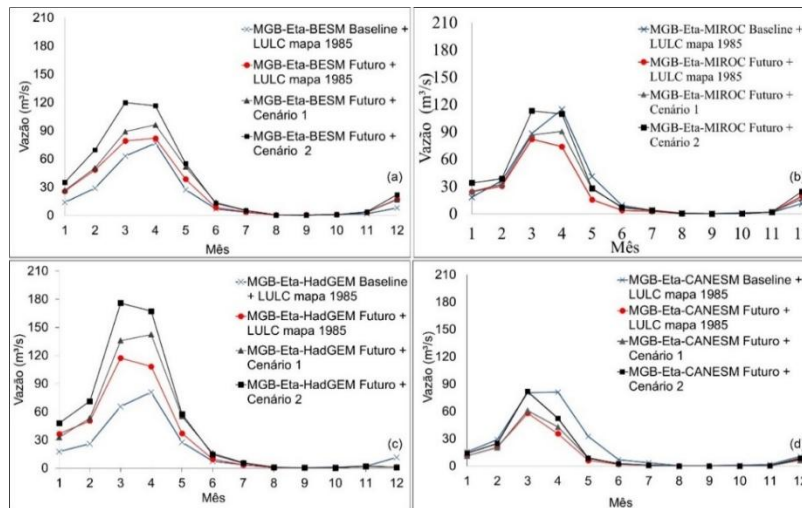


Figura 5. Vazão média de longo prazo no exutório da bacia hidrográfica do rio Pajeú referente ao cenário LULC e cenários climáticos para MGB-Eta-BESM (a), MGB-Eta-HADGEM (b), MGB-Eta-MIROC (c) MGB-Eta-CANESM (d).

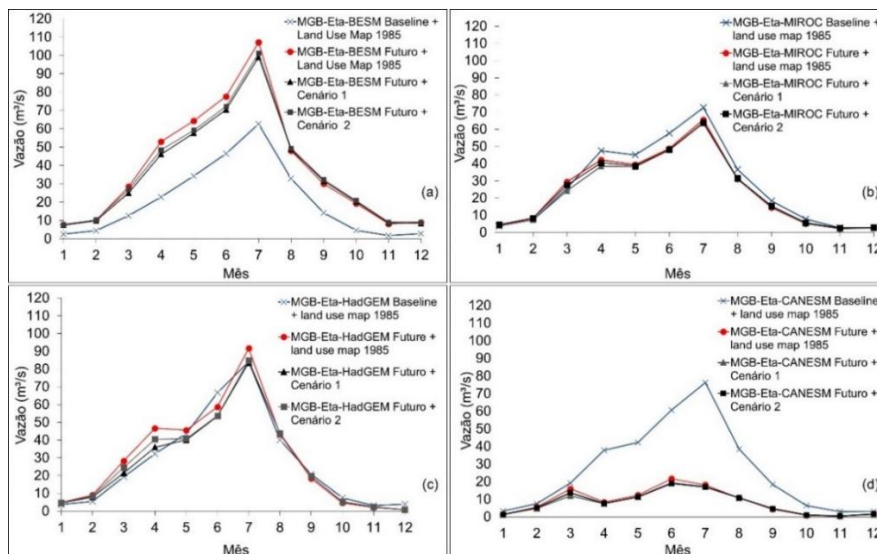


Figura 6. Vazão média de longo prazo no exutório da bacia hidrográfica do rio Capibaribe referente aos LULC e cenários climáticos MGB-Eta-BESM (a), MGB-Eta-HADGEM (b), MGB-Eta-MIROC (c) e MGB-Eta-CANESM (d).

