



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ  
PRO-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO TECNOLÓGICA  
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA**

**RAFAEL CORRÊA MUNIZ**

**VARIAÇÃO INTRA E INTERANUAL DE CÁTIIONS DISSOLVIDOS E  
ELEMENTOS TRAÇO NO CANAL PRINCIPAL DO RIO AMAZONAS, ÓBIDOS-  
PARÁ**

**SANTARÉM-PA  
2023**

**RAFAEL CORRÊA MUNIZ**

**VARIAÇÃO INTRA E INTERANUAL DE CÁTIIONS DISSOLVIDOS E  
ELEMENTOS TRAÇO NO CANAL PRINCIPAL DO RIO AMAZONAS, ÓBIDOS-  
PARÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação  
Stricto Sensu em Recursos Naturais da Amazônia como  
parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em  
Ciências Ambientais; UFOPA; Área de concentração:  
Ciências Ambientais  
Orientador Dr. José Mauro Sousa de Moura

**SANTARÉM-PA  
2023**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA**

---

M966v    Muniz, Rafael Corrêa  
          Variação intra e interanual de cátions dissolvidos e elementos traço no canal principal do Rio Amazonas, Óbidos - Pará./ Rafael Corrêa Muniz. - Santarém, 2023.  
          42 p. : il.  
          Inclui bibliografias.

Orientador: José Mauro Sousa de Moura.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Engenharia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia.

1. Hidrografia. 2. Elementos químicos. 3. Pulso de inundação. I. Moura, José Mauro Sousa de, *orient.* II. Título.

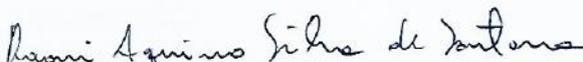
CDD: 23 ed. 551.48098115



Universidade Federal do Oeste do Pará  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS NATURAIS DA  
AMAZÔNIA

ATA Nº 170

Aos 05 (cinco) dias do mês de agosto de 2022 (dois mil e vinte e dois), às 09h00, no Auditório NTB Campus Tapajós, realizou-se a sessão de defesa pública da dissertação ao grau de mestre em Ciências Ambientais - área de concentração Estudos e Manejos de Ecossistemas Amazônicos, de autoria de Rafael Corrêa Muniz, intitulada VARIACÃO INTRA E INTERANUAL DE CÁTIONS DISSOLVIDOS E ELEMENTOS TRAÇOS NO CANAL PRINCIPAL DO RIO AMAZONAS PARA, ÓBIDOS- PARÁ. A Banca Examinadora constituiu-se por: RODRIGO DA SILVA (UFOPA - Examinador Interno); RAONI AQUINO SILVA DE SANTANA (UFOPA - Examinador Externo ao Programa); DIANI FERNANDA DA SILVA LESS (UFOPA - Examinadora Externa ao Programa). Seguindo o regimento interno do curso, o presidente da banca Dr. José Mauro Sousa de Moura (Orientador) abriu a sessão, passando a palavra para o mestrando, que fez a exposição do seu trabalho. Findada a arguição, a banca examinadora se reuniu, sem a presença do candidato e do público, tendo deliberado por sua:  APROVAÇÃO, condicionada às correções sugeridas pela Banca Examinadora e entrega da versão corrigida no prazo de 30 dias; ( ) REPROVAÇÃO, condicionada as correções sugeridas pela Banca Examinadora e reapresentação da dissertação no prazo de 60 dias. Nada mais havendo por constar, lavrou-se e fez-se a leitura da presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora, Presidente (orientador) e mestrando. Santarém-PA. 05 de agosto de 2022.

  
Dr. RAONI AQUINO SILVA DE SANTANA, UFOPA

Examinador Externo ao Programa

  
Dra. DIANI FERNANDA DA SILVA LESS, UFOPA

Examinadora Externa ao Programa

  
Dr. RODRIGO DA SILVA, UFOPA

Examinador Interno

  
Dr. JOSÉ MAURO SOUSA DE MOURA, UFOPA

Presidente

RAFAEL CORRÊA MUNIZ

Mestrando

## DEDICATÓRIA

*Aos meu pais: Ronildo de Lima Muniz e  
Ana Aparecida Corrêa Muniz, por todo  
amor incondicional e educação.*

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

Gostaria de agradecer:

A minha mãe Ana Aparecida Corrêa Muniz, pois graças ao apoio dela que consegui chegar até este ponto me ajudando em cada dificuldade que passei.

A minha namorada Jeniffer Gomes da Silva por estar ao meu lado ao longo desses anos, ter passado por diversas fases comigo e estar sempre pronta a me dar suporte e ajudar no que fosse necessário.

Ao meu orientador José Mauro Sousa de Moura pela amizade, conhecimento adquirido desde a graduação até o presente momento, paciência e principalmente incentivo ao longo de todos esses anos.

A professora Adelaine Michela e Silva Figueira pelo apoio e cuidados ao longo de todos esses anos sempre recebendo as más notícias de problemas em campo e sempre disposta a ajudar o mais rápido possível.

Ao professor Rodrigo da Silva pelo apoio desde a graduação e incentivo nas mais diversas áreas de pesquisa sempre pronto para ensinar e aconselhar.

Ao meu amigo Alan da Silva Magalhães pelo apoio nos campos desde a época da graduação e pela amizade de tantos anos.

A minha amiga Irene Cibelle Gonçalves Sampaio por todo apoio e ensinamentos.

Aos colegas e amigos do laboratório de Física e Química da Atmosfera.

Ao programa de Pós-Graduação em Recursos Naturais da Amazônia-PPGRNA.

Ao projeto PEER pela capacitação em outras áreas de pesquisa e serviço técnico.

## RESUMO

Este estudo tem como objetivo analisar as concentrações e variações de cátions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) e elementos traço ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ , U) nas águas do rio Amazonas, próximo a cidade de Óbidos durante os anos de 2012 e 2013. O ponto de coleta abarca 69% de toda a bacia, cerca de 4,67 milhões de  $\text{km}^2$  a montante. De forma a cobrir toda a heterogeneidade do rio e de seus afluentes, as amostras foram coletadas em um transecto do rio, em 3 pontos diferentes e igualmente espaçados a uma profundidade de 0,5 metros, mensalmente. As análises químicas das amostras foram realizadas através de Espectrometria de Massa com Fonte de Plasma (ICP-MS). Os resultados mostraram que durante o período de estudo houve uma abundância do cátion  $\text{Ca}^{2+}$  seguindo uma ordem de predominância  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ . Todas as concentrações de cátions variaram conforme o pulso de inundação do rio apresentando, na sua maioria, picos de concentrações no período da Enchente e baixas concentrações no período da Vazante do rio. Os elementos traço seguiram, em sua maioria, a tendência dos cátions apresentando seus maiores e menores valores nos períodos transitórios do rio. Sua ordem de predominância foi para  $\text{Sr}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Li}^+ > \text{Rb}^+ > \text{U}$ . As fases da hidrógrafa (Enchente, Cheia, Vazante e Seca) apresentaram diferenças significativas para as concentrações dos compostos estudados mostrando que existem variações intra-anual nas concentrações dos elementos no rio, porém, o mesmo resultado não foi significativo para a variação entre os anos de estudo mantendo uma estabilidade da concentração interanual. Portanto, a variação na descarga do rio ao longo do ano altera a concentração dos compostos fazendo-se importante para entender a dinâmica desses íons e modelagem de fluxo desses elementos para o rio.

**Palavras-chave:** Hidrografia. Elementos Químicos. Pulso de inundação.

## ABSTRACT

This study aims to analyze the concentrations and variations of cations ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) and trace elements ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ , U) in the waters of the Amazon River, near the city of Óbidos during the years of 2012 and 2013. The sampling points cover 69% of the entire basin, around 4.67 million  $\text{km}^2$  upstream. In order to cover all the heterogeneity of the river and its tributaries, the samples were collected in a transect of the river, in 3 different points and equally spaced at a depth of 0.5 meters, monthly. Chemical analyzes of the samples were performed using Plasma Source Mass Spectrometry (ICP-MS). The results showed that during the study period there was an abundance of  $\text{Ca}^{2+}$  cation following an order of predominance  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ . All cation concentrations varied according to the flood pulse of the river, presenting, for the most part, peaks of concentration in the flood periods and lower concentrations for the river ebb period. The trace elements followed, for the most part, the tendency of the cations, presenting their highest and lowest values in the transitory periods of the river, between the flood and the dry season. Its order of predominance was for  $\text{Sr}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Li}^+ > \text{Rb}^+ > \text{U}$ . The phases of the hydrograph (Flood, Full, Ebb and Dry) showed significant differences for the concentrations of the studied compounds showing that there are intra-annual variation in element concentrations in the river, but the same result was not significant for the variation between the years of study maintaining a stability of the interannual concentration. Therefore, the seasonality present in the Amazon River alters the concentration of compounds making it important to understand the dynamics of these ions and modeling the flow of these elements to the river.

**Keywords:** Hydrography. Chemical Elements. Flood pulse.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Localização dos pontos de coleta no canal principal do rio Amazonas, próximo a cidade de Óbidos. Os três pontos mostrados no mapa são igualmente espaçados de forma a obter uma gama mais heterogênea das águas do rio.....	14
<b>Figura 2</b> - Variação da vazão ao longo dos anos de 2012 e 2013 para estação 17050001- Óbidos. ....	17
<b>Figura 3</b> - Variações dos parâmetros físico-químicos ao longo de 2 anos de coletas. ....	20
<b>Figura 4</b> - Variações dos cátions ao longo de 2 anos de coletas no canal principal do rio Amazonas.. ....	22
<b>Figura 5</b> - Relação entre as concentrações de cátions e a vazão do rio através do coeficiente de Sperman. ....	24
<b>Figura 6</b> - Variações de elementos traço ao longo de 2 anos de coletas no rio Amazonas, estreito de Óbidos.....	26
<b>Figura 7</b> - Variações do componente catiônicos seguindo como base as fases da hidrógrafa (Enchente, Cheia, Vazante, Seca) para os anos de 2012 e 2013. ....	30
<b>Figura 8</b> - Variações dos elementos traço seguindo como base as fases da hidrógrafa (Enchente, Cheia, Vazante, Seca) para os anos de 2012 e 2013.....	31

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Estatística descritiva das vazões para o período de estudo e para a vazão histórica utilizando 30 anos de dados do local de estudo. Os valores foram utilizados para a classificação dos meses dentro de determinado período hidrológico. ....	16
<b>Tabela 2</b> - Diferenças entre a sazonalidade da região (C- Cheia, E- Enchente, V- Vazante, S- Seca), utilizando o teste de Dunn para os anos de 2012 e 2013. Os valores descrevem o teste de post-hoc Dunn para p.ajustado. ....	28

## SUMÁRIO

<b>ARTIGO 1 - VARIAÇÃO INTRA E INTERANUAL DE CÁTIOS DISSOLVIDOS E ELEMENTOS TRAÇO NO CANAL PRINCIPAL DO RIO AMAZONAS, ÓBIDOS-PARÁ.....</b>	<b>10</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>LOCAL DE ESTUDO .....</b>	<b>12</b>
<b>DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO .....</b>	<b>13</b>
<b>SAZONALIDADE .....</b>	<b>15</b>
<b>ANÁLISE ESTATÍSTICA .....</b>	<b>16</b>
<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>17</b>
<b>Configuração hidrológica e parâmetros <i>in situ</i> .....</b>	<b>17</b>
<b>Íons dissolvidos na forma de cátions .....</b>	<b>21</b>
<b>Elementos traço .....</b>	<b>25</b>
<b>Variação intra e interanual.....</b>	<b>28</b>
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>32</b>
<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>32</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>33</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>38</b>

# VARIAÇÃO INTRA E INTERANUAL DE CÁTIOS DISSOLVIDOS E ELEMENTOS TRAÇO NO CANAL PRINCIPAL DO RIO AMAZONAS, ÓBIDOS- PARÁ

Intra and Interannual Variation of Dissolved Cation and Trace Elements in the Main Channel of the Amazonas River, Óbidos-Pará

## Rafael Corrêa Muniz

Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil  
[rafaelmuniz.cc@gmail.com](mailto:rafaelmuniz.cc@gmail.com)

## José Mauro Sousa de Moura

Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil  
[jmaurosm@gmail.com](mailto:jmaurosm@gmail.com)

## Irene Cibelle Gonçalves Sampaio

Universidade Federal do Oeste do Pará, Brasil  
[irenecibelle@hotmail.com](mailto:irenecibelle@hotmail.com)

## Resumo

Este estudo tem como objetivo analisar as concentrações e variações de cátions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) e elementos traço ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ , U) nas águas do rio Amazonas, próximo a cidade de Óbidos durante os anos de 2012 e 2013. O ponto de coleta abarca 69% de toda a bacia, cerca de 4,67 milhões de  $\text{km}^2$  a montante. De forma a cobrir toda a heterogeneidade do rio e de seus afluentes, as amostras foram coletadas em um transecto do rio, em 3 pontos diferentes e igualmente espaçados a uma profundidade de 0,5 metros, mensalmente. As análises químicas das amostras foram realizadas através de Espectrometria de Massa com Fonte de Plasma (ICP-MS). Os resultados mostraram que durante o período de estudo houve uma abundância do cátion  $\text{Ca}^{2+}$  seguindo uma ordem de predominância  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ . Todas as concentrações de cátions variaram conforme o pulso de inundação do rio apresentando, na sua maioria, picos de concentrações no período da Enchente e baixas concentrações no período da Vazante do rio. Os elementos traço seguiram, em sua maioria, a tendência dos cátions apresentando seus maiores e menores valores nos períodos transitórios do rio, entre a Cheia e a Seca. Sua ordem de predominância foi para  $\text{Sr}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Li}^+ > \text{Rb}^+ > \text{U}$ . As fases da hidrógrafa (Enchente, Cheia, Vazante e Seca) apresentaram diferenças significativas para as concentrações dos compostos estudados mostrando que existem variações intra-anual nas concentrações dos elementos no rio, porém, o mesmo resultado não foi significativo para a variação entre os anos de estudo mantendo uma estabilidade da concentração interanual. Portanto, a variação na descarga do rio ao longo do ano altera a concentração dos compostos fazendo-se importante para entender a dinâmica desses íons e modelagem de fluxo desses elementos para o rio.

