

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

ERASMO CARLOS FERREIRA

**INFLUÊNCIA DO CLIMA E AMBIENTE SOBRE A DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-
TEMPORAL DA DOENÇA DE HAFF NA AMAZÔNIA**

FLORIANÓPOLIS

2026

ERASMO CARLOS FERREIRA

**INFLUÊNCIA DO CLIMA E AMBIENTE SOBRE A DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-
TEMPORAL DA DOENÇA DE HAFF NA AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada ao
Mestrado Profissional em Clima e
Ambiente do Campus Florianópolis
do Instituto Federal de Santa
Catarina para a obtenção do
diploma de Mestre em Clima e
Ambiente.

Orientador: Mathias Alberto
Schramm

Coorientador: Michel Nobre Muza

FLORIANÓPOLIS

2026

CDD 551.6
F383i

Ferreira, Erasmo Carlos

Influência do clima e ambiente sobre a distribuição espaço-temporal da doença de Haff na Amazônia [DIS] / Erasmo Carlos Ferreira; orientação de Mathias Alberto Schramm; coorientação de Michel Nobre Muza – Florianópolis, 2026.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Clima e Ambiente) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Doença de Haff. 2. Bacia Amazônica. 3. Variáveis ambientais. 4. El Niño-Oscilação Sul. 5. Atlântico Tropical. I. Schramm, Mathias Alberto. II. Muza, Michel Nobre. III. Título.

Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC

Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis

Catalogado por: Ana Paula F. Rodrigues - CRB 14/1117



Folha de Aprovação

Aluno: Erasmo Carlos Ferreira

Título:	Influência do Clima e Ambiente sobre a Distribuição Espaço Temporal da Doença de Haff na Amazônia
----------------	---

Aprovado pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Mestre em Clima e Ambiente

Dr. Mathias Alberto Schramm

Orientador / Presidente / IFSC / Itajaí – SC

Participação: ☒ Presencial ☐ Videoconferência

Documento assinado digitalmente
MATHIAS ALBERTO SCHRAMM
Data: 12/12/2025 09:56:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

☒ **Aprovado** ☐ **Reprovado**

Dr. Cássio Aurélio Suski

Avaliador Interno / IFSC / Itajaí – SC

Participação: ☐ Presencial ☒ Videoconferência

Documento assinado digitalmente
CASSIO AURELIO SUSKI
Data: 12/12/2025 16:36:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

☒ **Aprovado** ☐ **Reprovado**

Dr. Thiago Pereira Alves

Avaliador Interno / IFSC / Itajaí – SC

Participação: ☐ Presencial ☒ Videoconferência

Documento assinado digitalmente
THIAGO PEREIRA ALVES
Data: 15/12/2025 09:11:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

☒ **Aprovado** ☐ **Reprovado**

Dr. Luiz Fernando de Novaes Vianna

Avaliador Externo / Epagri/CIRAM / Florianópolis – SC

Participação: ☒ Presencial ☐ Videoconferência

Documento assinado digitalmente
LUIZ FERNANDO DE NOVAES VIANNA
Data: 15/12/2025 11:33:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

☒ **Aprovado** ☐ **Reprovado**

Dra. Sandra Maria Feliciano de Oliveira Azevedo

Avaliador Externo / UFRJ / Rio de Janeiro – RJ

Participação: ☐ Presencial ☒ Videoconferência

Documento assinado digitalmente
SANDRA MARIA FELICIANO DE OLIVEIRA E AZEVEDO
Data: 15/12/2025 13:56:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

☒ **Aprovado** ☐ **Reprovado**

Este trabalho foi aprovado por:

☐ maioria simples

☒ unanimidade

Florianópolis, 11 de dezembro de 2025



Dedico este trabalho aos meus pais (*in memoriam*), que, mesmo com sérias restrições de cultura, sempre pensaram que a minha educação não poderia estar alienada da educação formal. Aos meus irmãos, que compreenderam que esta seria uma fase de ausência e distanciamento do nosso convívio. E, principalmente, aos filhos (Débora e Arthur), que são a razão da minha jornada constante pelo aprender e que sempre apoiam a minha busca pelo conhecimento científico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente aos Professores Doutores Mathias Schramm (Orientador) e Michel Muza (Coorientador), pois, sem a competência, conhecimento, trabalho, dedicação e certa abnegação – que, segundo o dicionário eletrônico Oxford Languages, significa: “ação caracterizada pelo desprendimento e altruísmo, em que a superação das tendências egoísticas da personalidade é conquistada em benefício de uma pessoa, causa ou princípio; dedicação extrema; altruísmo” – para com este discente, não teria o êxito aqui apresentado.

Aos filhos Débora e Arthur, que me impulsionam a buscar sempre novos desafios e conhecimentos.

A todos os professores, pela dedicação e competência por apresentarem conteúdos de suma importância ao nivelamento de novos conhecimentos.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Estado de Santa Catarina, por dar-me a oportunidade de desenvolver este trabalho em suas dependências.

Aos que, de forma direta e indireta, com dicas, informações e conhecimentos fizeram parte deste trabalho.

Aos amigos e familiares que acreditaram que eu não desistiria de mais essa empreitada, nada fácil realmente, mas física e emocionalmente desafiadora e recompensadora em sua conclusão.

RESUMO

Este estudo busca apresentar, de forma objetiva, as possíveis influências que o clima e o ambiente podem exercer sobre a Doença de Haff. Essa doença caracteriza-se por uma *rabdomiólise* de origem desconhecida. Entretanto, considerou-se nesta pesquisa, como causa provável, as ficotoxinas produzidas por microalgas e transferidas a pescados. No Brasil, a Doença de Haff é registrada desde 2008 na região amazônica, associada ao consumo de peixes como Pacu (*Piaractus mesopotamicus*), Tambaqui (*Colossoma macropomum*) e Pirapitinga (*Piaractus brachypomus*). Nos últimos anos, o número e a frequência dos casos têm aumentado, refletindo, talvez, as alterações que são observadas no clima e no ambiente da região. Dessa forma, o objetivo da pesquisa é a análise e o mapeamento da Doença de Haff na Bacia Amazônica (BA), verificando relações entre variáveis climáticas e ambientais com as ocorrências da doença. Registros da doença, de 2008 a 2024, foram obtidos junto aos órgãos estaduais de saúde e Ministério da Saúde. Dados climáticos de precipitação e radiação foram coletados por meio de reanálises *ERA5* e de plataformas científicas, tais como: Centro Europeu de Previsão de Tempo a Médio Prazo (ECMWF), Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Agência Nacional de Águas (ANA), Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), Ministério da Saúde (MS), além de softwares como QGIS para confecção de mapas e *ERA5-Land* para reanálises de dados climatológicos. Registros diários da cota do Rio Negro, em Manaus, e do Rio Amazonas, em Itacoatiara, desde 2009 até 2024, foram retirados do site do Porto de Manaus. As análises dos dados mostram que os municípios de Itacoatiara e Manaus, no Amazonas, e de Santarém, no Pará, são os que registram o maior número de casos. Os dados também sugerem que a Doença de Haff ocorre em ciclos associados a variações ambientais e climáticas. O pico da doença acontece entre os meses de agosto e outubro, logo após o pico de cheia dos rios, que ocorre em junho. Essa maior ou menor elevação dos níveis dos rios tem influência direta do volume total de pluviosidade nas cabeceiras dos rios que formam a bacia hidrográfica. A radiação solar também parece ser um fator importante para o aumento da ocorrência da doença, uma vez que influencia diretamente na produtividade primária, promovendo o desenvolvimento dos organismos fotossintetizantes. As relações entre o clima, o ambiente e a doença necessitam de maiores estudos para aprofundar a compreensão desses parâmetros.

Palavras-Chave: Doença de Haff. Bacia Amazônica. Variáveis ambientais. El Niño-Oscilação Sul. Atlântico Tropical.

ABSTRACT

This study seeks to objectively present the possible influences that climate and environment may have on Haff disease. This disease is characterized by rhabdomyolysis of unknown origin; however, in this study, we consider the likely cause to be phycotoxins produced by microalgae and transferred to fish. In Brazil, Haff disease has been recorded since 2008 in the Amazon region, associated with the consumption of fish such as pacu (*Piaractus mesopotamicus*), tambaqui (*Colossoma macropomum*), and pirapitinga (*Piaractus brachypomus*). In recent years, the number and frequency of cases have increased, perhaps reflecting changes observed in the region's climate and environment. Thus, the objective of this research is to analyze and map Haff disease in the Amazon Basin (AB), verifying relationships between climatic and environmental variables and the occurrence of the disease. Records of the disease from 2008 to 2024 were obtained from state health agencies and the Ministry of Health. Climate data on precipitation and radiation were collected through ERA5 reanalyses and scientific platforms such as the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE), the National Institute for Space Research (INPE), the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), the National Water Agency (ANA), the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), the Ministry of Health (MS), and software such as QGIS for mapmaking and ERA5-Land for climate data reanalysis. Daily records of the water level of the Rio Negro in Manaus and the Amazon River in Itacoatiara, from 2009 to 2024, were taken from the Port of Manaus website. Data analysis shows that the municipalities of Itacoatiara and Manaus in Amazonas and Santarém in Pará have the highest number of cases. The data also suggest that Haff disease occurs in cycles associated with environmental and climatic variations. The peak of the disease occurs between August and October, shortly after the peak of the river floods, which occurs in June. This greater or lesser rise in river levels has a direct influence on the total volume of rainfall at the headwaters of the rivers that form the Hydrographic Basin. Solar radiation also appears to be an important factor in the increased occurrence of the disease, as it directly influences primary productivity, promoting the development of photosynthetic organisms. The relationships between climate and the environment and the disease require further study to deepen our understanding of the relationships between these parameters.

Keywords: Haff Disease. Amazon Basin. Environmental variables. El Niño Southern Oscillation. Tropical Atlantic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema representativo de sistemas meteorológicos que atuam na BHA: a) Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS); b) Zona de Convergência Intertropical (ZCIT); Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM); ventos alísios de nordeste (ANE); Alta da Bolívia.....	28
Figura 2: Mapa da Bacia Hidrográfica do Amazonas	33
Figura 3: Mapa da distribuição espacial dos casos de DH no Brasil	41
Figura 4: Mapa dos percentuais dos casos de DH por estado na região Amazônica entre 2008 e 2025	42
Figura 5: Mapas de distribuição espacial-temporal dos casos da DH para os anos de: a) 2008; b) 2015; c) 2021; d) 2022 e) 2023; e f) 2024	43
Figura 6: Mapas de precipitação na BHA em períodos mensais climatológicos entre os anos de 1991 e 2000: a) janeiro; b) fevereiro; c) março; d) abril; e) agosto; f) setembro; g) outubro; h) novembro	55
Figura 7: Mapas de anomalias de precipitação dos meses de dezembro de 2007 a março de 2008 e agosto, setembro, outubro e novembro de 2008	57
Figura 8: Mapas de anomalias de precipitação de dezembro de 2014 a março de 2015 e de agosto a novembro de 2015	58
Figura 9: Mapas de anomalias de precipitação de dezembro de 2020 a março de 2021 e de agosto a novembro de 2021	60
Figura 10: Mapas de anomalias de precipitação de dezembro de 2021 a março de 2022 e de agosto a novembro de 2022	63
Figura 11: Mapas de anomalias de precipitação de dezembro de 2022 a março de 2023 e de agosto a novembro de 2023	64
Figura 12: Mapas de anomalias de precipitação de dezembro de 2023 a fevereiro de 2024	65
Figura 13: Mapas quadrimestrais de radiação solar no período entre 1991 e 2023: a) meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março; b) abril, maio, junho e julho; c) agosto, setembro, outubro e novembro	69
Figura 14: Mapas quadrimestrais de anomalias de radiação referentes aos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março de 2007 a 2023	71
Figura 15: Mapas quadrimestrais de anomalias de radiação referentes aos meses de agosto, setembro, outubro e novembro, nos anos de 2008, 2015, 2020, 2021, 2022 e 2023	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Distribuição temporal dos casos de DH no Brasil entre os anos de 2008 e 2024	42
Gráfico 2: Distribuição da variação sazonal das cotas dos rios Negro (linha azul) e Amazonas (linha dourada) e distribuição temporal dos casos de DH na região Norte do Brasil	47
Gráfico 3: Distribuição temporal (mensal) dos casos de DH na Bacia Amazônica....	48
Gráfico 4: Cotas médias semanais dos rios Amazonas e Negro nos portos de Manaus e Itacoatiara	49
Gráfico 5: Séries históricas de cotas do Rio Amazonas	50
Gráfico 6: Risco médio de dias de inundação de acordo com as cotas do Rio Negro no porto de Manaus	51
Gráfico 7: Séries históricas de precipitação (linha azul – estação Itacoatiara; linha vermelha – estação Manaus) e série histórica de radiação (linha preta – Manaus; linha verde – Itacoatiara) entre os anos de 2000 e 2024	54
Gráfico 8: Dados temporais do ENOS (El Niño-La Niña) e ocorrência da DH entre 2000 e 2024	56
Gráfico 9: Dados e média mensal (bianual) de precipitação entre os anos de 2007 e 2008 nas estações 82331 (Manaus) e 82336 (Itacoatiara)	58
Gráfico 10: Dados e média mensal (bianual) de precipitação entre os anos de 2014 e 2015 nas estações 82336 e 82331	59
Gráfico 11: Dados e média mensal de precipitação entre os anos de 2020 e 2021 nas estações 82336 e 82331	62
Gráfico 12: Dados e média mensal (bianual) de precipitação entre os anos de 2021 e 2022 nas estações 82336 e 82331	63
Gráfico 13: Dados e média mensal (bianual) de precipitação entre os anos de 2022 e 2023 nas estações 82336 e 82331	65
Gráfico 14: Dados e média mensal (bianual) de precipitação entre os anos de 2023 e 2024 nas estações 82336 e 82331	66
Gráfico 15: Relação entre casos de Doença de Haff na Amazônia e a cota do Rio Negro em Manaus.....	67
Gráfico 16: Correlação entre casos de Doença de Haff na Amazônia e a cota do Rio Negro em Manaus, com defasagens de 15 a 75 dias	68
Gráfico 17: Dados dos níveis de radiação no período entre 2000 e 2024.....	70
Gráfico 18: Níveis de radiação e índices de precipitação nos municípios de Manaus e Itacoatiara no período entre os anos de 2007 e 2024	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Duração dos períodos hidrológicos dos ciclos de cheias e vazantes no município de Manaus-AM.....	31
Tabela 2: Casos notificados de Doença de Haff e estado predominante nos anos de 2008, 2015, 2021, 2022, 2023 e 2024.....	46
Tabela 3: Variação das cotas máximas e mínimas do Rio Negro em Manaus e média do número de dias com cotas entre 27 e 30 m, nos anos de 2008-2024	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Sistemas Climáticos/Ambientais Integrados para avaliação da ocorrência da Doença de Haff na Amazônia.....	75
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB	Alta da Bolívia
AM	Amazonas
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
AP	Amapá
AS	América do Sul
ATN	Atlântico Tropical Norte
AUs	Áreas Úmidas
BA	Bacia Amazônica
BHA	Bacia Hidrográfica do Amazonas
CAMS	Copernicus Atmosphere Monitoring Service
CH	Ciclo Hidrológico
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
CNZU	Comitê Nacional de Zonas Úmidas
DH	Doença de Haff
ECMWF	Centro Europeu de Previsão de Tempo a Médio Prazo
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
ENSO	El Niño-Southern Oscillation
EPSG	Coordinate Systems Worldwide
ERA5	Fifth Generation ECMWF Atmospheric Reanalysis
ET	Evapotranspiração
ETo	Evapotranspiração de Referência
GLM	Modelo Linear Generalizado
GrADS	Grid Analysis and Display System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MS	Ministério da Saúde
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OA	Oceano Atlântico
PA	Pará
PE	Pacífico Equatorial
PTT	Produto Técnico-Tecnológico
QGIS	Quantum Geographic Information System
RS	Radiação Solar
SCAI	Sistemas Climáticos/Ambientais Integrados
SGB	Serviço Geológico do Brasil
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SRG	Sistema de Referência de Coordenadas

