Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
ISSN 2237-8642

PROJEÇÕES HIDROLÓGICAS DO RIO MADEIRA (2025–2030) SOB OS CENÁRIOS CLIMÁTICOS SSP1-2.6 E SSP5-8.5 DO CMIP6

Hydrological Projections Of the Madeira River (2025–2030) Under Cmip6 Climate Scenarios Ssp1-2.6 And Ssp5-8.5

Proyecciones Hidrológicas Del Río Madeira (2025-2030) Bajo Los Escenarios Climáticos Cmip6 Ssp1-2.6 Y Ssp5-8.5

Carolina Costa Ramos
Universidade Federal do Pará
carolinaramosufpa@gmail.com

Ana Cibelle Tavares Leal
Universidade Federal do Pará
cibelleleal.ufra@gmail.com

Resumo: Com o aumento das emissões de gases de efeito estufa e as consequentes alterações nos padrões climáticos, entender e prever as mudanças climáticas é de extrema importância para a tomada de decisões e formulação de políticas eficazes de mitigação e adaptação. É no contexto desta vulnerabilidade regional às mudanças do clima e às incertezas decorrentes destas mudanças que se insere este trabalho. Tendo como objetivo não apenas projetar níveis d'água, mas traduzir essas projeções em impactos operacionais concretos para o setor hidroviário. Foram desenvolvidas redes neurais artificiais utilizando a arquitetura *multilayer perceptron.* Foram realizados 2 cenários de testes, o cenário SSP1-2.6 apresenta emissões reduzidas de gases do efeito estufa (GEE), enquanto o cenário SSP5-8.5 exibe emissões mais intensas. As entradas das RNAs são constituídas por dados de precipitação, temperatura, umidade e cota (nível d'agua) do trecho de Porto velho a Humaitá. Já a saída da rede é composta pela previsão de cota da estação de Humaitá para o período de 2025 a 2030. O cenário 1 (SSP1-2.6) apresentou uma variação dos valores de cota de aproximadamente 800 cm a 1500 cm para o período projetado de 2025 a 2030. Enquanto, o cenário 2 (SSP5-8.5) os valores de cota variaram de 800 cm a 2400 cm. No cenário SSP1-2.6 a variação no nível d'água do Rio Madeira foi mais moderada, enquanto o cenário SSP5-8.5 apresentaram maiores níveis d'agua. Os resultados reforçam a necessidade de planejamento e adaptação do setor hidroviário diante das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Mudanças climáticas; Hidrovias; Transporte Aquaviário; Rede Neural.

Abstract: With the increase in greenhouse gas emissions and the consequent changes in weather patterns, understanding and predicting climate change is of utmost importance for decision-making and formulation of effective mitigation and adaptation policies. It is in the context of this regional vulnerability to climate change and the uncertainties arising from these changes that this study is situated. Aiming not only to project water levels but also to translate these projections into concrete operational impacts for the waterway sector. Artificial neural networks were developed using the multilayer perceptron architecture. Two test scenarios were performed, scenario SSP1-2.6 presents reduced greenhouse gas (GHG) emissions, while scenario SSP5-8.5 presents more intense emissions. The inputs of the ANNs consist of precipitation, temperature, humidity and water level data from the stretch from Porto Velho to Humaitá. The network output is composed of the predicted water level of the Humaitá station for the period from 2025 to 2030. Scenario 1 (SSP1-2.6) presented a variation in water level values of approximately 800 cm to 1500 cm for the projected period from 2025 to 2030. Meanwhile, scenario 2 (SSP5-8.5) showed water level values ranging from 800 cm to 2400 cm. In scenario SSP1-2.6, the variation in the water level of the Madeira River was more moderate, while scenario SSP5-8.5 presented higher water levels. The results reinforce the need for planning and adaptation of the waterway sector in the face of climate change.

Keywords: Climate change; Waterways; Water Transport; Neural Network.

Resumen: Con el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y los consiguientes cambios en los patrones climáticos, comprender y predecir el cambio climático es de suma importancia para la toma de decisiones y la formulación de políticas eficaces de mitigación y adaptación. Es en este contexto de esta vulnerabilidad regional al cambio climático y las incertidumbres derivadas de estos cambios que se inserta este trabajo. Con el objetivo no solo de proyectar los niveles de agua, sino también de traducir estas projecciones en impactos operativos concretos para el sector hidroviario Se desarrollaron redes neuronales artificiales utilizando la arquitectura de perceptrón multicapa. Se realizaron dos escenarios de prueba, el escenario SSP1-2.6 presenta emisiones reducidas de gases de efecto invernadero (GEI), mientras que el escenario SSP5-8.5 presenta emisiones más intensas. Las entradas de las RNA consisten en datos de precipitación, temperatura, humedad y elevación (nivel de agua) del tramo de Porto Velho a Humaitá. El resultado de la red se compone del nivel de agua previsto para la estación de Humaitá para el período de 2025 a 2030. El escenario 1 (SSP1-2.6) presentó una variación en los valores del nivel de agua de aproximadamente 800 cm a 1500 cm para el período proyectado de 2025 a 2030. Por otro lado, el escenario 2 (SSP5-8.5) mostró valores de nivel de agua que oscilaron entre 800 cm y 2400 cm. En el escenario SSP1-2.6, la variación en el nivel de agua del río Madeira fue más moderada, mientras que el escenario SSP5-8.5 presentó niveles de agua más altos. Los resultados refuerzan la necesidad de planificación y adaptación del sector fluvial ante el cambio climático.

Palabras clave: Cambio climático; Vías navegables; Transporte de agua; Redes neuronales.

Submetido em: 20/02/2025
Aceito para publicação em: 15/09/2025
Publicado em: 23/10/2025

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas representam um dos desafios mais urgentes enfrentados pela sociedade contemporânea. Com o aumento das emissões de gases de efeito estufa e as consequentes alterações nos padrões climáticos, compreender e projetar essas mudanças é essencial para a tomada de decisões e formulação de políticas eficazes de mitigação e adaptação. Segundo Tucci (2005), os modelos de previsão hidrológica podem oferecer suporte em sistemas de alerta para inundações, auxiliar na tomada de decisões relacionadas à operação de barragens ou ainda na definição dos níveis de navegação em determinada região.

As previsões hidrológicas para a Bacia Amazônica foram avaliadas na literatura utilizando diferentes cenários climáticos e hidrológicos. Um estudo realizado por Monteiro *et al*. (2024) apresentou a modelagem estatística hidrológica da bacia do rio Tocantins considerando de forma simplificada os processos que compõem o ciclo hidrológico. A modelagem foi realizada através de regressão linear múltipla, utilizando a informação de precipitação na área de estudo e a vazão de entrada na bacia como variáveis explicativas para a vazão no exultório da bacia. A partir dessa metodologia e da análise dos resultados, o modelo mostrou-se eficiente para a estimativa da vazão a partir de dados de precipitação prevista por hidro estimadores.

As alterações climáticas deverão influenciar a intensificação de eventos extremos nas próximas décadas, como cheias e secas. Contudo, a sensibilidade climática varia largamente entre bacias, afetadas por características da superfície, pela escala da bacia, e as previsões utilizando redes neurais artificiais (RNAs) têm se mostrado ferramentas promissoras para abordar algumas das complexas questões relacionadas às mudanças climáticas.

Mendonça (2021) realizou simulações do fenômeno de conversão de chuvas em vazões de uma Sub-bacia Hidrográfica do Rio Guamá (SHRG), no Estado do Pará, Brasil, utilizando modelos baseados em RNAs, com arquiteturas MLP (*Multilayer Perceptron*) e NARX *(Nonlinear Autoregressive with Exogenous Inputs*). Os resultados mostram a possibilidade da simulação de vazões de pequenas e médias bacias hidrográficas da Amazônia através da combinação de RNAs NARXs, principalmente em bacias com ausência ou limitação de dados chuva-vazão.

A bacia do rio Madeira desempenha papel fundamental no desenvolvimento social e econômico da região, através da navegação (transporte de passageiros e cargas) e da produção de energia elétrica por meio das usinas de Jirau e Santo Antônio (ANTAQ, 2024). Entretanto, as mudanças e variabilidade no clima têm afetado a dinâmica fluvial dos principais rios da Bacia Amazônica, principalmente a do rio Madeira (Marengo *et al*., 2016; Vergasta *et al*., 2023). Nos últimos anos, o aumento na frequência e intensidade dos eventos de secas e enchentes tem causado prejuízos e danos ao meio ambiente, aos recursos hídricos, à economia e às cidades e comunidades que vivem às margens dos rios, principalmente as populações vulneráveis na Amazônia (Espinoza *et al*., 2019; Bredâ *et al.*, 2020; Souza *et al*., 2020; Caldatto *et al*., 2024).

No que diz respeito à região de interesse deste estudo, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), em seu sexto ciclo de avaliação (AR6), lançado em março de 2023, aponta aumento das temperaturas e seus consequentes impactos nos regimes de chuvas e nas vazões dos rios da Amazônia. Segundo Marengo (2023), nos últimos 30 anos, tem aumentado a ocorrência de eventos climáticos extremos na região, com maior frequência de chuvas intensas e períodos de estiagem mais prolongados. É nesse contexto de vulnerabilidade regional às mudanças climáticas e às incertezas decorrentes destas alterações que se insere este trabalho. O rio Madeira apresenta particularidades que amplificam sua vulnerabilidade: é um rio com alta carga de sedimentos e leito extremamente dinâmico, sujeito a constantes processos de erosão e assoreamento. Além disso, é um eixo logístico vital para o escoamento da produção agropecuária do Centro-Oeste, abriga usinas hidrelétricas de grande porte e sustenta comunidades ribeirinhas. Apesar de sua importância, há uma carência de estudos que integrem projeções climáticas de última geração (CMIP6) com técnicas de inteligência artificial (RNAs) para prever com precisão os impactos hidrológicos específicos nesta bacia, especialmente no que tange à navegabilidade. Portanto, este trabalho busca preencher esta lacuna, objetivando não apenas projetar níveis d'água, mas traduzir essas projeções em impactos operacionais concretos para o setor hidroviário.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Aquisição de dados hidroclimáticos

O conjunto de dados de temperatura e umidade foi obtido do Banco de Dados Meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (2025), enquanto a variável de cota (nível d'água) foi extraída do Banco de Dados Hidrometeorológicos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (2025). Para a análise do comportamento dessas variáveis, foram utilizados dados no período de 1993 a 2024, a consistência dos dados das estações utilizadas foi um fator determinante na escolha.