**Palavras-chave:** Hydrography, Chemical Elements, Flood pulse.

1 O artigo apresentado foi redigido conforme as diretrizes de submissão da revista Caderno de Geografia. As normas indicadas para a redação de artigos pela revista estão disponíveis no link: <http://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/about/submissions>.

## Abstract

This study aims to analyze the concentrations and variations of cations ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) and trace elements ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ , U) in the waters of the Amazon River, near the city of Óbidos during the years of 2012 and 2013. The sampling points cover 69% of the entire basin, around 4.67 million  $\text{km}^2$  upstream. In order to cover all the heterogeneity of the river and its tributaries, the samples were collected in a transect of the river, in 3 different points and equally spaced at a depth of 0.5 meters, monthly. Chemical analyzes of the samples were performed using Plasma Source Mass Spectrometry (ICP-MS). The results showed that during the study period there was an abundance of  $\text{Ca}^{2+}$  cation following an order of predominance  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ . All cation concentrations varied according to the flood pulse of the river, presenting, for the most part, peaks of concentration in the flood periods and lower concentrations for the river ebb period. The trace elements followed, for the most part, the tendency of the cations, presenting their highest and lowest values in the transitory periods of the river, between the flood and the dry season. Its order of predominance was for  $\text{Sr}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Li}^+ > \text{Rb}^+ > \text{U}$ . The phases of the hydrograph (Flood, Full, Ebb and Dry) showed significant differences for the concentrations of the studied compounds showing that there are intra-annual variation in element concentrations in the river, but the same result was not significant for the variation between the years of study maintaining a stability of the interannual concentration. Therefore, the seasonality present in the Amazon River alters the concentration of compounds making it important to understand the dynamics of these ions and modeling the flow of these elements to the river.

**Keywords:** Hydrography, Chemical Elements, Flood pulse.

## INTRODUÇÃO

A região hidrográfica do rio Amazonas percorre uma área de aproximadamente 7 milhões de quilômetros quadrados ocupando cerca de 3,8 milhões de quilômetros quadrados do território nacional. Tem como principal fluxo de água o rio Amazonas que lança suas águas no Oceano Atlântico ao nível da linha do equador, aproximadamente na longitude de  $50^\circ$  W. A nascente do rio Amazonas localiza-se nos Andes Peruanos, estabelecendo no Brasil cerca de 63,88% de seu território, seguido de 16,14% na Colômbia, 15,16% na Bolívia, 2,31% no Equador, 1,35% na Guiana, 0,60% no Peru e 0,11% na Venezuela (FILIZOLA *et al.*, 2002; FILIZOLA *et al.*, 2009; MARTINELLI *et al.*, 1989; MOLINIER *et al.*, 1995).

O rio Amazonas é formado pela junção de dois rios Ucayali e Maranhão, ambos localizados no Peru. É o rio mais caudaloso do mundo drenando áreas de floresta tropical, floresta de várzea, montes, regiões de savana e transportando grandes quantidades de constituintes para o oceano Atlântico (GAILLARDET *et al.*, 1997).

Grande porção do rio está localizada geologicamente em planícies sedimentares amazônicas, sendo limitada ao norte e sul por dois escudos pré-cambrianos (Planalto das Guianas e Planalto Brasileiro) de composição ígneas e metamórficas, sendo um dos fatores

responsáveis pela variabilidade das características químicas e físicas dos diversos rios da bacia amazônica (Molinier *et al.*, 1996; Moreira-Turcq *et al.*, 2003).

O sistema integrado de diversos processos que ocorrem ao longo do canal principal e seus tributários refletem na disponibilidade de elementos principais na forma de íons e elementos traço, estes regidos pela geologia da bacia hidrográfica, taxas de intemperismo químico e hidrológico que ocorrem na bacia (WOHL, 2020). Para Sanchez *et al.* (2015), as águas do canal principal do rio Amazonas podem ser classificadas como cálcico-bicarbonatadas, tendo maiores concentrações a montante e sendo diluídas em direção a jusante. Esse regime de concentrações é regido pela hidrografia do rio e o clima da região. Para Mortatti e Probst (2002), utilizando dados do CAMREX, observou que 64% dos elementos dissolvidos no rio tem origem Andina, com uma carga de 6,0% para  $\text{Ca}^{2+}$ , 3,7% para  $\text{Mg}^{2+}$ , 13,8% para  $\text{Na}^+$  e 32,2% para K, sendo de origem atmosférica.

Sanchez *et al.* (2015), discorrem em seu trabalho a grande gama de pesquisas na região com amostragens pontuais ao longo do ano, mostrando uma falta de monitoramento contínuo da química da água. Amostragens pontuais podem refletir aspectos circunstanciais ao longo das mudanças sazonais do rio.

Assim, o objetivo deste estudo foi determinar a variação intra e interanual da concentração de íons dissolvidos ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) e elementos traço ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ , U) no canal principal do rio Amazonas próximo a cidade de Óbidos, para os anos de 2012 e 2013.

## LOCAL DE ESTUDO

O local de estudo compõe-se de um transecto do rio Amazonas localizado próximo (cerca de 4 km) à cidade de Óbidos, no Oeste do estado do Pará. O ponto de coleta abarca 69% de toda a bacia, cerca de 4,67 milhões de  $\text{km}^2$  a montante. A região possui uma condição de estreitamento que integra os fluxos dos afluentes a montante, sendo um ponto estratégico de pesquisa (RONCHAIL *et al.*, 2006)

O canal principal do rio Amazonas possui aproximadamente 6.500 km de extensão. Destes, cerca de 3.200 km estão integrados ao território brasileiro. Sua nascente localiza-se nos Andes peruanos com o nome de Marañón, dividindo-se, no Brasil, entre os trechos próximos a Tabatinga (Amazonas) até a confluência com o rio Negro, denominado Solimões e outro próximo a Manaus (Amazonas), o qual consiste no canal principal que deságua no oceano atlântico. É um rio de planícies que apresenta baixa declividade (AHIMOR, 2011).

Considerado o maior rio do mundo, possui uma descarga estimada em  $200.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , cerca de 73% de toda vazão do Brasil. Somente a bacia do rio Solimões contribui com 49% dessa descarga, seguido do rio Madeira com 15% e rio Negro com 14% (ANA, 2018). Em termos de grandeza, o rio Amazonas e o rio Congo, na África, representam cerca de 60% da descarga de água doce no oceano atlântico (PROBST *et al.*, 1994).

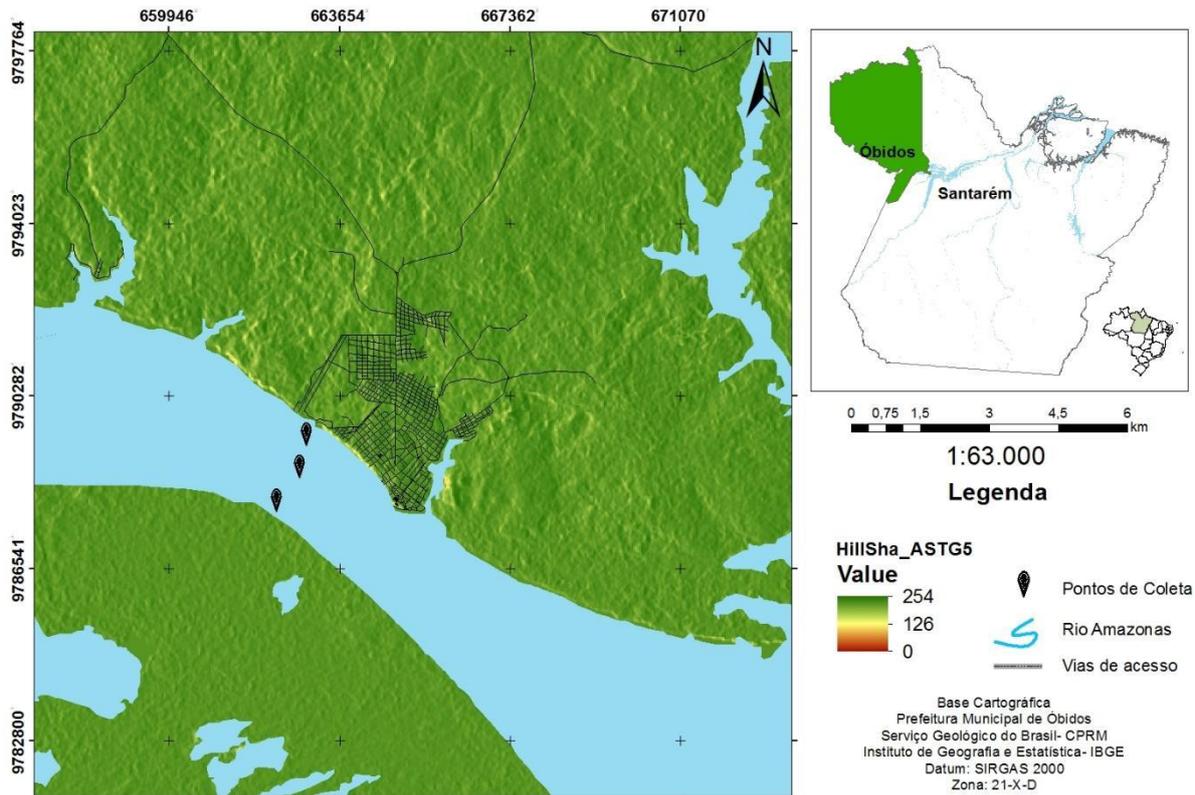
O clima da bacia hidrográfica amazônica, na porção do Brasil, é considerado de úmido a superúmido, com taxas elevadas de precipitação variando em torno de 2.460 mm. As duas estações características da região enquadram-se em Seca, com precipitações inferiores a 100 mm/mês, e estação chuvosa, com precipitação superior a 200 mm/mês (REBOITA *et al.*, 2010).

Na porção central do rio Amazonas, a evapotranspiração da floresta recicla 50% da água precipitada (SALATI e MARQUES, 1984). O clima da região é uma junção de diversos fatores, sendo o balanço de energia solar e a disponibilidade de energia parte dos principais responsáveis. Os altos valores de energia solar em toda a região fazem com que amplitude térmica varie entre 1-2 °C, com valores médios entre 24 e 26 °C (ROCHA, 2017).

Stallard e Edmond (1983), descrevem que a bacia hidrográfica do rio Amazonas drena diferentes formações geológicas, divididas em 3 zonas morfoestruturais. Zona pré-cambriana, que compõe os escudos das Guianas e Brasil Central de rochas metamórficas e ígneas; Cordilheira dos Andes, de rochas carbonáticas e evaporitos; Calha Amazônica com depósitos fluviais do Pleistoceno e sedimentos do Terciário.

## DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO

Durante os anos de 2012 e 2013 foram realizadas coletas mensais de água, utilizando uma pequena embarcação, no curso principal do rio Amazonas, próximo a cidade de Óbidos, nas coordenadas em UTM 662608.13 E 9788675.15 S (Figura 1). De forma a abarcar toda a heterogeneidade do rio e de seus afluentes, as amostras foram coletadas em um transecto do rio, em 3 pontos diferentes e igualmente espaçados, a uma profundidade de 0,5 metros. Foram coletados 4 litros de água, sendo que, 2 litros foram retirados do ponto central do rio, 1 litro da margem esquerda e 1 litro da margem direita, e armazenados em um garrafão de HDPE (*high-density polyethylene*-polietileno de alta densidade).



**Figura 1** - Localização dos pontos de coleta no canal principal do rio Amazonas, próximo a cidade de Óbidos. Os três pontos mostrados no mapa são igualmente espaçados de forma a obter uma gama mais heterogênea das águas do rio.

**Fonte:** Autor, 2023.

A amostra composta foi transportada em uma caixa de isopor refrigerada durante o deslocamento ao laboratório. No laboratório de química da Universidade Federal do Oeste do Pará, a amostra foi filtrada utilizando uma bomba peristáltica (*Geopump- Geotech*) com tubos de silicone, previamente limpos, acoplados a filtros de cápsula de 0,45  $\mu\text{m}$  (*Geotech Filter*). Do total de água filtrada, 125 ml foram armazenadas sob refrigeração para análise de cátions principais e elementos traço nas instalações do instituto de pesquisa *WoodWell Climate, Massachusetts* – Estados Unidos.