SVSA	Secretaria de Vigilância em Saúde e Ambiente
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
TSM-AT	Temperatura da Superfície do Mar Atlântico
UTM	Universal Transverse Mercator
Z	Zênite
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 Geral.....	18
1.1.2 Específicos.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 DOENÇA DE HAFF	21
2.2 CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DA BACIA AMAZÔNICA.....	22
2.2.1 Rio Amazonas e Áreas Úmidas	29
2.2.2 Cotas dos Portos de Manaus e Itacoatiara.....	31
3 METODOLOGIA.....	33
3.1 ÁREA DE ESTUDO	33
3.2 CASOS DA DOENÇA DE HAFF	33
3.3 DADOS DAS COTAS DOS PORTOS DE MANAUS E ITACOATIARA	34
3.4 ANÁLISE E REANÁLISE DE DADOS CLIMÁTICOS	35
3.5 MAPAS E PROCESSAMENTO DE MATRIZES	36
3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	36
3.7 ANÁLISE DE MULTIDADOS	37
3.7.1 Sistemas Climáticos/Ambientais Integrados	38
4 RESULTADOS	41
4.1 DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DOS CASOS DE DH NA AMAZÔNIA..	42
4.2 CICLOS DE CHEIA E VAZANTE E COTAS DOS PORTOS DE MANAUS E ITACOATIARA	48
4.3 CLIMATOLOGIA DA AMAZÔNIA	54
4.4 DADOS ESTATÍSTICOS	66
4.5 RADIAÇÃO SOLAR.....	68
5 PRODUTO(S) DESENVOLVIDO(S)	74
5.1 SISTEMAS CLIMÁTICOS/AMBIENTAIS INTEGRADOS.....	74
5.2 PRODUTOS TÉCNICOS TECNOLÓGICOS (PTT)	75
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
REFERÊNCIAS.....	79

1 INTRODUÇÃO

Recentemente, ganhou força o conceito de One Health (Uma só Saúde/Saúde Única), definida pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como uma abordagem integrada e unificadora para equilibrar e otimizar a saúde das pessoas, dos animais e do ambiente, sendo particularmente importante para prevenir, prever, detectar e responder a ameaças à saúde global (Rizzotto *et al.*, 2025).

A ligação entre as doenças emergentes, as mudanças que estão ocorrendo no meio ambiente e a frequência de eventos climáticos extremos, como secas, tempestades severas, alteração nos padrões de chuva, ondas de calor e de frio, está bem estabelecida e vem sendo foco de vários pesquisadores, entre eles (Kovats, 2000; Wu *et al.*, 2024; Leite-Filho *et al.*, 2021; Souza, 2025).

Kovats (2000) abordou as relações entre Tempo, Clima e Saúde Humana, em especial sobre a variabilidade climática e o El Niño Oscilação Sul (ENOS), sobre a ocorrência e distribuição de doenças em diferentes regiões do mundo. Kovats (2000) afirma ainda que existem boas evidências epidemiológicas de que o El Niño está associado ao aumento no risco de certas doenças, especialmente malária, em áreas geográficas específicas onde tem influência sobre as variações climáticas.

Leal, Guimarães e Kampel (2021), estudando a relação entre parâmetros sociodemográficos e ambientais com a transmissão do vírus da Hepatite A no estado do Pará, observaram a relação positiva com os períodos de precipitação intensa. Fonseca (2022) mostrou que a variabilidade na precipitação e nos níveis dos rios influenciam na sazonalidade da incidência de malária em diferentes cenários hidrológicos da região Amazônica.

Segundo a Secretaria de Vigilância em Saúde do Ministério da Saúde, “a Doença de Haff é uma síndrome ainda de etiologia desconhecida, caracterizada por uma condição clínica que desencadeia o quadro de rabdomiólise com início súbito de rigidez e dores musculares” (Brasil, 2021).

No Brasil, a Doença de Haff (DH) foi registrada pela primeira vez em 2008 (Santos *et al.*, 2009) quando 25 pessoas foram internadas em Manaus com quadro de mialgia intensa após o consumo de peixes do Rio Amazonas, entre eles pacu (*Piaractus mesopotamicus*), tambaqui (*Colossoma macropomum*) e pirapitinga (*Piaractus brachypomus*). Nos últimos anos a frequência e o número de casos têm aumentado no Brasil, especialmente na região Amazônica (Brasil, 2024).

Diferentes hipóteses etiológicas para a Doença de Haff já foram propostas, entretanto, não sendo possível afirmar qual ou quais são os agentes causadores. Atualmente, a hipótese mais aceita é que a doença seja causada por alguma ficotoxina ou pela mistura de várias ficotoxinas, similares a Palytoxina, e produzidas por microalgas (Alcala *et al.*, 1988; Okano *et al.*, 1998; Onuma *et al.*, 1999; Yoshimine *et al.*, 2001; Taniyama *et al.*, 2002; Cardoso *et al.*, 2021).

Segundo Ramos e Vasconcelos (2010), as palytoxinas constituem um grupo de toxinas marinhas policetídicas, não proteicas, de altíssima massa molecular consideradas entre as substâncias naturais mais tóxicas já descritas. Nesse contexto, as palytoxinas emergem como candidatas plausíveis para as contaminações de DH uma vez que são toxinas marinhas termoestáveis, não são inativadas pelo cozimento e possuem elevada afinidade por tecidos musculares.

Considerando que a Doença de Haff é uma intoxicação causada por ficotoxinas que se acumulam no pescado, que essas ficotoxinas são produzidas por microalgas durante eventos de floração e que existem diferentes fatores ambientais e climáticos que atuam nesse processo, torna-se relevante investigar a relação entre essas variáveis e a ocorrência da doença. Nesse contexto, compreender como elementos do clima e do ambiente podem interferir na distribuição espaço-temporal dos casos contribui para ampliar o conhecimento científico sobre o tema e subsidiar ações de vigilância e monitoramento em saúde pública na região.

Assim, este trabalho busca verificar a influência de variações climáticas e ambientais sobre a ocorrência e a distribuição espaço-temporal dos casos de Doença de Haff na Bacia Amazônica no período entre 2008 e 2024.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Verificar a influência do clima e do ambiente sobre a ocorrência e distribuição espaço-temporal dos casos de Doença de Haff na Amazônia.

1.1.2 Específicos

- Analisar a distribuição espaço-temporal dos casos de Doença de Haff na Bacia

Amazônica.

- Verificar a relação entre o ciclo de cheia e vazante do Rio Amazonas e a distribuição dos casos de Doença de Haff durante os anos de ocorrência da doença.
- Verificar a influência das cotas do rio e do período de inundação na ocorrência da doença.
- Analisar a relação chuva x vazão nos processos de cheia e analisar a variação da radiação e sua correlação com a ocorrência dos casos de Doença de Haff.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DOENÇA DE HAFF

O Ministério da Saúde (Brasil, 2021) define a Doença de Haff (DH) como uma síndrome de etiologia desconhecida, caracterizada por rabdomiólise e início súbito de rigidez e dores musculares, na qual os sinais e sintomas ocorrem após o consumo de pescado, no período de até 24 horas.

Segundo Feng *et al.* (2014), é uma doença severa, que apresenta sintomas que muito se assemelham aos da rabdomiólise. Essa condição é caracterizada por ocorrência súbita de extrema rigidez muscular, mialgia difusa, dor torácica, dispneia, dormência e perda de força em todo o corpo, além do aumento dos níveis de creatinofosfoquinase, mioglobina, transaminases e desidrogenase láctica no sangue, geralmente acompanhadas por urina de coloração escura.

Descrita originalmente em 1924 próximo à costa do Mar Báltico (Meyer, 1924), a DH, ou *Haffkrankheit*, tem sido reportada em diferentes continentes: na Europa (Zu Jeddloh, 1939; Berlim, 1948), posteriormente nos EUA (Comings; Rosenfeld, 1961), Rússia (Ludupova *et al.*, 2009) e China (Chan, 2016).

Segundo Araújo *et al.* (2022), por ser uma doença de início súbito e que, devido ao quadro de rabdomiólise e à falência de múltiplos órgãos, observa-se um quadro de agravamento que, se não tratado imediatamente, pode levar à morte em menos de 24 horas.

Khan (2009) relata que poucos pacientes morrem em decorrência da doença; em sua maioria, os intoxicados sobrevivem e apresentam rápida recuperação, mas frequentemente necessitam de hospitalização e, por vezes, tratamento intensivo, sobretudo para prevenir e conter quadros de falência renal.

No Brasil, a DH é popularmente conhecida como doença da urina preta; os registros mais antigos da doença estão restritos ao Estado do Amazonas (AM) (Santos *et al.*, 2009; Tolesani Junior *et al.*, 2013), e mais recentemente casos compatíveis foram registrados no litoral do Nordeste do país (Bandeira *et al.*, 2017). Desde 2008, foram contabilizadas algumas centenas de casos de contaminação (Brasil, 2023), sendo que todos estão associados à ingestão de pescado.

Esses dados mostram uma distribuição espaço-temporal nas ocorrências dos surtos, com predomínio entre os meses de julho e novembro, ao longo do Rio Amazonas, entre as cidades de Manaus (AM) e Santarém (PA).

Nessa região, as principais espécies de peixes de água doce associadas aos casos foram pacu (*Piaractus mesopotamicus*), com 49,8% e o tambaqui (*Colossoma macropomum*), com 25,1% (Brasil, 2024).

De acordo com o Boletim Epidemiológico nº 1/2024 da Fundação de Vigilância em Saúde do Amazonas (FVS-RCP/SES-AM), o estado do Amazonas continuou a apresentar casos da DH em 2023. No período de 1º de janeiro a 31 de dezembro de 2023, foram notificados 104 casos de rabdomiólise em dez municípios do estado do Amazonas, dos quais 34 foram descartados. Os 70 casos restantes atenderam à definição de caso compatível com a DH e estavam distribuídos em oito municípios, sendo que 80,9% ocorreram entre os meses de julho a dezembro de 2023 e 67,6% dos casos foram concentrados no município de Itacoatiara.