Devido à ausência e falhas nas séries temporais nos dados de precipitação da ANA (média de 30 anos), foram utilizados dados de produtos climáticos derivados de sensoriamento remoto, como o *Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS). Os dados do produto CHIRPS já foram validados por diversos estudos realizados na região amazônica (Paca *et al*., 2020; Cavalvante et al., 2020; Sapucci *et al*., 2022; Dos Santos Silva *et al*., 2023). Além disso, Cordeiro; Blanco (2021) constataram que o produto CHIRPS apresenta as melhores estimativas de precipitação mensal, quando comparado a outros produtos de satélite, sendo, portanto, adequado para a estimativa de chuvas na região.

Para as análises das projeções climáticas futuras, foram obtidos dados do projeto *Coupled Model Intercomparison Program* Versão 6 (CMIP6) (Wu *et al*., 2021). O CMIP6 representa um avanço em relação ao seu antecessor (CMIP5), com maior resolução espacial e novos cenários de emissão, os Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (SSPs) (Eyring *et al*., 2016; IPCC, 2023). Neste estudo, o modelo climático global MIROC6 (Tatebe *et al*., 2019) foi selecionado devido ao seu desempenho documentado na representação dos padrões de precipitação e temperatura na região amazônica (Vergasta *et al*., 2023).

Foram selecionadas as variáveis de temperatura, umidade e precipitação para as estações analisadas, com o intervalo de tempo entre 2025-2030, considerando dois cenários de emissões de gases do efeito estufa: SSP1-2.6 (cenário de baixas emissões, representando um caminho sustentável) e SSP5-8.5 (cenário de altas emissões, representando um desenvolvimento baseado em combustíveis fósseis).

Para a personalização e o processamento das informações climáticas, foi importante considerar os seguintes critérios: escala espacial, escala temporal, horizonte temporal,

modelo climático, coordenadas da área de estudo e cenários de emissões. A Tabela 1 apresenta um exemplo aplicado a área de estudo.

Tabela 1- Informações utilizadas para definir os critérios das projeções climáticas na área de estudo.

Critério	Dados
Escala espacial	Local/Coordenadas: **Lat** **Log** -7,50 -63,02 (Humaitá) -8,75 -63,92 (Porto Velho)
Escala temporal	Mensal
Horizonte temporal	2025-2030 (Projeções)
Modelo climático	MIROC6
Cenários de emissões	**SSP1-2.6**: Emissões são reduzidas de forma lenta, chegando a zero por volta de 2075. **SSP5-8.5**: Desenvolvimento baseado no uso de combustíveis fósseis.

Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

2.1.2. Processamento de dados

As redes neurais artificiais foram desenvolvidas no *software Phython*® (P*ython software foundation*, 2025), utilizando a biblioteca *TensorFlow*. Para o treinamento das redes neurais artificiais com as diferentes combinações de dados, foi empregada a arquitetura *multilayer perceptron* com o algoritmo *feedforward backpropagation,* amplamente citado na literatura devido aos ótimos resultados na previsão de séries temporais (De Souza Costa, 2021; Blanco *et al*., 2023; Costa *et al.*, 2023). A arquitetura *Multilayer Perceptron* (MLP) foi selecionada devido à sua comprovada eficácia em modelar relações não-lineares entre variáveis climáticas e hidrológicas em estudos anteriores na Amazônia (Figueiredo e Blanco, 2019; Silva, 2019), além de sua relativa simplicidade e robustez para o problema em questão.

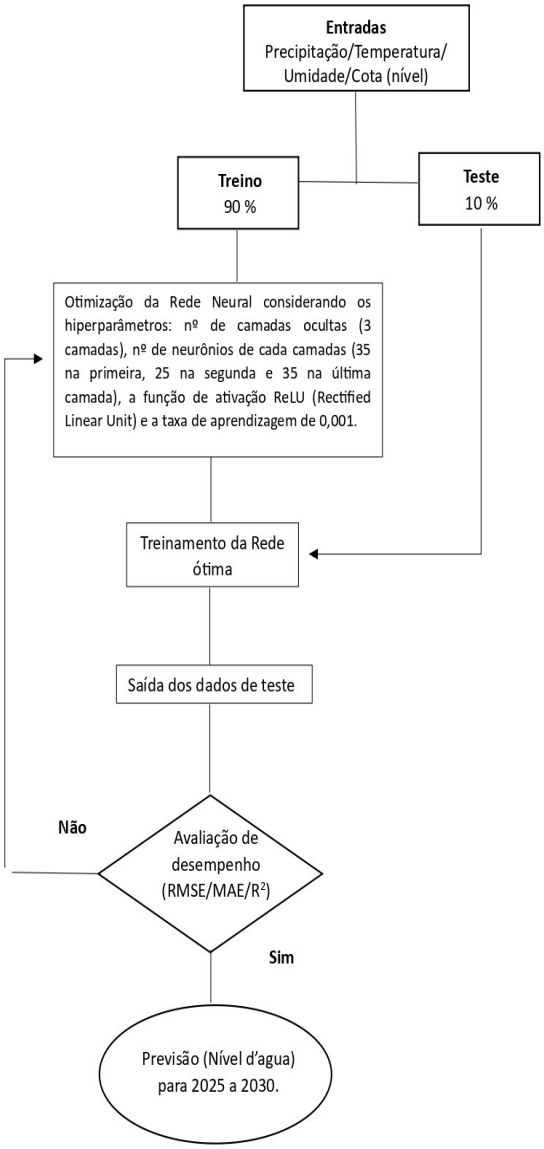
Neste estudo, todos os dados foram divididos em treinamento (90%) e teste (10%) para o desenvolvimento dos modelos. Foram realizados 2 cenários de testes: o cenário SSP1-2.6

apresenta emissões reduzidas de gases do efeito estufa (GEE), enquanto o cenário SSP5-8.5 exibe emissões mais intensas. As entradas das RNAs são constituídas por dados de precipitação, temperatura, umidade e cota (nível d'agua) do trecho de Porto velho a Humaitá. Os dados de saída da rede neural correspondem a previsão de cota da estação de Humaitá para o período de 2015 a 2030. No entanto, apenas os dados futuros do período de 2025 a 2030 foram ilustrados nos resultados dos mapas de profundidade, pois os dados do período anterior foram utilizados para o treinamento da rede. Para garantir a generalização do modelo e evitar *overfitting*, foi utilizada a técnica de *early stopping*, interrompendo o treinamento quando o erro de validação deixava de diminuir.

A partir das projeções geradas pelas RNAs para os anos de 2025 a 2030, nos cenários SSP1 2.6 e SSP 5 8.5, foram construídos mapas de superfície das profundidades no canal de navegação. Os mapas foram baseados nos menores níveis previstos d'água, que representam os períodos mais críticos para o transporte hidroviário.

Foi realizado um processo de otimização dos hiperparâmetros da rede para identificar a rede com melhor desempenho, nos dois cenários considerados, que se ajuste a esses dados: nº de camadas ocultas (3 camadas), nº de neurônios de cada camadas (35 na primeira, 25 na segunda e 35 na última camada), a função de ativação ReLU (Rectified Linear Unit) e a taxa de aprendizagem de 0,001. O fluxograma da figura 1 apresenta um resumo da metodologia desenvolvida nesta pesquisa.

Figura 1 - Fluxograma da metodologia aplicada



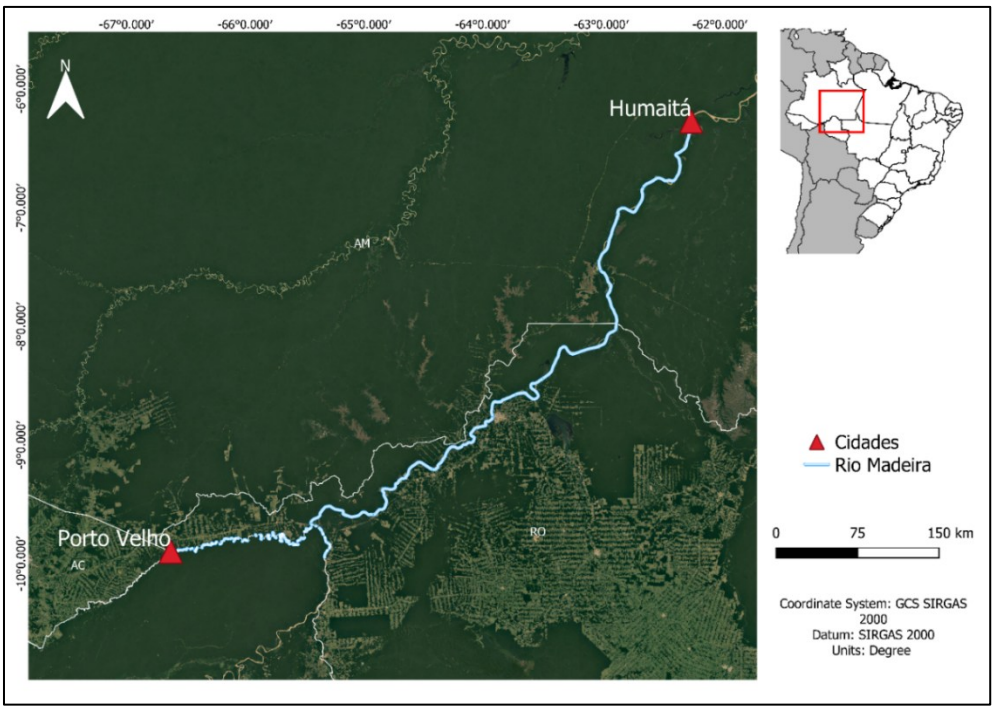
Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Caracterização da área de estudo

O rio Madeira é um dos principais afluentes da margem direita da hidrovia do rio Amazonas, representando a segunda hidrovia mais importante da região norte (ANTAQ, 2024). Segundo o DNIT (2021) a hidrovia do rio Madeira apresenta uma extensão navegável de 1.060 km, entre Porto Velho e a foz, localizada no município de Itacoatiara (AM). Essa extensão está distribuída em aproximadamente 180 km dentro dos limites do estado de Rondônia e 876 km no estado do Amazonas (Figura 2).

