



Mudança de níveis de água (1995-2021) no Estuário Superior do rio Amazonas (Baixo Amazonas - Pará): possíveis fatores que afetam

Rafaele da Silva Sampaio¹, Maamar El Robrini²

¹Mestre em Oceanografia, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil. E-mail: rafaele.sampaio@ig.ufpa.br ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3949-608X> ²Professor Titular da Faculdade de Oceanografia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval e Programa de Pós-graduação em Oceanografia, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil. E-mail: robrini@ufpa.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7850-1217>

Artigo recebido em 12/04/2023 e aceito em 25/08/2023

RESUMO

As mudanças climáticas exercem influência significativa sobre a demanda hídrica global e os parâmetros hidrológicos. Modelos climáticos indicam uma possível intensificação dos fenômenos de seca e cheia na região amazônica. Os cálculos destinados à identificação de tendências desempenham um papel importante na compreensão da variabilidade climática. Este artigo objetiva analisar as condicionantes hidrometeorológicas no Baixo Amazonas, determinando as variabilidades temporais e espaciais dos aspectos meteorológicos, hidrológicos, destacando anomalias ENOS, utilizando a análise de tendências através do teste não paramétrico de Mann-Kendall durante o período de 1995-2021. Nos anos de 1997-1998, o El Niño de forte intensidade impactou na diminuição da cota do rio (3,06 m) em 1998, na vazão (72469,31 m³/s) em 1997. Em 1995-1996 o El Niño moderado causou a diminuição das cotas (2,67 m em 1995 - menor da série histórica). Em 2007-2008, o La Niña moderado atuou no regime pluviométrico (2008 teve o maior índice de toda a série histórica (825,10 mm)). Em 2020-2021, La Niña de moderada intensidade elevou a cota fluviométrica a 5,75 m (2021) e na cheia atingiu vazão de 273143,34 m³/s (maior da série histórica). Foi comprovado pelos métodos estatísticos que ocorreram tendências positivas na vazão e no nível do rio e a estacionariedade dos dados pluviométricos.

Palavras-chave: Baixo Amazonas; ENOS; Vazão; Precipitação; Mann-Kendall.

Water level changes (1995-2021) in the Upper Amazon Estuary (Lower Amazon - Pará): possible climate factors

ABSTRACT

Climate change exerts a significant influence on global water demand and hydrological parameters. Climate models indicate a potential intensification of drought and flood phenomena in the Amazon region. Calculations aimed at identifying trends play a crucial role in understanding climate variability. This article aims to analyze the hydrometeorological determinants in the Lower Amazon, determining the temporal and spatial variabilities of meteorological and hydrological aspects, highlighting ENSO anomalies, using trend analysis through the non-parametric Mann-Kendall test during the period from 1995 to 2021. In the years 1997-1998, the strong El Niño impacted a reduction in river levels (3.06 m in 1998) and flow (72469.31 m³/s in 1997). In 1995-1996, the moderate El Niño caused a decrease in levels (2.67 m in 1995 - the lowest in the historical series). In 2007-2008, the moderate La Niña influenced the rainfall regime (2008 had the highest index in the entire historical series (825.10 mm)). In 2020-2021, the moderate La Niña raised the river level to 5.75 m (2021), and during the flood, it reached a flow of 273143.34 m³/s (the highest in the historical series). Statistical methods confirmed positive trends in flow and river level, and the stationarity of rainfall data.

Keywords: Lower Amazon; ENOS; Flow; Precipitation; Mann-Kendall.

Introdução

As mudanças climáticas e no uso e ocupação do solo exercem influência significativa sobre a demanda hídrica global e os parâmetros hidrológicos. Essas influências repercutem nas dinâmicas do ciclo hidrológico e no panorama socioambiental. Na Amazônia, a percepção dessas mudanças na disponibilidade hídrica local é evidenciada pelo acentuado aumento nas

inundações e nos períodos de seca (Dias et al., 2023).

Na região amazônica, observou-se que as mudanças nessas características, tanto em termos de intensidade, frequência quanto duração, têm se manifestado como fenômeno em ascensão. Este cenário destaca a crescente vulnerabilidade humana frente aos riscos climáticos, demonstrando

a necessidade de aprimorar a compreensão e a previsão, com implementação adequada de medidas mitigatórias (Brito et al., 2022).

Modelos climáticos indicam uma possível intensificação dos fenômenos de seca e cheia na região amazônica. Esses eventos estão correlacionados com o aquecimento da temperatura da superfície do mar no Oceano Pacífico Tropical e/ou no Oceano Atlântico Norte Tropical, fenômeno conhecido como El Niño Oscilação Sul (ENOS) (Brito et al., 2022).

O ENOS descreve condições em que o Oceano Pacífico Equatorial exibe temperaturas acima da média normal histórica (El Niño) ou abaixo dessa média (La Niña). Essa variação tem impactos globais significativos na temperatura e na precipitação (Brito et al., 2022).

Nas últimas décadas, houve um aumento em estudos sobre tendências regionais e continentais do ciclo da água devido às mudanças e variabilidade climáticas. Foram observadas mudanças nos regimes de fluxo em vários rios ao redor do mundo como resposta às mudanças no meio ambiente. Os estudos de tendências das componentes hidrológicas, como vazão e precipitação, têm aumentado para identificar uma possível mudança climática (Ferreira et al., 2022).

Os cálculos destinados à identificação de tendências desempenham um papel importante na compreensão da variabilidade climática, sendo um componente essencial no aprimoramento de modelos hidrológicos e na implementação de estratégias de gestão de recursos hídricos (Dias et al., 2023).

A avaliação da tendência a uma alteração na escala espacial local ou regional, é importante, pois, viabiliza a constatação de irregularidades e da probabilidade para os riscos, permitindo compreender as mudanças da disponibilidade hídrica ao longo do tempo em uma região. A presença ou ausência de estacionariedade das variáveis possibilita identificar eventos de elevada magnitude de modo a visualizar as principais demandas quanto ao gerenciamento ambiental e subsidiar políticas públicas de adaptação adequadas às diferentes realidades socioambientais. (Aleixo e Almeida Filho, 2022).

O conhecimento e o monitoramento das águas fluviais e sistemas pluviométricos são fundamentais para subsidiar a gestão dos recursos hídricos. As séries históricas permitem monitorar o tempo e o clima ao longo dos anos. Nisto, a análise hidro meteorológica permite o equacionamento da oferta e volume de água dos cursos d'água,

utilizado em tomadas de decisões orientadas a racionalização e preservação deste recurso.

A grande disponibilidade de recursos hídricos no Brasil é justificada pelo grande número de rios com alta vazão média anual, contudo a variabilidade da precipitação e da vazão na bacia Amazônica são aspectos de grande preocupação, em função do desmatamento, das queimadas, dos eventos extremos e dos fenômenos meteorológicos, como o El Niño, que provocam a seca e La Niña, que eleva os índices pluviométricos, causando enchentes (Ferreira et al., 2022).