Um estudo realizado por Wu *et al.* (2024), relata casos da DH que ocorreram na região de Wuhan, China, em um período compreendido entre 2016 e 2022, destacando que os relatos e as notificações são observados entre 13 julho e 19 de outubro de cada ano, e que o número de casos aumentou com a elevação do nível da água no rio Yangzi. Nos anos com alta taxa de incidência, a correlação entre o número de casos de DH e o nível da água do rio foi mais forte.

2.2 CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS DA BACIA AMAZÔNICA

A Bacia Hidrográfica do Amazonas (BHA) está posicionada entre os paralelos de 5° de latitude Norte e 20° de latitude Sul, e entre os meridianos de 48° e 79° de longitude Oeste, abrangendo vários estados da região Norte do Brasil, além de parte da hidrografia de vários outros países latino-americanos, englobando um total de 10 sub-bacias, que neste trabalho, para melhor compreensão, será dividida em quatro sub-bacias, a saber: Norte, Sul, Leste e Oeste, e 2.752 rios (ANA, 2023; Ellwanger *et al.*, 2020).

Segundo Fassoni-Andrade *et al.* (2021), a BHA é o principal sistema hidrológico do mundo, com cerca de 6 milhões de km², desaguardo no Oceano Atlântico, em média 206.103 m³/s, equivalente a 20% da água doce global. Dessa forma, torna-se peça-chave no sistema climático global.

A magnitude da Bacia Amazônica, associada à sua extensa rede de drenagem, exerce influência direta sobre os padrões atmosféricos e climáticos da região. Essa interação entre a dinâmica hidrológica e os processos meteorológicos evidencia o papel essencial do ciclo hidrológico na manutenção dos elevados índices pluviométricos característicos da Amazônia (Molion, 2005; Marengo, 2016).

Segundo os estudos de Fisch, Marengo e Nobre (1996), Correia *et al.* (2007), Limberger e Silva (2016) e Rocha *et al.* (2017), a precipitação média anual na Bacia Amazônica é de aproximadamente 2.000 mm nas áreas próximas ao Equador, podendo ultrapassar 3.000 mm/ano nas regiões oeste, noroeste e no litoral norte da Amazônia.

Rocha *et al.* (2017) enumera ainda que 20% da precipitação local advém do processo de evapotranspiração (ET), o que é corroborado por Castro *et al.* (2018), que concluem que 58% da precipitação é transformada em vapor, retornando para a atmosfera, e que 56% das águas pluviais do Rio Amazonas voltam à atmosfera pela ação das florestas. Assim, mais de 50% das chuvas são provenientes da recirculação do vapor d'água sobre a floresta amazônica, o que é preponderante para a manutenção do ciclo hidrológico da Bacia Amazônica.

De acordo com o informe anual da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2023), o ciclo hidrológico possui uma dinâmica própria que depende de elementos físicos e meteorológicos. Essa dinâmica é impulsionada por fatores como correntes de ar, que transportam vapor de água pelos continentes; a gravidade, responsável pelos fenômenos da precipitação, da infiltração e do deslocamento das massas de água; e a energia térmica solar, responsável pela evaporação da água, sendo a precipitação a principal fonte de entrada de água no ciclo.

O ciclo da água pode ser descrito como tendo início na evaporação da água dos oceanos; o vapor resultante é transportado pelo movimento das massas de ar, que, sob determinadas condições, é condensado, formando nuvens que podem resultar em precipitação (Balbinot *et al.*, 2008). O balanço de água na bacia central da Amazônia indica que mais da metade da água que cai como chuva retorna para atmosfera por meio do processo de evapotranspiração, enquanto 45% é drenada pelos rios. De forma geral, estudos mostram que o desflorestamento de grande escala na Amazônia conduz a impactos significativos nos balanços de radiação, energia e água, com aumento na temperatura da superfície (1-3 °C), redução na

evapotranspiração (-40%) e redução na precipitação total da ordem de 30% (Silveira *et al.*, 2017).

A interação entre a floresta amazônica e a atmosfera constitui um dos principais mecanismos de regulação climática da região, sustentando a alta umidade e a recorrência das chuvas. Estudos apontam que a reciclagem de vapor d'água gerada pela vegetação contribui de forma significativa para a manutenção da precipitação em diferentes escalas espaciais (Shukla; Nobre; Sellers, 2009).

Portanto, alterações na cobertura vegetal, como o desmatamento, não apenas reduzem a evapotranspiração, mas também comprometem a redistribuição de umidade e a estabilidade do ciclo hidrológico em toda a Bacia Amazônica (Martinelli; Filoso, 2008; Marengo; Espinza, 2016).

Pereira (2004) ressalta que, devido a diversos fatores, entre eles a posição geográfica, a vegetação, o ciclo hidrológico e a topografia local, a BHA apresenta características de chuvas convectivas, apresentando clima equatorial, quente e úmido, com média anual de temperatura entre 24° a 26 °C. Limberger e Silva (2016) sugerem que o padrão do regime de chuvas na região é monçônico, sendo influenciado, segundo Rosso (2021), pelo Sistema de Monções da América do Sul (SMAS). A distribuição espacial e temporal das chuvas na Amazônia exerce influência direta sobre os processos hidrológicos e energéticos da região.

Segundo Muza e Carvalho (2006), trabalhos anteriores indicam que a característica espaço-temporal da precipitação extrema durante o verão austral depende de mecanismos variando da escala intrasazonal a interanual. Como consequência, tais mecanismos podem afetar as características da distribuição das chuvas sobre o centro-sul da Amazônia.

Essa relação evidencia que a variabilidade pluviométrica é um dos principais fatores de regulação do ciclo hidrológico amazônico, modulando o balanço de energia e os fluxos de vapor d'água na bacia (Gonçalves; Silva Dias; Machado, 2019).

A dinâmica hidrológica da Bacia Amazônica, fortemente condicionada pela sazonalidade das chuvas e pelas variações no nível dos rios, está intrinsecamente associada à disponibilidade e à intensidade da radiação solar na região (Marengo *et al.*, 2018).

A radiação influencia processos-chave como a evaporação e a evapotranspiração, regulando o ciclo da água e, conseqüentemente, o balanço hídrico. Assim, compreender a interação entre regime pluviométrico, fluxo fluvial e

energia solar é fundamental para analisar o funcionamento climático e ecológico da bacia.

De acordo com Bomventi, Wainer e Taschetto (2006), quase toda a energia do Planeta Terra é proveniente da radiação solar (RS), de onda curta, o que exige um balanço entre a radiação solar incidente – que atinge a superfície da Terra – e a radiação de onda longa emitida da Terra para o espaço. Outra parte do balanço de energia ocorre na forma de calor latente, associado à evaporação na superfície, e de calor sensível, relacionado à condução de calor.

De toda a energia solar irradiada, somente 25% (denominada de insolação direta) chega à superfície sem interferência da atmosfera. Cerca de 26% é composta pela radiação difusa, que é a radiação solar que chega à Terra após ter sido dispersada por moléculas de gases e aerossóis presentes na atmosfera. Os outros 49% restantes são reenviados de diversas maneiras de volta para o espaço ou para a atmosfera (Ometto, 1981).

Segundo Azevedo (1997), cerca de 73% do saldo de radiação sobre a floresta amazônica é gasto na evaporação e na transpiração das árvores, enquanto 27% são utilizados em outros processos, sendo cerca de 1% empregado na fotossíntese e 26% no aquecimento do ar e do solo, sendo a radiação solar vital para a evapotranspiração (ET) local.

Para Pereira, Villa Nova e Sedyama (1997), a ET é controlada pelo balanço energético, pela demanda atmosférica e pelo fornecimento de água do solo às plantas. O ciclo hidrológico representa o contínuo movimento da água na Terra sob a ação da gravidade e da energia solar. A avaliação dos termos que compõem a equação do balanço hídrico, especialmente a ET, envolve o levantamento de dados observados ou o desenvolvimento de expressões que representem o mecanismo de transporte dos volumes de água.

A evapotranspiração de referência (ET_o) representa o processo de perda de água para a atmosfera, considerando uma superfície gramada padrão cobrindo o solo, sem restrição de umidade, sendo controlada pelo balanço energético, pela demanda atmosférica e pelo fornecimento de água do solo às plantas (Pereira *et al.*, 1997).

Pesquisas realizadas que tratam do equilíbrio hidrológico-atmosférico da Amazônia concluíram que a ET_o representa aproximadamente 59 a 82% das chuvas, proporcionando uma melhor interação com o balanço hídrico da região (Marengo, 2005).

Para Castro *et al.* (2018), na Bacia Amazônica, o balanço hídrico apresenta divergências em períodos sazonais, nas sub-bacias que formam a bacia principal, eventos de precipitação, vazão e evaporação apresentam comportamentos distintos. Quando a precipitação aumenta e a evaporação diminui em determinadas sub-bacias, observam-se variações entre as margens esquerda e direita do rio, apresentando grande regularidade no regime hidrológico anual. Ou seja, as sub-bacias que estão em regime de seca pluviométrica são compensadas pelas sub-bacias que se encontram na época de cheias, fazendo com que o regime hidrológico anual varie ligeiramente de ano para ano, conforme estudos de Callède *et al.* (2002).

A evapotranspiração exerce papel fundamental na formação do vapor d'água atmosférico na Amazônia, não se restringindo à umidade advectada do Oceano Atlântico pelos ventos alísios. Estima-se que aproximadamente 50% do vapor d'água regional seja gerado pela própria floresta, o que torna o uso e a cobertura do solo fatores determinantes nesse processo. Simulações climáticas realizadas por Sampaio *et al.* (2007) indicam que a substituição da floresta por pastagens pode reduzir a evapotranspiração entre 15% e 30% e a precipitação entre 5% e 20%, favorecendo a intensificação de secas extremas e o aumento da ocorrência de queimadas.

Na Amazônia, os diferenciais entre as estações de inverno e verão estão intrinsecamente ligados às células de circulação de Hadley (meridional) e Walker (zonal), que são descritas como circulações que surgem em resposta às diferentes pressões chamadas de Oscilação Sul, observadas na zona equatorial da bacia do Oceano Pacífico (Gomes, 2018).

Gomes (2018) enumera ainda que a Circulação de Walker é constituída de células ao longo do planeta, com movimentos ascendentes no oeste do Pacífico Tropical entre (160° e 180° E), na Amazônia (60° W) e a oeste da África. As regiões de subsidência ficam localizadas próximo da costa oeste do continente sul-americano (90° W), no Oceano Atlântico (0°) a leste da África.

Ambas exercem o papel de reguladoras do balanço de energia terrestre, sendo a de célula de Hardley resultado do diferencial de aquecimento entre os trópicos e as latitudes médias, dando origem à formação de uma circulação meridional, juntamente com convecções locais e da ZCIT, entre os meses de junho a agosto (Lucena, 2008; Limberger; Silva, 2016).

Camargo *et al.* (2007) reforçam que as células de Circulação de Walker também têm importância para a Bacia Amazônica, pois sofrem uma influência direta dos movimentos dos ventos alísios durante sua formação.

A Alta da Bolívia é outro fator meteorológico que, segundo Gusmão (1996), é caracterizada por um anticiclone que ocorre na alta troposfera no verão sobre a América do Sul. O padrão de circulação do verão na alta troposfera mostra a formação de um anticiclone sobre a parte central na América do Sul e um cavado no Nordeste brasileiro.

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é caracterizada por uma zona de alta nebulosidade próxima ao Equador, onde os ventos originários dos hemisférios Norte e Sul se encontram (ventos alísios). Destacam-se as seguintes características: está localizada na faixa tropical, onde existe a presença de fracos gradientes de pressão, predominância de ventos fracos e temperatura da superfície do mar (TSM) elevada. O valor médio de pressão observado está em torno de 1.008 hPa, com presença de cúmulos e cumulonimbos cujos topos vão além de 12.000 m, além de altas camadas de cirros. Sobre os continentes, a ZCIT não é tão delineada quanto sobre os oceanos. É responsável por chuvas intensas sobre regiões tropicais como Brasil, África e Indonésia (Andrade, 2007).