Figura 2 - Area de Estudo



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

O rio é navegável durante todo o ano, permitindo o tráfego de comboios de barcaças de carga com 40 mil toneladas (PDZ, 2022). O ciclo sazonal das águas é caracterizado por períodos de estiagem, ou de águas baixas, de julho a outubro, e o período de cheias ou de águas altas, que vai de fevereiro a maio (Lopes, 2018). Durante o período de cheias, o rio Madeira sofre influência do rio Amazonas, ocasionando grandes áreas de inundação e elevadas profundidades, alagando os afloramentos rochosos e ilhas que afloram na estiagem nos trechos mais a jusante do rio.

A lâmina d´água esperada nos meses de águas baixas é de 1,7 metros. O regime hidrológico do rio é composto de 2 períodos distintos e existe o fenômeno do “repiquete”, geralmente nos meses de outubro e novembro, quando ocorre uma variação de nível d’água de aproximadamente 3 metros. A amplitude de variação de nível d’água entre a estação das cheias e das águas rasas é de 15 metros, e a largura do rio é de normalmente 1km (ANTAQ, 2023). Na maior parte do rio, existem profundidades naturais que permitem a navegação. No entanto, existem pontos críticos que são trechos do rio nos quais o acúmulo de sedimentos depositados no fundo gera obstruções às embarcações. É importante destacar que a dinâmica do rio altera o leito do rio a cada ano, e o traçado do canal de navegação deve adequar-se a

essas modificações. Dentre os pontos mais recorrentes para intervenção por meio de dragagem destacam-se Curicacas, Miriti e Cojubim (PADMA 2022; DNIT, 2022).

O clima da Amazônia é afetado principalmente por mudanças sazonais da posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que é o principal sistema produtor de chuvas na estação chuvosa (Sori, 2018). A precipitação média na bacia do rio Madeira é da ordem de 1834 mm ano^{-1} (Vergasta *et al*., 2020).

Rios classificados como de "água branca", como o Madeira, são altamente instáveis, com remodelamentos constantes do leito submetido a intensa dinâmica fluvial, principalmente nos cursos médio e inferior, modificando de forma permanente seu curso, possuindo ao mesmo tempo uma ampla planície de inundação, onde os processos fluviais são mais atuantes, seja pela erosão ou pela deposição de sedimentos dentro do canal, como também pelos efeitos dos transbordamentos periódicos (Villamizar *et al*., 2020).

3.2. Mudanças Climáticas

O bioma Amazônico desempenha um papel central na regulação do clima global, mas enfrenta pressões como o desmatamento e mudanças no uso do solo, que amplificam os impactos locais e globais das alterações climáticas (Espinoza *et al*., 2019; De Souza Costa *et al*., 2020; Marengo (2023); Vergasta *et al*., 2023). Esse cenário reforça a relevância do ODS 13 da Agenda 2030 da ONU (IPEA, 2019), cujas metas vêm sendo amplamente debatidas, especialmente nas últimas duas décadas, em estudos científicos e relatórios para tomadores de decisão, como os do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Tais documentos destacam que o combate à crise climática exige o cumprimento do Acordo de Paris, com o aquecimento global limitado a menos de 2°C — idealmente 1,5°C — para reduzir riscos catastróficos (Magnan *et al*., 2021; Pedersen *et al*., 2021; IPCC, 2023).

Com o avanço do conhecimento científico sobre o funcionamento do complexo sistema climático, espera-se cada vez mais à diminuição dessas incertezas nas projeções da mudança climática global. No entanto, até que isso se concretize uma das principais estratégias atualmente adotada é utilizar vários cenários de emissões de gases do efeito estufa (GEE) e diferentes modelos climáticos. Essa combinação é denominada de cenário climático.

Os modelos climáticos estão em constante atualização, pois grupos interdisciplinares em diferentes centros de pesquisa aprimoram a resolução espacial, incorporam novos processos físicos e ciclos biogeoquímicos. As atualizações são coordenadas de acordo com o cronograma dos relatórios de avaliação do IPCC, divulgando um conjunto de resultados de modelos – conhecidos como "rodadas" (IPCC, 2023; Artaxo, 2023). Esses esforços coordenados fazem parte dos Projetos de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP). Um dos principais conjuntos de simulações executadas pelos modelos são os cenários climáticos futuros, onde os modelos recebem um conjunto comum de concentrações futuras de gases de efeito estufa, aerossóis e outras forças climáticas para projetar o que pode acontecer no futuro.

O relatório de avaliação do IPCC de 2021 (AR6) apresentou novos modelos CMIP6 (IPCC, 2013; IPCC, 2023). O CMIP6 consiste nas "rodadas" de cerca de 100 modelos climáticos diferentes sendo produzidos por cerca de 50 grupos de modelagem espalhados pelo mundo. Na preparação para o IPCC AR6, a comunidade de modelagem de energia desenvolveu um novo conjunto de cenários de emissões impulsionados por diferentes pressupostos socioeconômicos, denominados de "Caminhos Socioeconômicos Compartilhados" (SSPs) (IPCC, 2023). A maior resolução espacial do CMIP6 torna esses modelos mais adequados à análise em bacias como a do rio Madeira.

Hoje existe um crescente consenso na comunidade científica, refletido, por exemplo, nas análises sistemáticas do IPCC, de que o aquecimento global observado nos últimos 120 anos é explicado pelas emissões antropogênicas dos Gases de Efeito Estufa – GEE (principalmente, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, CFCs) e de aerossóis, e não por eventual variabilidade natural do clima (IPCC, 2023). Na verdade, muitos cientistas enxergam inúmeras evidências apontando não mais para a possibilidade de o planeta enfrentar futuras mudanças no clima, mas indicando que já estaríamos vivendo a era das mudanças climáticas resultantes do aquecimento global. Essas alterações climáticas já têm impactado regimes fluviais e ciclos hidrológicos, exigindo novas abordagens de previsão e manejo, como propõe o presente estudo.

3.3. Influência climática nos rios Amazônicos

Pesquisas de mudanças climáticas têm analisado tendências futuras de variáveis climáticas em toda a extensão da bacia Amazônica, mensurando seus impactos não só nos ecossistemas, como também nas atividades humanas e econômicas (Rocha *et al*., 2019; De Souza Costa *et al.,* 2020; Serrão, 2022; Lucas, 2022). Os eventos de secas e enchentes fazem parte da variabilidade natural da bacia Amazônica, todavia, nas últimas décadas têm se observado mudanças e variações extremas no clima e na hidrologia da bacia (Marengo; Espinoza, 2016; Espinoza *et al*., 2019) e esses cenários são frequentemente atribuídos a alterações em larga escala, como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS), e as temperaturas anômalas da superfície do mar (TSM) no Oceano Atlântico tropical (Reboita *et al*., 2021; Silva, 2022; Cevalho *et al*., 2024). A seca de 2005 foi uma das secas mais intensas e amplamente estudadas, conhecida como a "seca do século". As causas foram atribuídas a um aquecimento anômalo do Oceano Atlântico Norte, que reduziu as chuvas em grande parte da Amazônia Ocidental. A seca de 2005 teve graves consequências ambientais e sociais, incluindo incêndios florestais e prejuízos para comunidades ribeirinhas (Shi *et al*., 2019; De Souza Aguiar, 2019). Por outro lado, outros anos se destacaram pelo excesso de chuva e cheias recordes de rios do bioma amazônico, como o evento de inundação que atingiu o estado do Amazonas em 2021 superou os níveis de rios atingidos até então em quase 120 anos de monitoramento (Matos *et al*., 2021; Fleischmann *et al*., 2023). Climatologicamente, o evento foi associado a uma intensificação de padrões de circulação atmosférica relacionadas ao evento La Niña que atuou na região desde meados de 2020 até meados de 2021.

Silva (2019) apresentou a proposta de um sistema de previsão de nível d'água mensal do Rio Xingu baseado em Redes Neurais Artificiais *Perceptron* de Múltiplas Camada, uma vez que a cidade de Altamira- PA vem sofrendo com casos extremos de cheias que tendem a provocar inundações, resultando em prejuízos para a sua população. No desenvolvimento da pesquisa foram utilizados dados de precipitação na bacia e sub-bacias do Rio Xingu, e informações de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do período de 1979 a 2016. A proposta englobou três cenários de predição: modelo com dados de precipitação, modelo com informações de temperatura da superfície do mar e aplicação utilizando a junção de TSM com precipitação, ainda foram utilizadas algumas métricas para o desempenho de rede, o *Mean*

Square Error (MSE) e coeficiente de determinação (R^2). Os resultados satisfatórios obtidos demonstram a grande aplicabilidade das Redes Neurais Artificiais para o problema de previsão de cheias, visto que comparada a outras metodologias possuem maior precisão na busca de soluções para problemas não lineares. Resultados como esses incentivam a aplicação de RNAs em outras bacias amazônicas, como o Madeira.

Com o objetivo de analisar a influência das mudanças climáticas nas vazões mínimas de referência de duas pequenas bacias hidrográficas localizadas na Amazônia Legal e, também, no Arco do Desflorestamento, Costa *et al*., (2023), utilizou cenários definidos no 5° Relatório do IPCC para projetar precipitações futuras das pequenas bacias. Os resultados demonstraram que nos dois cenários, a vazão mínima de referência tende a diminuir bastante, chegando mesmo a ser nula. E diante dessa redução significativa, os projetos de manejo, uso e captação de água tornam-se imprescindíveis, principalmente, para as populações mais vulneráveis. Essa tendência pode ser agravada em grandes rios amazônicos, como o Madeira, com efeitos diretos sobre a navegação, geração de energia e segurança hídrica.