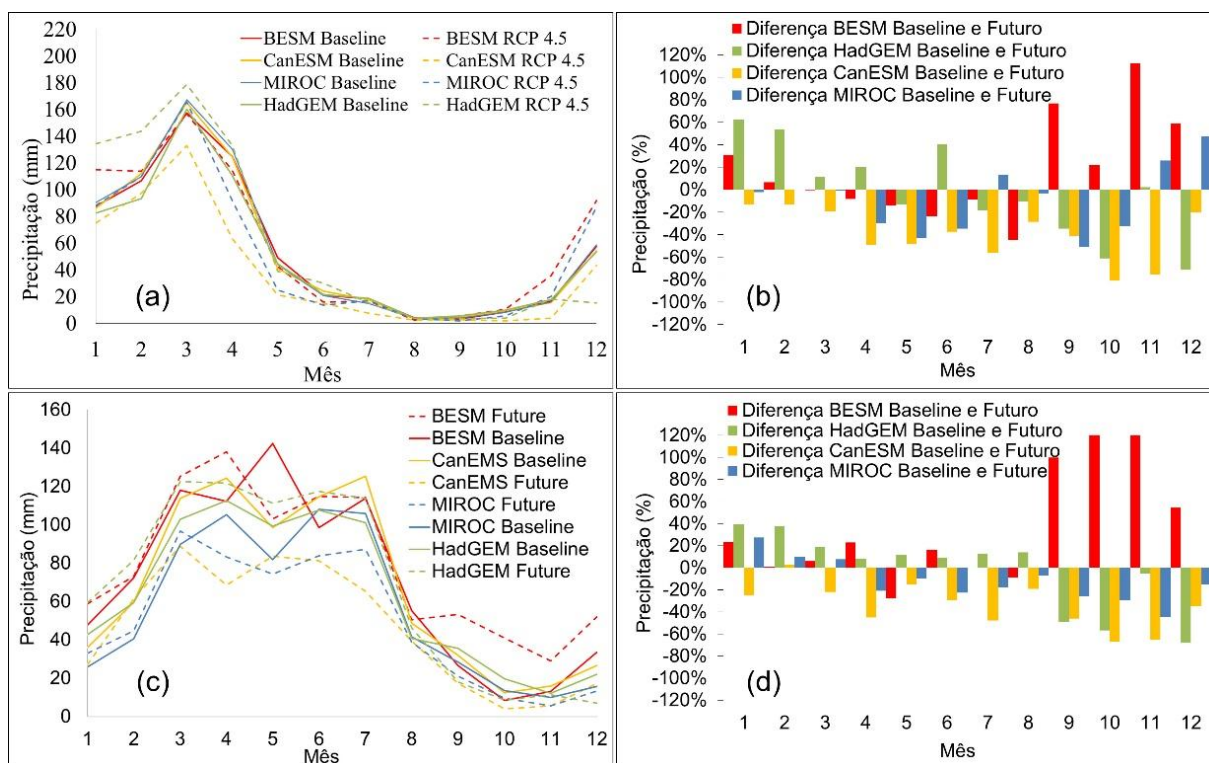


Figura 7. Precipitação média de longo prazo nos cenários climático para a bacia hidrográfica do rio Pajeú (a, b) e do rio Capibaribe (c, d).

É perceptível que a variabilidade pode variar de cenário para cenário. Como a exemplo do estudo desenvolvido por Avazpour et al. (2025) na bacia do Kashkan, localizada no sudoeste do Irã, que constaram mudanças na precipitação mensal em diferentes cenários SSP (Shared Socioeconomic Pathways) demonstrando como fatores climáticos e geográficos locais afetam as tendências de precipitação. Os autores mencionaram que as previsões de precipitação apresentam variabilidade, pois alguns meses registram reduções e outros mostram aumentos.

Nesse contexto, a rodada MGB-Eta-BESM foi a que apresentou maiores volumes de vazão média de longo prazo considerando o clima futuro em comparação com o período baseline (1961-1990), seguida da rodada MGB-Eta-HADGEM. Enquanto a rodada MGB-Eta-CANESM foi a que apresentou condições mais severas em relação a diminuição dos volumes de vazão. No geral, esse é o comportamento apresentado, também, em relação ao período baseline de cada modelo climático. A rodada MGB-Eta-MIROC apresenta diminuição da vazão média de longo prazo, porém não tão acentuada como a rodada MGB-Eta-CANESM (figura 5 e 6).

Nesse contexto, em termos de volumes de vazão média de longo prazo, o maior pico de vazão na rodada MGB-Eta-BESM futuro +

cenário LULC 2 atingiu 112,31 m³/s ao tempo que o maior pico de vazão na rodada MGB-Eta-HADGEM futuro + cenário LULC 2 133,70 m³/s, uma diferença de 21,39 m³/s entre os resultados das simulações hidrológicas com dados climáticos do Eta-BESM e Eta-HADGEM na bacia hidrográfica do Rio Pajeú. Já na rodada MGB-Eta-MIROC o maior pico de vazão foi de 114,73 m³/s no período baseline e na rodada MGB-Eta-CANESM foi de 81,07 m³/s também no período baseline, diferença de volume de 33,66 m³/s.

Esse comportamento também foi encontrado por Costa et al. (2022) com a utilização do modelo MGB-IPH para a bacia do rio Doce com a utilização de cenários climáticos. Mas é divergente ao relatado por Brito et al. (2019) e Marengo (2004) que relatam que o cenário BESM apresenta tendência de clima mais seco na maior parte da América do Sul.

Em relação aos valores máximos, mínimos e médios de vazão as condições foram mais severas para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe (Figura 8), principalmente na rodada MGB-Eta-MIROC e MGB-Eta-CANESM. Para a bacia hidrográfica do rio Pajeú, a rodada MGB-Eta-CANESM é a que apresenta diminuição de forma mais acentuada da vazão, porém ainda sendo uma condição mais amena em comparação a bacia hidrográfica do rio Capibaribe (Figura 8).

Esse resultado vai de encontro ao que relata Brito et al. (2019) e Marengo (2004), que o MICOR5 apresenta tendência de clima mais seco para América do Sul.

A rodada MGB-Eta-HADGEM é que apresentou maior tendência de elevação de vazão para a bacia hidrográfica do rio Pajeú. Resultado semelhante ao encontrado por Schuster et al. (2020) para a bacia hidrográfica transfronteiriça da Laguna dos Patos ao utilizar dados do modelo HADGEM.

A associação dos dados futuros de clima aos cenários LULC mostram que o clima pode ser um fator mais impactante para elevação da vazão que os cenários LULC para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe. Uma vez que os cenários LULC futuros geram menores volumes de vazão, mas quando associado, principalmente aos cenários climáticos Eta-BESM e Eta-HADGEM, tenderam a elevar a vazão.

A Figura 9 apresenta os valores da vazão Q10 e Q90 a nível mensal para a simulação hidrológica nos cenários de uso e ocupação da terra atual e futuros associados aos panoramas de climas também presentes e vindouros, tendo em vista que a bacia hidrográfica do rio Pajeú passa boa parte do ano hidrológico com vazão baixa entre os meses de julho a novembro.

É possível perceber que o resultado do modelo MGB-IPH com os cenários LULC e clima atual e futuro apresenta uma significativa elevação na vazão de cheia Q10 na rodada MGB-Eta-BESM e MGB-Eta-HADGEM e sua diminuição nas sessões MGB-Eta-MIROC e MGB-Eta-CANESM.

A magnitude da elevação daquelas varia de acordo com o cenário LULC associado ao climático, sendo o panorama LULC 2 o que apresenta maior vazão.