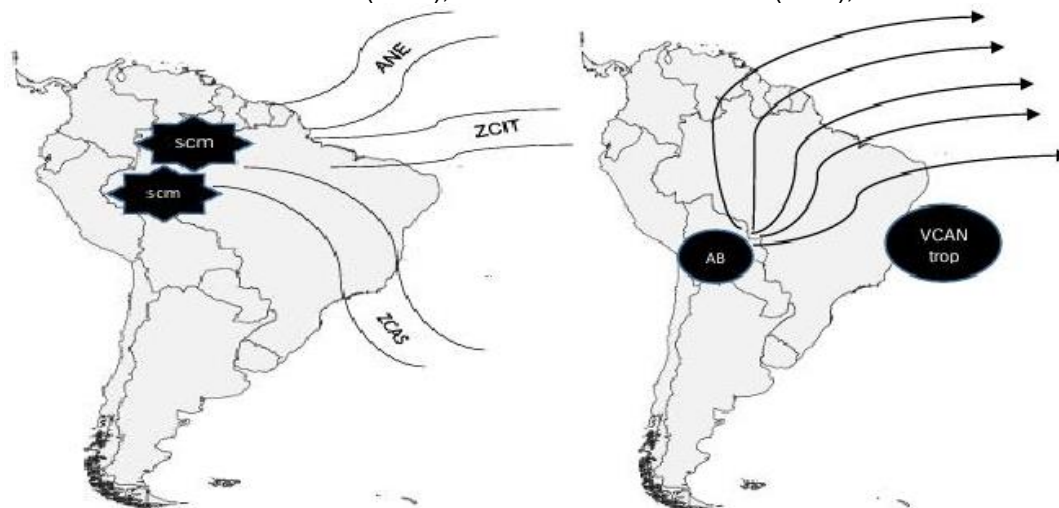
Ferreira (1996) reforça que este é um dos mais importantes sistemas meteorológicos que atuam nos trópicos e se mostra decisivo na caracterização de diferentes condições de clima e tempo nas áreas tropicais, especificamente no norte do Nordeste brasileiro.

Ferreira (1996) conclui, também, que a ZCIT está inserida em uma região onde ocorrem interações atmosféricas e oceânicas, como zona de confluência dos alísios, zona do cavado equatorial, zona de máxima temperatura da superfície do mar, zona de máxima convergência de massa e zona da banda de máxima cobertura de nuvens convectivas, todas interagindo próximas à faixa equatorial.

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é, segundo Quadro (2012), um fenômeno meteorológico que exerce papel preponderante no regime de chuvas na região onde estiver atuando, acarretando altos índices de pluviométricos na América do Sul. Já para Oliveira (2019), é um importante sistema meteorológico atuante no verão austral da América do Sul e marca a estação chuvosa devido aos períodos associados de intensa precipitação, sendo caracterizada por uma banda de nebulosidade orientada noroeste-sudeste, que atua desde o sul da Amazônia até o

sudoeste do Atlântico Sul, passando pelas regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil (Figura 1).

Figura 1: Esquema representativo de sistemas meteorológicos que atuam na BHA: a) Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS); b) Zona de Convergência Intertropical (ZCIT); Sistema Convectivo de Mesoescala (SCM); ventos alísios de nordeste (ANE); Alta da Bolívia



Fonte: Elaborada pelo autor

Este regime é modulado por sistemas dinâmicos de microescala, mesoescala e escala sinótica que, em períodos de eventos climáticos extremos, podem variar entre as sub-bacias, apresentando características sazonais de clima. Nessas condições, períodos de cheias e de secas influenciam diretamente as características físicas, morfológicas, climáticas e ambientais da Bacia Amazônica, impactando a salinidade superficial do mar (SSM) (Gouveia, 2019), intensificando o ciclo hidrológico e relacionando-se a anomalias positivas da TSM, no Atlântico Tropical Norte (ATN).

A temperatura da superfície do mar (TSM) no Atlântico Tropical Norte (ATN), diretamente influenciada pela radiação solar, desempenha papel relevante na modulação da precipitação na América do Sul. Anomalias positivas de TSM, acima das médias climatológicas entre 24 °C e 30 °C, favorecem o deslocamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) para latitudes mais ao norte, resultando na redução da convergência de umidade sobre a Bacia Amazônica (Silva, 2015).

Silva (2015) salienta ainda que a TSM sofre grandes influências do El Niño-Oscilação Sul (ENOS), principalmente com relação às forçantes remotas no Atlântico Tropical, sendo também influenciada por mudanças na convecção no Pacífico Tropical associadas ao ENOS em várias regiões do ATN.

Cada evento ENOS possui características próprias devido às diversas forçantes tropicais e extratropicais que atuam com diversas intensidades, conjugadas

ou não com outras anomalias TSM e, portanto, modificam os impactos associados a cada evento ENOS (Ambrizzi, 2003).

Martins (2022) reforça que fatores como correntes oceânicas quentes, que elevam a temperatura em determinadas áreas oceânicas, os ventos alísios que influenciam a evaporação e fenômenos como El Niño e La Niña influenciam diretamente o aumento da TSM no Atlântico Tropical Norte.

2.2.1 Rio Amazonas e Áreas Úmidas

O Rio Amazonas possui aproximadamente 7 mil quilômetros de extensão e volume de vazão de cerca 210.000 m³/s, despejando aproximadamente 31 toneladas de sedimentos no Oceano Atlântico a cada segundo. O rio também se encontra na maior planície fluvial do Brasil e é do tipo meandro (apresenta tortuosidades ao longo do seu curso), nascendo na Cordilheira do Andes, no Peru, e tendo sua bacia finalizada no Oceano Atlântico. Grande parte do território da bacia encontra-se em áreas de planícies e planaltos na região Norte do Brasil (ANA, 2018).

Entre os principais afluentes do Amazonas, destacam-se, pela margem direita, os rios Javará, Juruá, Jutá, Purus, Madeira, Tapajós e Xingu e, pela margem esquerda, os rios Içá, Japurá, Negro, Uatumã, Nhamundá, Trombetas e Jari (ANA, 2018).

A sazonalidade dos períodos de cheia e vazante do Rio Amazonas está intrinsecamente ligada ao regime de precipitação e ao ciclo hidrológico na grande bacia, sendo que, ao norte da bacia, o máximo da cheia ocorre entre junho e julho e, nos rios localizados na parte centro-sul da bacia, a cheia ocorre entre março e maio (Silva, 2017).

Silva (2017) apresenta ainda a seguinte geometria do Rio Amazonas: Amazonas-Peru. O Rio Amazonas nasce no Nevado de Mismi, Cordilheira Oriental dos Andes Peruanos, entre as cidades de Cuzco e Arequipa, a uma altitude de aproximadamente 5.300 m, a montante do rio Apurímac, que formará o rio Ucayali. Após a confluência com o rio Marañon, ainda no Peru, passa a ser chamado de Amazonas.

Matos *et al.* (2021) enumeram que a temperatura da água do Rio Amazonas na região próxima a Manaus apresenta uma variação sazonal típica, com temperaturas

que raramente descem abaixo de 20 °C, sendo a temperatura máxima registrada 30 °C.

Da Silva Less e Da Cunha (2021) reforçam os dados obtidos por Matos *et al.* (2021), destacando que, em março, por exemplo, a temperatura média da água é de 25,8 °C, com a máxima podendo chegar a 28 °C. A temperatura média da água em 2014 foi de 29,52 °C; em 2015, de 29,63 °C; e, em 2016, também de 29,63 °C. O estudo ressalta que foi constatada significativa variação sazonal, com 28,65 °C na cheia e 30,02 °C na seca.

Medidas similares foram obtidas em outras seções do Rio Amazonas. Os autores também constataram a baixa variação temporal da temperatura da água, característica dos grandes rios e suas áreas úmidas ou áreas inundáveis. Segundo a Recomendação do Comitê Nacional de Zonas Úmidas (CNZU) nº 7 (2015, p. 1), as áreas úmidas (AUs) são:

[...] ecossistemas na interface entre ambientes terrestres e aquáticos, continentais ou costeiros, naturais ou artificiais, permanente ou periodicamente inundados ou com solos encharcados. As águas podem ser doces, salobras ou salgadas, com comunidades de plantas e animais adaptados à sua dinâmica hídrica.

Cerca de 20% da superfície da América do Sul é coberta por áreas úmidas (Piedade; Schöngart; Junk, 2005). À medida que classificações mais minuciosas são elaboradas, esse valor tende a aumentar (Junk *et al.*, 2011). O estudo aqui apresentado está voltado para a região amazônica, onde as áreas inundáveis também são chamadas de várzea e normalmente se localizam entre os grandes rios da bacia, como os rios Solimões, Amazonas e Negro (Teixeira; Sano, 2008).

De acordo com seu regime hidrológico, as áreas úmidas podem ser divididas em dois grandes grupos: aquelas com coluna de água relativamente estável, como os pântanos e turfeiras, e aquelas com grandes flutuações no nível da água, com períodos sazonais em seu ciclo hidrológico. A Tabela 1 indica os períodos e os números aproximados de dias em que ocorrem os eventos de cheia e vazante do Rio Negro (Cunha; Piedade; Junk, 2013).

Tabela 1: Duração dos períodos hidrológicos dos ciclos de cheias e vazantes no município de Manaus-AM

Período	Típico (dias)	Longo (dias)	Curto (dias)
Enchente	90 a 160	acima de 160	abaixo de 90
Cheia	60 a 160	acima de 160	abaixo de 60
Vazante	30 a 70	mais de 70	abaixo de 30
Seca	30 e 120	mais de 120	abaixo de 30

Fonte: Adaptada de Bittencourt e Amadio (2007)

Os principais fatores hidrológico-hidráulicos naturais que propiciam enchentes e inundações, de acordo com Monte *et al.* (2015), são o relevo, o tipo e a intensidade da precipitação, a cobertura vegetal, a capacidade de drenagem, a geologia, a morfologia fluvial, a extensão do canal e da planície de inundação, a interação canal-planície de inundação e rugosidade, sugerindo grande importância em sua área de drenagem. Melack *et al.* (2009, p. 47-48) salientam que:

A planície de inundação central da Amazônia é representada pelo trecho de 2600 km no rio Solimões/Amazonas entre os meridianos -70.5° -52.5° que possui cerca de 6500 lagos e planícies de inundação associados, e também os 400km finais dos principais tributários (Japurá, Purus, Negro e Madeira).

Segundo Sorribas (2016), a área de drenagem da BHA está localizada na região tropical, sendo o rio principal situado apenas alguns graus ao sul da linha do Equador. Sorribas (2016) destaca ainda que o regime de chuvas evidencia forte oposição entre os trópicos Norte e Sul devido à alternância do aquecimento de cada hemisfério, com estações secas de junho a agosto no hemisfério sul e de janeiro a março ao norte do Equador. A principal variabilidade das estações chuvosas ocorre em escalas decadal e interanual, sendo que a variabilidade interanual da chuva depende particularmente do ENOS.

2.2.2 Cotas dos Portos de Manaus e Itacoatiara

Os níveis do Rio Negro são registrados e quantificados desde 1902, quando era considerado um dos mais antigos e eficientes serviços de medição de níveis de rios da Bacia Amazônica, realizado pela companhia inglesa Manaus Harbour Limited, então exploradora do Porto de Manaus. Atualmente, essas medições são realizadas por estações telemétricas e convencionais da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), do Serviço Geológico do Brasil (SGB), coordenadas pela Agência Nacional de

Águas e Saneamento Básico (ANA), nos principais portos da região e suas áreas úmidas (AUs) e inundáveis (Mello, 2001).

De acordo com o Boletim de Alerta Hidrológico da Bacia do Amazonas (SGB, 2025, p. 9):

o Rio Negro em Manaus apresenta um hidrograma estável, em que 76% dos anos da série histórica a cota máxima é atingida no mês de junho e 18% no mês de julho. A partir daí o Rio Negro tende a iniciar seu processo de vazante, até que atinja a cota mínima. O fim da vazante, por sua vez, não apresenta um período preferencial, podendo ocorrer entre outubro e janeiro do próximo ano.

As mesmas instituições monitoram os níveis do Rio Amazonas no Porto de Itacoatiara e emitem, em seus relatórios, as cotas máximas e mínimas atingidas em cada porto em séries históricas.

As cotas estão associadas aos níveis de precipitação ocorridos em períodos anteriores aos meses de maior incidência da doença, que se concentram entre julho e novembro.

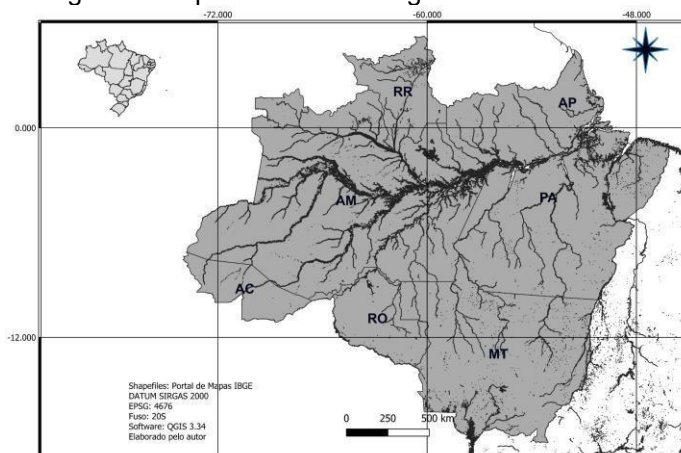
Fleischmann *et al.* (2023) ressaltam que sete dos dez maiores níveis máximos anuais de água registrados nos últimos 119 anos em Manaus, na confluência entre os rios Negro e Amazonas, ocorreram desde 2009, e que o maior nível já registrado foi no ano de 2021, no município de Manaus. Em sua pesquisa, os autores concluíram que ocorreu um aumento de 26% na inundação máxima anual ao longo do Rio Amazonas desde 1980.