As análises de cátions principais ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) e elementos traço ( $\text{Li}^+$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Rb}^+$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ , U) foram realizadas por uma espectrometria de massa com fonte de plasma (ICP-MS), de segmento único, o qual cobre a faixa de concentração de mg/L a pg/L de uso em laboratórios de geoquímica e de ciências de materiais. O método de análise seguiu os realizados por Voss *et al.* (2014), Brown *et al.* (2020). Para a verificação da concentração destes compostos, aproximadamente 1,8 ml dos materiais amostrados foram inseridos em frascos de amostrador automático de capacidade de 2 ml, para serem centrifugados por 10 minutos a uma rotação por minuto de 7000. Para ajuste de pH, necessário para obtenção das concentrações, foi utilizado 1 ml pipetado em outro amostrador e adicionado soluções

para diminuição do pH para  $\leq 2$ . Os padrões do ICP-MS foram ajustados para isótopos de escândio, índio e urânio para intensidades máximas de feixe de íons estáveis. A calibração das concentrações foi feita utilizando curvas de diluições em série de NIST 1640a e SLRC-5 (Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá). Os resultados analíticos foram corrigidos para desvio e interferências com variação de  $\pm 5\%$ .

As medidas de parâmetros físico-químicos foram observadas *in situ* utilizando uma sonda multiparamétrica YSI Professional Plus. Entre os parâmetros observados estão: Temperatura da água ( $^{\circ}\text{C}$ ); Oxigênio Dissolvido ( $\text{mg/L}$ ); Condutividade ( $\mu\text{S/cm}$ ) e pH.

## **SAZONALIDADE**

Os dados de precipitação de Óbidos, foram obtidos através do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados de vazão foram obtidos através do Portal HidroWeb, ferramenta integrada ao Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), utilizando a estação 17050001, localizada próximo ao porto hidroviário da cidade de Óbidos. Os dados de precipitação e vazão foram utilizados para determinação dos períodos hidrológicos da região (Cheia, Seca, Enchente, Vazante) através do método de quarteamento utilizando como base os valores de  $200.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  e  $100.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  para determinação da periodicidade da região (Tabela 1).

**Tabela 1** - Estatística descritiva das vazões para o período de estudo e para a vazão histórica utilizando 30 anos de dados do local de estudo. Os valores foram utilizados para a classificação dos meses dentro de determinado período hidrológico.

Fonte: Autor, 2023.

	<b>Sazonalidade</b>	<b>vazão mensal 2012-2013</b>	<b>Vazão média histórica 30 anos</b>
<b>Média</b>	Cheia	239815	217047
	Enchente	163980	155784
	Seca	106532	106626
	Vazante	178939	169040
<b>Mediana</b>	Cheia	241526	222528
	Enchente	166450	163596
	Seca	105670	106626
	Vazante	184786	169040
<b>Desvio Padrão</b>	Cheia	8847	7160
	Enchente	45202	27206
	Seca	19974	5619
	Vazante	26540	21990
<b>Mínimo</b>	Cheia	225961	208466
	Enchente	94122	114267
	Seca	85304	101759
	Vazante	145363	149996
<b>Máximo</b>	Cheia	251634	222933
	Enchente	222933	186894
	Seca	129486	111492
	Vazante	200822	188083

<b>Cheia</b>											
<b>Enchente</b>			Abril	Maio	Junho	Julho	<b>Vazante</b>			<b>Enchente</b>	
Janeiro	Fevereiro	Março				Agosto	Setembro	<b>Seca</b>		Dezembro	
								Outubro	Novembro		

## ANÁLISE ESTATÍSTICA

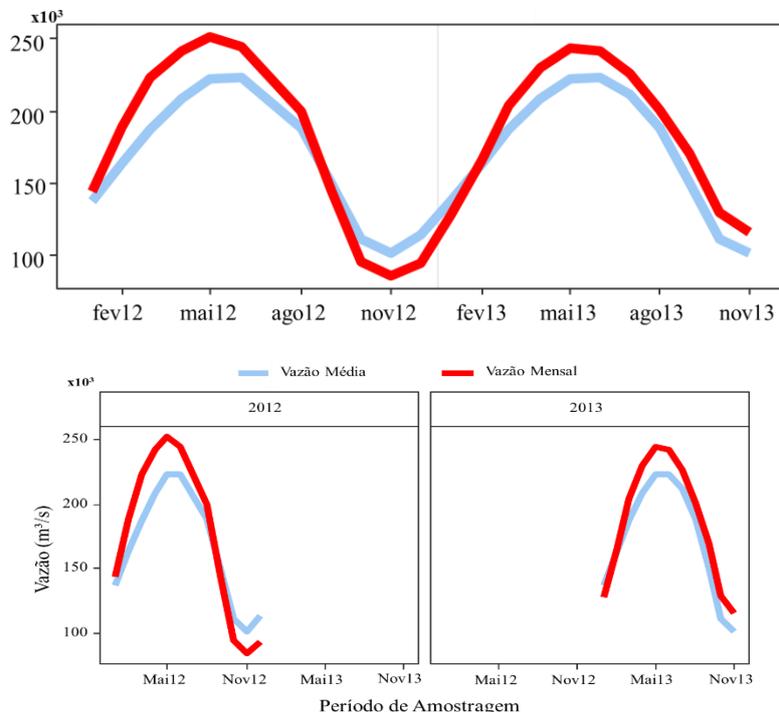
Todos os dados foram submetidos a análise estatística no software R versão 1.1. Para observar quais tratamento os dados receberiam, foi realizado o teste de Shapiro-Wilk afim de entender se os valores seguem ou não uma distribuição normal. Para entender a correlação entre as variáveis, foi realizado o teste de coeficiente de correlação de *Spearman*, onde  $\rho$  assumirá um valor conforme o valor de associação das variáveis. Para entender a variação inter e intra-anual dos dados foi realizado o teste de *Kruskal-Wallis* que busca comparar uma ou mais amostras e se existe diferença entre sua variância.

Assumindo que os dados obtiveram diferenças entre os grupos, foi realizado o teste de *Dunn* para entender entre quais grupos estariam presente essas diferenças. Para todos os dados também foi realizado estatística descritiva.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Configuração hidrológica e parâmetros *in situ*

Para os anos de 2012 e 2013, a vazão média foi de  $181.989 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , com máximas de  $251.634 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  e mínimas de  $85.304 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Comparado com média de 50 anos de dados de vazão para o local, a média dos anos de coleta foi 18% maior que a média histórica de  $169.591 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , a mínima foi 19% menor que os valores históricos ( $101.759 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ) a máxima foi 11% maior que a máxima média histórica de  $222.932 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Os anos de 2012 e 2013 apresentaram as maiores vazões nos meses de abril, maio e junho e os menores valores de vazão nos meses de outubro, novembro e dezembro, seguindo a tendência histórica (Figura 2).



**Figura 2** - Variação da vazão ao longo dos anos de 2012 e 2013 para estação 17050001 - Óbidos.  
**Fonte:** Autor, 2023.

*Callede et al.* (2002), estabelecem valores similares aos observados. Em seu trabalho ele observa uma média para a estação de Óbidos de  $170.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ , com valores

máximos para os meses de maio e junho, superiores a  $200.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . Os meses de novembro e dezembro tiveram os menores valores de descarga, com vazões aproximadas de  $100.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ . No mesmo estudo, os autores definem o regime hidrológico da região com altos valores de descarga sendo estes bem regulares. Callede *et al.* (1996), também encontraram valores similares de vazão para o canal principal do rio Amazonas, próximo à cidade de Óbidos. Seus dados para os períodos de Enchentes mostram vazões de  $258.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ .

A precipitação total para o período de estudo foi de 3.997 mm, com média variando em torno de 170,5 mm. O valor máximo de precipitação foi de 452,1 mm e mínima de 10,3 mm. Apesar do maior valor de precipitação ser encontrado para o ano de 2012, esse ano apresentou baixa precipitação comparado com o ano de 2013, somente 3 meses (janeiro, fevereiro e março) superaram a média do período. O ano de 2013 apresentou 5 meses superando a média do período estudado (janeiro, fevereiro, março, abril e maio). Os valores máximos de precipitação sucederam previamente as máximas de vazão. O atraso na transferência da precipitação para o rio envolve diferentes tempos de residência influenciados pelo lençol freático, solo e águas superficiais (ANDERMANN *et al.*, 2012). Paiva *et al.* (2013), mostram através de modelagem para toda a bacia, uma contribuição de 56% de águas superficiais, 36% do solo e 8% de águas subterrâneas para o armazenamento e fluxo lento de água regulando a amplitude e os momentos de inundação.

Os dados de parâmetros físico-químicos estão ligados a composição química das suas águas. Durante o período de coleta foram captadas 21 amostras de parâmetros físico-químicos da região (Figura 3).

A temperatura da água medida *in situ* no canal principal do rio Amazonas permaneceu estável ao longo do período de amostragem, variando entre 27,8 e 31,1 °C, com coeficiente de variação de 3,4%. Os maiores valores foram encontrados para os meses de outubro e novembro e menores valores para os meses de março e abril. A temperatura da água apresentou ligeira correlação a vazão, com o aumento das temperaturas nos períodos de menor vazão e valores de menor temperatura nos períodos de maior vazão ( $r^2= 0,67$ ,  $p<0,05$ ).

Os valores de oxigênio dissolvido (OD) variaram entre mínimas de  $2,5 \text{ mg L}^{-1}$  e máximas  $7,02 \text{ mg L}^{-1}$ , com média de  $4,5 \text{ mg L}^{-1}$ . Assim como os valores de temperatura da água, os maiores valores de OD foram observados nos últimos meses do ano e os menores nos meses de abril e maio. A concentração de oxigênio dissolvido apresentou diminuição em relação as máximas de vazão da região, com aumento posterior nos meses com baixa vazão, estabelecendo uma leve correlação negativa ( $r^2= 0,65$ ,  $p<0,05$ ).

Devol *et al.* (1995), mostram em seus trabalhos que a concentração de OD apresenta variação sazonal podendo resultar principalmente da profundidade do rio. Casagrande *et al.* (2006) e Affonso *et al.* (2011), apresentam valores um pouco menores que aos encontrados nesse trabalho, com mínimas de 3,6 e 4,0 mg L<sup>-1</sup> e máximas de 6,0 mg L<sup>-1</sup>. Affonso *et al.* (2011), descrevem em suas discussões a influência da taxa aérea de respiração maior nos períodos de águas altas e menor durante o período de menor vazão, resultando em uma colaboração inversamente proporcional à profundidade e vazão do rio. Devol *et al.* (1983) e Richey *et al.* (1986), descrevem a grande quantidade de carga de sedimentos em suspensão como determinante da produção de O<sub>2</sub> na bacia do rio Amazonas. Essa carga atua impedindo a penetração de luz no sistema e inibindo os processos de fotossíntese.

O pH encontrado nas amostragens variou entre 6,1 e 8,3, com valor médio de 7,1. A variação não apresentou grandes dispersões ao longo do período. Os valores encontrados na pesquisa estão de acordo com os obtidos por Moquet *et al.* (2015) e Sánchez (2015), com média de 6,9 variando entre 6,2 e 7,5 para o mesmo local de amostragem. Ríos-Villamizar *et al.* (2014), encontraram valores próximos para outros rios de águas brancas, pH de 7,27 para os rios Juruá, Japurá. Furch e Junk (1997), descrevem características típicas de rios de águas brancas, águas com riqueza em carbonato e cálcio, condutividade acima de 40 µS/cm<sup>-1</sup> e pH acima de 6,5. Essa não variabilidade é comumente encontrada por outros pesquisadores, Affonso (2011) e Devol *et al.* (1987) descrevem valores entre 6,35 e 7,01 durante suas pesquisas.