Quanto à vazão de estiagem Q90 na simulação, percebe-se sua significativa elevação na rodada MGB-Eta-HADGEM. As outras sessões do modelo não apresentaram seu aumento positivo ou negativo, isso porque os valores se mantiveram próximos de zero.

Percebe-se que o resultado do modelo MGB-IPH com os cenários de uso da terra e clima atuais e futuros indica elevação na vazão de cheia Q10 na rodada MGB-Eta-MIROC, enquanto a de estiagem (Q90) apresenta uma pequena diminuição, tanto no cenário 1 quanto no 2 de uso e ocupação do solo.

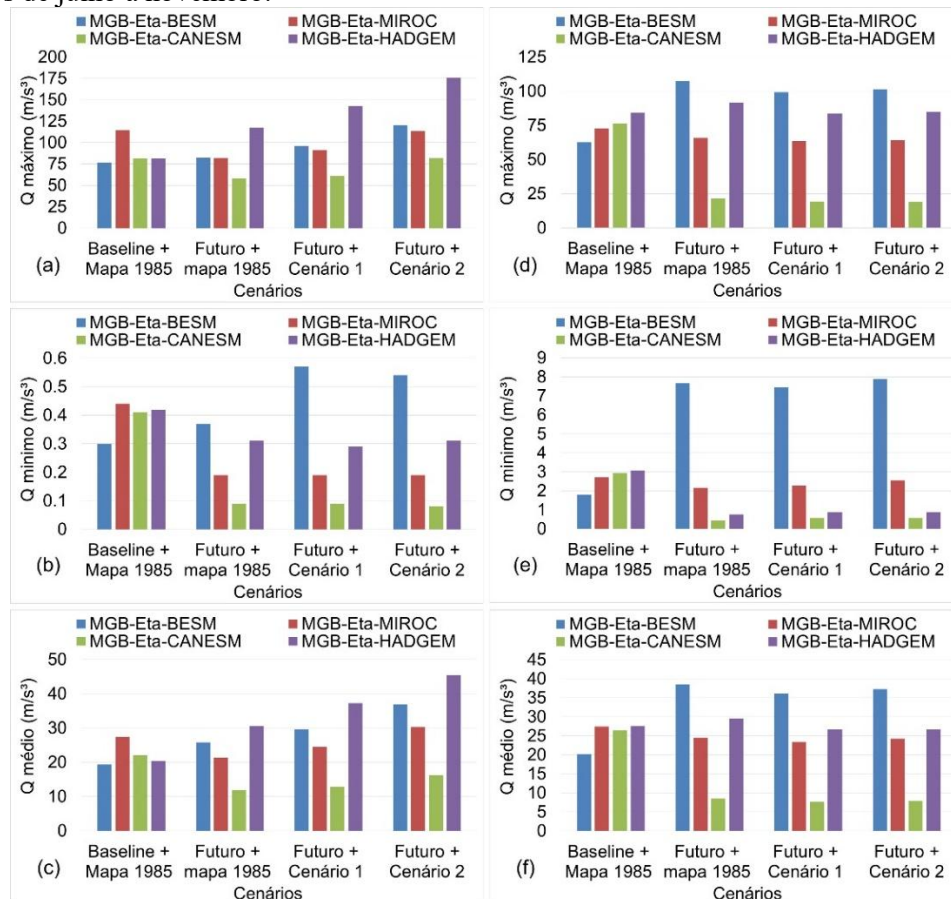


Figura 8. Vazão mínima, máxima e média de longo prazo no exutório da bacia hidrográfica do rio Pajeú (a, b, c) e no exutório da bacia hidrográfica do rio Capibaribe (d, e, f).

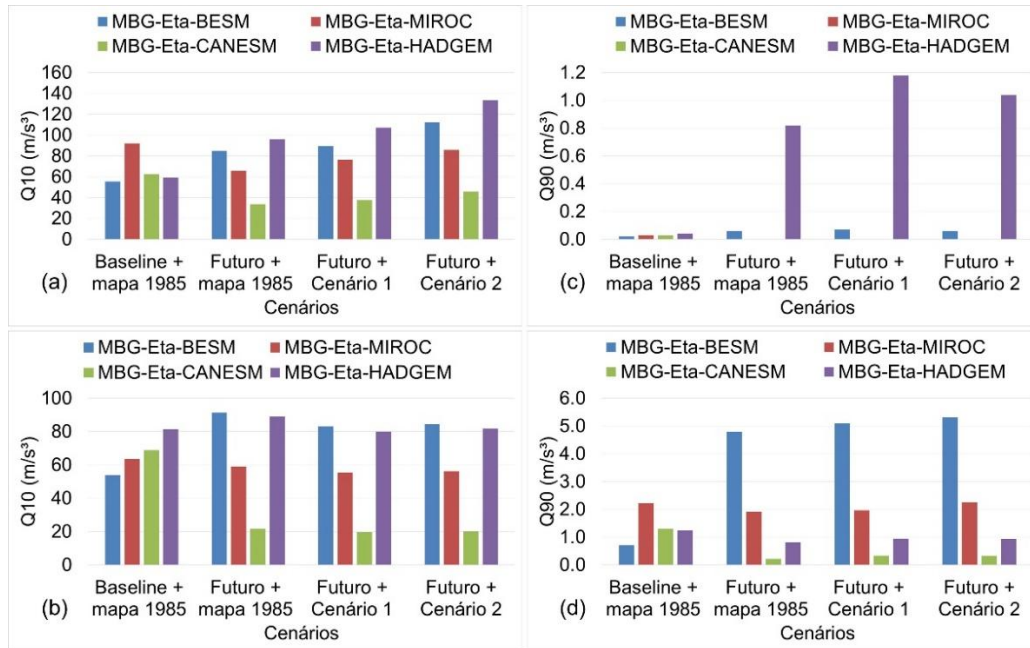


Figura 9. Valores da vazão Q10 e Q90 a nível mensal para a simulação hidrológica nos cenários de uso e ocupação da terra atual e futuros. (a) e (c) Bacia hidrográfica do rio Pajeú e (b) e (d) bacia hidrográfica do rio Capibaribe.