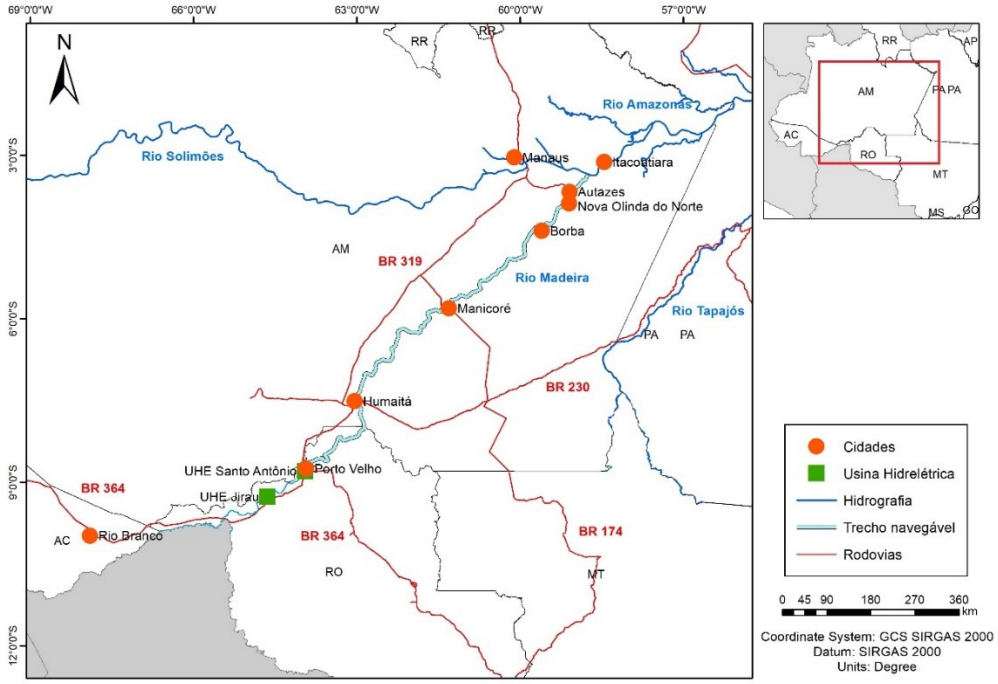
3.4. Navegação no rio Madeira

A região Amazônica é conhecida por sua extensa e densa rede de rios e cursos d'água, que, embora variem em extensão e volume, formam uma das mais importantes infraestruturas de transporte fluvial do país. Essa rede fluvial abrange aproximadamente de 20 mil km de vias navegáveis, conforme dados da ANTAQ (2020), e é essencial para a mobilidade na região. Dada a escassez de estradas que conectam a Amazônia a outras partes do país, essa rede de rios desempenha um papel vital na integração econômica e social da região, permitindo o escoamento de produtos agrícolas, minérios e outros recursos naturais que são fundamentais para a economia local e nacional. Além disso, em muitos locais, como em algumas comunidades ribeirinhas, o transporte fluvial é a única opção viável, destacando ainda mais sua importância estratégica para a conectividade e o desenvolvimento da Amazônia.

A demanda pela utilização da hidrovia do rio Madeira vem crescendo ao longo dos anos, se tornando um dos principais corredores logísticos do norte do país. Esse processo teve início com a implantação da nova fronteira agrícola de soja e milho na região Centro-Oeste do

Brasil, integrando a região aos grandes portos ao longo do rio Amazonas, por onde essas cargas podem ser exportadas (Figura 3). A carga a granel, proveniente das plantações de Mato Grosso e do sul de Rondônia, é transportada pela BR-364, em caminhões até Porto Velho, onde os comboios graneleiros são carregados seguindo viagem para o terminal de Itacoatiara/AM ou Santarém/PA (CNA, 2022).

Figura 3 - Mapa do trecho navegável do rio Madeira.



Fonte: Adaptado TCU (2017).

Em 2023, a movimentação de cargas na hidrovia representou 10,7 milhões de toneladas (ANTAQ, 2024). As principais cargas movimentadas pelo rio Madeira são soja, milho, fertilizantes, combustíveis e outros granéis líquidos e gasosos, alimentos perecíveis e não perecíveis, contêineres, automóveis, cargas gerais e cargas rolantes denominadas RoRo caboclo (ANTAQ, 2023). O meio mais comum de transporte utilizado são os comboios, que são um conjunto de barcaças ou chatas não propulsionadas e acopladas, movimentadas por uma embarcação propulsionada, conhecida pelo termo empurrador ou rebocador. A recomendação para as embarcações na época da cheia do rio é de calado máximo de 6,8 metros e na seca do rio calado mínimo 1,7 metros durante a extensão do trecho navegável de Porto Velho a Foz do Rio Amazonas (PDZ, 2022). Essas alterações nos níveis d'água comprometem a logística, elevando custos e a eficiência do transporte. Os períodos em que a

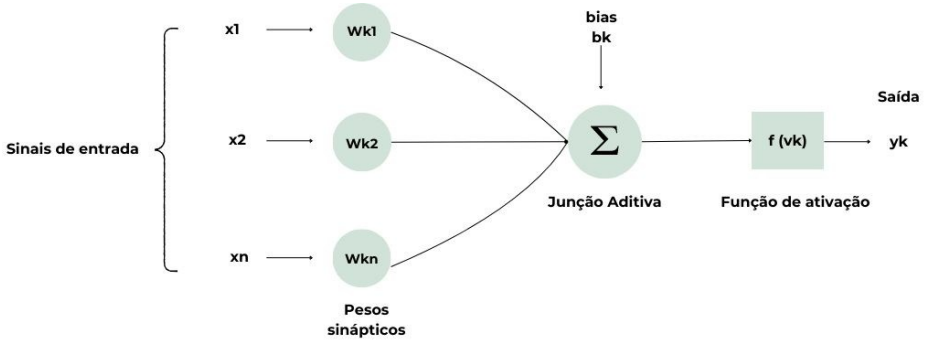
navegação é paralisada ou limitada, o tempo perdido devido a danos ou acidentes ou ainda tempos prolongados por operações como desmembramento de comboios ou tempo de espera para passagem de um comboio em regiões onde o canal é estreitado, ou mesmo a redução da capacidade de transporte por conta das baixas profundidades (PDZ, 2022; ANTAQ, 2023).

3.5. Rede Neural Artificial

A concepção de redes neurais artificiais foi influenciada pela compreensão do funcionamento do cérebro humano. Em 1943, o neurofisiologista Warren McCulloch e o lógico Walter Pitts publicaram um artigo seminal intitulado "*A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity*". Nesse trabalho, foi introduzida uma abordagem matemática para modelar neurônios biológicos como unidades de processamento que realizam operações lógicas (Haykin, 2001).

As redes neurais artificiais são modelos computacionais que buscam simular o funcionamento dos neurônios do cérebro humano para realizar tarefas complexas de processamento de informações (Aggarwal, 2018). Elas são compostas por camadas de neurônios artificiais interconectados, onde cada um dos quais realiza operações simples, mas quando organizados em uma rede, podem realizar tarefas mais complexas, como reconhecimento de padrões, classificações e previsões. Um neurônio artificial (Figura 5) é composto funcionalmente por três elementos (Haykin, 2001): um conjunto de sinapses ou links de comunicação, cada uma dessas apresentando um determinado peso; um somador para realizar o somatório dos sinais de entrada, ponderado pelas sinapses (pesos sinápticos) do neurônio e uma função de ativação, para filtrar a dimensão da saída do neurônio.

Figura 4 - Estrutura de um neurônio artificial



Fonte: Elaborado pelos autores (2024)

A Figura 4 é uma ilustração da estrutura de um neurônio artificial, os sinais de entrada (x_n), ponderados com pesos (w_{Kn}); uma soma é obtida por adição das entradas multiplicado por seus respectivos pesos e adicionando um sinal preconizado (b_k). O resultado dessa soma (v_k) atua através de uma função de ativação [f (v_k)] e fornece a saída do neurônio (y_k).

Matematicamente um modelo simplificado de neurônio artificial pode ser descrito pela seguinte expressão:

(1) $$y_k = \text{f (yk)}$$

em que: y_k = saída do neurônio artificial; f = função de ativação.

Além da estrutura básica, existem arquiteturas de redes neurais especializadas. As arquiteturas se referem às diferentes maneiras pelas quais os neurônios artificiais são organizados e conectados dentro de uma rede neural para realizar tarefas de aprendizado.

As redes MLP, ou *Multilayer Perceptron*, surgiram como uma forma de superar a limitação da rede com uma única camada de não solucionar problemas que não fossem linearmente separáveis. Em 1986, Rumelhart, Hintont e Willians (1986) demostraram que era possível treinar com eficiência redes com camadas intermediárias, treinadas com o algoritmo *backpropagation*, resultando nas redes MLP. Durante o treinamento da RNA há o ajuste dos pesos, cujo objetivo é reduzir os erros na saída da rede. Dessa forma, deve-se dispor da amostra das respectivas saídas desejadas para que os pesos e limiares sejam ajustados de forma contínua pelo algoritmo de aprendizado, caracterizando, assim, um treinamento supervisionado.

3.5.1. Avaliação de desempenho

As avaliações de desempenho são aplicadas nas diferentes etapas de elaboração de um modelo baseado em RNAs, seja na avaliação da eficiência do processo de aprendizagem (treinamento) ou do processo de teste (verificação). Para isso algumas métricas de avaliação podem ser utilizadas, entre elas destaca-se a aplicação do Erro Quadrático Médio (RMSE) e MAE (Erro Médio Absoluto) (Ruezzene *et al*., 2021).

a) Erro Quadrático Médio (RMSE)

O RMSE (2) é uma métrica quadrática ponderada, o que significa que penaliza mais severamente erros grandes e outliers. Isso é particularmente relevante para o problema de previsão de níveis d'água, uma vez que erros de previsão elevados (subestimar ou superestimar significativamente uma cheia) podem ter impactos operacionais e socioeconômicos desastrosos, incluindo paralisação da navegação, danos à infraestrutura portuária ou falhas em sistemas de alerta de inundações. Portanto, minimizar o RMSE direciona o modelo a evitar grandes erros, aumentando a confiabilidade para a tomada de decisão (Hodson, 2022; Romanuke, 2021).