As mudanças no padrão do uso do solo na bacia amazônica, principalmente a partir de 1970, têm sido bastante intensas, causando significativas modificações no clima da região. O desmatamento e as queimadas são os principais causadores desses impactos, pois emitem gases e partículas levando a alterações negativas no ciclo hidrológico da bacia amazônica: diminuição do regime de chuvas, prolongamento da estação seca e modificações nos processos de reciclagem de precipitação (Ferreira et al., 2022).

Alguns trabalhos foram realizados na Amazônia Brasileira: Variabilidade do regime hidrológico da bacia amazônica (Coutinho et al., 2020) que mostraram tendências positivas nos rios da margem esquerda e variadas nos rios da margem direita;

Relação entre eventos climáticos extremos e desastres ambientais fluviais no Amazonas (Guimarães et al., 2021) onde a ocorrência desses eventos extremos e de eventos próximos a esses limiares teve como resultado uma maior ocorrência de desastres ambientais fluviais de inundação e seca no Estado;

Tendência temporal e estimativa do risco hidrológico de extremos máximos de chuva e de vazão na cidade de rio Branco, Acre (Oliveira et al., 2021) onde é possível concluir a ocorrência de mudanças nos padrões hidrológicos, promovendo uma mudança temporal aumento nos registros máximos de vazão e chuva, embora não é estatisticamente significativo;

Os índices de anomalia de chuva e sua relação com o El Niño oscilação sul na bacia hidrográfica do rio Tapajós (Ferreira, et al., 2022) onde a influência do fenômeno ENOS é maior para região norte do que para região sul da Bacia Hidrográfica do rio Tapajós;

Análise do índice de anomalia de chuva e tendência de precipitação para estações pluviométricas na Amazônia Central (Brito et al., 2022) sugeriu que o comportamento da precipitação na região é variável, em função da

variação geomorfológica de cada ambiente, bem como das influências antrópicas exercidas sobre o ambiente;

Tendências climáticas em Coari - AM (Aleixo e Almeida Filho, 2022) onde é possível afirmar que ocorreram tendências positivas crescentes de incremento da temperatura do ar registrada em Coari;

Análise da tendência de séries históricas de vazão na bacia hidrográfica do rio Amazonas (Dias et al., 2023) detectou que as vazões médias anuais estão aumentando na Bacia Amazônica nos períodos analisados.

A análise da série histórica de dados climáticos auxilia na avaliação de hipóteses que considerem a estacionariedade das condições hidroclimáticas futuras. E a análise espacial de tendências permite identificar locais que apresentam mudanças em um comportamento em série, podendo estimar os possíveis danos a essas

mudanças nas atividades sociais, ambientais e econômicas, ajudando assim a orientar decisões quanto ao risco devido a essas mudanças e para uma gestão adequada dos recursos hídricos.

Este artigo objetiva analisar as condicionantes hidro meteorológicas no Baixo Amazonas, nos municípios de Santarém e Óbidos, determinando as variabilidades temporais e espaciais dos aspectos meteorológicos (temperatura e precipitação), hidrológicos (vazão e cota fluviométrica), destacando anomalias, aliados a análise de tendências durante o período de 1995-2021.

Material e métodos

A área de estudo se encontra na mesorregião do Baixo Amazonas, nos municípios de Santarém e Óbidos. O acesso à área se dá por via rodoviária, fluvial e/ou aéreo (Figura 1).

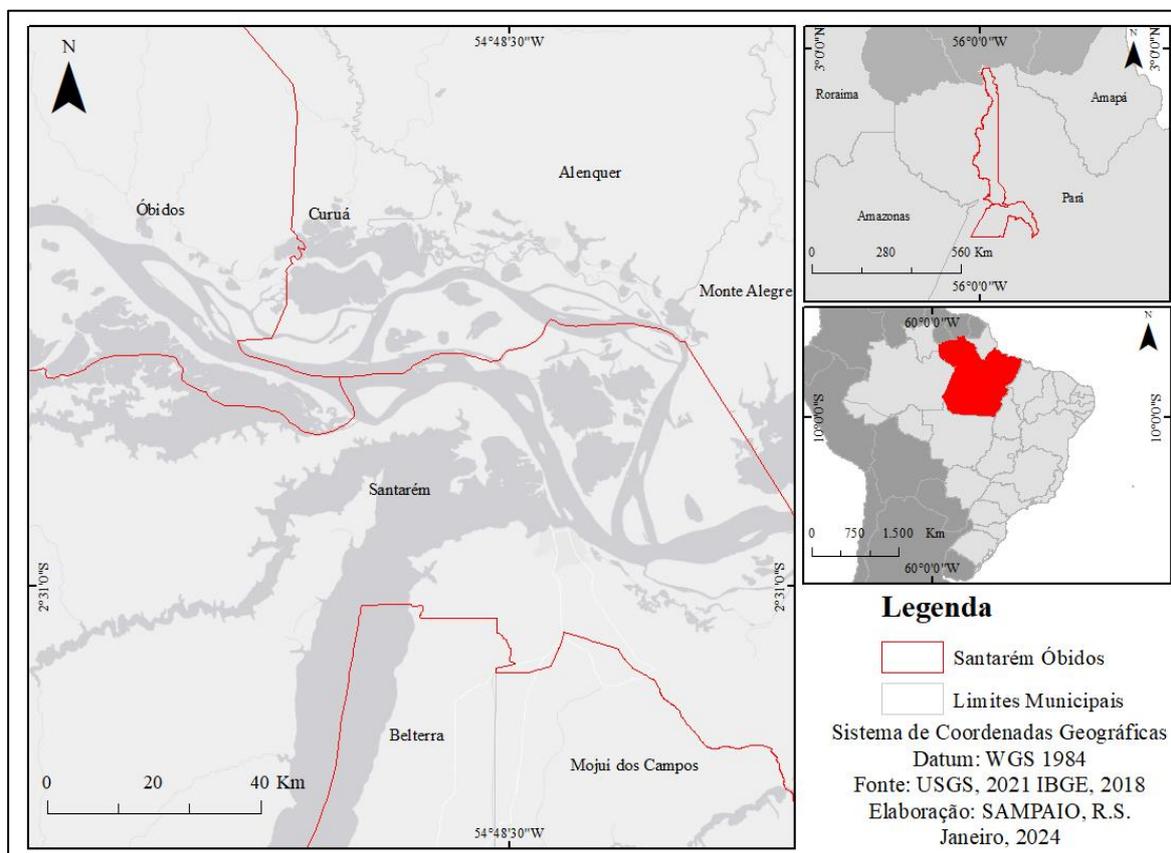


Figura 1. Localização da área de estudo nos municípios de Santarém e Óbidos.