Nesse sentido, na modelagem do cenário de clima futuro MGB-Eta-MIROC associada ao mapa de uso do solo de 1985, houve um aumento no Q10 de 246,38% em relação ao cenário de baseline relacionado ao quadro supramencionado, e de 374% no panorama climático futuro ligado ao de número 2.

Em relação aos resultados do MGB-Eta-BESM, observa-se uma elevação na Q10 em 49% na rodada que associa cenário de clima futuro ao mapa de 1985 em comparação à modelagem da amostra climática baseline + o referido quadro supramencionado. Percebe-se, também, um aumento de 125 % na vazão Q10 no panorama climático futuro associado ao mapa de 1985 em comparação ao segundo cenário. Nas outras combinações do MGB-Eta-BESM, foi possível observar uma maior ocorrência do referido fenômeno.

O MGB-Eta-CANESM apresentou volumes menores tanto na Q10 quanto na Q90 nas simulações do MGB-IPH com os cenários futuros de clima e uso da terra futuros. Em contrapartida, houve um pequeno aumento na segunda para a modelagem de MGB-Eta-HADGEM futuro associado ao mapa de 1985 em comparação à rodada MBG-Eta-HADGEM combinado com o mapa de 1985.

Considerações finais

O modelo MGB-IPH apresentou desempenho satisfatório na simulação hidrológica em diferentes bacias hidrográficas, conseguindo representar a variabilidade climática da do rio Capibaribe que compreende desde um clima mais úmido a seco, assim como apresentou resultados satisfatórios ao simular uma de clima semiárido como a do rio Pajeú.

Assim como, também se mostrou eficiência para simular impactos provindos de diferentes cenários LULC sobre o regime de vazão e processos hidrológicos, porém sendo necessário demandar atenção especial para a parametrização do modelo e, também, para a definição da quantidade de classes da URH a fim de oferecer um maior controle da parametrização do modelo e, dessa maneira, compreender melhor se substituição da vegetação natural por pastagem e agricultura acarretará alterações positivas ou negativas dos volumes de vazão. Essa é uma lacuna que ainda precisa ser melhor explorada em relação ao modelo MGB.

Entretanto, é importante ressaltar que o tamanho da área ocupada pelo tipo de uso da terra tem forte influência no parâmetro W_m , ou seja,

quanto maior área ocupada, maior é a sensibilidade do modelo. Isso pode ser um problema nas amostragens de bacias hidrográficas com cenários LULC muito antropotizado, apresentando resultado divergentes em comparação com bacias hidrográficas com maior estado de conservação natural.

O modelo MGB-IPH também mostrou eficiência para simular os impactos das alterações climáticas sob o regime de vazão. Os cenários Eta-BESM e Eta-HADGEM são os que apresentam condições mais amenas de sua diminuição para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe.

No período chuvoso, o MGB-Eta-BESM é o que apresenta alterações mais positivas na vazão para a bacia hidrográfica do rio Capibaribe. As simulações do Eta-CANESM e Eta-MIROC indicam-lhe condições mais severas ao tempo que o segundo apresenta condições mais austeras para a bacia hidrográfica do rio Pajeú.

Por fim, percebeu-se que os cenários climáticos Eta-BESM, Eta-HADGEM, Eta-CANESM e Eta-MIROC apresentaram previsões diferentes para ambas as bacias hidrográficas, não revelando um panorama futuro do clima em comum. Essa divergência de resultado precisa ser melhor estudada, pois, cada cenário pode indicar ou sugerir diferentes medidas atenuadoras frente as mudanças climáticas para as áreas banhadas pelas bacias hidrográficas analisadas.

Agradecimentos

Este estudo foi financiado pela chamada CAPES/ANA 19/2015 (88887.115873/2015-01), pela Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais (Rede CLIMA) e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processo nº 441951/2020-1). O segundo autor é bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq (PQ).