A fórmula do RMSE é a seguinte:

(2)
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i}^{n}(Q_{e-} Q)^2}{n}}$$

b) MAE – Erro Médio Absoluto

O MAE, calcula a média das magnitudes dos erros absolutos, oferecendo uma interpretação linear e direta do erro médio do modelo. Enquanto o RMSE indica a magnitude do erro típico com maior sensibilidade a valores extremos, o MAE fornece uma medida mais robusta do erro médio esperado, sendo menos sensível a outliers (Romanuke, 2021). A fórmula do MAE é a seguinte:

(3)
$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |y_{i-} \hat{y}_i|$$

Essa análise conjunta garante uma avaliação mais robusta e confiável da capacidade preditiva da RNA desenvolvida, assegurando que as projeções sejam tanto precisas quanto consistentes para o apoio à gestão hidroviária.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Desempenho do Modelo e Validação

Para avaliar a convergência dos dados, os resultados foram avaliados com base em métricas estatísticas. Observou-se que a arquitetura da rede neural exibiu valores relativamente reduzidos de RMSE e MAE (tabela 3), o que indica que as previsões dos níveis d'água estão alinhadas com os valores reais. Isso demonstra que os modelos são capazes de identificar padrões e relações nos dados, gerando previsões com boa precisão. Contudo, é fundamental destacar que, mesmo com métricas de erro favoráveis, sempre existe uma margem de incerteza nas previsões. Os valores de RMSE (0,1222) e MAE (0,0930) indicam erros médios de ≈12 cm e ≈9 cm nas projeções de cota, respectivamente, demonstrando boa precisão do modelo. Embora pequenos, esses erros têm impactos práticos: (1) na navegação, podem exigir ajustes de carga em períodos críticos; (2) para comunidades ribeirinhas, afetam a precisão de alertas de cheias; e (3) na operação de hidrelétricas, influenciam decisões sobre vazões.

Esses valores representam uma precisão satisfatória para fins de planejamento hidroviário, especialmente quando comparados a estudos similares que utilizam RNAs para previsão de níveis d'água em grandes bacias tropicais (Peres, 2019; Zhou *et al*., 2020). Campos Filho (2023) apresentou valores de RMSE na ordem de 0,10 a 0,15 e MAE de 0,09 para previsão de níveis d'água em um trecho do rio Madeira utilizando redes neurais artificiais. A baixa discrepância entre RMSE e MAE sugere uma distribuição equilibrada dos erros, sem a presença de outliers significativos que comprometam a robustez do modelo.

Tabela 3- Métricas de desempenho do modelo de RNA para previsão de cotas no Rio Madeira.

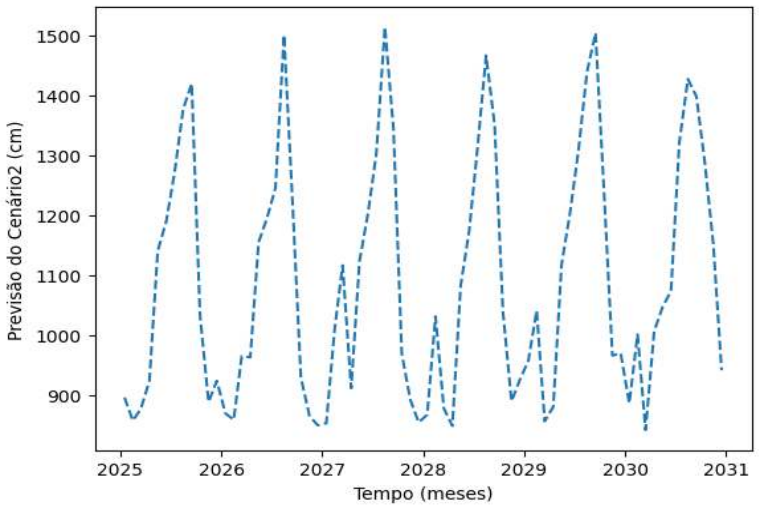
Métrica	Valores
RMSE	0.1222
MAE	0.0930

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

4.2. Análise das Projeções Hidrológicas e Comparação entre Cenários

Os resultados obtidos revelaram informações importantes sobre as variações climáticas esperadas e os possíveis impactos na navegabilidade do rio Madeira. Analisou-se a série histórica de dados e as projeções futuras, a fim de identificar tendências e padrões significativos. Com base nos dados levantados, a rede neural (MLP) gerou projeções relacionadas aos níveis d'água para os períodos de 2025 a 2030, considerando os dados climáticos do CMIP6 e os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 respectivamente.

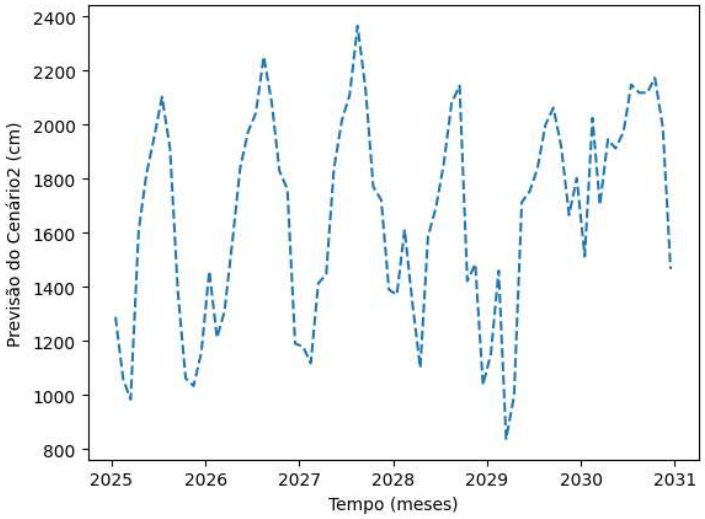
Figura 6 - Projeção de cotas (nível d'água em cm) para o cenário SSP1-2.6 no período de 2025 a 2030.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

O cenário 1 (SSP1-2.6) apresentou uma variação dos valores de cota de aproximadamente 800 cm a 1500 cm para o período projetado de 2025 a 2030. Enquanto, o cenário 2 (SSP5-8.5) os valores de cota variaram de 800 cm a 2400 cm. Um aumento para 2400 cm teria impactos significativos na navegabilidade: (1) em curto prazo, poderia ampliar temporariamente a capacidade de carga em trechos mais profundos, mas (2) em médio prazo, aumentaria os riscos de interrupções devido a inundações severas - com perda de infraestrutura portuária, erosão de margens e alteração de canais navegáveis.

Figura 7 - Projeção de cotas (nível d'água em cm) para o cenário SSP1-2.6 no período de 2025 a 2030.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Através do treinamento dessas redes com os insumos de dados adquiridos anteriormente, as RNAs foram capazes de aprender padrões e relações, permitindo a geração de previsões confiáveis e precisas, bem como observado em trabalhos posteriores (Peres, 2019; Zhou *et al*., 2020; de Mendonça *et al*., 2021). Figueiredo; Blanco (2019) apresentaram uma análise de modelos RNA (Redes Neurais Artificiais), tipo MLP (*Multilayers Perceptron*) na previsão de níveis de água mensais e de condições de navegabilidade, com antecedência de vinte e quatro meses, na bacia do rio Tapajós. Como resultado das análises observou-se que o modelo RNA apresentou R^2 médio igual 0,971 e erro quadrático médio RMSE da ordem de 0,008. Com base nos resultados dessa pesquisa foram geradas ferramentas que permitiram a análise de condições de navegabilidade e o dimensionamento de obras de infraestrutura hidroviárias.

A partir dos dados de cota foram geradas superfícies para demonstração das profundidades do trecho do rio nos diferentes cenários analisados.

Os cenários são representações plausíveis das emissões futuras de Gases de Efeito Estufa (GEE) baseados em um conjunto de suposições coerentes e fisicamente consistentes sobre suas forçantes (IPCC, 2023; SOARES, 2022). As narrativas SSP1 e SSP5 se diferem em termos de uso da terra e sistemas energéticos e em termos quantitativos sua principal distinção é quanto aos níveis de emissões futuras. Os cenários representam alterações a curto prazo, no entanto, tais alterações podem mudar em cenários de longo prazo.

O cenário SSP1-2.6 representa uma trajetória de desenvolvimento sustentável, com redução significativa nas emissões de gases de efeito estufa, implementação de políticas ambientais eficazes e transição para uma matriz energética mais limpa (IPCC, 2023). Nesse contexto, os impactos das mudanças climáticas sobre o ciclo hidrológico são menos intensos em comparação com cenários de altas emissões, como o SSP5-8.5. Assim, a variação no nível d'água do Rio Madeira tende a ser mais moderada, com menor frequência de eventos extremos de cheia e seca, esse cenário de mais estabilidade é apresentado nos mapas a seguir nos anos de 2025 a 2030.

Figura 8 - Projeção do cenário SSP1-2.6 para os anos de 2025 a 2030.

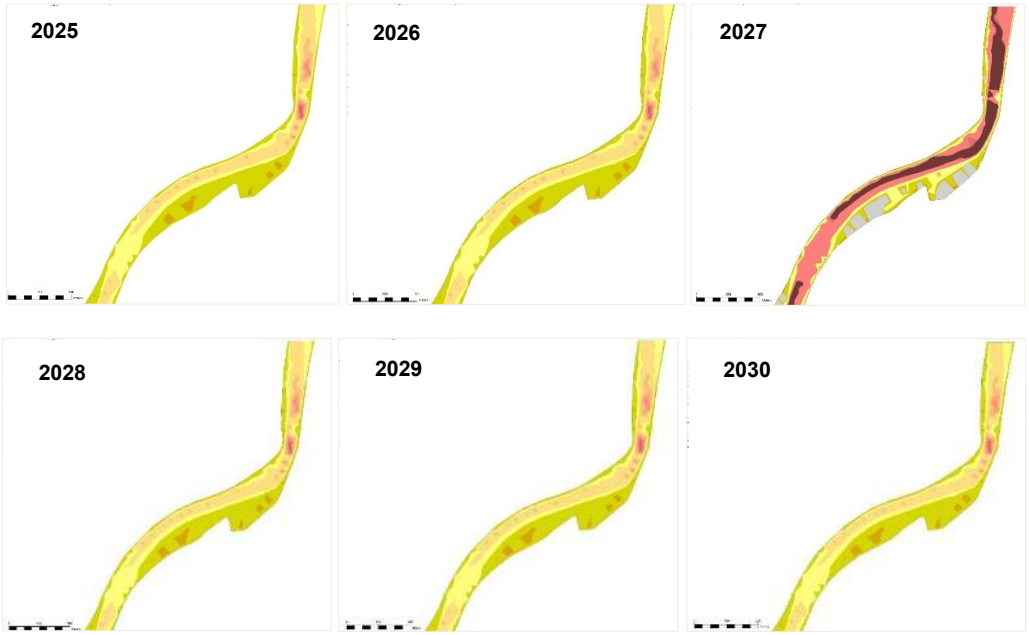


TABELA DE PROFUNDIDADE DA SUPERFÍCIE

PROFUNDIDADE MÁXIMA	PROFUNDIDADE MÍNIMA	GRADIENTE
-41 m	-36 m	
-36 m	-31 m	
-31 m	-26 m	
-26 m	-21 m	
-21 m	-16 m	
-16 m	-11 m	
-11 m	-6.0 m	
-6.0 m	-1.0 m	
-1.0 m	4.0 m	
4.0 m	10 m	
10 m	16 m	
16 m	20 m	

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

A menor concentração de gases de efeito estufa nesse cenário SSP1-2.6 impacta diretamente a evapotranspiração e os padrões de precipitação. A menor elevação das temperaturas também reduz a taxa de evaporação, garantindo maior estabilidade hídrica na bacia.