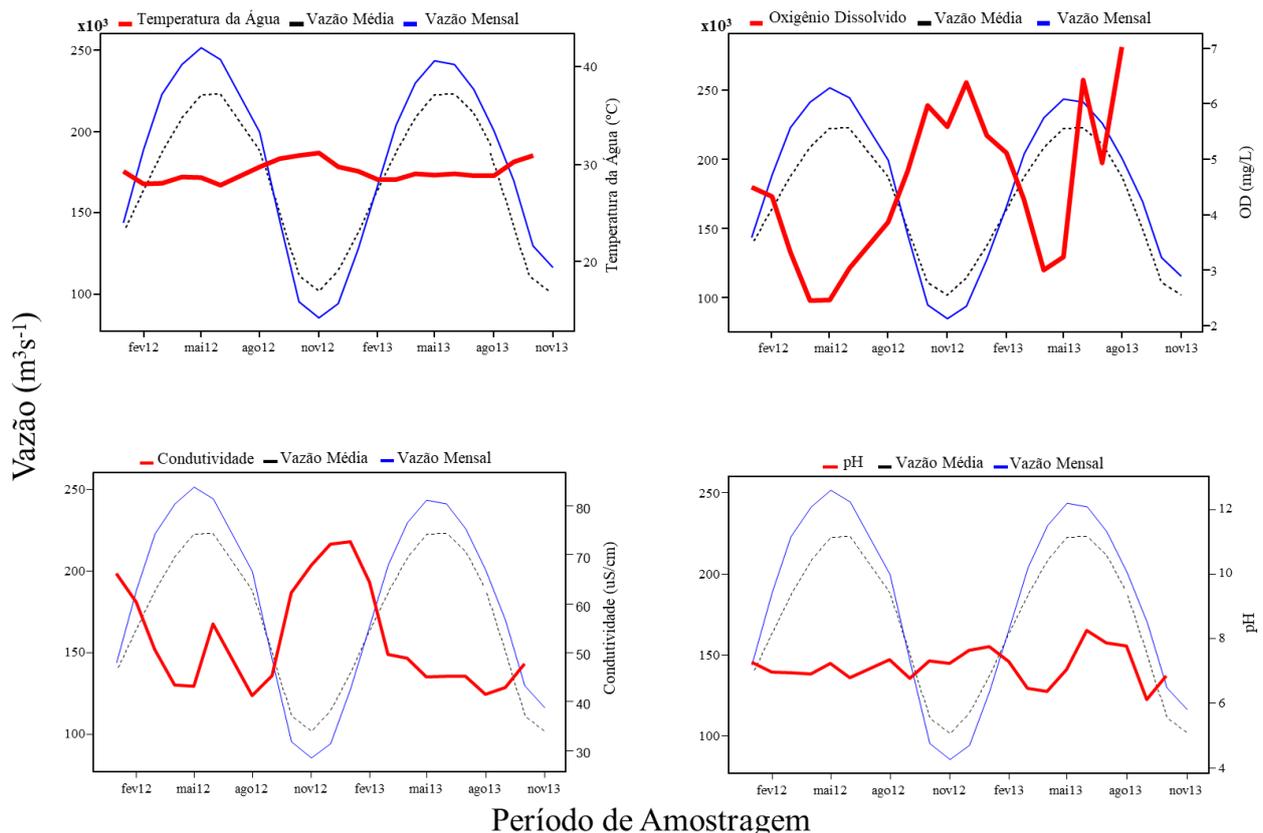
O ambiente geológico e a vegetação possuem fortes relações nos valores de pH nos rios. Enquanto em rios de águas claras o pH é atribuído por substâncias húmicas e fúlvicas, os valores neutros para os rios de águas brancas formam-se por dissolução dos silicatos. A decomposição de matéria orgânica favorece a acidificação das águas enquanto a grande presença de sedimentos em suspensão contribui para valores de pH próximos a neutralidade (QUEIROZ, 2009).

Os valores de condutividade encontrados apresentaram média de 52,1 µS/cm<sup>-1</sup>. Os meses de novembro, dezembro e janeiro de 2012 apresentaram os maiores valores 67,7 µS/cm<sup>-1</sup>, 72,0 µS/cm<sup>-1</sup>, 72,6 µS/cm<sup>-1</sup>, respectivamente. O mês de agosto de 2012 apresentou o valor mínimo para o período de amostragem, 41,0 µS/cm<sup>-1</sup>. Os maiores valores de condutividade foram encontrados no período de menor vazão, mostrando uma leve correlação ( $r^2 = 0,59$ ,  $p < 0,05$ ).

Os valores de condutividade elétrica representam a presença de substâncias dissolvidas em ânions e cátions, que sofrem influência de diversos fatores como vegetação,

clima, intemperismo químico e físico e geologia. No rio Amazonas, afluentes da margem direita, que possuem altos transportes de cargas de sedimento, possuem altos valores de condutividade elétrica. No leito principal do rio Amazonas, próximo à fronteira Peru/Brasil, concentrações de condutividade podem chegar a  $155 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  (JUNK e FURCH, 1980; SILVA, 2016). Horbe *et al.* (2013), descrevem valores similares de condutividade para rios de águas brancas, em geral mais altos na Seca, com média de  $89 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ .

Sanchez *et al.* (2015) e Moquet *et al.* (2015), apresentam dados de várias estações ao longo da bacia amazônica, com médias para a estação de Óbidos concordantes para os valores encontrados nessa pesquisa, em torno de  $51 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ . As estações do Solimões-Tabatinga, apresentaram valores em torno de  $138 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ . Souto *et al.* (2015), mostram uma diluição de compostos ocasionando uma diminuição nos valores encontrados nas estações posteriores a jusante, de  $111 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$  até  $51 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ . As águas do rio Solimões ricas em íons dissolvidos misturam-se com águas de outros afluentes com menos carga de espécies iônicas dissolvidas contribuindo para a diminuição desse parâmetro no decorrer do canal principal do rio Amazonas.



**Figura 3** - Variações dos parâmetros físico-químicos ao longo de 2 anos de coletas.

Fonte: Autor, 2023.

## Íons dissolvidos na forma de cátions

O período de amostragem para os valores de íons dissolvidos na forma de cátions (cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), sódio ( $\text{Na}^+$ ) e potássio ( $\text{K}^+$ )) ocorreu entre 2012 e 2013, totalizando 22 amostras (Figura 4).

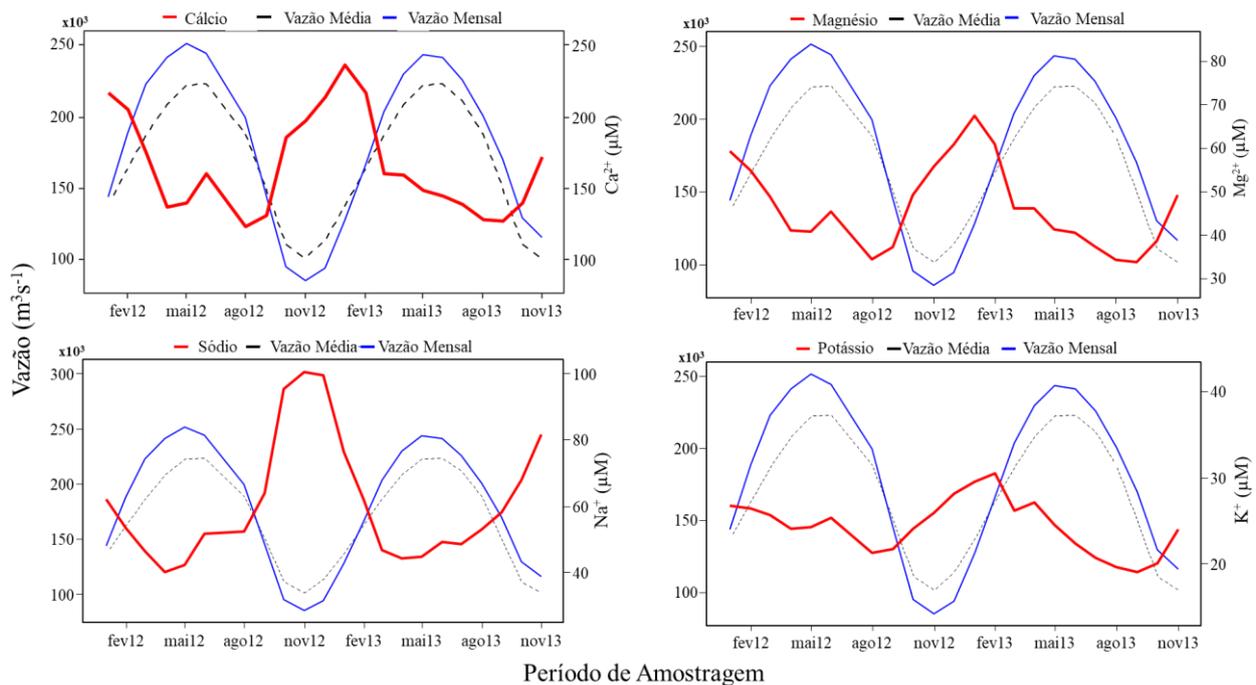
Durante o período de coleta a média da concentração molar de cálcio foi de  $164 \pm 34 \mu\text{M}$ . O ano de 2012 apresentou máximas de 217 e  $214 \mu\text{M}$  para os meses de janeiro e fevereiro, ambos pertencentes ao período de Enchente da região. As mínimas para esse mesmo ano foram de 124 e  $131 \mu\text{M}$  nos meses de agosto e setembro, os quais são caracterizados como período de Vazante da região. Para o ano de 2013, cálcio apresentou valores máximos de 237 e  $217 \mu\text{M}$  nos meses de janeiro e fevereiro e mínimas para os meses de agosto e setembro, 129 e  $127 \mu\text{M}$ , respectivamente. O ano de 2013 também seguiu a tendência de 2012 com máximos valores de cálcio para os períodos de Enchente da região e valores menores nos períodos de Vazante.

As concentrações molares do componente magnésio também seguiram as mesmas tendências dos valores de cálcio com máximas nos períodos de Enchente do rio e mínimas para os períodos de Vazante do rio. Sua média para o período de amostragem foi de  $46,5 \pm 9,8 \mu\text{M}$ . Para o ano de 2012, magnésio apresentou maiores valores nos meses de janeiro e dezembro, chegando a 59 e  $61 \mu\text{M}$ , respectivamente. No mesmo ano, encontra-se mínimas de 34 e  $37 \mu\text{M}$  para os meses de agosto e setembro. Para o ano de 2013, magnésio teve seus valores máximos em janeiro e fevereiro com 67 e  $61 \mu\text{M}$ , respectivamente e, valores inferiores nos meses de agosto e setembro, ambos apresentando concentração molar de  $34 \mu\text{M}$ .

Diferente dos valores encontrados para cálcio e magnésio, sódio apresentou forte tendência negativa aos períodos de Cheia da região, mostrando que seu pico máximo de valores ocorreu no período de menor vazão do rio. Sua média para os 2 anos de amostragens foi de  $91,3 \pm 28 \mu\text{M}$  de desvio padrão. No ano de 2012 foram observados altos valores para os meses de outubro, novembro e dezembro, 143, 151 e  $149 \mu\text{M}$ , respectivamente. Os menores valores foram encontrados nos meses de abril e maio, com mínimas de 60 e  $63 \mu\text{M}$ , respectivamente. No ano de 2013, os valores de sódio foram maiores no início do ano (janeiro) e final do ano (dezembro), com concentrações chegando a 114 e  $123 \mu\text{M}$ , respectivamente.

Os menores valores de íons dissolvidos na forma de cátion foram observados para o componente potássio. Sua média para todo o período de amostragem girou em torno de  $24,4 \mu\text{M}$  com desvio padrão de  $3,2 \mu\text{M}$ . Diferente dos outros componentes já observados,

sua variação ao longo de 2 anos de coleta não foi tão expressiva como os demais cátions. As máximas para o ano de 2012 foram nos meses de Enchente do rio, janeiro e dezembro, com concentrações molares de  $27 \mu\text{M}$  e  $28 \mu\text{M}$ , respectivamente. Para os meses de agosto e setembro, ambos considerados como períodos de Vazante do rio, potássio apresentou valores mínimos com concentrações de  $21 \mu\text{M}$  e  $22 \mu\text{M}$ . O ano de 2013 seguiu a tendência do ano de 2012, com maiores valores nos períodos de Enchente do rio, janeiro e fevereiro, com concentrações de  $30 \mu\text{M}$  e menores valores nos períodos de Vazante do rio, agosto e setembro, com concentrações de  $19 \mu\text{M}$  e  $20 \mu\text{M}$ .



**Figura 4** - Variações dos cátions ao longo de 2 anos de coletas no canal principal do rio Amazonas.  
**Fonte:** Autor, 2023.

Na sua totalidade as concentrações dos principais cátions observados nesse estudo foram similares as observadas em pesquisas realizadas anteriormente no rio Amazonas. Os valores médios de cálcio ( $164 \pm 34 \mu\text{M}$ ) encontrados neste trabalho, também foram observados por Moquet *et al.* (2015) nas medições do projeto HYBAM, onde os autores encontraram valores próximos a  $149 \mu\text{M}$ . Outros autores dispõem em seus trabalhos médias similares aos encontrados nesse estudo ( $131 \mu\text{M}$  Gaillardet, 1997;  $141 \mu\text{M}$  Mortatti e Probst, 2003;  $151 \mu\text{M}$  Moon, 2014). Dellinger *et al.* (2015), encontraram valores entre  $165 \mu\text{M}$  e  $131 \mu\text{M}$  para diversos pontos próximos a cidade de Óbidos.

Os valores de  $\text{Mg}^{2+}$  também se assemelham aos dispostos na literatura. A concentração média de  $46,5 \pm 9,8 \mu\text{M}$  foi similar aos dados obtidos por amostragem pontual do HYBAM e descritos por Moquet *et al.* (2015), sendo de  $44 \mu\text{M}$ . Os autores Moon (2014) e Gaillardet (1997), obtiveram valores próximos as médias encontradas nesse trabalho com

45  $\mu\text{M}$  e 43  $\mu\text{M}$ , respectivamente. Mortatti e Probst (2003), observaram médias de 47  $\mu\text{M}$  no período de baixa vazão e 39  $\mu\text{M}$  no período de alta vazão que estão próximos aos valores encontrados para as mesmas fases neste trabalho, sendo de 41.8  $\mu\text{M}$  para cheia e 48.2  $\mu\text{M}$  para Seca.

Os valores de  $\text{Na}^+$  tiveram alta comparação com os descritos por trabalhos anteriores. Os dados do HYBAM, descritos por Moquet *et al.* (2015), sugerem médias de 93  $\mu\text{M}$  para a mesma área de estudo. Mortatti e Probst (2003), relataram valores de 109  $\mu\text{M}$  para o período de Cheia, 183  $\mu\text{M}$  para o período de Seca com média de 107  $\mu\text{M}$ . Neste trabalho, para as mesmas fases da hidrógrafa, foram observados valores 68,7, 129,5 e 91,3  $\mu\text{M}$ , respectivamente.