References

- Apac. (2025). *Informe e previsão climática: Fevereiro de 2025*. APAC. <https://www.apac.pe.gov.br/uploads/informe-previsao-climatica-FEVEREIRO-2025.pdf>
- Abbas, S. A., Bailey, R. T., Arnold, J. G., White, M. J., & Mirchi, A. (2025). Modeling agro-hydrological surface-subsurface processes in a semi-arid, intensively irrigated river basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 57, Article 102188. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102188>
- Adam, K. N., Fan, F. M., Pontes, P. R., Martin, J., & Collischonn, W. (2015). Mudanças climáticas e vazões extremas na Bacia do Rio Paraná. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 20(4), 999–1007. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n4.p999-1007>
- Adam, K. N., Collischonn, W., Fan, F., & Martin, J. (2017). Influência da técnica de remoção de viés aplicada em estudos de mudanças climáticas na bacia do rio Uruguai. In *Anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=2260>
- Alemayehu, S., Ayana, E. K., Dile, Y. T., Demissie, T., Yimam, Y., Girvetz, E., Aynekulu, E., Salomão, D., & Worqlul, A. W. (2020). Evaluating land suitability and potential climate change impacts on alfalfa (*Medicago sativa*) production in Ethiopia. *Atmosphere*, 11(10), 1124. <https://doi.org/10.3390/atmos11101124>
- Ali, M. H., Bertini, C., Popescu, L., et al. (2025). Comparative analysis of hydrological impacts from climate and land use/land cover changes in a lowland mesoscale catchment. *International Journal of River Basin Management*, 23(1), 1–15. <https://doi.org/10.1080/15715124.2025.2454692>
- Andrade, C. W. L., Montenegro, S. M. G. L., Montenegro, A. A. A., Lima, J. R. S., Srinivasan, R., & Jones, C. A. (2020). Climate change impact assessment on water resources under RCP scenarios: A case study in Mundaú River Basin, Northeastern Brazil. *International Journal of Climatology*.
- Andrade Neto, J. V. (2022). *Simulação hidrológica de grandes bacias semiáridas com densas redes de açudes e poucos dados* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Arraujo, A. S. (2017). *Calibração do modelo MGB-IPH na bacia hidrográfica do Rio Apodi-Mossoró* (Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Norte).
- Assis, J. M. A., Sousa, W. M., & Sobral, M. C. (2015). Análise climática da precipitação no Submédio da Bacia do Rio São Francisco a partir do índice de anomalias de chuva. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 36, 115–127.
- Avazpour, F., Hadian, M. R., Talebi, A., & Haghighi, A. T. (2025). Impact of climate change on river flow using a hybrid model of LARS-WG and LSTM: A case study in the Kashkan Basin. *Results in Engineering*, 26,

- Article 104956.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104956>
- Ayele, T. G., et al. (2023). Hydrological response to land use and land cover change using SWAT model in the Upper Awash Basin, Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 856, 159170. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159170>
- Baker, T. J., Miller, S. N., & Brown, T. C. (2013). Assessing impacts of land use change on streamflow using the SWAT model in a semiarid watershed in Africa. *Journal of Hydrology*, 486, 105–120. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.020>
- Bárdossy, A., & Pegram, G. (2011). Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. *Water Resources Research*, 47, 1–18.
- Beserra, P. S. (2016). *Avaliação dos efeitos das alterações na cobertura e uso do solo sobre o regime de vazões via modelagem hidrológica considerando incerteza paramétrica* (Dissertação de mestrado). Universidade de Brasília.
- Blainski, É., Porras, E. A. A., Garbosa, L. H. P., & Pinheiro, A. (2017). Simulation of land use scenarios in the Camboriú River Basin using the SWAT model. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 22, e33. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716110>
- Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações. (2022). *Impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos no Brasil*. Governo Federal. https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/arquivos/Relatorio_Mudanca_Clima_Brasil.pdf
- Brito, A. L., Veiga, J. A., Correia, F. W., & Capistrano, V. B. (2019). Avaliação do desempenho dos modelos HadGEM2-ES e Eta a partir de indicadores de extremos climáticos de precipitação para a Bacia Amazônica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 34(2), 165–177. <https://doi.org/10.1590/0102-77863340003>
- Brito Neves, B. B., et al. (1995). A tafrogênese estateriana nos blocos paleoproterozóicos da América do Sul e processos subsequentes. *Geonomos*, 3(2), 1–21.
- Brito Neto, R. L. (2018). *Simulação hidrológica para a Bacia Hidrográfica do Rio Pardo em diferentes cenários de uso e ocupação do solo* (Dissertação de mestrado). Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.
- Brito Neto, R. L., Tagliaferre, C., Lemos, O. L., Rocha, F. A., & Paula, A. (2021). Application of the MGB-IPH model in the Pardo River hydrographic basin in different scenarios of use and occupation of the soil. *Ciência Florestal*, 31(1), 191–213. <https://doi.org/10.5902/1980509836095>
- Chen, Y., Li, W., Deng, H., & Zhou, J. (2020). Impacts of land-use and climate change on hydrological processes in the Zhanghe Reservoir Basin, China, using the SWAT model. *Geoscience Letters*, 7(2), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s40562-020-00161-1>
- Chou, S. C., Marengo, J. A., Lyra, A. A., Sueiro, G., Pesquero, J. F., Alves, L. M., Kay, G., Betts, R., Chagas, D. J., Gomes, J. L., Bustamante, J. F., & Tavares, P. (2011). Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta-CPTec/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and Paraná River basins. *Climate Dynamics*, 38(9), 1829–1848. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1155-5>
- Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., et al. (2014a). Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. *American Journal of Climate Change*, 3(5), 438–454.
- Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., & Marengo, J. (2014b). Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. *American Journal of Climate Change*, 3, 512–527. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>
- Cocconi, J. K. (2019). *Investigações das mudanças no uso e ocupação do solo na Bacia Taquari-Antas e suas possíveis influências nas vazões* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina.
- Collischonn, W., Allasia, D., Silva, B. C., & Tucci, C. E. M. (2007). The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), 878–895. <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>
- Costa, F. P. D., Buarque, D. C., Brêda, J. P. L. F., & Föeger, L. B. (2022). Impact of climate change on the flow of the Doce River Basin. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 27, e34. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220069>
- CPRM. (2005). *Mapa geológico do Estado de Pernambuco*. CPRM.