Em termos hidrológicos, o SSP1-2.6 favorece uma maior previsibilidade dos níveis d'água, reduzindo a ocorrência de secas severas ou inundações extremas (SOARES, 2022). Isso contribui para a segurança da navegação fluvial, garantindo melhores condições para o transporte aquaviário e reduzindo impactos negativos sobre a infraestrutura hidroviária e as comunidades ribeirinhas. Além disso, a menor variabilidade climática preserva o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos e diminui a erosão das margens do rio.

Dessa forma, o cenário SSP1-2.6 reforça a importância da adoção de estratégias de mitigação das mudanças climáticas, evidenciando que políticas sustentáveis podem resultar em um regime hidrológico mais estável e previsível, beneficiando tanto a segurança hídrica quanto as atividades econômicas e ambientais ao longo do Rio Madeira.

Figura 9 - Projeção do cenário SSP5-8.5 para os anos de 2025 a 2030.

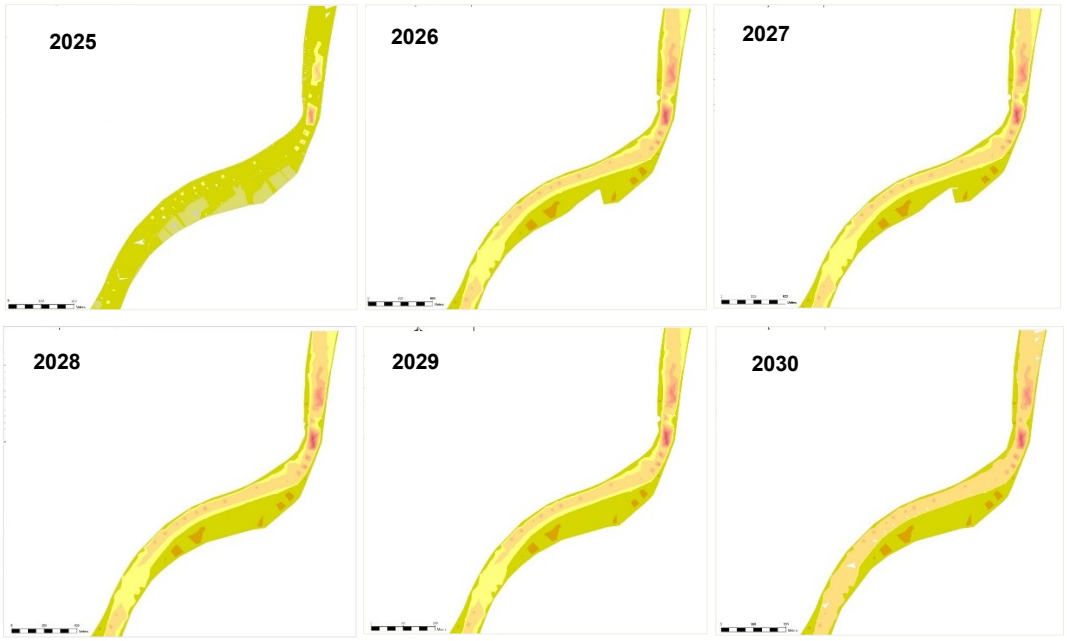


TABELA DE PROFUNDIDADE DA SUPERFÍCIE

PROFUNDIDADE MÁXIMA	PROFUNDIDADE MÍNIMA	GRADIENTE
-41 m	-36 m	
-36 m	-31 m	
-31 m	-26 m	
-26 m	-21 m	
-21 m	-16 m	
-16 m	-11 m	
-11 m	-6.0 m	
-6.0 m	-1.0 m	
-1.0 m	4.0 m	
4.0 m	10 m	
10 m	16 m	
16 m	20 m	

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

No cenário SSP5-8.5, nos anos de 2025 a 2030, foram observadas mudanças significativas nas condições do trecho analisado, em especial para o aumento das profundidades e a redução das áreas rasas. O aumento do nível d'água no Rio Madeira no cenário climático SSP5-8.5 pode ser explicado pela intensificação de processos climáticos relacionados ao aquecimento global. O SSP5-8.5 é caracterizado por altas emissões de gases de efeito estufa, rápido crescimento econômico baseado em combustíveis fósseis e mudanças significativas nos padrões climáticos globais (Tebaldi *et al*., 2021). Esse cenário leva a alterações no ciclo hidrológico que afetam diretamente os níveis dos rios, incluindo o Rio Madeira.

Entre os principais fatores responsáveis pela elevação do nível d'água, destaca-se o aumento da precipitação extrema, que intensifica o escoamento superficial e reduz a infiltração no solo, elevando o risco de enchentes. Embora o maior volume hídrico possa, em tese, favorecer a navegação em alguns trechos, a instabilidade hidrológica compromete a previsibilidade operacional - fator crítico para a segurança fluvial. Mudanças nos padrões sazonais (Teixeira, 2023; Zheng *et al*., 2024) e o aumento da evapotranspiração por aquecimento global (Penna, 2024) criam um ciclo de retroalimentação que amplifica a variabilidade: períodos de cheias extremas alternam-se com vazantes aceleradas, dificultando o planejamento logístico e aumentando os custos de adaptação para transporte de carga e comunidades ribeirinhas.

Embora o aumento da intensidade das chuvas e níveis d'água possam favorecer temporariamente a navegação em algumas áreas, a instabilidade do regime hidrológico e os eventos extremos frequentes apresentam desafios significativos para o transporte aquaviário. Esses riscos exigem a articulação com políticas públicas brasileiras, como o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA) e o Plano Amazônia Sustentável (PAS), que preveem ações para infraestrutura resiliente e gestão de bacias hidrográficas. Além disso, as comunidades ribeirinhas e os ecossistemas associados ao Rio Madeira — região prioritária para programas como o Projeto Integrado da Amazônia do Banco Mundial — podem ser particularmente vulneráveis às alterações nos padrões hidrológicos (Correia Filho *et al*., 2024). Nesse contexto, estratégias como melhorias na infraestrutura de transporte (e.g., eixos de navegação do Programa de Aceleração do Crescimento, PAC), sistemas de alerta precoce (como os do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, Cemaden) e

o manejo integrado da bacia — alinhado ao Plano Nacional de Recursos Hídricos — são medidas urgentes para reduzir os impactos das mudanças climáticas.

4.3. Impactos na Navegabilidade e Operação da Hidrovia

A navegabilidade no Rio Madeira é diretamente influenciada pelas variações sazonais e extremas do nível d'água. O calado mínimo recomendado para segurança na navegação é de 1,7 m (170 cm) durante a estiagem, podendo chegar a 6,8 m (680 cm) no período de cheias (ANTAQ, 2023).

No cenário SSP1-2.6, as cotas variaram entre 800 cm e 1500 cm. Isso indica que, mesmo nos picos de cheia, o calado permanece dentro dos limites operacionais seguros. Contudo, durante os períodos de menor cota (próximos a 800 cm), o calado pode ficar abaixo do recomendado, exigindo redução de carga ou até mesmo paralisação temporária em trechos críticos como Curicacas e Miriti.

Já no cenário SSP5-8.5, as cotas atingem até 2400 cm, o que equivale a um calado superior a 6,8 m. Embora isso possa, em tese, permitir maior capacidade de carga, na prática eleva significativamente os riscos de inundações, erosão de margens, alteração do canal navegável e interrupção de operações portuárias. Além disso, a maior amplitude hidrológica dificulta o planejamento logístico e aumenta a necessidade de dragagens de emergência, elevando os custos operacionais.

Esses resultados reforçam a necessidade de adaptação da infraestrutura hidroviária e de sistemas de alerta precoce para mitigar os impactos das mudanças climáticas na navegação do Rio Madeira. A análise evidencia que mesmo no cenário mais otimista (SSP1-2.6), haverá pressões sobre o sistema, exigindo adaptações. No entanto, é no cenário SSP5-8.5 que os impactos se tornam severos e potencialmente disruptivos. A frequência de eventos extremos previstos pode exceder a capacidade de resposta da infraestrutura atual, levando não apenas a aumentos de custo, mas a interrupções prolongadas da navegação, com reflexos diretos no preço dos commodities transportados e no abastecimento regional.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5, os resultados indicaram que as variações nos níveis d'água do rio estão diretamente associadas a mudanças nos padrões de precipitação, temperatura e umidade. No cenário SSP5-8.5, marcado por altas emissões de gases de efeito estufa, observou-se um aumento significativo nos níveis d'água, impulsionado por precipitações mais intensas e alterações nos ciclos hidrológicos. Esse aumento pode resultar em enchentes mais frequentes, erosão das margens e desafios operacionais para o transporte fluvial e a infraestrutura hidroviária da região.

Por outro lado, o cenário SSP1-2.6, que representa uma trajetória sustentável, apresentou menor variação nos níveis d'água, indicando maior estabilidade hidrológica e menor ocorrência de eventos extremos. Essa condição favorece o transporte aquaviário e reduz o impacto sobre comunidades ribeirinhas e estruturas logísticas da bacia.

Este estudo não apenas projetou níveis d'água para o Rio Madeira utilizando um modelo de RNA alimentado por dados do CMIP6, mas avançou na tradução dessas projeções em impactos operacionais concretos para a navegabilidade. Os resultados demonstram de forma clara a disparidade entre os cenários climáticos, com o SSP5-8.5 apresentando riscos significativos de interrupção à operação da hidrovia. A contextualização regional destacou a vulnerabilidade única deste corredor logístico. Portanto, este trabalho fornece uma ferramenta analítica robusta e dados empíricos críticos para informar políticas públicas de adaptação e investimentos em infraestrutura resiliente, reforçando a necessidade de ação imediata face às mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos *(SNIRH)*. [S. l.], 2025. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas. Acesso em: 28 maio 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (Brasil). Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil. Brasília, DF: ANA, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO (ANTAQ). Anuário Estatístico *2024*. Brasília, DF: Ministério da Infraestrutura, 2023. Disponível em: https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/index.html#pt. Acesso em: 20 ago. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO (ANTAQ). Relatório Concessão da Hidrovia do Rio Madeira. [S.l.], 2023. Disponível em: http://web.antaq.gov.br/Sistemas/WebServiceLeilao/DocumentoUpload/Audiencia%20153/HMD_Secao_C_Engenharia_f1_rev1.pdf. Acesso em: 28 out. 2024.