Clima e parâmetros meteorológicos

De acordo com Dubreuil et al. (2018), o tipo de clima anual em Santarém está entre os tipos Af e Am: Af, clima quente sem estação seca e Am, clima de monção quente. O tipo Af corresponde

aos climas quentes e chuvosos durante todo o ano na Amazônia ocidental, na foz do Amazonas. O tipo Am vem em segundo lugar distribuído no sul e leste da Amazônia.

Os principais sistemas atmosféricos causadores da precipitação e sua variabilidade na bacia amazônica são: a Zona de Convergências Intertropical (ZCIT) estabelecendo o padrão anual de precipitação na região, identificado por uma faixa de nebulosidade localizada na zona tropical que exibe um deslocamento de norte a sul, aproximadamente alinhado com as áreas de maior Temperatura da Superfície do Mar (TSM) (Cevalho et al., 2024); Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) se forma nas áreas recobertas pela floresta amazônica a partir da convergência da umidade do Oceano Atlântico com a evapotranspiração da floresta local. Assim, o encontro desses dois tipos de umidade forma nebulosidade que se direciona para o Oceano Atlântico Sul (Cevalho et al., 2024).

O regime de chuvas na margem direita da Bacia Amazônica onde se localiza o rio Tapajós é influenciada pelo deslocamento da ZCAS, onde a precipitação máxima ocorre em dezembro-janeiro-fevereiro. A precipitação no Baixo Amazonas reflete contribuições tanto de sistemas convectivos estimulados por forçantes locais que se move para o interior da costa (Coutinho et al., 2020).

A variabilidade da precipitação entre os dois períodos (maior precipitação e menor precipitação) é influenciada pelos fenômenos de meso e grande escala, os sistemas atmosféricos são dinâmicos e explicam a ampla variabilidade sazonal pluviométrica, dentre eles a ZCIT

responsável pela chuva no outono austral. A ZCIT é o causador da sazonalidade da precipitação na região, pois coincide com o período chuvoso que acontece no decorrer da marcha da ZCIT em direção ao hemisfério Sul. Os aglomerados convectivos são os principais sistemas do regime seco (Lira et al., 2020).

Os mecanismos oceânicos que atuam nos extremos climáticos (intensificação de máximos e mínimos) é o El Niño Oscilação Sul (ENOS) com eventos de El Niño (EN) e La Niña (LN). A caracterização do ENOS é analisada por meio do cálculo de alguns índices, como o Índice Oceânico Niño (Oceanic Niño Index – ONI) definido pela média móvel trimestral da anomalia de temperatura da superfície do mar (ATSM) para a região do Niño 3.4, por no mínimo, cinco meses consecutivos, onde a anomalia maior que 0,5 °C está associado a El Niño e inferior a -0,5 °C está associado a La Niña (Sampaio, 2023).

A intensificação desses fenômenos climáticos na região amazônica pode contribuir para eventos extremos como enchentes, grandes secas, inundações e alterações nas estações do ano. Suas ocorrências são classificadas como Fraca, Moderada e Forte e foram coletados do Golden Gate Weather Service (Tabela 1). Essas fases correspondem ao aquecimento e resfriamento da superfície do mar no Oceano Pacífico Equatorial, próximo da costa oeste da América do Sul (Souza e Reboita, 2021).

Tabela 1. Intensidades dos eventos de El Niño e La Niña no período estudado.

EL NIÑO			LA NIÑA		
Fraco	Moderado	Muito forte	Fraco	Moderado	Forte
2004-2005	1994-1995	1997-1998	2000-2001	1995-1996	1998-1999
2006-2007	2002-2003	2015-2016	2005-2006	2011-2012	1999-2000
2014-2015	2009-2010		2008-2009	2020-2021	2007-2008
2018-2019			2016-2017		2010-2011
			2017-2018		

O EN sobre a região de estudo causa pouca precipitação e durante a LN causam chuvas mais abundantes. A seca de 2015 foi associada ao ENOS, e afetou uma grande área, que inclui mais de 80% da Amazônia (Ferreira et al., 2022).

A temperatura média anual é de 25.9 °C. A pluviosidade média é 2150 mm/ano. A diferença entre a precipitação do mês mais seco e do mês mais chuvoso é de 355 mm. As temperaturas médias têm variação de 1.6° C durante o ano. O mês mais quente do ano é outubro com temperatura média de 26.9 °C. A temperatura média em junho é de 25.3 °C, durante o ano é a temperatura média mais baixa. O mês mais seco é setembro e tem 33

mm de precipitação. O maior volume de precipitação ocorre em março, com média de 388 mm. O clima dominante é quente e úmido, característico das Florestas Tropicais. Não ocorrem mudanças significativas de temperatura, devido sua proximidade da linha do equador. A temperatura média anual varia de 24,3° a 25,8°C, com umidade relativa média do ar de 86%. A precipitação pluvial média é de 1920 mm/ano, com maior intensidade durante o período de "inverno" (dezembro a maio), quando a precipitação média varia de 170 mm a 300 mm. Durante o “verão” regional ou período mais seco, ocorrem as menores precipitações com

valores médios < 60mm, entre os meses de agosto a outubro (SANTARÉM, 2019).

Condições Hidrológicas

A rede hídrica da área de estudo inclui os rios Amazonas e Tapajós. O rio Amazonas percorre uma extensão de 6.885 km até a sua foz, com 1.100 tributários. A vazão do rio Amazonas na foz é de 209.000 m³/s. A evaporação do rio Amazonas equivale a 1.382 mm/ano. A descarga de sedimentos em suspensão é de 500-1.200 Mt/a (Nittrouer et al., 2021). Possui largura média de 4 a 5 km em seu curso, o leito menor do rio Amazonas chega a atingir quase 10 km de largura. Durante as grandes cheias, ao cobrir totalmente o seu leito maior (várzea), chega a aproximadamente 50 km de largura.

O rio Tapajós percorre 800 km até desaguar no rio Amazonas próximo a Santarém com vazão de 12.434 m³/s. Pode chegar a 20 km de largura entre as margens (SANTARÉM, 2019).

O clima que predomina na área de trabalho interfere diretamente no regime dos rios, tornando a identificação do período sazonal mais fácil. No rio Tapajós o período de enchente e de vazão afluente ocorre entre os meses de janeiro a maio e o de vazante e de vazão defluente entre junho e dezembro, a estiagem entre agosto e outubro com picos de descarga entre os meses de fevereiro a maio (Guedes, 2020). No rio Amazonas verifica-se crescimentos progressivos quanto à vazão, no sentido oeste-leste, de fevereiro a maio, atingindo valores máximos em meados de maio, aumentando a área inundada; entretanto, a partir de junho, a

vazão e, por conseguinte, a área inundada decresce, com valor mínimo em novembro (CPRM, 2021).