- Dai, A., et al. (2016). Global impacts of energy demand on the freshwater resources of nations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(23), 9612–9617. <https://doi.org/10.1073/pnas.1507701112>
- De Roos, M., et al. (2022). Net irrigation requirement under different climate scenarios using AquaCrop over Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26, 3731–3753. <https://doi.org/10.5194/hess-26-3731-2022>
- Deser, C., et al. (2021). Insights from Earth system model initial-condition large ensembles and future prospects. *Earth System Dynamics*, 12(4), 1393–1410. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0731-2>
- Diki, V. N., Shimizu, H. M., Lin, Z. D. M., Nwofor, O. K., & Chineke, T. C. (2015). Modelling present and future African climate using CMIP5 scenarios in HadGEM2-ES. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.4084>
- Ding, H., Shi, X., Yuan, Z., Chen, X., Zhang, D., & Chen, F. (2024). Does vegetation greening have a positive effect on global vegetation carbon and water use efficiency? *Science of the Total Environment*, 951. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175589>
- Embrapa. (2006). *Sistema brasileiro de classificação de solos* (2ª ed.). Embrapa Solos.
- Eastman, J. R. (2016). *TerrSet: Geospatial monitoring and modeling system manual*. Clark Labs, Clark University.
- Escarião, R. D., Montenegro, S. M. G. L., Azevedo, J. R. G., & Ribeiro Neto, A. (2013). Influência do modelo hidrológico na avaliação da sensibilidade dos recursos hídricos a cenários de mudanças climáticas em região semiárida. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 17(3), 81–91. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v17n3.p81-91>
- Estoque, R. C., Ooba, M., Avitabile, V., Hijioka, Y., Dasgupta, R., Togawa, T., & Murayama, Y. (2019). The future of Southeast Asia's forests. *Nature Communications*, 10, Article 1829.
- Eva, E. A., et al. (2024). Projection of land use and land cover changes based on land change modeler and integrating both land use land cover and climate change on the hydrological response of Big Creek Lake Watershed, South Alabama. *Journal of Environmental Management*, 370, 122923. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122923>
- Felix, V. S., & Paz, A. R. (2016). Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 21(3), 556–569. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011616009>
- Feng, P., et al. (2023). Quantifying the impact of climate and vegetation changes on runoff based on the Budyko framework. *Frontiers in Earth Science*, 11. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1251759>
- Ferreira, P. S., Gomes, V. P., Santos, A. M., Morais, Y. C. B., Miranda, R. Q., Ferreira, J. M. S., & Galvêncio, J. D. (2014). Análise do cenário de suscetibilidade à desertificação na bacia hidrográfica do rio Pajeú – Estado de Pernambuco. *Scientia Plena*, 10(10).
- Folharini, S., & Oliveira, R. (2020). Utilização do Land Change Modeler na modelação prospectiva do uso e cobertura do solo na microrregião de Santos, Brasil, para o ano de 2022. *Revista de Geografia e Ordenamento do Território*, 19, 57–73.
- Galindo, I. C. L., Ribeiro, M. R., Santos, M. F. A. V., Lima, J. F. W. F., & Ferreira, R. F. A. L. (2008). Relações solo-vegetação em áreas sob processo de desertificação no município de Jataúba, PE. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1283–1296.
- García-Pablo, M. A., et al. (2021). Impact of urban land-cover changes on the spatiotemporal land surface temperature in a tropical city of Mexico. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(2), Article 76. <https://doi.org/10.3390/ijgi10020076>
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211–1250. <https://doi.org/10.13031/2013.23637>
- Gebbru, A. B., Gebreyohannes, T., & Kahsay, G. H. (2025). Modelling climate change and aridity for climate impact studies in semi-arid regions: The case of Giba Basin, northern Ethiopia. *Heliyon*, 11(1), e41693. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e41693>
- Gorugantula, S. S., & Kambhammettu, B. V. N. P. (2025). An integrated hydrological model to simulate terrestrial water storage in a large river basin: Evaluation using GRACE data. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 59, Article 102309. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102309>
- Haylock, M. R., Peterson, T., Alves, L. M., Ambrizzi, T., Anunciação, Y. M. T., et al. (2006). Trends in total and extreme South

- American rainfall 1960–2000 and links with sea surface temperature. *Journal of Climate*, 19, 1490–1512.
- He, L., & Rosa, L. (2023). Solutions to agricultural green water scarcity under climate change. *PNAS Nexus*, 2(4), pgad117. <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad117>
- Inmet. (2023). *Primeira quinzena de fevereiro terá chuvas intensas na Região Nordeste*. Instituto Nacional de Meteorologia. <https://portal.inmet.gov.br/noticias/primeira-quinzena-de-fevereiro-ter%C3%A1-chuvas-intensas-na-regi%C3%A3o-nordeste>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Water. In *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 4-1–4-49). Cambridge University Press.
- Jati, D. A., & Silva, J. T. (2017). Estudos geohidrológicos da bacia do rio Curuá-Una, Santarém, Pará: Aplicação do modelo hidrológico de grandes bacias (MGB-IPH). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10(4), 1296–1311. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v10.4.p1296-1311>
- Jiang, Y., et al. (2025). Study on the effect of underlying surface changes on runoff generation in the urbanized watershed. *Scientific Reports*, 15. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95295-1>
- Jiménez-Bonilla, A., Rodríguez-Rodríguez, M., Yanes, J. L., & Gázquez, F. (2025). Impact of climate change on permanent lakes in a semiarid region: Southwestern Mediterranean Basin (S Spain). *Science of the Total Environment*, 961, 178305. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.178305>
- Kayitesi, N. M., Guzha, A. C., & Mariethoz, G. (2022). Impacts of land use land cover change and climate change on river hydro-morphology: A review of research studies in tropical regions. *Journal of Hydrology*, 615, 128702. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128702>
- Kirchner, J. W., et al. (2020). Streamflow response to forest management. *Nature*, 578, E12–E15. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-1940-6>
- Kumar, A., et al. (2025). Vegetation hydrology and slope interaction under variable infiltration: A state-of-the-art review. *Journal of Infrastructure Preservation and Resilience*, 6, 33. <https://doi.org/10.1186/s43065-025-00152-0>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159–174.
- Lee, J. Y., Yang, J., Kim, H., & Ha, K. J. (2025). Future changes in regional inter-monthly precipitation patterns of the East Asian summer monsoon and associated uncertainty factors. *Earth System Dynamics*, 16, 1135–1155. <https://doi.org/10.5194/esd-16-1135-2025>
- Leite, C. C. O., et al. (2026). The impact of land use and land cover changes on surface and baseflow dynamics in a Brazilian savanna basin. *Sustainable Water Resources Management*, 12. <https://doi.org/10.1007/s40899-026-01342-8>
- Lima, T. S., et al. (2016). Analysis of climate variability in semiarid region, Petrolândia, Pernambuco. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 6(1).
- Lin, B., Chen, X., Yuan, J., Chen, X., & Chen, Y. (2015). Analyses of the impacts of land-use changes on watershed runoff using different time indicators based on the SWAT model. *Ecological Indicators*, 58, 55–63. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.05.036>
- Liu, R., Wang, X., Zhang, Y., & Li, H. (2023). Analysis of runoff according to land-use change in the Upper Hutuo River Basin. *Water*, 15(6), 1138. <https://doi.org/10.3390/w15061138>
- Lorenzo, A. S. (2011). *Processos hidrológicos em um fragmento de floresta estacional semidecidual no município de Viçosa, MG* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Viçosa.
- Lyra, A., Tavares, P., Chou, S. C., Sueiro, G., Dereczynski, C. P., Sondermann, M., Silva, A., Marengo, J., & Giarolla, A. (2017). Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2067-z>