A concentração de  $\text{K}^+$  encontrada na pesquisa (24,5 $\pm$ 3,2  $\mu\text{M}$ ) foi similar a faixa de concentração de diversos autores. O monitoramento feito pelo projeto HYBAM obteve uma média de 23  $\mu\text{M}$  para a região (MOQUET *et al.*, 2015). Gaillard (1997), Mortatti e Probst (2003) e Moon (2014), tiveram resultados próximos aos encontrados, suprimidos a uma faixa de 20 a 26  $\mu\text{M}$ .

A presença de similaridade entre os valores dispostos nesse estudo e os demais encontrados nos trabalhos anteriores mostra um certo grau de estabilidade na concentração desses compostos no rio ao longo dos últimos anos. Estudos do canal principal do rio Amazonas e seus principais afluentes (rio Solimões, rio Madeira e rio Negro) mostram níveis diferentes de concentração de íons entre esses rios, mas apresentam baixas variações ao longo dos anos (MOQUET *et al.*, 2015).

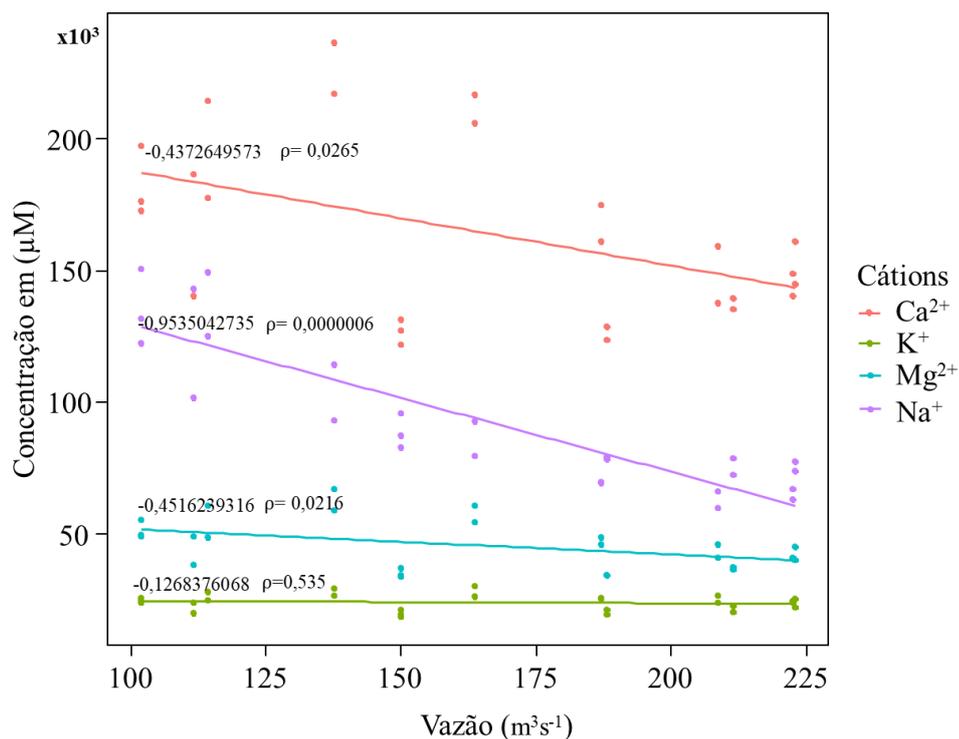
As águas do canal principal do rio Amazonas são classificadas como cálcico-bicarbonatadas, onde a concentração de íons dissolvidos no rio diminui no sentido montante jusante (MORTATTI e PROBST, 2003; SANCHEZ *et al.*, 2015). As águas do rio Solimões/Amazonas possuem altos teores de eletrólitos com predominância iônica do elemento  $\text{Ca}^{2+}$  e menor predominância do elemento  $\text{K}^+$ . Suas características químicas resultam de sua região inicial Andina e pré-Andina (FURCH, 1984). Essas altas concentrações de cálcio no rio refletem as rochas carbonáticas que são desgastadas na região dos Andes (STALLARD e EDMOND, 1983). As águas originadas nas regiões Andinas incorporam uma grande carga de sedimentos que é dissolvido ao longo do rio contribuindo nas concentrações de íons no canal principal do rio Amazonas (TORRES *et al.*, 2015).

Assim como em Wetzel (1981) e Furch (1984), a ordem de predominância dos cátions seguiu a tendência observada em trabalhos anteriores. Para esse estudo, o cátion  $\text{Ca}^{2+}$  incorporou 50,6% dos valores obtidos na amostragem, seguido de 27,77% para  $\text{Na}^+$ ,

14,15% para  $Mg^{2+}$  e 7,42% para  $K^+$ , ficando na ordem de predominância  $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+} > K^+$ .

Outro processo que pode ser observado nos dados encontrados é o efeito de histerese descrito por Moquet *et al.* (2015). Nesse processo o sistema conserva suas propriedades por esgotamento da fonte, diminuição no fornecimento do soluto dissolvido em água ou incremento de diferentes fontes de íons. Sanches *et al.* (2015), observaram esse comportamento em diferentes estações ao longo do curso principal do rio. As concentrações dos elementos dissolvidos apresentaram sazonalidade com as mais altas concentrações um ou dois meses depois da menor vazão e as menores concentrações foram encontradas posterior aos picos de maior vazão. Todos os cátions amostrados nesta pesquisa seguiram esse comportamento com exceção do  $Na^+$ .

Moquet *et al.* (2011), sugerem uma distribuição do cátion  $Na^+$  inversamente proporcional a vazão do rio. Submetendo os cátions ao teste de *Spearman*, pode-se observar que somente o potássio obteve boa correlação com a vazão ( $\rho = -0,95$ , p-valor = 0.0001), indicando comportamento similar ao encontrado pelo autor (Figura 5).



**Figura 5** - Relação entre as concentrações de cátions e a vazão do rio através do coeficiente de Spearman.  
**Fonte:** Autor, 2023.

## Elementos traço

Nos 2 anos de coletas, obteve-se 22 amostras de elementos traço para o rio Amazonas, próximo ao estreito de Óbidos. Foram realizadas coletas para os componentes ( $\text{Li}^+$ ) lítio, ( $\text{Sr}^{2+}$ ) estrôncio, ( $\text{Rb}^+$ ) rubídio, ( $\text{Ba}^{2+}$ ) bário e (U) urânio (Figura 6).

Para o ano de 2012, o elemento lítio teve seus maiores valores nos meses de janeiro e dezembro (119 e 116 nM), representando o período de Enchente da região. As mínimas foram encontradas nos meses de agosto e setembro (84 nM), representando o período de Vazante da região. Em 2013, lítio apresentou maiores valores de concentração molar para janeiro e fevereiro, em torno de 129 nM. Assim como no ano anterior, nos meses de agosto e setembro, foram observados os menores valores para esse elemento traço, com 90 e 88 nM, respectivamente. Sua concentração molar média ao longo do período de amostragem foi de 105,3 nM com desvio padrão de 14,4 nM.

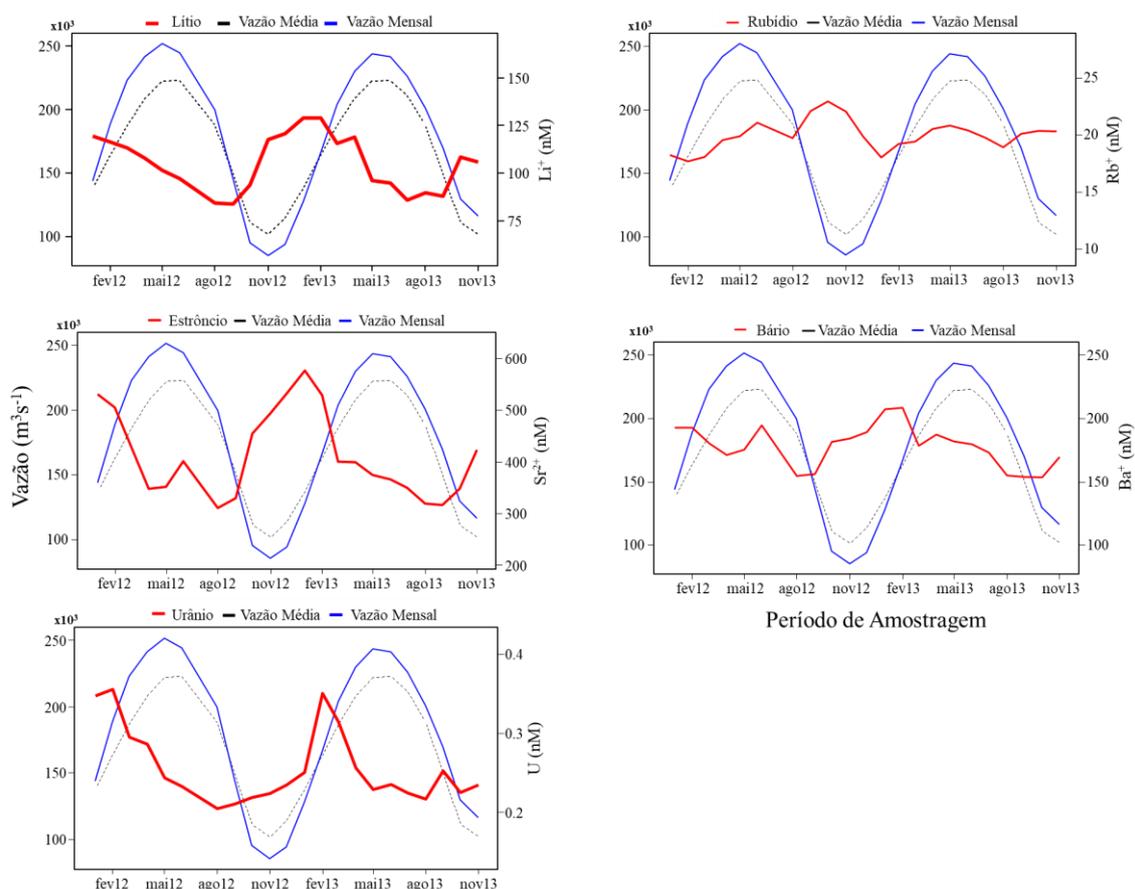
Rubídio mostrou um comportamento mais linear ao longo do ano não apresentando variações expressivas durante o pulso de inundação da região. Seu valor médio foi de  $20 \pm 1,4$  nM. Durante o ano de 2012 os meses de setembro, outubro e novembro apresentaram os maiores valores de concentração molar para esse elemento 22,1, 23 e 22 nM, respectivamente. Seus menores valores foram de 17,7 e 18,1 nM nos meses de Enchente da região. Para o ano de 2013 os maiores valores foram de 20,5 e 20,8 nM nos meses de abril e maio e, mínima de 18 nM no mês de janeiro.

Os maiores valores de concentração molar dentre os elementos traço foram observados para o componente estrôncio, o qual respondeu expressivamente as variações do pulso de inundação do rio. Seus maiores valores foram observados nos meses de Enchente e período de transição entre o final da Seca e início da Enchente do rio para ambos os anos de estudo. O ano de 2012 apresentou altos valores em janeiro e dezembro desse ano 531 e 532 nM, respectivamente. Os menores valores desse ano foram observados no período de Vazante do rio com 309 nM para o mês de agosto e 329 nM para o mês de setembro. Para o ano de 2013 observou-se valores expressivos em janeiro com 577 nM e mínimas de 316 nM no mês de setembro. A média para os dois anos analisados foi de  $412,6 \pm 82,3$  nM.

O componente bário teve uma variação ao longo do ano, com média para o período de estudo de  $178,4 \pm 16,4$  nM. No ano de 2012, seus maiores valores foram encontrados nos meses de janeiro e fevereiro, ambos com concentrações de 193 nM. Suas mínimas foram para os meses de agosto e setembro, Vazante do rio Amazonas, com concentrações de 155 e 156 nM. O ano de 2013 seguiu a mesma tendência do ano anterior com máximas

no período de Enchente e mínimas no período de Vazante do rio. Janeiro e fevereiro de 2013 tiveram altas de 207 e 209 nM e setembro e outubro com valores menores de 155 e 154 nM.

As concentrações molares de urânio foram as menores observadas entre todas as concentrações do estudo. Sua média para todo o período foi de  $0,256 \pm 0,047$  nM. Seguindo a maioria dos dados amostrados, urânio teve um acréscimo nos períodos de Enchente do rio e um decréscimo no período de Vazante do rio. O ano de 2012 teve como máximas os meses de janeiro e fevereiro com 0,35 e 0,36 nM e, mínimas de 0,20 e 0,21 nM para os meses de agosto e setembro. Em 2013 as maiores concentrações foram de 0,35 e 0,31 nM para os meses de fevereiro e março e menores concentrações para os meses de julho e agosto, ambas com 0,22 nM.



**Figura 6** - Variações de elementos traço ao longo de 2 anos de coletas no rio Amazonas, estreito de Óbidos.

**Fonte:** Autor, 2023.

As concentrações de elementos foram parecidas com as relatadas em trabalhos anteriores. O elemento  $\text{Li}^+$  obteve média de  $105,3 \pm 14,4$  nM, próximo aos valores encontrados por Gaillardet *et al.* (1997), que observaram valores de 120 a 150 nM para o canal principal do rio Amazonas. O  $\text{Rb}^+$  apresentou média de  $20 \pm 1,4$  nM para o período de estudo. Seyler *et al.* (2003), conseguiram valores próximos, em um intervalo de 18 a 23 nM.