Aquisição e tratamento de dados

O aporte teórico compreende os estudos de climatologia geográfica e técnicas utilizadas em estudos de tendências climáticas realizados no Brasil e no exterior.

Foram adquiridas séries históricas de dados pluviométricos e fluviométricos da Agência Nacional de Águas (ANA) através do HidroWeb (<http://hidroweb.ana.gov.br/>) com séries históricas correspondentes aos anos de 1995 e 2021. Foram utilizados dados de vazão, cotas (nível de água) e precipitação. Alguns postos apresentam falhas (de instrumentação ao longo do tempo) em seus registros, e alguns foram desativados então os postos foram selecionados de acordo com a disponibilidade de dados, o critério estabelecido foi que a série temporal deveria ser contínua e que possibilitasse a comparação temporal, o que totalizou um comprimento temporal de 26 anos. Foram utilizados 4 postos (fluviométricos e pluviométricos) nos municípios de Santarém e Óbidos (Tabela 2) (Figura 2) que monitora seu nível e vazão desde 1980. Os dados de precipitação compreendem as médias mensais e anuais observadas nas estações pluviométricas, assim como as séries de vazões e cotas, a partir de estações fluviométricas. Para os dados ambientais vários são os métodos que podem ser utilizados para o preenchimento de falhas, uma delas é a utilização de médias de dados observados.

Tabela 2. Postos fluviométricos no Baixo Amazonas na Bacia Amazônica

Código	Nome	Latitude	Longitude	Tipo
17900000	Santarém	-2,41	-54,74	Fluviométrica
254010	Boa vista	-2,26	-54,52	Pluviométrica
254000	Santarém	-2,44	-54,70	Pluviométrica
17050001	Óbidos	-1,92	-55,51	Fluviométrica

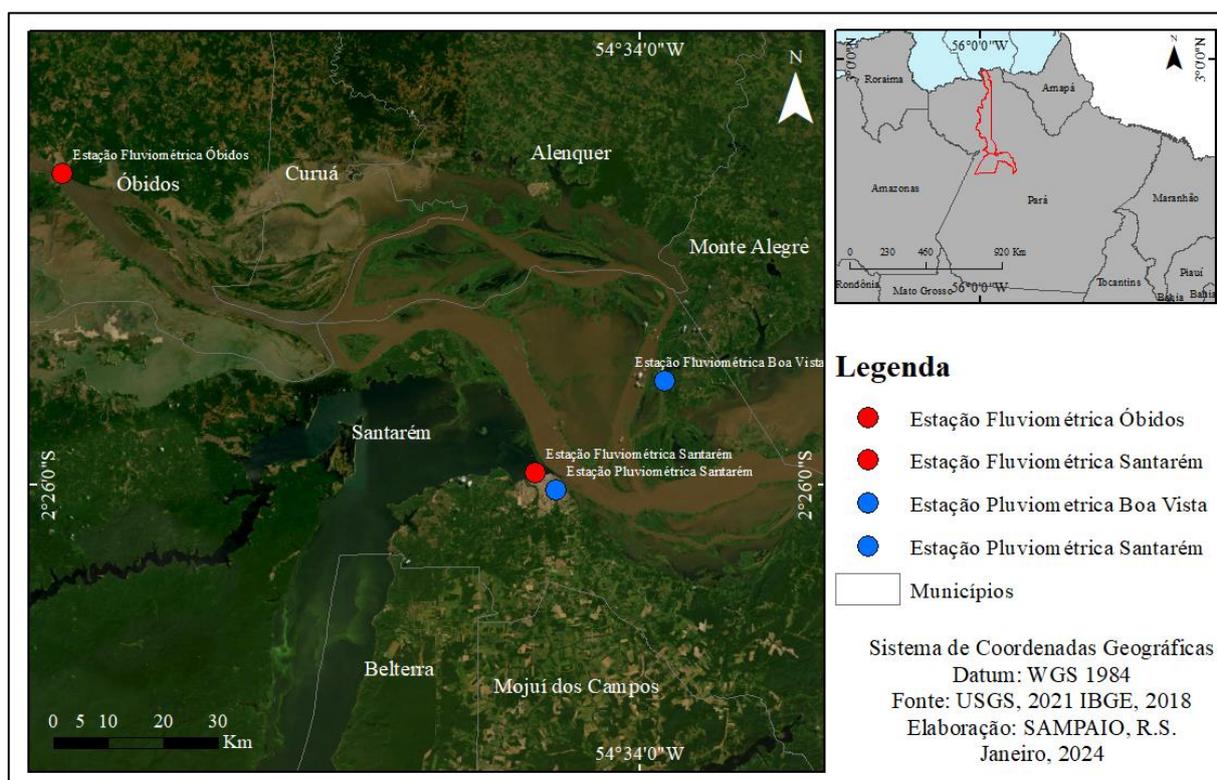


Figura 2. Localização dos postos encontrados no site Hidroweb do ANA.

Processamento estatístico de dados

Para identificação de tendência nas séries históricas foi utilizado o teste de Mann-Kendall nos softwares R Studio, um software livre de ambiente de desenvolvimento integrado para R (linguagem de programação para gráficos e cálculos estatísticos), e o software Minitab, um software estatístico que permite analisar e identificar diferentes tipos de informações. Através do Minitab é feito também um gráfico que mostra as relações entre cada combinação possível das variáveis gráficas, com linhas de suavizador para ajudar a visualizar as relações e a tendência. Foram utilizadas as médias mensais tabeladas nos programas. Os testes foram aplicados em função dos meses e nas médias anuais, para melhor compreender a variabilidade temporal. Sendo assim, os dados das séries históricas foram divididos e o teste aplicado para cada período.

Uma série temporal ou série histórica, é uma sequência de dados obtidos em intervalos de tempo regulares, durante determinado período específico e pode ser obtido mediante observações periódicas do evento: vazões diárias de curso d'água, precipitação diária, etc. No início da análise da série temporal, deve-se modelar o fenômeno, e a partindo desta análise é possível descrever o comportamento da série, estimar os dados e avaliar quais as causas influenciaram o comportamento da série, analisando a existência de

relações de causa e efeito entre duas ou mais séries temporais (Rocha e Santos, 2018).

Modelos de séries temporais são usados para avaliar o comportamento de uma variável ao longo do tempo. Os modelos estatísticos para séries temporais usam passado histórico de variável para planejar observações futuras. Dessa forma, se pode ter uma ideia, em média, de como a variável se comportará nos próximos períodos. A tendência é definida como um padrão de crescimento ou decrescimento da variável em certo período de tempo. A sazonalidade é definida como padrões de comportamento que se repetem em específicas épocas do ano. A estacionariedade é uma variável que se comporta de forma aleatória ao longo do tempo ao redor de uma média constante. Séries temporais que possuem tendência e/ou sazonalidade não são estacionárias e é necessário o uso de técnicas adequadas para determinada situação. Para identificação de tendência em séries históricas podem ser usados diferentes testes não paramétricos, que em geral, permitem confirmar a estacionariedade da série histórica, ou seja, excetuando as flutuações aleatórias, as observações são constantes com relação à cronologia de suas ocorrências (Rocha e Santos, 2018).