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

Esta pesquisa tem como área de estudo a Bacia Amazônica brasileira (BA) (Figura 2) situada nos estados de Roraima, Rondônia, Acre e parte do Mato Grosso, com foco nos estados do Amazonas, Pará e Amapá. Buscou-se analisar de que maneira as condições climáticas características da Amazônia – incluindo variáveis meteorológicas e hidrológicas, como precipitação, temperatura, radiação solar, cotas de cheia e vazante – poderiam estar relacionadas à ocorrência e à distribuição espaço-temporal dos casos de Doença de Haff nos municípios da região estudada.

Figura 2: Mapa da Bacia Hidrográfica do Amazonas



Fonte: Adaptada do Portal de Mapas do IBGE. Shapefiles: SIMGEO/IBGE

3.2 CASOS DA DOENÇA DE HAFF

Para a coleta de dados referentes à DH, entre 2008 e novembro de 2021, foram utilizados dados oriundos de artigos acadêmicos e literatura científica (revistas e periódicos). Os registros referentes aos casos suspeitos da doença na região amazônica, anteriores a 2008, não eram oficialmente catalogados ou informados ao Ministério da Saúde (MS), havendo a possibilidade de subnotificação ou de ausência de notificação dos casos de DH.

Com a publicação da Nota Técnica nº 52/2021, passou a ser obrigatória a notificação de todos os casos suspeitos. Os dados incluem, quando possível, informações de dia, mês, ano, município e número de ocorrências, possivelmente

contabilizando casos de contaminação em moradores que vivem em regiões que fazem divisa com os municípios que relataram ao MS os casos de contaminação.

Isso, contudo, não exclui a possibilidade de ocorrer subnotificação de casos em regiões mais afastadas dos centros de saúde. Essas informações foram utilizadas para gerar gráficos e mapas de distribuição espacial e temporal dos casos de DH, além de análises da relação com a cota do rio, precipitação e irradiação solar.

3.3 DADOS DAS COTAS DOS PORTOS DE MANAUS E ITACOATIARA

Registros diários das cotas do Rio Amazonas nos portos de Manaus e de Itacoatiara, ambos do estado do Amazonas, entre 2007 e 2025, foram obtidos do site da PROA Manaus. Os registros de cotas máxima e mínima no Porto de Manaus, entre 1903 e 2024, foram obtidos no site Porto de Manaus e no Serviço Geológico do Brasil (SGB).

A análise dessas séries históricas das cotas máximas e mínimas do Rio Amazonas no Porto de Manaus foi realizada a partir da segmentação temporal do registro hidrológico em dois períodos distintos: 1903-1969 e 1970-2024. Essa divisão foi adotada com o objetivo de identificar possíveis mudanças no regime hidrológico ao longo do século XX e início do século XXI, considerando a maior disponibilidade e padronização dos dados hidrométricos a partir da década de 1970, bem como evidências de intensificação da variabilidade climática e hidrológica em períodos mais recentes.

Para cada ano hidrológico, as cotas máximas e mínimas anuais foram definidas, respectivamente, como os maiores e os menores níveis do rio registrados no intervalo anual, permitindo a avaliação dos extremos hidrológicos associados aos eventos de cheia e estiagem. As séries foram analisadas separadamente para cada período, de modo a possibilitar comparações intertemporais e a identificação de padrões de variabilidade e tendência.

A interpretação das séries baseou-se na análise visual da variabilidade interanual e na aplicação de linhas de tendência linear, utilizadas como ferramenta exploratória para indicar possíveis alterações de longo prazo no comportamento das cotas máximas e mínimas. Esse procedimento permitiu avaliar diferenças no regime das cheias e vazantes entre os períodos analisados, bem como investigar indícios de

intensificação de extremos hidrológicos, sem pressupor causalidade direta, mas fornecendo subsídios para análises climáticas e ambientais integradas.

3.4 ANÁLISE E REANÁLISE DE DADOS CLIMÁTICOS

Os conjuntos de dados de reanálise climática são amplamente utilizados em estudos que abrangem desde análises climatológicas até a investigação de desastres naturais, sendo majoritariamente produzidos por centros especializados em meteorologia. No presente estudo, os dados climáticos e ambientais de reanálise foram submetidos a uma análise exploratória com o objetivo de caracterizar sua distribuição espacial e temporal, bem como identificar padrões sazonais e interanuais de anomalias atmosféricas, considerando as variáveis de precipitação e radiação solar, além das condições do oceano adjacente, representadas pela temperatura da superfície do mar (TSM).

Para o processamento e a análise dos dados, foi utilizado o software Grid Analysis and Display System (GrADS), um sistema de análise e visualização de dados em grade que suporta diversos formatos, incluindo binário, GRIB e Network Common Data Form (NetCDF), e permite a manipulação de múltiplas variáveis climáticas, atmosféricas, terrestres e oceânicas. As reanálises climáticas (precipitação, radiação solar e TSM) foram obtidas a partir do conjunto de dados ERA5, que apresenta resolução espacial de aproximadamente 10 km sobre a região amazônica e disponibiliza dados com resolução temporal horária.

Os dados do ERA5, produzidos pelo Centro Europeu de Previsão do Tempo de Médio Prazo (ECMWF) e lançados em 2019, fornecem estimativas consistentes e coerentes das variáveis climáticas globais ao longo de várias décadas, representando um avanço significativo em relação às reanálises anteriores, especialmente no que se refere à resolução espacial, temporal e à qualidade dos dados. Nesse sentido, o uso do ERA5 possibilita uma melhor compreensão dos padrões climáticos, a identificação de mudanças relevantes e a avaliação de seus potenciais impactos em escala regional.

Para este estudo, foram utilizados dados do período de 1991 a 2024, a partir dos quais foi calculado o período climatológico de referência e, posteriormente, as anomalias mensais de precipitação e radiação solar, definidas como a diferença entre os valores observados e a climatologia (anomalia = observado – climatologia).

3.5 MAPAS E PROCESSAMENTO DE MATRIZES

A cartografia do estudo foi elaborada por meio do software QGIS (versão 3.34.6), que é um Sistema de Informações Geográficas (SIG) multiplataforma e de livre acesso. Foram utilizados *shapefiles* referentes às unidades da federação, limites municipais do Brasil, massas d'água da Bacia Amazônica e limites da América do Sul, todos obtidos a partir do Portal de Mapas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Os dados espaciais foram organizados e processados em conformidade com o Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) EPSG, adotando-se o Sistema de Referência Geodésico para as Américas (SIRGAS, 2000) como datum geodésico, no fuso UTM 20S, adequado à área de estudo.

Adicionalmente, foram utilizados o software Python, uma linguagem de programação de código aberto, de alto nível e orientada a objetos, e o Microsoft Excel, para o tratamento dos dados, elaboração de planilhas, geração de gráficos e apoio à construção dos mapas temáticos.

3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A análise estatística realizada neste trabalho teve como objetivo explorar a relação entre a “Cota do rio” e o número de “Casos” de doença ao longo do tempo. As principais técnicas estatísticas e abordagens utilizadas foram: Modelos de Regressão Linear e Modelo Linear Generalizado (GLM) Poisson, nos quais foram aplicados dois tipos de modelos de regressão para entender a relação entre “Cota do rio”, como variável preditora e, “Casos”, como variável resposta.

Na Regressão Linear, um modelo linear básico foi ajustado para avaliar se existe uma relação linear direta entre as variáveis. Já no Modelo Linear Generalizado (GLM), considerando que a variável “Casos” representa contagens (dados não negativos e inteiros), utilizou-se função de ligação logarítmica, sendo a distribuição Poisson considerada mais apropriada do que a regressão linear clássica. O modelo Poisson é adequado para modelar dados de contagem e lida com a suposição de que a variância é igual à média.

O que é correlação com defasagem? Ela mede a correlação entre duas séries temporais, mas com uma série deslocada no tempo em relação à outra. Uma correlação positiva em um determinado intervalo de tempo sugere que valores altos

na primeira série estão associados a valores altos na segunda série após esse intervalo.

A Análise de Correlação Defasada reconhece a natureza temporal dos dados. Essa técnica envolve calcular o coeficiente de correlação entre a série temporal “Cota do rio” e a série temporal “Casos”, porém com a série da “Cota do rio” em um determinado número de dias (o *lag*). Isso permite identificar a relação entre a “Cota do rio” em um determinado momento e o número de “Casos” que ocorrem algum tempo depois. Foram explorados diferentes *lags* (entre 5 dias e 60 dias) para encontrar o período de defasagem em que a correlação é mais forte.

Para complementar a análise de regressão, foi investigada a frequência com que valores extremos de “Cota do rio” e “Casos” ocorrem individualmente e em conjunto,

considerando diferentes defasagens. Foram definidos limites para valores extremos (por exemplo, usando percentis) e contada a ocorrência de:

- “Cota do rio” alta defasada e “Casos” altos.
- “Cota do rio” baixa defasada e “Casos” baixos.
- “Cota do rio” alta defasada e “Casos” baixos.
- “Cota do rio” baixa defasada e “Casos” altos.

Essas abordagens estatísticas, combinadas com a visualização dos dados e dos resultados dos modelos, permitiram investigar a potencial influência da “Cota do rio” sobre o número de “Casos” da doença, particularmente considerando possíveis relações de causa e efeito com defasagem temporal. As análises descritivas e construção de gráficos foram realizadas com o uso dos Softwares SigmaPlot e Google Colab na linguagem de programação Python.

3.7 ANÁLISE DE MULTIDADOS

O levantamento e análise de dados espaço-temporais de curto, médio e longo prazo, que serviram de ponto de apoio à pesquisa, tais como a Temperatura da Superfície do Mar (TSM), utilizada para análise do aquecimento das águas superficiais do Oceano Atlântico Tropical, foram analisados com dados oriundos do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e ERA5. Climatologicamente, a ZCAS pode ser identificada como uma banda de nebulosidade de orientação

noroeste-sudeste (NW/SE), estendendo-se desde o sul da região Amazônica até a região central do Atlântico Sul.

Também foi considerado o sistema atmosférico da ZCIT, definido pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) como uma banda de nuvens que circula todo o globo terrestre na região equatorial. O fenômeno El Niño/La Niña, um dos sistemas climáticos mais discutidos e conhecidos, é definido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pelo NOAA como o aquecimento anormal das águas superficiais e subsuperficiais do Oceano Pacífico Equatorial.

Além disso, foram utilizados dados provenientes dos portais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) para complementação das informações analisadas.

3.7.1 Sistemas Climáticos/Ambientais Integrados

O estudo adotou uma abordagem integrada e multiescalar para a análise dos fatores climáticos e ambientais associados à ocorrência da Doença de Haff. As variáveis foram organizadas segundo diferentes níveis de escala espacial.

Em macroescala climática, consideraram-se os principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a Amazônia, incluindo o El Niño-Oscilação Sul (ENOS), a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Atlântico Tropical, a Alta da Bolívia (AB), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Adicionalmente, foram analisadas anomalias positivas de precipitação anual superiores a 2.200 mm e os índices de temperatura máxima do ar à superfície, com valores acima de 33,7 °C, conforme referência regional.

Em mesoescala ambiental, a caracterização hidrológica baseou-se na identificação das fases do ciclo hidrológico (enchente, cheia e vazante), nas cotas do Rio Negro em Manaus, categorizadas em <27,5 m, entre 27,5 e 29,0 m e >29,0 m, bem como no número de dias de inundação, classificados em <60, entre 60 e 90 e >90 dias. Essas variáveis foram utilizadas para representar a dinâmica fluvial e a extensão da inundação sazonal.