Moquet *et al.* (2015), ao longo de 9 anos apresentaram dados de concentrações de  $\text{Sr}^{2+}$  com média de 406 nM. Os valores observados nessa pesquisa resultaram em uma média para esse elemento de  $412,6 \pm 82,3$  nM, similar ao trabalho anterior. Os valores de  $\text{Ba}^{2+}$  também foram similares aos encontrados por Palmer e Edmond (1993) e Seyler *et al.* (2003). A amplitude desses trabalhos mostra valores entre 151 e 196 nM, dentro da média encontrada nesse estudo, com valor de  $178,4 \pm 16,4$  nM. O componente U, que obteve a menor concentração dos elementos estudados, teve sua média ( $0,256 \pm 0,047$ ) próxima as de Gaillardet *et al.* (1997), Palmer e Edmond (1993) e Seyler *et al.* (2003).

Os elementos traço, assim como os cátions, também apresentaram certa sazonalidade no decorrer dos dois anos de estudo. Palmer e Edmond (1993) e Gaillardet *et al.* (1997), mostraram que as concentrações desses elementos traço são fortemente relacionados aos cátions principais, onde o controle de distribuição dessas concentrações são os mesmos que atuam para as concentrações de cátions. Quase todos os elementos apresentaram fenômeno de histerese com suas máximas nos períodos de Enchente do rio e mínimas nos períodos de Vazante do rio. Seyler *et al.* (2013), mostram em seu trabalho de quantificação e estimativa de elementos traço no rio Amazonas, uma similaridade com os dados encontrados nesta pesquisa. Eles observaram seus maiores valores nos períodos de menor vazão do rio, para os elementos U e  $\text{Rb}^+$  os autores também observaram uma baixa variação anual, tendo um comportamento mais linear.

Alguns autores sugerem que a variação desses elementos ao longo das diferentes fases da hidrógrafa pode estar relacionada ao influxo de água decorrente de afluentes categorizados como portadores de águas pretas. Com uma elevada quantidade de matéria orgânica dissolvida esses rios influenciam a concentração dos elementos traço identificados no leito principal do rio Amazonas (AUCOUR *et al.*, 2003; HORBE *et al.*, 2013). Tang e Johannesson (2003) e Seyler *et al.* (2003), sugerem também que efeitos de diluição provocados pela chuva e contribuição lateral de áreas inundadas durante o período de Cheia do rio podem afetar processos de oxirredução e disponibilidade desses elementos para o canal principal.

Para os autores Dellinger *et al.* (2015), a composição do elemento  $\text{Li}^+$  é primariamente abastecida por águas brancas provenientes dos Andes seguido de terras lateríticas provenientes de rios de águas claras e latossolos-podzols banhados por águas pretas.

## Varição intra e interanual

Após a definição e separação dos meses do período estudado em diferentes períodos sazonais, pode-se estabelecer algumas influências do período que se encontra o pulso de inundação e a variação dos componentes estudados (Tabela 2).

**Tabela 2** - Diferenças entre a sazonalidade da região (C- Cheia, E- Enchente, V- Vazante, S- Seca), utilizando o teste de Dunn para os anos de 2012 e 2013. Os valores descrevem o teste de post-hoc Dunn para p.ajustado.

Fonte: Autor, 2023.

	$Ca^{2+}$	$K^+$	$Na^+$	$Mg^{2+}$	$Rb^+$	$Sr^{2+}$	$Li^+$	$Ba^{2+}$	$U$
<b>C-E</b>	0.0396	0.19403	0.11386	0.0643	0.0396	0.0571	0.08119	0.97023	0.4209
<b>C-S</b>	1	1	0.00193	1	1	1	1	1	1
<b>C-V</b>	0.76083	0.42399	0.36244	0.66156	1	0.61592	0.63842	0.20226	0.72232
<b>E-S</b>	1	0.11481	0.66156	1	0.00922	1	0.69752	0.25598	0.03159
<b>E-V</b>	0.00073	0.00168	1	0.00097	0.47559	0.00073	0.00119	0.00546	0.01171
<b>S-V</b>	0.08569	1	0.7643	0.08569	1	0.13326	0.34019	1	1

Os 4 períodos hidrológicos (Enchente, Cheia, Vazante e Seca), definidos por quarteamento, obtiveram boas respostas nos comportamentos das concentrações. Para os anos de 2012 e 2013, não houve diferença estatisticamente significativa nas concentrações de cátions e elementos traço no canal principal do rio Amazonas, o que foi observado por diversos outros autores (Gaillardet *et al.*, 1997; Mortatti e Probst, 2003; Seyler *et al.*, 2013). Porém ao observar a variação desses valores ao longo do ano notou-se que existem diferenças entre as fases da hidrógrafa (Figura 7).

O elemento  $Ca^{2+}$  apresentou uma amplitude intra-anual para o ano de 2012 entre 202-146  $\mu M$  com um coeficiente de variação de 21%. No ano de 2013 sua amplitude variou de 204-127  $\mu M$  com coeficiente de variação de 20%. No ano de 2012  $Mg^{2+}$  apresentou uma amplitude de 55-35  $\mu M$  com coeficiente de variação de 19% similar ao ano de 2013 com amplitude de 58-34  $\mu M$  e coeficiente de variação de 19%. O componente  $Na^{2+}$  apresentou o maior coeficiente de variação em pelo menos um dos anos, com uma amplitude de 146-66  $\mu M$  para 2012 e 2013 com 112-69  $\mu M$ , seu coeficiente foi de 34% e 19%, respectivamente. O último cátion analisado também apresentou significativa variação ao longo do ano. O  $K^+$  teve uma amplitude no ano de 2012 de 21-26  $\mu M$  com coeficiente de variação de 8% e no ano de 2013 mostrou uma amplitude entre 21-28  $\mu M$  com coeficiente de 16%.

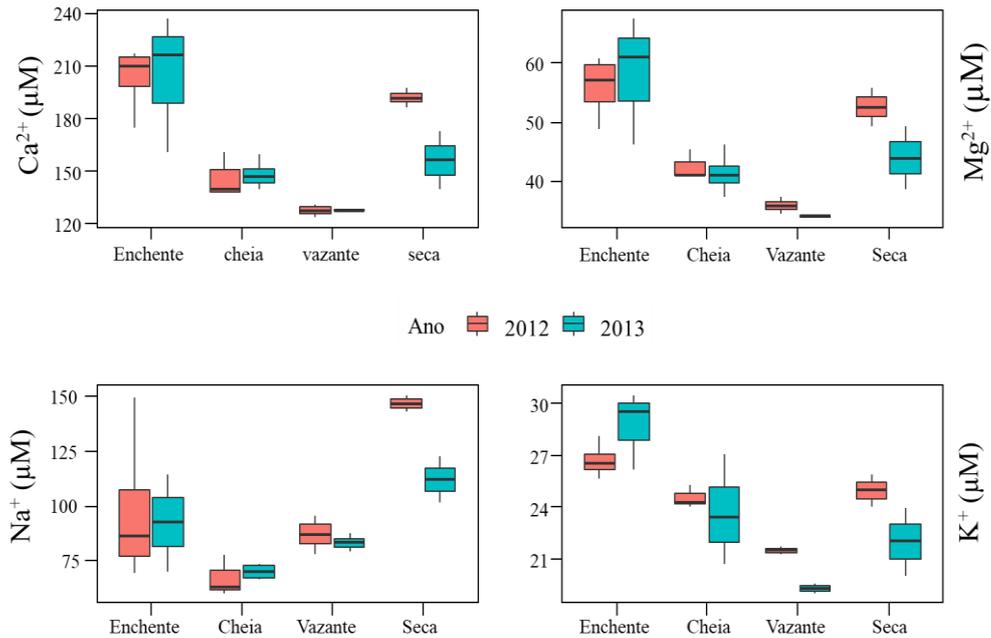
Os elementos traço apresentaram comportamento similar aos observados nos cátions. O elemento  $Li^+$  apresentou amplitude de 117-84 nM com coeficiente de variação

de 13% para o ano de 2012, já o ano de 2013 mostrou uma amplitude de 124-88 nM com coeficiente de 14%. O componente  $Rb^+$  teve amplitude de 22-18 nM e coeficiente de variação de 8% para 2012 e em 2013 apresentou uma amplitude de 22-20 com coeficiente de 3%. O elemento  $Sr^{2+}$  obteve os maiores valores entre os elementos traço e também apresentou os maiores coeficientes de variação para os anos de estudo. No ano de 2012 sua amplitude foi de 498-319 nM com coeficiente de 20% e no ano de 2013 sua amplitude foi de 501-317 nM com coeficiente de variação de 19%.  $Ba^{2+}$  no ano de 2012 apresentou amplitude de 188- 155 nM e coeficiente de 8% e no ano de 2013 mostrou amplitude de 198-154 nM com coeficiente de 11%. O elemento U, como já mencionado, obteve os menores valores de todos os íons, com uma amplitude para 2012 de 0,31-0,22 nM e para 2013 de 0,31-0,23 nM e variação de 18% e 14%, respectivamente.

Para todos os elementos estudados, com exceção  $Na^+$  e  $Rb^+$ , os maiores valores de concentração foram no período de Enchente do rio, seguido dos menores valores para a fase de Vazante. Para o  $Na^+$   $Rb^+$  a maior concentração foi no período de Seca com menor valor no período de Cheia do rio.

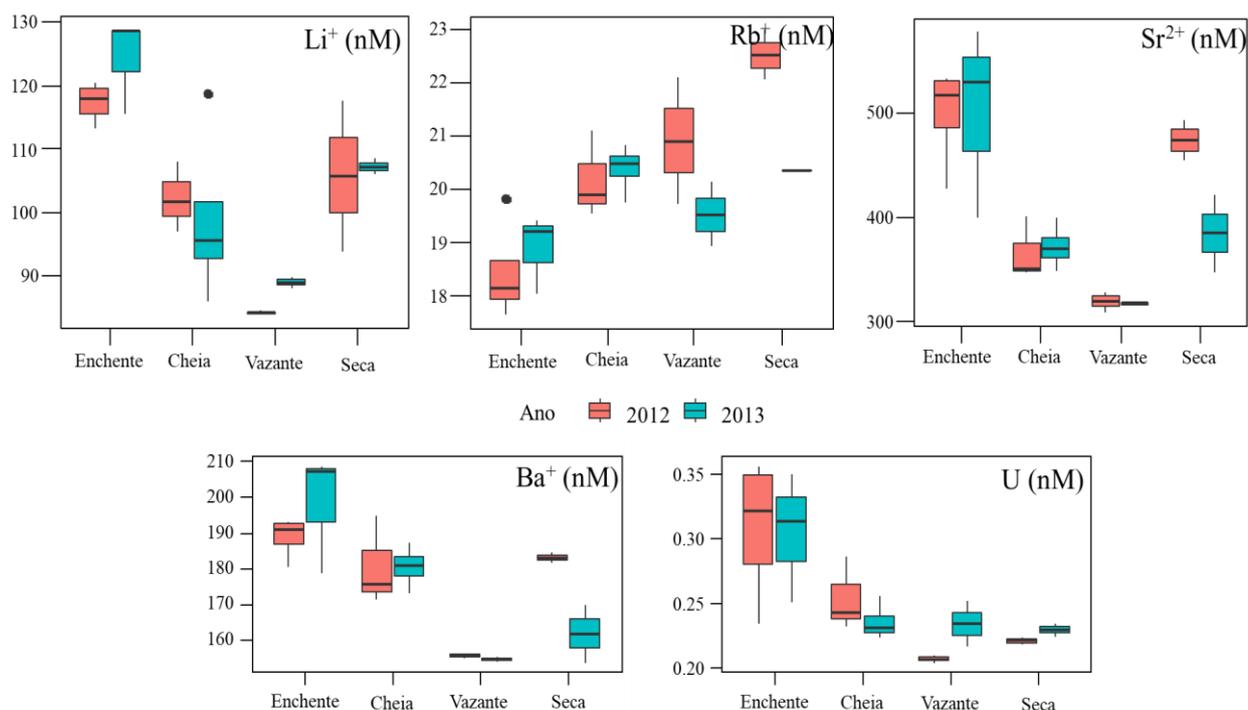
Para entender se existiram diferenças entre as fases da hidrógrafa (Enchente, Cheia, Vazante e Seca) foi aplicado o teste de *Kruskal-Wallis* para ambos os anos. Para todos os valores se assumiu ter ao menos uma diferença entre as fases com valor de p menor que 0,05. Após a aplicação do teste post-hoc de *Dunn* pode-se observar entre quais fases foram mais expressivas essas diferenças.

Para os elementos  $Ca^{2+}$   $Mg^{2+}$ , como já observado ao longo dos resultados, o período de Enchente diferenciou-se significativamente do período de Vazante com  $p < 0,00003$ . Entre as fases de transição dos picos de alta e baixa do rio também pode-se observar diferença entre os grupos. Para (Cheia – Enchente) obteve-se um valor de  $p < 0,038$  e para (Seca – Vazante)  $p < 0,01$ . Os elementos  $Na^+$  e  $K^+$  somente obtiveram valores significativamente diferentes entre duas fases. As fases de (Cheia-Seca) foram as que tiveram mais diferenças para o componente  $Na^+$  com valor de  $p < 0,0002$ , já para o componente  $K^+$  somente o período de (Enchente-Vazante) foram expressivamente diferentes com  $p < 0,0002$ .