A análise de tendência pode ser realizada por regressão linear, porém, quando não é conhecida a distribuição dos dados que serão analisados ou não há a intensão de considerar a

distribuição, a análise de tendência pode ser feita por métodos não-paramétricos como o Teste Mann-Kendall.

Teste de Mann-Kendall

O teste Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) é utilizado para determinar se uma série de dados possui tendência temporal estatisticamente significativa. O teste foi empregado para testar a significância estatística (crescente ou decrescente) das séries temporais, é um dos mais utilizados na avaliação de tendências de séries históricas naturais que se distanciam da distribuição normal, como de vazões, temperatura e precipitação (Lira et al., 2020).

As hipóteses adotadas para o Teste Mann-Kendall são:

H0 (hipótese nula): não há tendência presente nos dados; **HA** (hipótese alternativa): uma tendência está presente nos dados que pode ser de aumento ou de diminuição.

Baseia-se na estatística “S” (Equação 1). Trata-se de um teste que correlaciona as classificações de observações e sua sequência temporal, ou seja, compara cada valor da série com o outro valor anterior, em ordem sequencial, para determinar a variável estatística (Lira et al., 2020).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

Onde *sgn* é a somatória dos sinais da diferença par a par, de todos os valores da série (*x_i*) em relação aos valores remanescentes, em ordem sequencial (*x_j*) são os valores dos dados sequenciais e *n* é o tamanho ou comprimento da série temporal (Lira et al., 2020). Os resultados da somatória variam de acordo com as condições da Equação 2:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{Se } x_j - x_i > 0 \\ 0, & x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{Se } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Em seguida, calcula-se a variância da estatística de S (Var (S)), na Equação 3:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1) * (2n+5) - \sum_{i=1}^p t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (3)$$

Onde *n* é o número de observações, caso a série tenha grupos com observações iguais; sendo que *p* é o número de grupos com observações iguais

e *t_i* é o número de dados com valores iguais em um certo grupo *i* (exemplo, uma série histórica com 3 valores iguais entre si teria 1 repetição de extensão igual a 3, ou *t_i* = 1 e *i* = 3). Séries contendo amostras de *n* > 10, a estatística S tende a normalizar (Lira et al., 2020).

Considerando a hipótese nula e a ausência de *p*, a variância da estatística de S (Var (S)), pode ser calculada através da Equação 4. Onde *n* é o número de pontos de dados.

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1) * (2n+5)] \quad (4)$$

O valor do teste é obtido no resultado de Z de Mann-Kendall, Equação 5:

$$\begin{aligned} \text{Se } S > 0 & \quad Z = \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \\ \text{Se } S = 0 & \quad Z = 0 \\ \text{Se } S < 0 & \quad Z = \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \end{aligned} \quad (5)$$

O resultado de Z de Mann-Kendall indica tendência na série temporal. Os valores de ZMK positivos indicam tendências crescentes, enquanto ZMK negativos indicam tendências decrescentes nas séries temporais (Lira et al., 2020).

A significância estatística do teste de Mann-Kendall considera o valor *p* como a probabilidade de o resultado observado ocorrer se a hipótese nula for verdadeira. Utilizou-se um nível de significância de 5%, ou seja, um resultado com menos de 5% de probabilidade de ocorrer caso a hipótese nula seja verdadeira o que sugere que a hipótese de estabilidade nos dados seja rejeitada e que a hipótese alternativa pode ser significativa (Aleixo e Almeida Filho, 2022).

Resultados e discussão

Caracterização hidrológica e climatológica

Para os dados fluviométricos, o ano hidrológico como o período de enchente, cheia, vazante e seca do rio. No ano de 2021 é possível perceber a partir das cotas fluviométricas do rio Amazonas os meses de enchente (dezembro – abril), o pico da enchente (maio) cuja média foi de 7,97 m, a vazante (junho – outubro) e a seca (novembro) onde a média foi de 2,78 m, os níveis mínimos indicaram o período de águas baixas e os níveis máximos foram compreendidos como período de águas altas (Figura 3 A). A definição do regime hidrológico anual único para o rio Amazonas, que é de cheia e vazante, é apoiado nos

registros de cotas fluviométricas, o rio Amazonas começa a subir a partir de novembro/dezembro indo até maio/junho, enquanto começa a vazar em julho/agosto até outubro/novembro. O rio leva de sete a oito meses até atingir a cota máxima e desce em apenas quatro a cinco meses. Ou seja, o tempo de descida das águas é o dobro do tempo de subida e esse fato é muito importante na dinâmica e nos processos fluviais do rio Amazonas e seus

afluentes (Sampaio, 2023). A análise das médias das cotas fluviométricas anuais da série histórica de 1995 a 2021 é possível identificar as menores cotas: 2,67 m (1995), 3,06 m (1998) e 3,91 m (2016). Entretanto, as maiores cotas foram de 5,83m (2014), 5,75 m (2021) e 5,55 m (2009) (Figura 3 B).

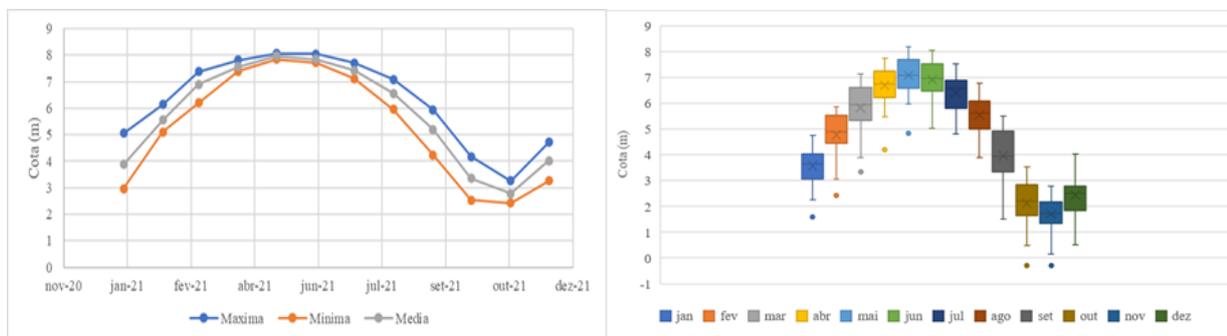


Figura 3. (A) Máxima, mínima e média de cota hidrológica do rio Amazonas em 2021. (B) Série histórica de cotas fluviométricas do rio Amazonas de 1995 a 2021.