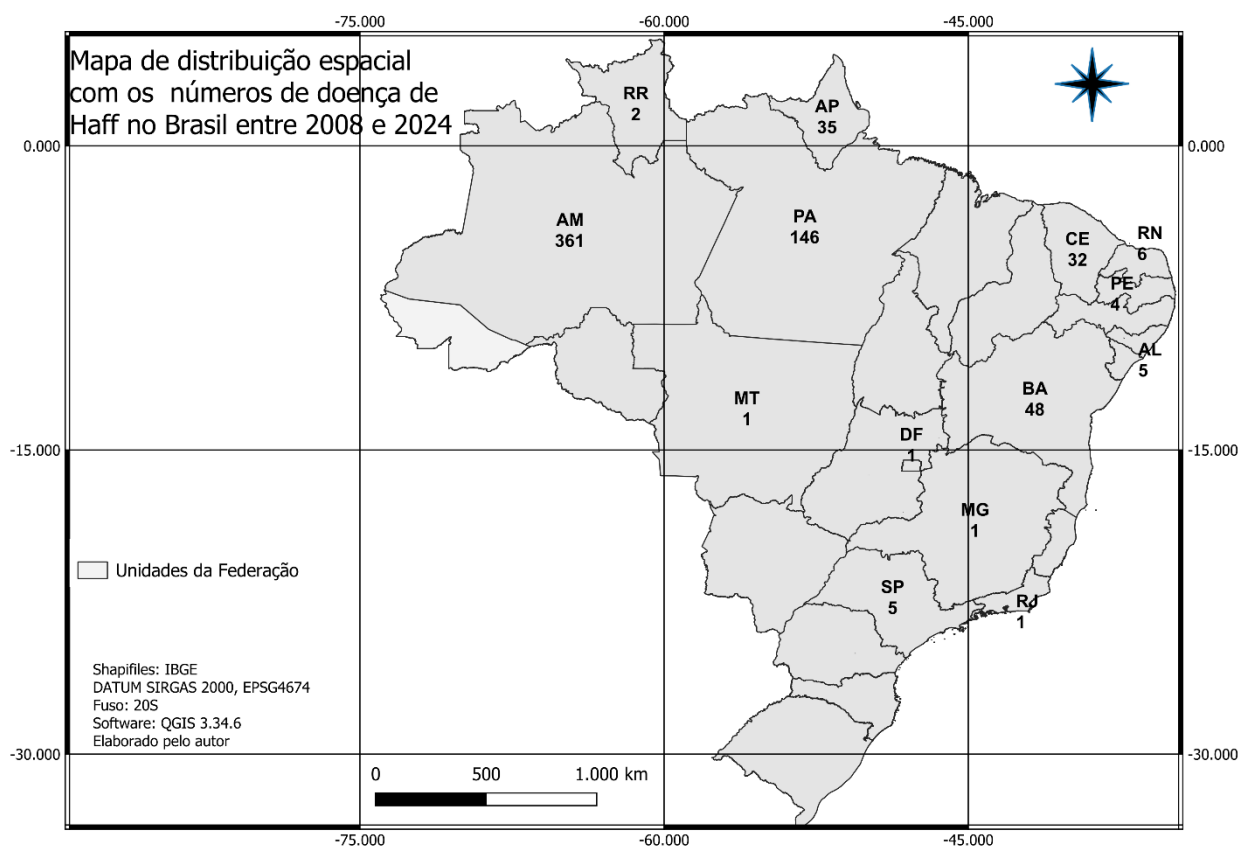
Em microescala, foram consideradas informações relacionadas ao ambiente imediato e ao consumo de pescado, incluindo o tipo de corpo hídrico de origem (rios ou lagos) e as espécies de peixes associadas aos casos notificados, especificamente

pacu (*Mylossoma spp.*), tambaqui (*Colossoma macropomum*) e pirapitinga (*Piaractus brachypomus*). A integração dessas variáveis permitiu a organização sistemática dos dados e subsidiou as análises espaciais e temporais realizadas no estudo.

4 RESULTADOS

De acordo com os diferentes registros consultados, entre eles publicações acadêmicas, boletins das secretarias estaduais e municipais e boletins do Ministério da Saúde, em todo o Brasil foram notificados 768 casos de Doença de Haff (suspeitos e/ou compatíveis), entre os anos de 2008 e 2024, distribuídos em diversas regiões do país (Figura 3).

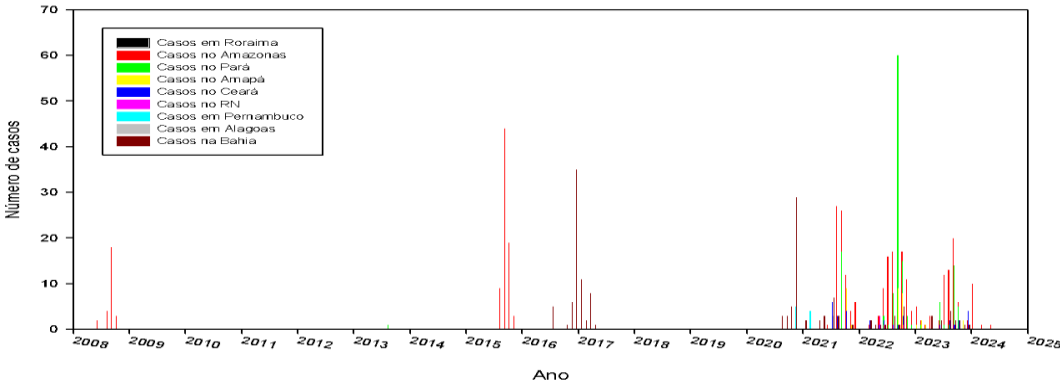
Figura 3: Mapa da distribuição espacial dos casos de DH no Brasil



Fonte: Adaptada do Portal de Mapas do IBGE. Shapefiles: SIMGEO/IBGE

Na distribuição temporal dos casos de DH no país (Gráfico 1), observou-se o aumento significativo nos últimos anos, em especial em 2021 e 2022. Entretanto, não há informações anteriores a 2008, o que relativiza os números atuais. As primeiras ocorrências registradas no Brasil datam de 2008, havendo alternância de anos com registros de casos até 2024.

Gráfico 1: Distribuição temporal dos casos de DH no Brasil entre os anos de 2008 e 2024
Distribuição dos casos de Doença de Haff no Brasil
no período de 2008 a 2024



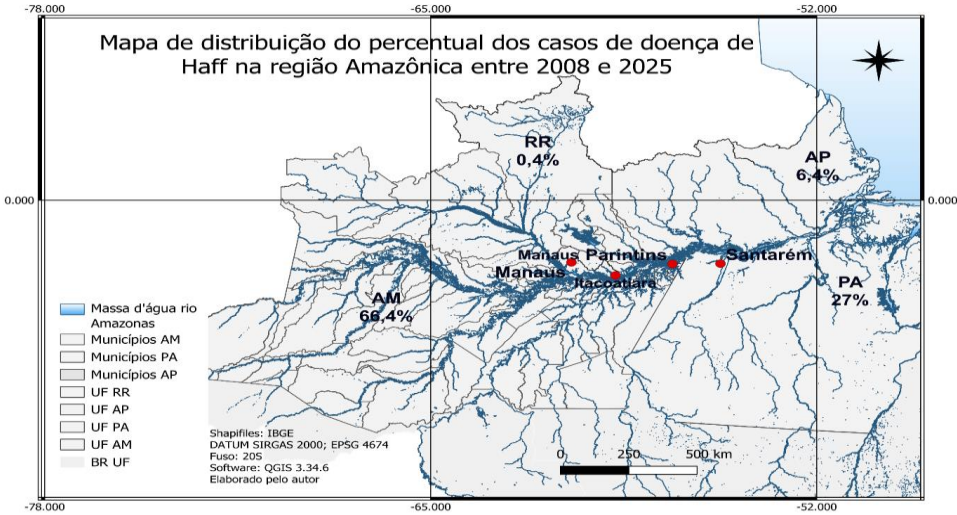
Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados do Ministério da Saúde (2008-2024), processados no software SigmaPlot

4.1 DISTRIBUIÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DOS CASOS DE DH NA AMAZÔNIA

Na região amazônica, os casos notificados (suspeitos e/ou compatíveis) de DH utilizados neste trabalho somam 547, correspondendo a 71% dos casos registrados no Brasil. A Figura 4 apresenta a distribuição espacial desses 547 casos e os percentuais de casos DH notificados por estado na região Norte do país entre os anos de 2008 e 2025, sendo que 66,4% ocorreram no estado do Amazonas, 26,9% no estado do Pará, 6,4% no estado do Amapá e somente 0,4% em Roraima.

De acordo com o Boletim do Ministério da Saúde, as principais espécies consumidas na região Norte e associadas aos casos de contaminação foram o pacu (*Piaractus mesopotamicus*), com 49,8%, e o tambaqui (*Colossoma macropomum*), 25,1%.

Figura 4: Mapa dos percentuais dos casos de DH por estado na região Amazônica entre 2008 e 2025



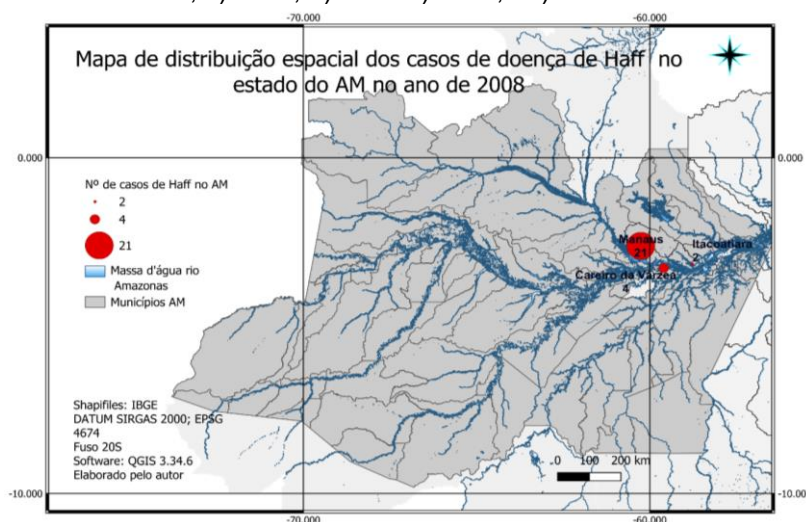
Fonte: Adaptada do Portal de Mapas do IBGE. Shapefiles: SIMGEO/IBGE

Entre os municípios que mais apresentaram casos de DH destacam-se Itacoatiara/AM (178), Manaus/AM (113), Santarém/PA (103) e Parintins/AM (31). Todos os demais municípios que registraram casos da doença nesse período somaram, no máximo, nove ocorrências. A soma dos casos nos quatro municípios com maior número de registros representa 78% do total de casos na Amazônia. Somente Itacoatiara e Manaus, distantes 200 km, somam juntos 54% dos casos, o que chama a atenção para essa região como foco das notificações da doença. Há também a possibilidade de esses municípios contarem com uma rede de saúde mais integrada ao sistema nacional de saúde pública, além da ocorrência de possíveis subnotificações em outros municípios.

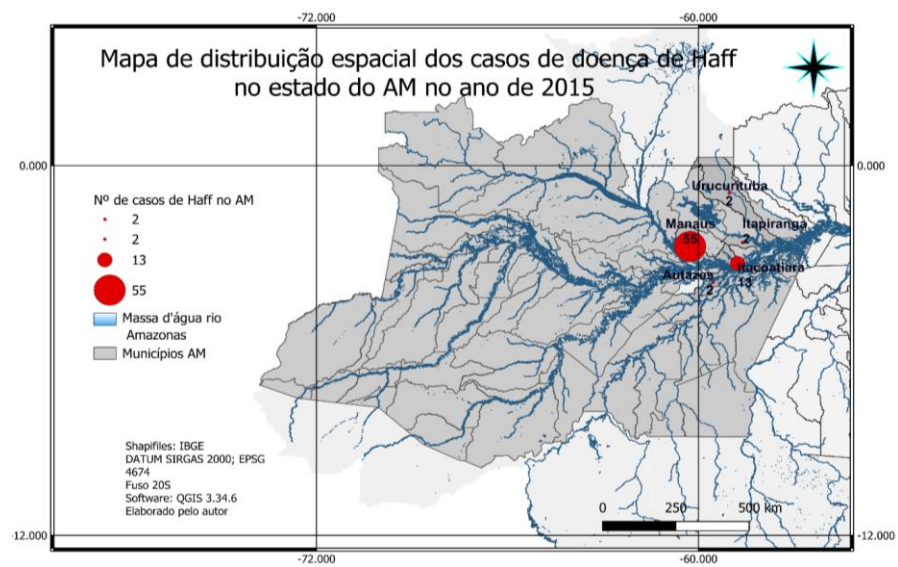
Observa-se, portanto, que os casos se concentram na porção central da bacia hidrográfica e nos municípios localizados ao longo da calha principal do Rio Amazonas. Os mapas apresentados na Figura 5 (a, b, c, d, e, f) mostram a distribuição espacial dos casos da Doença de Haff na Amazônia em diferentes anos, desde 2008, bem como o número de casos registrados nos municípios afetados.