**Figura 7** - Variações do componente catiônicos seguindo como base as fases da hidrógrafa (Enchente, Cheia, Vazante, Seca) para os anos de 2012 e 2013.  
**Fonte:** Autor, 2023.

Foram observadas diferenças semelhantes aos cátions para os elementos traço. Os componentes Ba<sup>2+</sup>, Rb<sup>+</sup> e U mostraram ao menos um conjunto de fases tendo diferença estatística entre eles. Para Ba<sup>2+</sup> e U somente (Enchente-Vazante) tiveram valor de  $p < 0,001$  e Rb<sup>+</sup> teve sua diferença expressa entre (Enchente-Seca) com  $p < 0,001$ . O elemento Sr<sup>2+</sup> expressou diferenças entre três conjuntos de fases (Cheia-Enchente; Seca-Vazante; Enchente-Vazante), porém, a maior diferença entre o conjunto de fases foi localizada para (Enchente-Vazante) com valor de  $p < 0,0002$ . Por último, o elemento Li<sup>+</sup> obteve diferença nos conjuntos (Cheia-Enchente) com  $p < 0,04$  e mais expressivamente para (Enchente-Vazante) com  $p < 0,0002$  (Figura 8).



**Figura 8** - Variações dos elementos traço seguindo como base as fases da hidrógrafa (Enchente, Cheia, Vazante, Seca) para os anos de 2012 e 2013.

**Fonte:** Autor, 2023.

A ausência de variação interanual dos elementos dissolvidos no rio analisado nesse estudo pode ser explicada pelo efeito de quimiostase, onde à medida que a água e os solutos acompanham o fluxo do rio eles se misturam com diferentes águas provenientes de lixiviação de solos orgânicos e dissolução de silicatos de baixa cristalinidade afetando a relação descarga-soluto (WALLING e WEBB, 1986; GODSEY *et al.*, 2009; BOUCHEZ *et al.*, 2017). Sanches *et al.* (2015) e Moquet *et al.* (2015), relatam os efeitos de histereses que são concordantes com as máximas e mínimas encontradas neste trabalho nos eixos transitórios de vazão do rio (Enchente-Vazante). Os autores descrevem para a estação de Óbidos uma sazonalidade em seus dados, onde os maiores valores de concentrações são encontrados um ou dois meses depois do período de Seca e explicam que os efeitos são ocasionados pela defasagem na sazonalidade do três principais afluentes do canal principal do rio Amazonas (rio Solimões, rio Madeira e rio Negro) que possuem discrepâncias no total de sólidos solúveis onde, principalmente, o rio Negro possui um efeito de diluição temporária na concentração desses compostos.

## **CONCLUSÃO**

O estudo de variação intra e interanual de cátions e elementos traço no canal principal do rio Amazonas, próximo ao estreito de Óbidos, mostrou que os dados coletados seguiram as mesmas tendências das últimas três décadas de pesquisas no rio, implicando em uma constância na concentração desses elementos no rio. Assim como os demais estudos, observou-se a forte presença do cátion  $\text{Ca}^{2+}$  na composição das águas do rio Amazonas, proveniente das águas que cobrem as regiões Andinas e sub-Andinas. A ordem de predominância observada foi para  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ . Os cátions e elementos traço, em sua maioria, apresentaram seus maiores valores no período de Enchente e menores valores no período de Seca do rio, mostrando uma tendência sazonal intra-anual.

## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (processo 132802/2019-8), apoio técnico-científico do WoodWell Climate Research Center e Universidade Federal do Oeste do Pará.

## REFERÊNCIAS

AFFONSO, A. G.; QUEIROZ, H. L. D.; NOVO, E. M. L. D. M. Limnological characterization of floodplain lakes in Mamirauá sustainable development reserve, Central Amazon (Amazonas State, Brazil). **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 23, p.95-108, 2011.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Região Hidrográfica Amazônica. Brasília**. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/amazonica.aspx>>. Acesso em: 31 julho de 2022.

AHIMOC. **Administração das Hidrovias da Amazônia Ocidental**. DNIT. p. 98, 2001.

ANDERMANN, C.; LONGUEVERGNE, L.; BONNET, S.; CRAVE, A.; DAVY, P.; GLOAGUEN, R. Impact of transient groundwater storage on the discharge of Himalayan rivers. **Nature Geoscience**, v. 5, n. 2, p. 127–132, 2012.

AUCOUR, A. M.; TAO, F. X.; MOREIRA-TURCQ. P.; SHEPPARD, D.; BENEDETTI, M. F. The Amazon River: Behaviour of Metals (Fe, Al, Mn) and Dissolved Organic Matter in the Initial Mixing at the Rio Negro/Solimões Confluence. **Chemical Geology**, v. 197, n. 4, p. 271–285, 2003.

BOUCHEZ, J.; MOQUET, J. S.; ESPINOZA, J. C.; MARTINEZ, J. M.; GUYOT, J. L.; LAGANE, C.; FILIZOLA, N.; NORIEGA, L.; SANCHES, L.H.; POMBOSA, R. River mixing in the Amazon as a driver of concentration-discharge relationships. **Water Resources Research**, v. 53, n. 11, p. 8660–8685, 2017.

BROWN, K. A.; WILLIAMS, W. J.; CARMACK, E. C.; FISKE, G.; FRANÇOIS, R.; MCLENNAN, D.; PEUCKER - EHRENBRINK, B. Geochemistry of Small Canadian Arctic Rivers with Diverse Geological and Hydrological Settings. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 125, n. 1, p. 328, 2020.

CALLEDE, J. J. L.; GUYOT, J. L.; GUIMARÃES, V. S.; OLIVEIRA, E.; SILVA, M. A. R.; FILIZOLA, N. P. N. J. Hidrologia da Bacia Amazônica. **A água em Revista- CPRM**, p. 31-36, 1996.

CALLEDE, J. J. L.; GUYOT, J. L.; RONCHAIL, J.; MOLINIER M.; OLIVEIRA, E. D. The River Amazon at Obidos (Brazil): Statistical studies of the discharges and water balance. **Hydrological Sciences Journal/Journal Des Sciences Hydrologiques**, v. 47, p. 321–333, 2002.

CASAGRANDE, C. A.; MOURA, J. M. S.; TOLEDO, A. M. A.; ANTUNES, P. M.; LUCAS, A. A. T.; PINAZZA, E.; MARTINELLI, L. A. Efeitos Naturais e Antrópicos nas Alterações dos Teores de Oxigênio Dissolvido: Uma Comparação Entre as Bacias do Rio Amazonas e Piracicaba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos–RBRH**, v.11, p. 221-231, 2006.

DELLINGER, M.; GAILLARDET, J.; BOUCHEZ, J.; CALMELS, D.; LOUVAT, P.; DOSSETO, A.; GORGE, C.; ALANOCA, L.; MAURICE, L. Riverine Li isotope fractionation in the Amazon River basin controlled by the weathering regimes. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 164, p. 71–93, 2015.

DEVOL, A. H. Methane oxidation rates in the anaerobic sediments of Saanich Inlet 1. **Limnology and Oceanography**, v. 28, p.738-742, 1983.

DEVOL, A. H.; QUAY, P. D.; RICHEY, J. E.; MARTINELLI L. A. The role of gas exchange in the inorganic carbon, oxygen, and  $^{222}\text{Rn}$  budgets of the Amazon River. **Limnology and Oceanography**, v. 32, p. 235-248, 1987.

DEVOL, A. H.; FORSBERG, B. R.; RICHEY, J. E.; PIMENTEL, T. P. Seasonal variation in chemical distributions in the Amazon (Solimões) River: a multiyear time series. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 9, n. 3, p. 307–328, 1995.

FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L.; MOLINIER, M.; GUIMARÃES, V.; OLIVEIRA, E. D.; FREITAS, M. A. Caracterização hidrológica da bacia Amazônica. **Amazônia: Uma Perspectiva Interdisciplinar**. Ed. Universidade do Amazonas, p 35-53, 2002.

FILIZOLA, N.; SPINOLA, N. M.; ARRUDA, W.; SEYLER, F.; CALMANT, S.; SANTOS, J. The Rio Negro and Rio Solimões confluence point - hydrometric observations during the 2006/2007 cycle. **River coastal and estuarine morphodynamics: RCEM**, v. 2, p. 1003-1006, 2009.

FURCH, K. **Water chemistry of the Amazon basin: The distribution of chemical elements among freshwaters**. p- 167-199. In: Sioli, H. (Ed) The Amazon - Limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin. Monographiae Biologicae. Junk, Dordrecht, p.763, 1984.

FURCH, K. JUNK, W. J. Physicochemical Conditions in the Floodplains. In: JUNK, W.J. (ed). The Central Amazon Floodplain: Ecology of a Pulsing System. **Springer-verlag**, Berlin, p. 69-108, 1997

GAILLARDET, J.; DUPRE, B.; ALLEGRE, C. J.; NÉGREL, P. Chemical and physical denudation in the Amazon River Basin. **Chemical Geology**, v. 142, n. 3, p. 141–173, 1997.

GODSEY, S. E.; KIRCHNER, J. W.; CLOW, D. W. Concentration-discharge relationships reflect chemostatic characteristics of US catchments. **Hydrological Processes: An International Journal**, v. 23, n. 13, p. 1844–1864, 2009.

HORBE, A. M. C.; QUEIROZ, M. M. D. A.; MOURA, C. A. V.; TORO, M. A. G. Geoquímica das águas do médio e baixo rio Madeira e seus principais tributários-Amazonas-Brasil. **Acta Amazonica**, v. 43, p. 489-504, 2013.

JUNK, W. J.; FURCH, K. Química da água e macrófitas aquáticas de rios e igarapés na Bacia Amazônica e nas áreas adjacentes (\*) Parte I: Trecho Cuiabá-Porto Velho-Manaus. **Acta amazônica**, v. 10, p. 611-633, 1980.

MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L.; DEVOL, A. H.; RICHEY, J. E.; FORSBERG, B. R. Suspended sediment load in the Amazon Basin: an overview. **GeoJournal**, v. 19, p. 381-389, 1989.

MOLINIER, M.; GUYOT, J. L.; OLIVEIRA, E.; GUIMARÃES, V.; CHAVES, A. Hydrologie du bassin de l'Amazone. Proc. **Grands Bassins Fluviaux Péri-atlantiques**, v.1, p.335-344, 1995.

MOLINIER, M.; GUYOT, J. L.; OLIVEIRA, E.; GUIMARÃES, V. **Les regimes hydrologiques de l'Amazone**, p 209-222, 1996.

MOON, S.; CHAMBERLAIN, C. P.; HILLEY, G. E. New estimates of silicate weathering rates and their uncertainties in global rivers. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 134, p. 257–274, 2014.

MOQUET, J. S.; CRAVE, A.; VIERS, J.; SEYLER, P. T.; ARMIJOS, E.; BOURREL, L.; CHAVARRI, E.; LAGANE, C.; LARAQUE, A.; CASIMIRO, W. S. L.; POMBOSA, R.; NORIEGA, L.; VERA, A.; GYOT, J. L. Chemical weathering and atmospheric/soil CO<sub>2</sub> uptake in the Andean and Foreland Amazon basins. **Chemical Geology**, v. 287, n. 1, p. 1–26, 2011.

MOQUET, J. S.; GUYOT, J. L.; CRAVE, A.; VIERS, J.; FILIZOLA, N.; MARTINEZ, J. M.; OLIVEIRA, T. C.; SÁNCHEZ, L. S. H.; CASIMIRO, W. S. L.; NOGUEIRA, L.; POMBOSA, R. Amazon River dissolved load: temporal dynamics and annual budget from the Andes to the ocean. **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 23, n. 12, p. 11405–11429, 2015.

MOREIRA-TURCQ, P.; SEYLER, P. T.; GUYOT, J. L.; ETCHEBER, H. Exportation of organic carbon from the Amazon River and its main tributaries. **Hydrological processes**, v. 17, n. 7, p.1329–1344, 2003.

MORTATTI, J. PROBST, J. L. Aspectos Hidrogeoquímicos da Alteração de Silicatos na Bacia Amazônica. **Geociências**, v. 21, p. 139-145, 2002.

MORTATTI, J. PROBST, J. L. Silicate rock weathering and atmospheric/soil CO<sub>2</sub> uptake in the Amazon basin estimated from river water geochemistry: seasonal and spatial variations. **Chemical Geology**, v.197, n. 1, p. 177–196, 2003.

PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; BONNET, M. P.; FRAPPART, F.; CALMANT, S.; MENDES, C. A. B. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. **Water Resources**, v. 49, n. 3, p. 1226-1243, 2013.

PALMER, M. R.; EDMOND, J. M. Uranium in river water. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 57, n. 20, p. 4947–4955, 1993.

PROBST, J. L.; MORTATTI, J.; TARDY, Y. Carbon river fluxes and weathering CO<sub>2</sub> consumption in the Congo and Amazon river basins. **Applied Geochemistry**, v.9, p. 1-13, 1994.

QUEIROZ, M. M. A.; HORBE, A. M. C.; SEYLER, P.; MOURA, C. A. V. Hidroquímica do rio Solimões na região entre Manacapuru e Alvarães: Amazonas-Brasil. **Acta amazonica**, v. 39, p. 943-952, 2009.

R CORE TEAM (2019). R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. Available in: <<https://www.R-project.org>> (Acessado 10 de junho de 2022).

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25. p. 185-204, 2010.