Os dados de vazão de 2021 mostram os mesmos meses de enchente (dezembro – abril), o pico da enchente (maio) com média de 273,143,344 m³/s, a vazante (junho – outubro) e a seca (novembro) com média de 114,719,242 m³/s (Figura 4 A). As maiores médias de vazão ocorreram em 2021, onde a cheia de maio atingiu 273143,34 m³/s, em 2015 e

2019, foram respectivamente 262491,18 m³/s e 259186,28 m³/s (junho/enchente). Já as menores médias de vazão foram de 72469,31 m³/s no pico de seca em novembro de 1997 (menor da série), 76039,19 m³/s (2005) e 76624,92 m³/s em outubro/vazante (1995) (Figura 4 B).

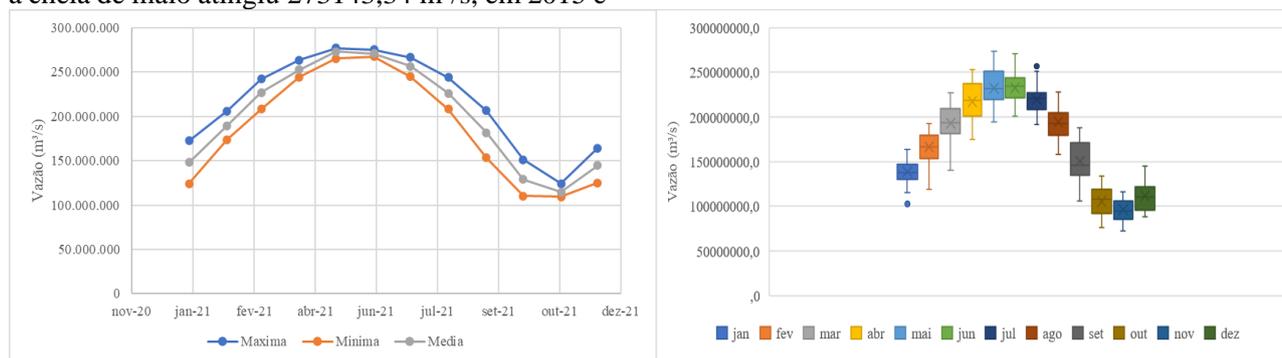


Figura 4. (A) Máxima, mínima e média de vazão em 2021 no rio Amazonas. (B) Série histórica de vazão de 1995-2021 no rio Amazonas.

Em 2021, a área de trabalho passou por um período de chuvas mais intensas entre fevereiro com 421,6 mm e março com 390,5 mm no "inverno amazônico", entre dezembro a maio, e diminuiu entre agosto com 32,9 mm e setembro com 26,1 mm, correspondendo ao "verão" regional nos meses de junho a novembro (mais seco). A máxima ocorreu em fevereiro, com 153,10 mm e a menor taxa com 11 mm em agosto (Figura 5 A). Os dados

pluviométricos da série histórica mostram o total mensal de chuvas. O maior volume de chuva ocorreu em março de 2008 com 825,10 mm, entretanto, em março de 2009 atingiu 689,20 mm, e em fevereiro de 2018 um volume de 676,10 mm. A partir da média aritmética dos valores anuais, os anos que tiveram as maiores médias anuais foram 2018 com 255,3 mm/ano, seguido de 2008 com 254,5 mm/ano e 2000 com 246,8 mm/ano. Os anos

com as menores médias anuais foram 1998 com 110,8 mm/ano, 1997 com 123,7 mm/ano e 2011 com 133,4 mm/ano (Figura 5 B).

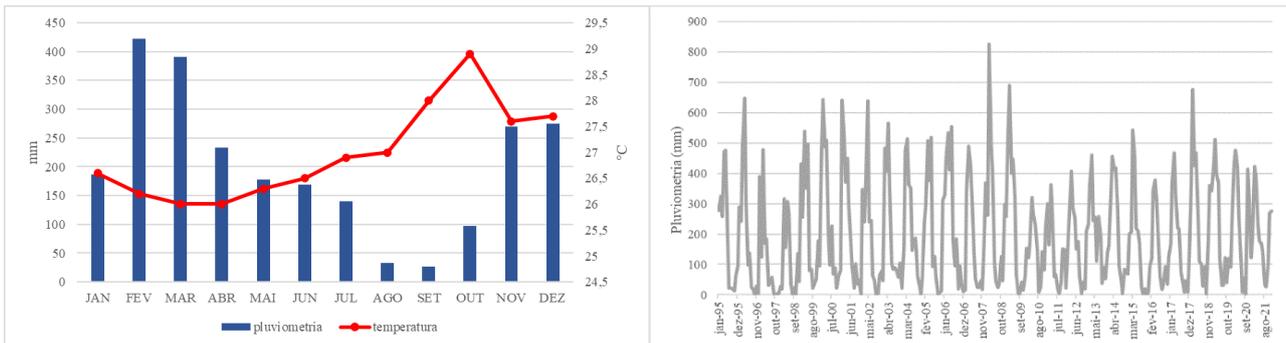


Figura 5. (A) Climograma com dados pluviométricos e de temperatura na área de trabalho em 2021. (B) Série história de pluviometria de 1995-2021 na área de trabalho.

Nos anos de 1997-1998, El Niño foi de forte intensidade e teve impacto na diminuição da cota do rio que chegou a 3,06 m em 1998, na vazão com 72469,31 m³/s em 1997 no pico de seca em novembro, e nas chuvas que atingiram uma média anual de 110,8 mm/a em 1998 e 123,7 mm/a em 1997.

El Niño de forte intensidade também aconteceu em 2015-2016 e em 2016 as cotas fluviométricas chegaram a 3,91 m, em 2015 mesmo com o El Niño, a vazão atingiu 262491,18 m³/s. Em 1994-1995 El Niño de intensidade moderada causou a diminuição das cotas (2,67 m em 1995 - menor da série histórica) e vazão de 76624,92 m³/s.

Em 2007-2008, La Niña intensidade forte influenciou o regime pluviométrico. Diante disso, em 2008, teve o maior índice em março com 825,10 mm com média anual de 254,5 mm/ano. Em 2020-2021 aconteceram La Niña de moderada intensidade que levaram em 2021 a cota em um patamar de 5,75 m, e durante a cheia de maio atingiu uma vazão de 273143,34 m³/s, a maior de toda a série histórica.

Teste de Mann-Kendall

Os resultados do teste de Mann-Kendall correspondem à análise da tendência, aplicados nas séries temporais anuais e mensais das estações pluviométrica e fluviométricas da área de estudo

onde o resultado de ρ value = 0.05, há 95% de chances dessa tendência ser verdadeira (Dias et al., 2023).