Figura 5: Mapas de distribuição espacial-temporal dos casos da DH para os anos de: a) 2008; b) 2015; c) 2021; d) 2022 e) 2023; e f) 2024

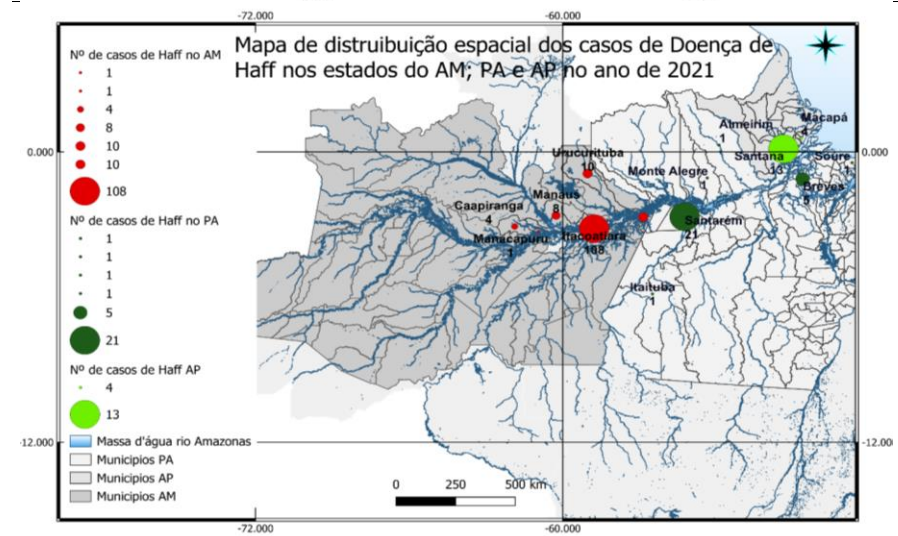
a)



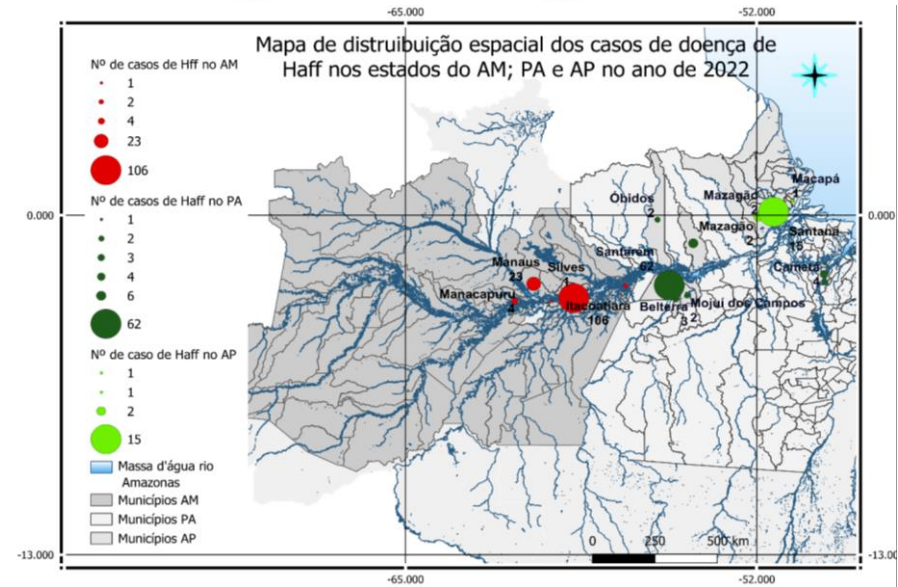
b)



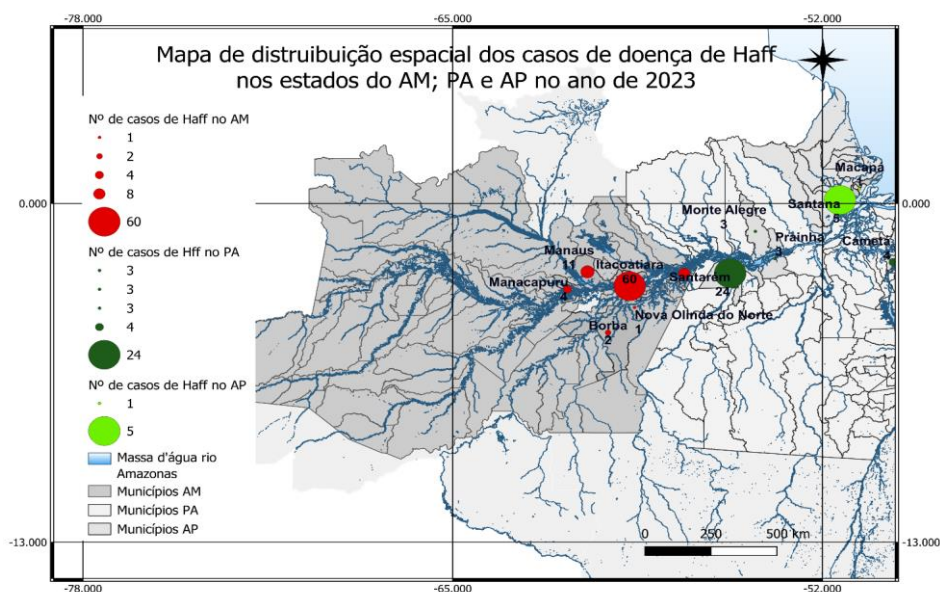
c)



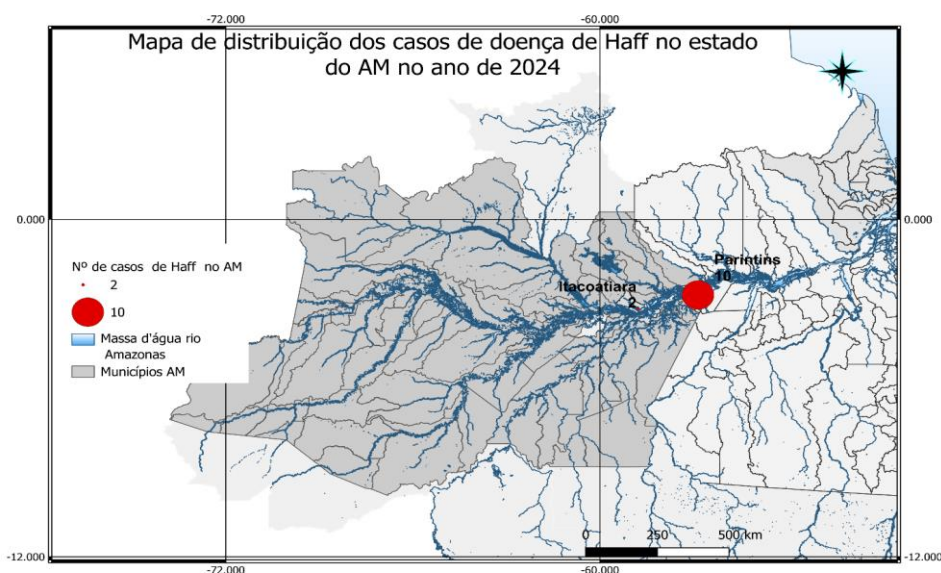
d)



e)



f)



Fonte: Adaptada do Portal de Mapas do IBGE. Shapefiles: SIMGEO/IBGE

No ano de 2008 no estado do Amazonas, ocorreu o primeiro surto registrado da doença (27 casos – MS), associado ao consumo de pacu (*Piaractus mesopotamicus*) e o tambaqui (*Colossoma macropomum*). Desde então, as ocorrências passaram a ser mais incidentes, com registros de 74 casos em 2015, também no estado do Amazonas. A Tabela 2 reforça os números de casos e evidencia o quanto o estado do Amazonas tem contribuído para os registros da doença na região.

Tabela 2: Casos notificados de Doença de Haff e estado predominante nos anos de 2008, 2015, 2021, 2022, 2023 e 2024

Ano	Nº Casos	Estado predominante
2008	27	AM (todos os casos)
2015	75	AM (todos os casos)
2021	201	AM (156 casos)
2022	239	AM (137 casos)
2023	132	AM (89 casos)
2024	12	AM (todos os casos)

Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados do Ministério da Saúde (2008-2024), processados no software SigmaPlot

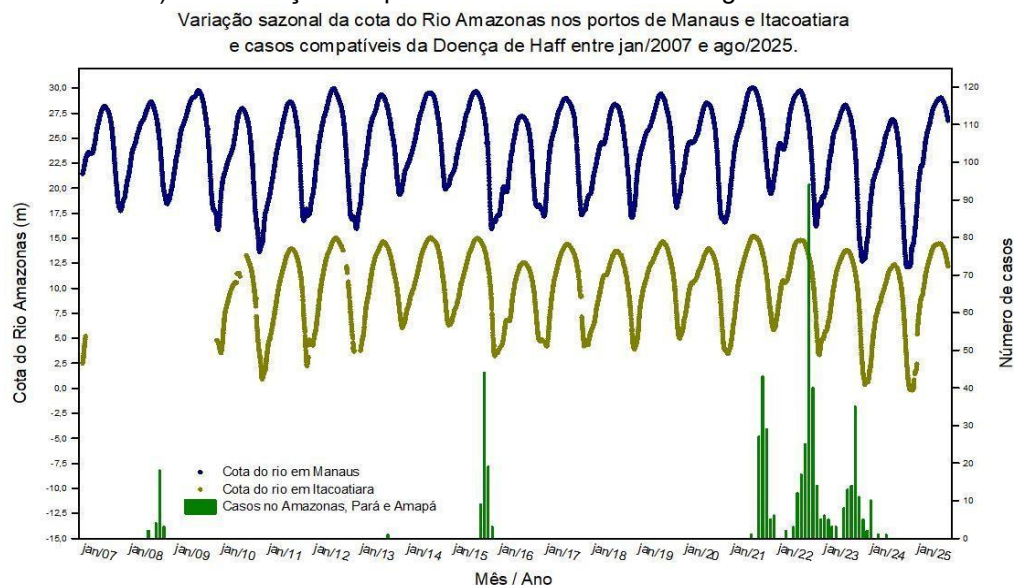
Relata-se um aumento significativo nas notificações de Doença de Haff entre 2021 e 2023 em vários estados da Bacia Amazônica, com os seguintes registros: em 2021, 156 casos; em 2022, 137 casos; e, em 2023, 89 casos. Para o ano de 2024, as notificações voltam a se concentrar no estado do Amazonas, com apenas 12 casos registrados.

Alguns fatores podem ajudar a explicar as oscilações nos números de casos. Entre esses fatores destacam-se:

- a) a combinação de variabilidade climática e ambiental, que pode acarretar alterações na ecologia dos peixes e na produção de toxinas;
- b) eventos climáticos que exercem influência significativa sobre o clima da região;
- c) o número de dias em que os portos de Manaus e Itacoatiara permanecem com cotas elevadas acima de determinados níveis.

A distribuição temporal dos casos de DH e das cotas de cheia e vazante nos portos de Manaus e Itacoatiara (2008-2024) está representada no Gráfico 2, que, de maneira semelhante à distribuição temporal observada na Bacia Amazônica, apresenta ciclos de ocorrência sazonal acompanhando os níveis de cheia e vazante dos rios Negro e Amazonas.

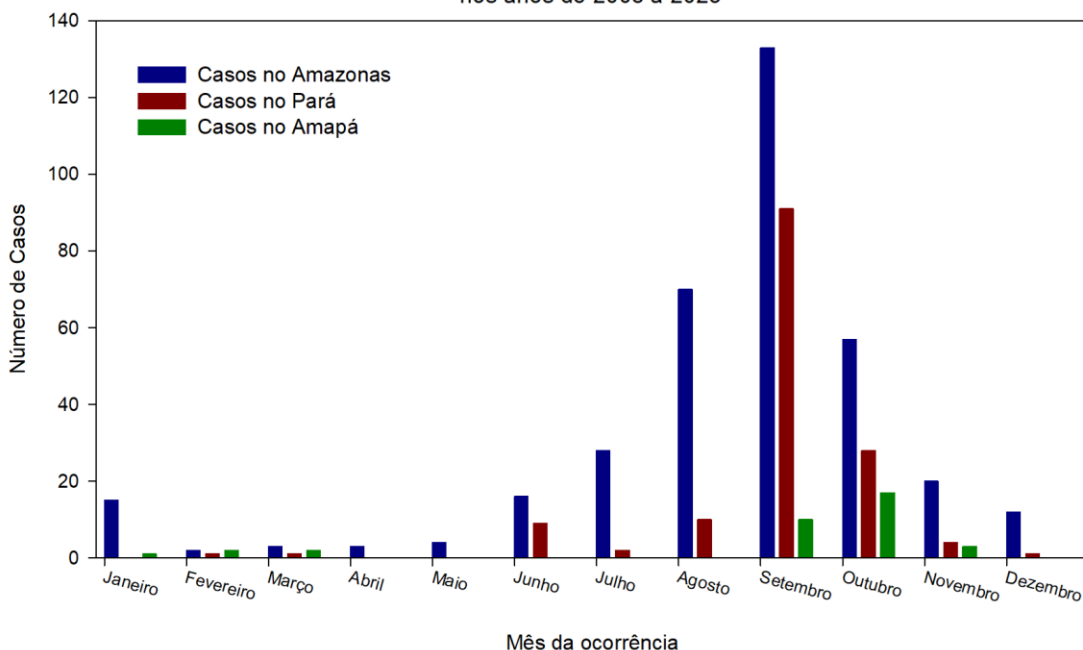
Gráfico 2: Distribuição da variação sazonal das cotas dos rios Negro (linha azul) e Amazonas (linha dourada) e distribuição temporal dos casos de DH na região Norte do Brasil



Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados do Ministério da Saúde (2007-2025), processados no software SigmaPlot

A distribuição mensal dos casos de Doença de Haff nos estados do Amazonas, Pará e Amapá, no período de 2008 a 2024, evidencia um padrão espaço-temporal bem definido. Observa-se que os registros iniciam no estado do Amazonas, predominantemente entre os meses de abril e maio, estendendo-se posteriormente ao estado do Pará nos meses de junho e julho e, por fim, ao estado do Amapá, com ocorrências concentradas entre setembro e outubro. Adicionalmente, os picos de ocorrência da doença são registrados de forma escalonada entre os estados, acompanhando essa progressão temporal, com maior incidência no mês de setembro nos estados do Amazonas, Pará e Amapá (Gráfico 3).