AGGARWAL, C. C. **Neural Networks and Deep Learning: A Textbook**. 1. ed. [S.l.]: Springer, 2018.

ARTAXO, P. Biomas brasileiros e as mudanças climáticas: Políticas de adaptação ao novo clima, consequentes e baseadas em ciência, são necessárias e urgentes. **Ciência e Cultura**, v. 75, n. 4, p. 01-08, 2023.

BLANCO, C..; SOARES, A. de C. L..; LOBATO, A. K. R.; CRUZ, J. da S. PRECIPITAÇÃO EM CENÁRIOS CLIMÁTICOS FUTUROS PARA USOS DE RECURSOS HÍDRICOS EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DA AMAZÔNIA. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, *[S. l.]*, v. 11, n. 2, 2023. DOI: 10.9771/gesta. v0i2.52993. Disponível em: https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/52993. Acesso em: 20 out. 2025.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima – IPCC. Brasília, DF, 2023. Disponível em: copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf. Acesso em: 15 jan. 2025

BRÊDA, J. P. L. F.; PAIVA, R. C. D. de; COLLISCHON, W. Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. **Climatic Change**, v. 159, p. 503–522, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10584-020-02667-9. Acesso em: 17 out. 2025.

CALDATTO, I. R.; BECKER, A. C. C.; BLENINGER, T.; POLLI, B. A.; DARU, R. L.; PENTEADO, R.; FREITAS, C. Characterization of woody material transport on the Madeira River at the Jirau Hydroelectric Power Plant: a study using a three-dimensional particle model. **RBRH**, v. 29, dez. p. 20-27, 2024. Disponivel em: https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420230128. Acesso em: Acesso em: 17 out. 2025.

CAMARGO, M. G. P. D. **Variabilidade da vazão do Rio Xingu na região da UHE Belo Monte sob cenários de projeções multimodelo de mudança climática.** 2019. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

CAMPOS FILHO, L. C. P. **Modelo de previsão de calados operacionais e capacidades de carga de comboios fluviais via machine learning a partir de temperaturas e precipitações obtidas por sensoriamento remoto.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2023.

CAVALCANTE, R. B. L.; FERREIRA, D. B. da S.; PONTES, P. R. M.; TEDESCHI, R. G. da C.; SOUZA, E. B. Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the

Brazilian Amazonia. **Atmospheric Research**, v. 238, p. 104879, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104879. Acesso em: 17 out. 2025.

CEVALHO, W.; ANDREOLI, R. V.; CERÓN, W. L.; OLIVEIRA, M. B. L. de; JIMENEZ, L. C. M.; SOUZA, R. A. F. de; KAYANO, M. T. Frequência de eventos extremos diários de precipitação em Manaus–AM e suas relações com o El Niño-Oscilação Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 1, p. 4-99, 2024.

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL. CNA e Entidades visitam sistema portuário de Porto Velho. 2022. Brasília, DF, Sistema CNA, SENAR / Instituto CNA. Disponível em: CNA e entidades visitam sistema portuário de Porto Velho | Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA). Acesso em: 28 maio 2025.

CORREIA FILHO, W.L.F.; GOBO, J.P.A.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F.; MENDES, D.; GOIS, G. Predicting Future Rainfall Scenario in the Brazilian Amazon and Its Socio-Economic Impacts. *In*: MISHRA, M.; DE LUCENA, A.J.; MAHARAJ, B. (eds) **Climate Change and Regional Socio-Economic Systems in the Global South**. Ed 1. Singapore: Springer, 2024. pp 155–170. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-97-3870-0_9. Acesso em: 17 out. 2025.

COSTA, G. K. L.; BLANCO, C. J. C.; SOARES, A. C. L.; CRUZ, J. S.; MENDONÇA, L. M. Impacto das mudanças climáticas nas vazões mínimas de referência de pequenas bacias hidrográficas na Amazônia Legal e dentro do arco do desflorestamento. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 20, n. 6, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.21168/rega.v20e6. Acesso em: 17 out. 2025.

DE SOUZA COSTA, C. E. A.; BLANCO, C. J. C.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. de. Impact of climate change in the flow regimes of the Upper and Middle Amazon River. **Climatic Change**, v. 166, n. 3, p. 45, 2021.

DE SOUZA COSTA, C. E. A.; BLANCO, C. J. C.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. de. IDF curves for future climate scenarios in a locality of the Tapajós Basin, Amazon, Brazil. **Journal of and Climate Change**, v. 11, n. 3, p. 760-770, 2020.

DE SOUZA, R. M.; VIOLA, M. R.; CHOU, S. C.; ALVES, M. V. G.; AVANZI, J. C. Projeções climáticas regionalizadas para o estado do Tocantins, Brasil, nos Cenários RCP 4.5 E RCP 8.5. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Inicia novo ciclo de dragagem no Rio Madeira. Brasília, DF: Ministério da Infraestrutura, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/noticias/dnit-inicia-novo-ciclo-de- -dragagem-no-rio-madeira. Acesso em: 20 jan. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Plano De Monitoramento Hidrográfico. Brasília, DF: Ministério dos Transportes. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/plano-de-monitoramento-hidroviario-pmh. Acesso em: 10 dez. 2024.

DOS SANTOS SILVA, F. D.; DA COSTA, C. P. W.; DOS SANTOS FRANCO, V.;GOMES, H. B.; DA SILVA, M. C. L.; DOS SANTOS VANDERLEI, M. H. G.; COSTA, R. L.; DA ROCHA JÚNIOR, R. L.; CABRAL JÚNIOR, J. B.; DOS REIS, J. S.; CAVALCANTE, R. B. L.; TEDESCHI, R. G.; DE JESUS DA COSTA BARRETO, N.; NOGUEIRA NETO, A. V.;DOS SANTOS JESUS, E.; DA SILVA FERREIRA, D. B. Intercomparação de Diferentes Fontes de Dados de Precipitação na Amazônia Legal Brasileira. **Clima,** v. 11, n. 241, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/cli11120241. Acesso em: 17 out. 2025.

ESPINOZA, J. C.; SÖRENSSON, A. A.; RONCHAIL, J.; MOLINA-CARPIO, J.; SEGURA, H.; GUTIERREZ-CORI, O. Regional hydro-climatic changes in the Southern Amazon Basin (Upper Madeira Basin) during the 1982–2017 period. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 26, p. 100637, 2019.

FIGUEIREDO, N.; BLANCO, C. Redes neurais artificiais na previsão de níveis de água e de navegabilidade na bacia do rio Tapajos-Amazônia. *In*: SIMPÓSIO DE MÉTODOS NUMÉRICOS COMPUTACIONAIS, 2019, Curitiba. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/330601891_REDES_NEURAIS_ARTIFICIAIS_NA_PREVISAO_DE_NIVEIS_DE_AGUA_E_DE_NAVEGABILIDADE_NA_BACIA_DO_RIO_TAPAJOS-AMAZONIA. Acesso em: 17 out. 2025.

GOMES, D. J. C.; BELTRÃO, N. E. S.; DIAS, Y. A. S.; MAIA, E. T. Eventos de inundação em anos extremos de Dipolo do Atlântico e La Niña no Arquipélago do Marajó. **Revista Brasileira De Climatologia**, v. 35, n. 20, p. 378–400, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.55761/abclima.v35i20.17577. Acesso em: 17 out. 2025.

HAYKIN, S. **Redes Neurais:** Princípios e Práticas**.** 2. ed. São Paulo: BOOKMAN, 2001.

HODSON, T. O. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. **Geosci. Model Dev,** v.15, p. 5481–5487, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022. Acesso em: 17 out. 2025.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Objetivos de desenvolvimento sustentável da Organização das Nações Unidas. Ação Contra a Mudança Global do Clima. [S. l.]: IPEA. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/ods/ods13.html. Acesso em: 28 maio 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Banco de dados Meteorológicos*. [S. l.]: Ministério da Agricultura e Pecuária, 2025. Disponível em: https://bdmep.inmet.gov.br/. Acesso em: 28 maio 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Summary for Policymakers. *In*: Climate Change 2023: Synthesis Report. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023. p. 1-34. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001. Disponível em: Summary for Policymakers. Acesso em: 28 maio 2025.

LOPES, I. de M. O.; MAGALHÃES, M. T. Q. Hidrovia do Rio Madeira como indutor de desenvolvimento microrregional das comunidades tradicionais do Baixo Madeira em Porto Velho. **Paranoá: Cadernos De Arquitetura E Urbanismo**, n. 22, p. 143–158, 2018. Disponível

em: https://periodicos.unb.br/index.php/paranoa/article/view/25676. Acesso em: 23 jan. 2022.

LUCAS, E. W. M. **Regionalização dos impactos das mudanças climáticas nos regimes de chuva e vazão na bacia hidrográfica do Xingu.** 2022. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2022.

MAGNAN, A.; PÖRTNER, HO.; DUVAT, V.K.E. Estimating the global risk of anthropogenic climate change. **Nature Climate Change**, v. 11, p. 879-885, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41558-021-01156-w. Acesso em: 17 out. 2025.

MARENGO, J. *Cenários futuros de clima e impactos*. Ciclo de Diálogos - Patrimônio Cultural e Ações Climáticas. Brasília, DF: Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (Iphan). Disponível em: https://www.gov.br/iphan/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programas/ciclo-de-dialogos-patrimonio-cultural-e-acoes-/climaticasJosMarengo_28.05.pdf. Acesso em: 20 out. 2024.

MARENGO, J.A.; WILLIAMS, E.R.; ALVES, L.M.; SOARES, W.R.; RODRIGUEZ, D.A. Extreme Seasonal Climate Variations in the Amazon Basin: Droughts and Floods. In: NAGY, L.; FORSBERG, B.; ARTAXO, P. (eds) Interactions Between Biosphere, Atmosphere and Human Land Use in the Amazon Basin. Ecological Studies, v. 227. **Springer**, Berlin, Heidelberg. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-662-49902-3_4. Acesso em: 17 out. 2025.