Pluviometria

Para os dados de precipitação o teste de Mann-Kendall, ajustado ao nível de significância 5% os dados de precipitação não apresentaram tendência na maioria dos seus valores médios, ou seja, para série anual e nem para a maioria dos valores mensais. O valor de p calculado para precipitação em outubro e dezembro tiveram valores maiores que a significância $\alpha = 0,05$, indicando tendências significativas para esses meses, com valor p calculado de 0.005 e 0.033, respectivamente (Tabela 3). Em outubro de 2020, choveu um total de 414,2 mm, destoando da média de dados nesse mês que é de 51,95mm. A tendência em dezembro também pode estar relacionada a índices destoantes na série histórica como em 2005 (311.1), 2008 (296.9), 2018 (360.2) e 2021 (274.8).

De acordo com Brito et al. (2022) as tendências crescentes das chuvas são suportadas por mudanças na circulação que favorecem um aumento no transporte de umidade para a Amazônia. Ainda assim, os testes permitiram observar que não há tendência ou rupturas para a maioria dos dados de precipitação anual ou mensal.

Tabela 3. Resultado dos testes Mann-Kendall para precipitação da estação pluviométrica na área de trabalho (1995 a 2021).

	Z (MK)	S	Var (S)	Valor p	Tendência
Anual	0.5837	2.9000	2.3010	0.559	NS
Janeiro	-1.1257	-55.0000	2301.0000	0.260	NS
Fevereiro	0.7921	39.0000	2301.0000	0.428	NS

Março	0.2501	1.3000	2.3010	0.802	NS
Abril	-1.1674	-57.0000	2301.0000	0.243	NS
Mai	-1.2508	-61.0000	2301.0000	0.211	NS
Junho	1.0634	52.0000	2300.0000	0.287	NS
Julho	0.2918	1.5000	2.3010	0.770	NS
Agosto	0.4586	2.3000	2.3010	0.646	NS
Setembro	0.0833	5.0000	2.3010	0.933	NS
Outubro	2.7732	134.0000	2300.0000	0.005	S+
Novembro	0.9589	47.0000	2301.0000	0.337	NS
Dezembro	2.1264	103.0000	2301.0000	0.033	S+

Nível do rio

Os resultados do teste de tendência para cotas fluviométricas mostraram que em quase todos os meses e no resultado anual, os dados apresentaram tendência significativa. Os valores de Mann-Kendall positivos indicam que a tendência apresenta padrão positivo. Porém, o mês de outubro dentro da série histórica teve como resultado o valor de p calculado de 0.196 (Tabela 4) indicando resultado sem tendência significativa

para esse mês, isto pode estar ligado ao fato de o mês estar dentro do período de seca no ano hidrológico. Nos estudos de Silva (2020) os resultados para região do baixo Amazonas verificaram tendência significativa para extremo de cheia em Óbidos. De acordo com Coutinho et al. (2020) eventos La Niña contribuem para as enchentes e fazem com que as vazões ultrapasassem os pontos de cheia.

Tabela 4. Resultado dos testes estatísticos não paramétricos para cota fluviométrica do rio Amazonas (Baixo Amazonas) (1995 a 2021).

	Z (MK)	S	Var (S)	Valor p	Tendência
Anual	2.835	137.0000	2301.0000	0.004	S+
Janeiro	3.065	148.0000	2300.0000	0.002	S+
Fevereiro	3.482	168.0000	2300.0000	0.000	S+
Março	3.127	151.0000	2301.0000	0.001	S+
Abril	2.626	127.0000	2301.0000	0.008	S+
Mai	2.626	127.0000	2301.0000	0.008	S+
Junho	3.273	158.0000	2300.0000	0.001	S+
Julho	3.232	156.0000	2300.0000	0.001	S+
Agosto	3.002	145.0000	2301.0000	0.002	S+
Setembro	2.209	107.0000	2301.0000	0.027	S+
Outubro	1.293	63.0000	2299.0000	0.196	NS
Novembro	1.897	92.0000	2300.0000	0.057	S+
Dezembro	2.564	124.0000	2300.0000	0.010	S+

Vazão

O resultado dos testes estatísticos de tendência para a vazão revelou que os períodos de enchente, cheia e o início da vazante (janeiro-agosto) apresentaram tendência com padrão positivo, porém os meses de vazante e seca (setembro-dezembro) indicaram resultado sem tendência significativa, podendo haver interferência do ano hidrológico nos resultados de análise de tendência. Ainda assim, a tendência anual de vazão da série histórica é positiva com valor de p calculado em 0.005 (Tabela 5).

De acordo com Dias et al. (2023) mostrou que as estações apresentaram um aumento da vazão média com tendência significativa positiva. Dias et al. (2023) afirma ainda que há um aumento no escoamento hídrico após o processo de desmatamento. O desmatamento, em sua fase inicial, resulta no aumento da descarga fluvial devido ao acréscimo no escoamento superficial e à redução da taxa de infiltração nas áreas compactadas pela ausência de vegetação. Essa diminuição impacta no sistema solo-planta da

região Amazônica, diminui a evapotranspiração e interfere nos componentes do balanço hídrico.

Tabela 5. Resultado dos testes estatísticos não paramétricos para vazão na área de trabalho (1995 a 2021).

	Z (MK)	S	Var (S)	Valor p	Tendência
Anual	2.751	133.0000	2301.0000	0.005	S+
Janeiro	1.792	87.0000	2301.0000	0.073	S+
Fevereiro	2.793	135.0000	2301.0000	0.005	S+
Março	2.626	127.0000	2301.0000	0.008	S+
Abril	2.710	131.0000	2301.0000	0.006	S+
Mai	3.002	145.0000	2301.0000	0.002	S+
Junho	3.210	155.0000	2301.0000	0.001	S+
Julho	3.085	149.0000	2301.0000	0.002	S+
Agosto	2.293	111.0000	2301.0000	0.021	S+
Setembro	1.334	65.0000	2301.0000	0.182	NS
Outubro	0.667	3.3000	2.3010	0.504	NS
Novembro	0.917	45.0000	2301.0000	0.359	NS
Dezembro	1.125	55.0000	2301.0000	0.260	NS

Embora o estudo apresente indicadores positivos em relação, principalmente, aos índices fluviométricos, é necessário levar em consideração que a Amazônia Legal além de sofrer com as mudanças climáticas, sofre, também, com a expansão do arco do desflorestamento. No caso das mudanças climáticas, as projeções de variáveis climáticas apresentaram cenários desfavoráveis. Na Amazônia, as projeções indicam condições mais secas em relação ao período histórico (Costa et al., 2023).

Diante desse cenário, é necessário continuar a analisar os índices de vazão e, principalmente, as vazões mínimas de referência. É a vazão que deve ser mantida no rio para atender a requisitos mínimos dos ecossistemas aquáticos além dos usos de recursos hídricos que devem ser preservados a jusante da intervenção no corpo de água (Costa et al., 2023).