RICHEY, J. E.; MEADE, R. H.; SALATI, E.; DEVOL, A. H.; NORDIN, C. F. JR; SANTOS, U. D. Water discharge and suspended sediment concentrations in the Amazon River: 1982--1984. **Water Resources Research**, v. 22, n 5, p. 756-764, 1986.

RÍOS-VILLAMIZAR. E. A.; PIEDADE. M. T. F.; DA COSTA J. G.; ADENEY. J. M.; JUNK. W. J. Chemistry of different Amazonian water types for river classification: a preliminary review. **Water and society**, v. 178, p. 1117, 2014.

ROCHA, V. M.; CORREIA, F.; SILVA, P. R. T; GOMES, W. B; VERGASTA, L. A; MOURA, R. G. Reciclagem de Precipitação na Bacia Amazônica: O Papel do Transporte de Umidade e da Evapotranspiração da Superfície. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.32, p 387-398, 2017.

RONCHAIL, J.; GUYOT, J. L.; VILLAR, J. C. E.; FRAIZY, P.; COCHONNEAU, G.; ORDENEZ, J. J. Impact of the Amazon tributaries on major flood in Óbidos. In Proceedings of the Fifth FRIEND World Conference held at Havana, Cuba, November 2006), **IAHS Publ.** 308, 220-225, 2006.

SALATI, E. MARQUES, J. Climatology of the Amazon region. **The Amazon: limnology and landscape ecology of a mighty tropical river and its basin**, p. 85-126, 1984.

SANCHEZ, L. S. H.; HORBE, A. M. C.; MOQUET, J. S.; SONDAG, F.; GUYOT, J. L. Spatial-temporal variation of dissolved inorganic material in the Amazon basin. **Acta Amazonica**, v.45, p.175-186, 2015.

SANTOS, R. V.; SONDAG, F.; COCHONNEAU, G.; LAGANE, C.; BRUNET, P.; HATTINGH, K.; CHAVES, J.G.S. Source area and seasonal  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  variations in rivers of the Amazon basin. **Hydrological processes**, v. 29, n. 2, p. 187–197, 2015.

SEYLER, P. T.; PINELLI, M.; BOAVENTURA, G. R. A. first quantitative estimate of trace metal fluxes from Amazon river and its main tributaries. **Journal de Physique IV**, v. 107, p. 1213–1218, 2003.

SILVA, M. S. R.; MIRANDA, S. A. F.; SANTANA, G. P. Bacia Hidrográfica do Rio Amazonas: Condições de suas águas versus Resolução N° 357/CONAMA/20051. **Scientia Amazonia**, v. 6, p. 83-90, 2016.

SOUTO, L. F. L.; OLIVEIRA, T. C. S.; SILVA, M. S. R. Variação espacial de cátions, ânions e variáveis físico-químicas no rio Solimões-Amazonas entre Manaus e Jutaí, bacia amazônica. **Acta Amazonica**, v. 45, p. 415-424, 2015.

STALLARD, R. F.; EDMOND J. M. Geochemistry of the Amazon: the influence of geology and weathering environment on the dissolved load. **Journal of Geophysical Research**, v.88, p. 9671–9688, 1983.

TANG, J.; JOHANNESSON, K. H. Speciation of rare earth elements in natural terrestrial waters: assessing the role of dissolved organic matter from the modeling approach. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 67, n. 13, p. 2321-2339, 2003.

TORRES, M. A.; WEST, A. J.; CLARK, K. E. Geomorphic regime modulates hydrologic control of chemical weathering in the Andes–Amazon. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 166, p. 105–128, 2015.

VOSS, B. M.; PEUCKER-EHRENBRINK, B.; EGLINTON, T. I.; FISKE, G.; WANG, Z. A.; HOERING, K. A.; MONTLUCON, D. B.; LECROY, C.; PAL, S.; MARSH, S.; GILÇIES, S. L.; JANMAAT, A.; BENNETT, M.; DOWNEY, B.; FANSLAU, J.; FRASER, H.; MACKLAM-HARRON, G.; MARTINEC, M.; WIEBE, B. Tracing river chemistry in space and time: Dissolved inorganic constituents of the Fraser River, Canada. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 124, p. 283–308, 2014.

WALLING, D. E.; WEBB, B. W. Solutes in river systems. In: Trudgill, S. T. (Ed.), Solute WEBB, B. W.; WALLING, D. E. Spatial variation of water temperature characteristics and behavior in a Devon river system. **Freshwater Biology**, v. 16, n 5, p. 585-608, 1986.

WETZEL, R.G. **Limnología**. Editora Omega, 679p, 1981.

WOHL, E. **Rivers in the Landscape**. Colorado- USA. Blackwell Pub, 528 p, 2020.

## ANEXOS

**Anexo 1:**Resumo dos dados obtidos de parâmetros físico-químicos nos dois anos de coletas no canal principal do rio Amazonas, estreito de Óbidos.

<b>Amostra</b>	<b>Período</b>	<b>vazão mensa(m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Vazão média(m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Período hidrológico</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Oxigênio Dissolvido (mg/L)</b>	<b>Condutividade (µm/cm)</b>	<b>pH</b>
1	jan/12	144005	137622.1	Enchente	29.3	4.50	66.1	7.3
2	fev/12	188614	163596.1	Enchente	28.0	4.30	60.2	7.0
3	mar/12	222933	186893.6	Enchente	28.0	3.32	50.5	7.0
4	abr/12	241526	208465.9	Cheia	28.7	2.45	43.2	6.9
5	mai/12	251634	222527.8	Cheia	28.6	2.50	43.0	7.2
6	jun/12	244369	222932.6	Cheia	27.8	3.00	55.7	6.8
7	ago/12	199593	188083.5	Vazante	29.7	3.90	41.0	7.3
8	set/12	145363	149995.9	Vazante	30.6	4.80	45.2	6.8
9	out/12	95233	111492.2	Seca	30.8	6.00	62.1	7.3
10	nov/12	85304	101759.2	Seca	31.1	5.60	67.7	7.2
11	dez/12	94122	114267.2	Enchente	29.7	6.40	72.0	7.6
12	jan/13	127892	137622.1	Enchente	29.2	5.40	72.6	7.7
13	fev/13	166450	163596.1	Enchente	28.4	5.10	64.3	7.3
14	mar/13	203846	186893.6	Enchente	28.4	4.30	49.5	6.5
15	abr/13	230001	208465.9	Cheia	29.0	3.00	48.8	6.4
16	mai/13	243701	222527.8	Cheia	28.9	3.20	44.9	7.0
17	jun/13	241516	222932.6	Cheia	29.0	6.40	45.1	8.3
18	jul/13	225961	211479.8	Cheia	28.8	4.90	45.0	7.9
19	ago/13	200822	188083.5	Vazante	28.8	7.00	41.4	7.8
20	set/13	169978	149995.9	Vazante	30.2	-	42.7	6.1
21	out/13	129486	111492.2	Seca	30.9	-	47.5	6.8
22	nov/13	116106	101759.2	Seca	-	-	-	-

**Anexo 2:**Resumo dos dados obtidos de elementos dissolvidos nos dois anos de coletas no canal principal do rio Amazonas, estreito de Óbidos.

Período	Vazão mensal(m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Vazão média(m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	Sazonalidade	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Li <sup>+</sup>	Rb <sup>+</sup>	Sr <sup>2+</sup>	Ba <sup>2+</sup>	U
jan/12	144005	137622.1	Enchente	217	59	93	27	119	18.2	531	193	0.35
fev/12	188614	163596.1	Enchente	206	55	80	26	116	17.7	505	193	0.36
mar/12	222933	186893.6	Enchente	175	49	69	26	113	18.1	427	180	0.30
abr/12	241526	208465.9	Cheia	138	41	60	24	108	19.5	347	171	0.29
mai/12	251634	222527.8	Cheia	140	41	63	24	102	19.9	351	175	0.24
jun/12	244369	222932.6	Cheia	161	45	77	25	97	21.1	401	195	0.23
ago/12	199593	188083.5	Vazante	124	34	78	21	84	19.7	309	155	0.20
set/12	145363	149995.9	Vazante	131	37	96	22	84	22.1	329	156	0.21
out/12	95233	111492.2	Seca	186	49	143	24	94	23.0	454	182	0.22
nov/12	85304	101759.2	Seca	198	56	151	26	118	22.0	494	185	0.22
dez/12	94122	114267.2	Enchente	214	61	149	28	121	19.8	532	189	0.23
jan/13	127892	137622.1	Enchente	237	67	114	30	129	18.0	577	207	0.25
fev/13	166450	163596.1	Enchente	217	61	93	30	129	19.2	528	209	0.35
mar/13	203846	186893.6	Enchente	161	46	70	26	116	19.4	400	179	0.31
abr/13	230001	208465.9	Cheia	159	46	66	27	119	20.5	399	187	0.26
mai/13	243701	222527.8	Cheia	149	41	67	24	96	20.8	374	182	0.23
jun/13	241516	222932.6	Cheia	145	41	74	22	95	20.4	365	180	0.24
jul/13	225961	211479.8	Cheia	140	37	73	21	86	19.7	349	173	0.22
ago/13	200822	188083.5	Vazante	129	34	79	20	90	18.9	319	155	0.22
set/13	169978	149995.9	Vazante	127	34	87	19	88	20.1	316	154	0.25
out/13	129486	111492.2	Seca	140	39	102	20	108	20.4	347	154	0.23
nov/13	116106	101759.2	Seca	173	49	123	24	106	20.3	422	170	0.23

**Anexo 3:** Resumo dos elementos dissolvidos para os anos de 2012 e 2013 separados pelas fases da hidrógrafa (Enchente, Cheia, Vazante e Seca)

<b>Período</b>	<b>Ano</b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>
Enchente	2012	202,97 (±19,2)	55,97 (±5,4)	97,99 (±35,6)	26,71 (±1,0)
Cheia	2012	146,26 (±12,9)	42,42 (±2,5)	66,94 (±9,2)	24,53 (±0,7)
Vazante	2012	127,66 (±5,2)	35,81 (±2,0)	87,12 (±12,4)	21,47 (±0,3)
Seca	2012	192,00 (±7,8)	52,52 (±4,6)	146,91 (±5,4)	24,95 (±1,3)
Enchente	2013	204,75 (±39,1)	58,17 (±10,9)	92,47 (±22,2)	28,73 (±2,3)
Cheia	2013	148,30 (±8,3)	41,30 (±3,6)	70,00 (±3,8)	23,60 (±2,8)
Vazante	2013	127,86 (±1,0)	34,05 (±0,3)	83,30 (±5,6)	19,28 (±0,4)
Seca	2013	156,53 (±23,1)	43,90 (±7,5)	112,19 (±14,6)	21,99 (±2,8)

<b>Período</b>	<b>Ano</b>	<b>Li<sup>+</sup></b>	<b>Rb<sup>+</sup></b>	<b>Sr<sup>2+</sup></b>	<b>Ba<sup>2+</sup></b>	<b>U</b>
Enchente	2012	117.39 (±3,2)	18.45 (±1,0)	498.79 (±49,3)	188.83 (±5,9)	0.31 (±0,1)
Cheia	2012	102.22 (±5,5)	20.17 (±0,8)	366.37 (±30,1)	180.52 (±12,4)	0.25 (±0,0)
Vazante	2012	84.22 (±0,3)	20.90 (±1,7)	319.29 (±14,0)	155.64 (±1,0)	0.21 (±0,0)
Seca	2012	105.73 (±16,7)	22.51 (±0,7)	473.84 (±27,9)	183.14 (±2,0)	0.22 (±0,0)
Enchente	2013	124.31 (±7,6)	18.88 (±0,7)	501.87 (±91,4)	198.21 (±16,9)	0.31 (±0,1)
Cheia	2013	98.89 (±14,0)	20.38 (±0,5)	371.57 (±20,9)	180.61 (±6,0)	0.24 (±0,0)
Vazante	2013	88.94 (±1,0)	19.52 (±0,9)	317.28 (±1,8)	154.66 (±0,9)	0.23 (±0,0)
Seca	2013	107.18 (±1,8)	20.35 (±0,0)	384.88 (±52,9)	161.81 (±11,6)	0.23 (±0,0)

**Anexo 4:** Resumo dos testes de Spearman para os dados de cátions, elementos traço e parâmetros físico-químicos do rio Amazonas para os anos de 2012 e 2013.

<b>SPEARMAN TEST</b>			
<b>X</b>	<b>Grupo</b>	<b>rho</b>	<b>p.value</b>
<b>Cátions</b>			
1	K <sup>+</sup>	-0.1268376	0.5353736
2	Ca <sup>2+</sup>	-0.4372650	0.0265209
3	Mg <sup>2+</sup>	-0.4516239	0.0215603
4	Na <sup>+</sup>	-0.9535043	0.0000006
<b>Elementos traço</b>			
5	Li <sup>+</sup>	-0.2977778	0.1394383
6	Rb <sup>+</sup>	-0.1548718	0.4482705
7	Sr <sup>2+</sup>	-0.4229060	0.0323789
8	Ba <sup>2+</sup>	0.0420513	0.8384795
9	U	0.1671795	0.4126132
<b>Parâmetros físico-químicos</b>			
10	Oxigênio Dissolvido	-0.70909091	0.00046342
11	pH	-0.17292490	0.42833051
12	Temperatura da água	-0.72435125	0.00009295
13	Condutividade	-0.67786561	0.00052922