- Lyu, X., Jia, Y., Qiu, Y., Du, J., Hao, C., Dong, H., & Chang, J. (2024). Influence of human-induced land use change on hydrological processes in semi-humid and semi-arid region: A case in the Fenhe River Basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 51, 101605. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101605>
- Madsen, H., Olesen, M., & Christensen, O. B. (2023). Role of mean and variability change in changes in European annual and seasonal extreme precipitation events. *Earth System Dynamics*, 14(3), 797–813. <https://doi.org/10.5194/esd-14-797-2023>
- Marengo, J. A. (2004). Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon Basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 78, 79–96.
- Masullo, Y. A. G., & Rangel, M. E. S. (2012). Uso e ocupação do solo e alterações climáticas na Ilha do Maranhão. *Revista Geonorte*, 2(5), 663–674.
- Medeiros, R. M., et al. (2018). Climate classification in Köppen model for the state of Pernambuco, Brazil. *Revista de Geografia*, 35(3), 219–234.
- Medeiros, R. M., et al. (2022). Climate indices and their variabilities in the state of Pernambuco, Brazil. *International Journal of Science and Research Archive*, 7(1), 68–77.
- Mehri, S., Moradi, H. R., & Mostafazadeh, R. (2025). Impact assessment of land use change scenarios on landscape fragmentation and river flow discharge using SWAT model. *Ecohydrology & Hydrobiology*. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2025.100655>
- Menezes, M. C. (2016). *Efeito do uso do solo sobre a vegetação: Estudo de caso em Inselberg no Cariri paraibano* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal da Paraíba.
- Meng, Z., Wu, X., Li, Y., & Wang, X. (2024). Drought timing differentiates the drought responses of vegetation growth on the Tibetan Plateau. *JGR Biogeosciences*. <https://doi.org/10.1029/2024JG008179>
- Nascimento, G. I. L. A., et al. (2021). A spatial approach to rainfall in Sertão do Pajeú, Pernambuco. *Research, Society and Development*, 10(11), e19614.
- Neill, C., et al. (2009). Implications of long-term land-use change for the hydrology and solute budgets of small catchments in Amazonia. *Journal of Hydrology*, 364, 349–363. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.11.013>
- Niu, G. Y., Fang, Y. H., Chang, L. L., Jin, J., Yuan, H., & Zeng, X. (2020). Enhancing the Noah-MP ecosystem response to droughts with an explicit representation of plant water storage supplied by dynamic root water uptake. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. <https://doi.org/10.1029/2020MS002062>
- Olmedo, M. T. C., Paegelow, M., & Mas, J. F. (2013). Interest in intermediate soft-classified maps in land change model validation: Suitability versus transition potential. *International Journal of Geographical Information Science*, 27(12), 2343–2361. <https://doi.org/10.1080/13658816.2013.831867>
- Pang, S., Wu, L., Luo, Y., Wang, R., Gao, T., & Guo, Z. (2024). A study on ecohydrological mutual feedback relationship of the Shangdong River Basin based on hydrological connectivity. *Science of the Total Environment*, 927. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171957>
- Pernambuco. Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos. (2010). *Plano hidroambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe: Diagnóstico hidroambiental*. Governo do Estado de Pernambuco.
- Pernambuco. Secretaria de Recursos Hídricos. (2022). *Plano estadual de recursos hídricos*. Governo do Estado de Pernambuco. <http://www.sectma.pe.gov.br/perh-pe/index.html>
- Pontes, P. R. M., & Collischonn, W. (2015). The Muskingum-Cunge-Todini streamflow routing model in floodplain rivers. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 20(2), 298–309.
- Rodrigues, L. F. (2020). Avaliação das previsões subsazonais do modelo Eta na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35(2), 181–194.
- Rosenfield, G. H., & Fitzpatrick-Lins, K. (1986). A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 52(2), 223–227.
- Ruggiero, P. G. C., Pivello, V. R., Sparovek, G., Teramoto, E., & Pires Neto, A. G. (2006). Relação entre solo, vegetação e topografia em área de cerrado (Parque Estadual de Vassununga, SP): Como se expressa em mapeamentos? *Acta Botanica Brasilica*, 20(2), 383–394.
- Samal, D. R., & Gedam, S. (2021). Assessing the impacts of land use and land cover change on water resources in the Upper Bhima River Basin, India. *Environmental Challenges*, 5, 100251. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100251>