Considerações finais

Os eventos de El Niño e La Niña estão relacionados a efeitos no regime hidrológico e pluviométrico como pode ser observado na análise das séries históricas.

O presente artigo demonstrou a efetividade dos métodos estatísticos na consolidação de respostas para análise de alterações, sendo possível afirmar que ocorreram tendências positivas crescentes na vazão e no nível dos rios registrado na área de trabalho.

Os resultados dos testes de tendências constataram que para precipitação não há tendência estatística significativa, apenas variações ocorridas em anos com atuação de La Niña. Para os dados de vazão e nível do rio, as tendências foram significativas positivas crescentes, onde os meses que se apresentaram sem tendência significativa estão relacionados a meses de seca no ano hidrológico.

O entendimento dos potenciais cenários climático-hidrológicos futuros, juntamente com suas incertezas associadas, pode desempenhar um papel crucial na projeção das futuras necessidades hídricas. Além disso, esse conhecimento pode orientar a formulação de políticas ambientais para o uso e gestão sustentável da água no futuro. Deve-se direcionar esforços para abordar a crise climática com o intuito de proteger as populações, com especial atenção às mais vulneráveis.

Agradecimentos

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e ao Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da UFPA.

Referências

- Aleixo, N. C. R., & Almeida Filho, L. S. (2022). Tendências climáticas em Coari - AM. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15 (05). 2601-2612. DOI:

- <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2601-2612>
- ANA, Agência Nacional de Águas. (2022). Portal HidroWeb. <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/mapa>
- Brito, A. P., Silva, N. C., Tomasella, J., Ferreira, S. J. F., & Monteiro, M. T. F. (2022). Análise do índice de Anomalia de Chuva e Tendência de Precipitação para Estações Pluviométricas na Amazônia Central. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 37, n. 1, 19-30. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863701452>
- Coutinho, E. de C., da Rocha, E. J. P., Lima, A. M. M., & Ribeiro, H. M. C. (2020). Variabilidade do regime hidrológico da Bacia Amazônica. *Boletim De Geografia*, 37(2), 129-147. <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v37i2.38424>
- Cevalho, W., Andreoli, R. V., Cerón, W. L., de Oliveira, M. B. L., Mamani-Jimenez, L. C., Souza, R. A. F. de, & Kayano, M. T. (2024). Frequência de Eventos Extremos Diários de Precipitação em Manaus – AM e Suas Relações com o El Niño-Oscilação Sul. *Revista Brasileira De Geografia Física*, 17(1), 84–99. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.1.p84-99>
- Costa, G. K. L., Blanco, C. J. C., Soares, A. C. L., Cruz, J. S., & Mendonça, L. M. (2023). 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*, 20, e6. <https://doi.org/10.21168/reg.v20e6>
- CPRM (2021). Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Vazão do rio Amazonas em Óbidos (PA) confirma cotas recordes em 2021. <https://www.cprm.gov.br/publique/Noticias/Vazao-do-rio-Amazonas-em-Obidos-%28PA%29-confirma-cotas-recordes-em-2021-6849.html>
- Dias, L. C., Fernandes, L. L., Lira, B. R. P., Ishihara, J. H., Pessoa, F. C. L., & Sales, L. G. de L. (2023). Análise da tendência de séries históricas de vazão na bacia hidrográfica do rio Amazonas. *Revista AIDIS De Ingeniería Y Ciencias Ambientales. Investigación, Desarrollo Y práctica*, 16(1), 154–175. <https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2023.16.1.82116>
- Dubreuil, V.; Fante, K. P.; Planchon, O.; Sant'anna Neto, J. L. (2018) Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. *CONFINS (PARIS)*. 37. 1-40.
- Ferreira, L. C. V., Batista, G. R., Costa, C. E. A. de S., Miranda, S. B. de A. de., Dias, G. F. de M. (2022). Os índices de anomalia de chuva e sua relação com o El Niño oscilação sul na bacia hidrográfica do rio Tapajós. *Research, Society and Development*, 11(17), e169111738004. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i17.38004>
- GOLDEN GATE WEATHER SERVICES. El Niño and La Niña years and Intensities – Based on Oceanic Niño Index (ONI). Disponível em: <https://ggweather.com/enso/oni.htm?fbclid=IwAR0dvxYhcKKy4x1B7T8N9Zd5-RULCzt4XmUz_myg4U4v1w74d_ACIVIMm>. Acesso em nov. 2022.
- Guedes, V. M. (2020). Dinâmica do carbono e nitrogênio dissolvidos na região do Baixo Rio Amazonas. [Dissertação de Mestrado]. Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação Tecnológica, Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia da Universidade Federal do Oeste do Pará.
- Lira, B. R. P.; Lopes, L. N. A.; Chaves, J. R.; Santana, L. R.; Fernandes, L. L. (2020). Identificação de Homogeneidade, Tendência e Magnitude da Precipitação em Belém (Pará) entre 1968 e 2018. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*. 43. 426-439.
- Nittrouer, C. A.; Demaster, D. J.; Kuehl, S. A.; Figueiredo, A. G.; Sternberg, R. W.; Faria, L. E. C.; Silveira, O. M.; Allison, M. A.; Kineke, G. C.; Ogston, A. S.; Souza Filho, P. W. M.; Asp, N. E.; Nowacki, D. J.; Fricke, A. T. (2021). Amazon Sediment Transport and Accumulation Along the Continuum of Mixed Fluvial and Marine Processes. *Annual Review of Marine Science*. 13. 501-536. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010816-060457>
- Oliveira, A. V. de; Serrano, R. O. P; Mesquita, A. A.; Moreira, J. G. do V. (2021). Temporal Trend and Estimation of the Hydrological Risk of Maximum Rainfall and Flow Extremes in the City of Rio Branco, Acre, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 36. 749-758.
- Rocha, P., & dos Santos, A. (2018). Hydrological analysis in water basins. *Mercator*, 17. doi:10.4215/rm2018.e17025
- Sampaio, R. S. (2023). Influência hidrológica na dinâmica multi-temporal (1995-2021) da linha fluvial na região de Santarém (Baixo Amazonas/Pará). [Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Pará]. Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da UFPA.

SANTARÉM. (2019). Revisão do plano municipal de saneamento básico de Santarém - 2020 – 2023. https://transparencia.santarem.pa.gov.br/storage/midias/anexos/86_plano_municipal_de_saneamento_2020-2023_semdec-seminfra-versao_final_2.pdf

Silva, N. C. (2020). Eventos extremos na Amazônia e seus efeitos na dinâmica hidrológica do rio e lagos de várzea amazônicos

[Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia]. Repositório do INPA. <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/36427>
Souza, C. A.; & Reboita, M. S. (2021) Ferramenta para o Monitoramento dos Padrões de Teleconexão na América do Sul. *Terra e Didática*, Campinas, SP. 17 (00), p. e02109. <https://doi.org/10.20396/td.v17i00.8663474>