MENDONÇA, L.; GOMIDE, I.; SOUSA, J.; BLANCO, C. Modelagem chuva-vazão via redes neurais artificiais para simulação de vazões de uma bacia hidrográfica da Amazônia. **Revista de Gestão de Água Da América Latina**, v. 18, n. 2, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.21168/rega.v18e2. Acesso em: 17 out. 2025.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTI). Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima – *IPCC*. Brasília, DF: Ministério Da Ciência, Tecnologia E Inovações. 2021. Disponível em: IPCC_AR6_SYR_LongerReport_PO.pdf. Acesso em: 28 maio 2025.

MONTEIRO, R. M. L.; DOS SANTOS, F. A. A.; ROLIM, P. A. M.; BARRETO, C. E. C.; DA ROCHA, E. J. P. Modelagem Estatística Hidrológica na Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins. **Revista Brasileira de Geografia Física**, *[S. l.]*, v. 17, n. 2, p. 1158–1173, 2024. DOI: 10.26848/rbgf.v17.2.p1158-1173. Disponível em: https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/260349. Acesso em: 20 out. 2025.

PACA, V.H. da M.; ESPINOZA-DÁVALOS, G. E.; MOREIRA, D. M.; COMAIR, G. Variability of Trends in Precipitation across the AmazonRiver Basin Determined from the CHIRPS Precipitation Product and from Station Records. **Water**, v. 12, n. 5, p. 1244, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/w1205124. Acesso em: 17 out. 2025.

PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS/PLATAFORMA BRASILEIRA DE BIODIVERSIDADE E SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS (PBMC/BPBES). Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas e da Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços

Ecossistêmicos – Sumário para Tomadores de Decisão. Rio de Janeiro: PBMC, COPPE – UFRJ, 2018. Disponível em: Potência-Ambiental-da-Biodiversidade-um-caminho-inovador-para-o-Brasil.pdf. Acesso em: 17 out. 2025.

PARSONS, L. Implications of CMIP6 Projected Drying Trends for 21st Century Amazonian Drought Risk. **Earth's Future**, v. 8, n. 10. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1029/2020EF001608. Acesso em: 17 out. 2025.

PEDERSEN, S. T.; DUARTE SANTOS, F.; AN VUUREN, D.; GUPTA, J.; ENCARNAÇÃO COELHO, R.; APARÍCIO, B. A.; SWART, R. An assessment of the performance of scenarios against historical global emissions for IPCC reports. **Global Environmental Change**, v. *66*, p.10219, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102199. Acesso em: 17 out. 2025.

PENNA, A. C. **Caracterização de bloqueios de sistemas atmosféricos no Sudeste do Brasil no verão: observações e cenários futuros utilizando as projeções de modelos do CMIP6**. 2024. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2024.

PERES, V. C. da. **Sistema hidrológico para previsão de risco na Amazônia utilizando redes neurais artificiais**. 2019. Dissertação (Mestrado em Gestão de Riscos e Desastres Naturais na Amazônia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019. Disponível em: http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/11837. Acesso em: 10 set. 2024.

PLANO ANUAL DE DRAGAGEM DE MANUTENÇÃO AQUAVIÁRIA (PADMA). Ministério dos Transportes. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/plano-anual-de-dragagem-de-manutencao-aquaviaria padma#:~:text=O%20Plano%20Anual%20de%20Dragagem, correntes%20para%20garantir%20seguran%C3%A7a%20e. Acesso em: 10 dez. 2024.

PLANO DE DESENVOLVIMENTO E ZONEAMENTO (PDZ) - Porto de Porto Velho. Porto Velho: Sociedade de Portos e Hidrovias do Estado de Rondônia – SOPH, Autoridade Portuária, 2022. Disponível em: texto pdz porto velho aprovado portaria 1063 de 15 de agosto 2022.pdf. Acesso em: 10 dez. 2024.

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python Language**, 2025. Disponível em: https://www.python.org/doc/. Acesso em: 06 maio 2025.

REBOITA, M. S.; OLIVEIRA, K. R.; CORRÊA, P. Y. C.; RODRIGUES, R. Influência dos diferentes tipos do fenômeno El Niño na precipitação da América do Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 2, p. 729-742, 2021.

RIVERA, J. A.; ARNOULD, G. Evaluation of the ability of CMIP6 models to simulate precipitation over Southwestern South America: Climatic features and long-term trends (1901–2014). **Atmospheric Research**, v. 241, p. 104953, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104953. Acesso em: 17 out. 2025.

ROMANUKE, V. Maximum-versus-mean absolute error in selecting criteria of time series forecasting quality. **Bionics of Intelligence**, v.1, n. 96, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.30837/bi.2021.1(96).01. Acesso em: 17 out. 2025.

RUEZZENE, C. B.; MIRANDA, R. B. DE; TECH, A. R. B.; MAUAD, F. F. Preenchimento de falhas em dados de precipitação através de métodos tracionais e por inteligência artificial. **Revista Brasileira De Climatologia**, v. *29,* 2021. Disponível em: https://doi.org/10.5380/rbclima.v29i0.75476. Acesso em: 17 out. 2025.

SANTOS NETO, L. A.; MANIESI, V.; QUERINO, C. A. S.; SILVA, M. J. G.; BROWN, V. Reis. Modelagem Hidroclimatológica Utilizando Redes Neurais Multi Layer Perceptron Em Bacia Hidrográfica No Sudoeste Da Amazônia. **Revista Brasileira De Climatologia**, v. 26, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.5380/abclima.v26i0.73007. Acesso em: 17 out. 2025.

SAPUCCI, C. R.; MAYTA, V. C.; SILVA DIAS, P. L. da. Avaliação de dados de precipitação de base diversa na Região Amazônica. **Theor Appl Climatol**, v. 149, p. 1167–1193, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00704-022-04087-4. Acesso em: 17 out. 2025.

SERRÃO, E. A. de O. **Impactos das mudanças climáticas e do uso da terra na produção hidrelétrica na Amazônia Oriental**. 2022. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2022.

SHI, M.; LIU J.; WORDEN, J. R.; ANTHONY BLOOM, A.; WONG, S.; FU, R. The 2005 Amazon Drought Legacy Effect Delayed the 2006 Wet Season Onset. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 15, p. 9082-9090, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1029/2019GL083776. Acesso em: 17 out. 2025.

SILVA, A. G. da. **Modelo de previsão hidrológica utilizando redes neurais artificiais: um Estudo de caso na Bacia do Rio Xingu – Altamira-PA**. 2019. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2019.

SOARES, Á. C. M. **Influência de fenômenos climáticos sobre o regime hidrológico no médio rio Negro (Amazonas – Brasil)**. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus (AM), 2022.

SORÍ, R.; MARENGO, J. A.; NIETO, R.; DRUMOND, A.; GIMENO, L. (2018). The Atmospheric Branch of the Hydrological Cycle over the Negro and Madeira River Basins in the Amazon Region. **Water**, v. 10, n. 6, p. 738. Disponível em: https://doi.org/10.3390/w10060738. Acesso em: 17 out. 2025.

SOUZA, V. A. S.; MOREIRA, D. M.; ROTUNNO FILHO, O. C.; RUDKE, A. P. Extreme rainfall events in Amazonia: The Madeira river basin. **Remote Sensing Applications: Society and Environment,** v. 18, p. 100316, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100316. Acesso em: 17 out. 2025.

TEBALDI, C., DEBEIRE, K., EYRING, V., FISCHER, E., FYFE, J., FRIEDLINGSTEIN, P., KNUTTI, R., LOWE, J., O'NEILL, B., SANDERSON, B., VAN VUUREN, D., RIAHI, K., MEINSHAUSEN, M., NICHOLLS, Z., TOKARSKA, K., HURTT, G., KRIEGLER, E., LAMARQUE, J., MEEHL, G., MOSS, R., BAUER, S., BOUCHER, O., BROVKIN, V., BYUN, Y., DIX, M., GUALDI, S., GUO, H., JOHN, J., KHARIN, S., KIM, Y., KOSHIRO, T. et al. Estimating future climate change in regional areas. **Journal of Climate**, v. 28, n. 2, p. 755-772, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00277.1. Acesso em: 17 out. 2025.

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO (TCU). Relatório de Fiscalização. Melhoramentos no Canal de Navegação da Hidrovia do Rio Madeira na Região Norte. Brasília, DF: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2017 Disponível em: https://www.camara.leg.br/internet/comissao/index/mista/orca/orcamento/OR2018/Fiscobras2017/anexo/SINTETICOS/Sint%C3%A9tico_2017_12.pdf. Acesso em: 17 out. 2025.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2 ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 678 p.

VALENTIM, H. D. A. **Análise de eventos extremos de precipitação e temperatura na bacia do rio Madeira**. 2020. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

VERGASTA, L. A., CORREIA, F. W. S., SATYAMURTY, P., CHOU, S. C., LYRA, A. de A., GOMES, W. de B. An assessment of the present hydroclimatic regime of the Madeira River basin using climate and hydrological models. **Hydrological Sciences Journal**, v. 68, n. 10, p. 1338–1357, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2216844. Acesso em: 17 out. 2025.

VIEIRA, R. S. **Impacto das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica da bacia do rio Tocantins**. 2021. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). State of the Global Climate *2023*. Geneva, Switzerland: WMO, 2024. (WMO-No. 1313). Disponível em: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=11928. Acesso em: 17 out. 2025.

WU, Y.; MIAO, C.; SUN, Y.; AGHAKOUCHAK, A.; SHEN, C.; FAN, X. Global observations and CMIP6 simulations of compound extremes of Monthly temperature and precipitation. **GeoHealth**, v. 5, n. 5, 2021. Disponível em: https:// doi.org/10.1029/2021GH000390. Acesso em: 17 out. 2025.

ZHOU, T. Preface to Special Issue on CMIP6 Experiments: Model and Dataset Descriptions. **Adv. Atmos. Sci**. v. 37, n. 1033, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00376-020-0008-8. Acesso em: 17 out. 2025.

ZILLMANN, J. **Mudanças climáticas e seus impactos na Amazônia: uma revisão bibliográfica.** 2018. Monografia (Especialização em Ciências Ambientais) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2018.