- Schuster, R. C., Fan, F. M., & Collischonn, W. (2020). Scenarios of climate change effects in water availability within the Patos Lagoon Basin. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 25, e9. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190061>
- Shiferaw, N., Habte, L., & Waleed, M. (2025). Land use dynamics and their impact on hydrology and water quality of a river catchment: A comprehensive analysis and future scenario. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(7), 4124–4136. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-35946-y>
- Silva, A. A., Braga, M. Q., Ferreira, J., Santos, V. J., Alves, S. C., Oliveira, J. C., & Calijuri, M. M. (2020). Anthropogenic activities and the Legal Amazon: Estimative of impacts on forest and regional climate for 2030. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100304>
- Silva, D. S., & Medeiros, J. D. F. (2018). Aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH na Bacia Hidrográfica do Rio Piranhas-Açu. In *Anais do XIV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*.
- Silva, R. J. N., Sobral, R. V. S., Soares, A. C. L., Mendonça, L. M., Cruz, J. S., & Blanco, C. J. C. (2024). Impacto das mudanças climáticas e de uso e cobertura da terra em pequenas bacias hidrográficas. *Revista de Gestão de Água da América Latina (REGA)*.
- Silva, R. B. M., Francelino, M. R., Moura, P. A., Moura, T. A., Pereira, M. G., & Oliveira, C. P. (2015). Relação solo/vegetação em ambiente de cerrado sobre influência do Grupo Urucui. *Ciência Florestal*, 25(2), 363–373.
- Sirqueira, P. C., Pons, N. A. D., Silva, B. C., Sirqueira Junior, J. L., Moreira, L. A., & Martins, A. M. (2022). Aplicação do modelo hidrológico MGB-IPH para simulação de cenários de uso do solo na Bacia do Rio Sapucaí (MG). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(5), 2414–2429.
- Souza, C. M., Jr., Shimbo, J. Z., Rosa, M. R., Parente, L. L., Alencar, A., Rudorff, B. F. T., Hasenack, H., Matsumoto, M., Ferreira, L. G., Souza-Filho, P. W. M., et al. (2020). Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. *Remote Sensing*, 12(17), 2735. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>
- Stehman, S. V. (1996). Estimating the kappa coefficient and its variance under stratified random sampling. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(4), 401–402.
- Trata Brasil. (2022). *Mudanças climáticas e água no Brasil*. Instituto Trata Brasil. <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/08/mudancas-climaticas.pdf>
- Uddin, K., Chaudhary, S., Chettri, N., Kotru, R., Murthy, M., Chaudhary, R. P., Ning, W., Shrestha, S. M., & Gautam, S. K. (2015). The changing land cover and fragmenting forest on the roof of the world: A case study in Nepal's Kailash Sacred Landscape. *Landscape and Urban Planning*, 141, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.04.003>
- Valencia, S. (2024). Improving SWAT model structure for simulating streamflow under climate and land use change scenarios. *Environmental Modelling & Software*, 170, 105122. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105122>
- Vergasta, L. A., Correia, F. W. S., Chou, S. C., Nobre, P., Lyra, A. A., Gomes, W. B., & Capistrano, V. (2021). Avaliação do balanço de água na Bacia do Rio Madeira simulado pelo modelo regional climático Eta e o modelo hidrológico de grandes bacias MGB. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 36(2), 153–169. <https://doi.org/10.1590/0102-77863610005>
- Wang, H., et al. (2017). Impact of land use and land cover change on streamflow using the SWAT model: A case study in the East River Basin, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, 1–17. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1-2017>
- Wei, X., & Zhang, M. (2010). Quantifying streamflow change caused by forest disturbance at a large spatial scale: A single watershed study. *Water Resources Research*, 46, W12525. <https://doi.org/10.1029/2010WR009250>
- Woldesenbet, T. A., Elagib, N. A., Ribbe, L., & Heinrich, J. (2017). Hydrological responses to land use/cover changes in the source region of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Science of the Total Environment*, 575, 724–741. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.124>
- Yan, D., Werners, S. E., Ludwig, F., & Huang, H. Q. (2015). Hydrological response to climate change: The Pearl River, China, under different RCP scenarios. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 228–245. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.06.001>
- Xavier, A. P. C., & Silva, R. M. (2018). Modelagem temporal dinâmica do uso e

- ocupação do solo baseada em SIG para a Bacia do Rio Tapacurá (PE). *Geociências*, 37(1), 193–210.
- Xiong, J., & Yang, Y. (2025). Climate change and hydrological extremes. *Current Climate Change Reports*, 11, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s40641-024-00198-4>
- Xue, S., Li, Y., Zhang, Q., & Wang, J. (2024). Effects of future climate and land use changes on runoff in tropical regions of China. *Scientific Reports*, 14, 30922. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81754-8>
- Zhang, M., Wei, X., Sun, P., & Liu, S. (2012). The effect of forest harvesting and climate variability on runoff in a large watershed: A case study in the Upper Minjiang River Basin, Yangtze River. *Journal of Hydrology*, 464–465, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.050>
- Zhang, X. Y., Jin, J., Zeng, X., Hawkins, C. P., Neto, A. A. M., & Niu, G. Y. (2022). The compensatory CO₂ fertilization and stomatal closure effects on runoff projection from 2016–2099 in the western United States. *Water Resources Research*. <https://doi.org/10.1029/2021WR030046>