Gráfico 3: Distribuição temporal (mensal) dos casos de DH na Bacia Amazônica
Distribuição mensal do total dos casos compatíveis de Doença de Haff
nos estados do Amazonas, Pará e Amapá
nos anos de 2008 a 2025



Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados do Ministério da Saúde (2008-2025), processados no software SigmaPlot

4.2 CICLOS DE CHEIA E VAZANTE E COTAS DOS PORTOS DE MANAUS E ITACOATIARA

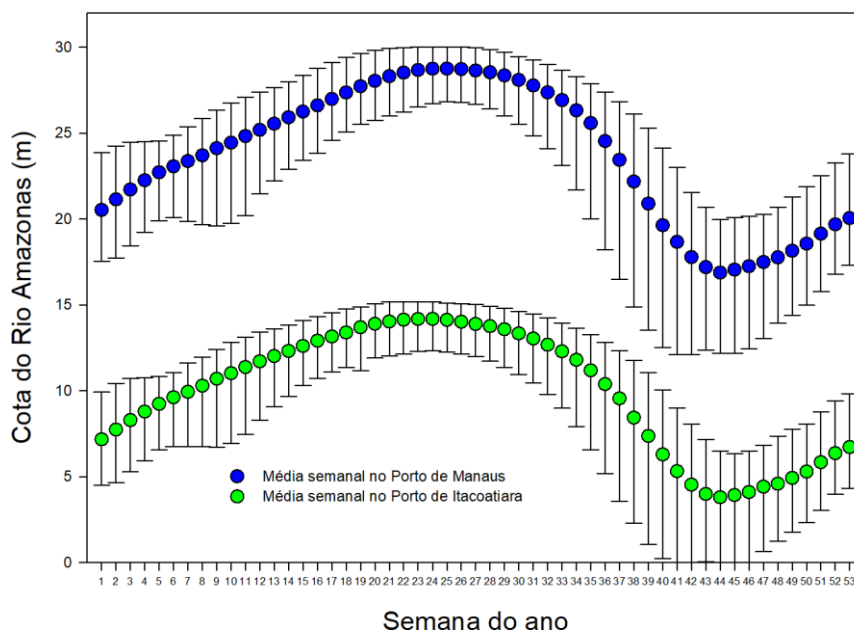
O Gráfico 4 apresenta a cota média semanal do Rio Amazonas nos portos de Manaus e Itacoatiara. Observam-se duas fases bem características: uma de cheia e outra de vazante. Segundo o Serviço Geológico do Brasil, essas duas fases possuem duração média de 239 e 125 dias, respectivamente (ver Tabela 1) sendo que o pico da cheia ocorre normalmente nos meses de janeiro a maio e o pico da seca ocorre nos meses de outubro e novembro.

Ao comparar esse comportamento com a distribuição espacial dos casos de Doença de Haff, observa-se um deslocamento progressivo das ocorrências do estado do Amazonas em direção ao Amapá, acompanhando a calha principal de vazão do rio durante o período de vazante.

Esse padrão espacial coincide com a redução das cotas fluviométricas e das vazões características desse período hidrológico, tornando-se mais evidente quando analisadas as datas e os locais de registro dos primeiros sintomas relatados pelos pacientes. Tal comportamento sugere uma possível associação entre a dinâmica

hidrológica fluvial, marcada pela vazante, e a propagação espaço-temporal dos casos da doença ao longo do sistema fluvial amazônico.

Gráfico 4: Cotas médias semanais dos rios Amazonas e Negro nos portos de Manaus e Itacoatiara
Média semanal das cotas do Rio Amazonas nos portos de Manaus e Itacoatiara
no período de novembro/2009 a setembro/2025

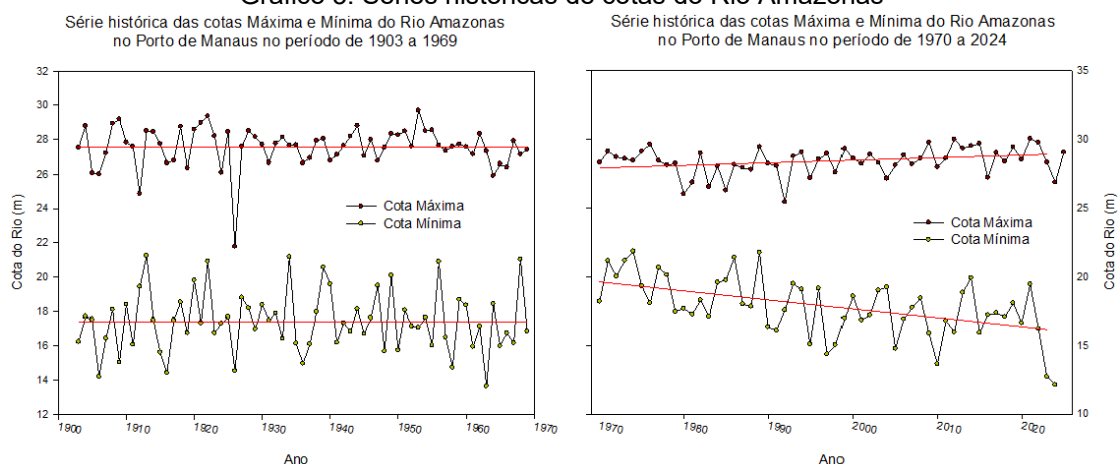


Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados obtidos do Serviço Geológico do Brasil (SGB)

Importante destacar que essa relação entre a ocorrência da DH e a elevação da cota do rio também foi relatada por Wu *et al.* (2024), que estudaram 423 casos de rabdomiólise associada ao consumo de pescado (crustáceos) do rio Yangzi, na província de Wuhan, na China, entre os anos de 2016 e 2022.

Ao analisar a série histórica das cotas máximas e mínimas do Rio Amazonas no Porto de Manaus, observa-se que a cota máxima média é de cerca de 27,9 m e a cota mínima média de 17,5 m, com variações anuais para mais ou para menos. Ou seja, existe uma variabilidade nos valores de cota de ano para ano, a qual será explicada mais adiante pela climatologia (Gráfico 5).

Gráfico 5: Séries históricas de cotas do Rio Amazonas



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados obtidos do Serviço Geológico do Brasil (SGB)

No primeiro período (1903 a 1969) observa-se que as cotas máximas apresentam variabilidade interanual moderada, com valores concentrados em torno de uma média relativamente estável, conforme indicado pela linha de tendência praticamente horizontal. As cotas mínimas, embora também exibam flutuações anuais, mantêm-se em patamares relativamente constantes, sem tendência clara de elevação ou redução ao longo do período. Esse comportamento sugere um regime hidrológico com variabilidade natural predominante, sem evidências robustas de mudanças estruturais de longo prazo.

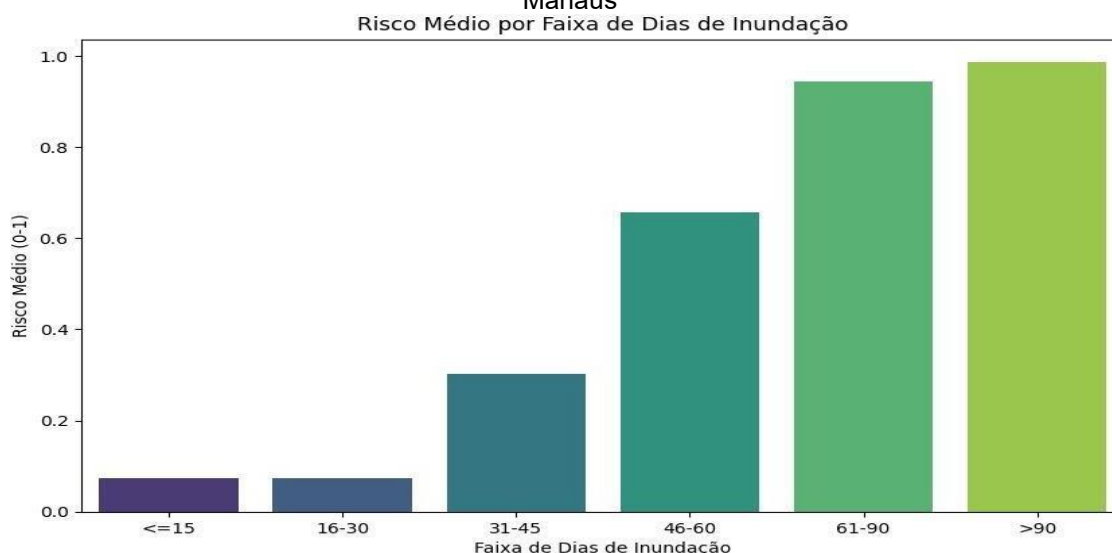
No segundo período (1970 a 2024), o comportamento das séries se altera de forma mais evidente. As cotas máximas mantêm uma tendência levemente positiva, indicando a ocorrência de cheias mais elevadas ou mais frequentes nas últimas décadas. Em contraste, as cotas mínimas apresentam uma tendência negativa, evidenciando a intensificação de eventos de estiagem mais severos. Esse afastamento progressivo entre as cotas máximas e mínimas indica um aumento da amplitude hidrológica, caracterizando maior ocorrência de eventos extremos.

Segundo o Relatório Técnico de Operação do Ano de 2021 do Departamento de Hidrologia do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), “o evento de cheias do ano de 2021 representou, para o estado do Amazonas, o maior e mais impactante evento de inundação de toda sua história de monitoramento hidrológico” (*apud* MATOS *et al.*, 2021, p. 6). Já nos anos de 2023 e 2024, a região enfrentou uma de suas mais severas secas dos últimos dez anos (Silva; Fearnside, 2023). Vale lembrar que, durante esse período de cheia histórica, houve uma sequência de casos de Haff durante três ciclos anuais consecutivos (2021, 2022 e 2023).

Os períodos de cheia do rio representam, portanto, um fator importante para o acompanhamento e a previsão da ocorrência da Doença de Haff na Amazônia, porém não constituem os únicos indicadores. Ressalta-se também que as características da planície de inundação do Rio Amazonas, que, de acordo com o MapBiomass, têm apresentado aumento das áreas de alagamento nos últimos anos, principalmente na região entre Manaus e Santarém.

Utilizando as cotas entre 26 e 30 m para o porto de Manaus e entre 13 e 15 m para o porto de Itacoatiara, e com base em padrões típicos de planícies de inundação na Amazônia (ver Tabela 1), Bittencourt e Amadio (2007) sugerem cerca de 200 km² de perímetro de alcance nas áreas afetadas pelas cheias.

Gráfico 6: Risco médio de dias de inundação de acordo com as cotas do Rio Negro no porto de Manaus



Fonte: Elaborado pelo autor, com uso de dados do Porto de Manaus [s.d.]

Observa-se um aumento progressivo do risco médio à medida que se ampliam as faixas de dias de inundação (Gráfico 6). Nas classes iniciais (≤ 15 e 16-30 dias), os valores de risco permanecem baixos, indicando que eventos de inundação de curta duração estão associados a menor probabilidade de ocorrência do fenômeno analisado.

A partir da faixa de 31-45 dias, verifica-se um incremento significativo do risco, sugerindo a existência de um limiar temporal a partir do qual a persistência da inundação passa a exercer maior influência. Esse comportamento torna-se mais pronunciado nas faixas de 46-60 dias, com elevação substancial do risco médio. Por fim, os maiores valores são observados nas classes de 61-90 dias e >90 dias, com risco próximo ao máximo, evidenciando que inundações prolongadas estão fortemente associadas a níveis elevados de risco.

Nesse sentido, foi possível analisar (Tabela 3) o número de dias em que as áreas permaneceram alagadas com cotas acima de 27,5 m do Rio Amazonas nos períodos em que ocorreram casos da Doença de Haff.

Tabela 3: Variação das cotas máximas e mínimas do Rio Negro em Manaus e média do número de dias com cotas entre 27 e 30 m, nos anos de 2008-2024

Ano (Haff)**	Cota máx. (m)	Data	Cota Min. (m)	Data	Média de N° dias
2008**	28,62	19/jun.	18,43	28/out.	113
2015**	29,66	29/jun.	15,92	28/out.	125
2021**	30,02	16/jun.	19,44	04/nov.	133
2022**	29,75	22/jun.	16,19	28/out.	124
2023**	28,3	13/jun.	12,70	26/out.	63
2024**	26,81	13/jun.	12,18	01/nov.	0

Fonte: Elaborada pelo autor, com uso de dados do Porto de Manaus [s.d.]

As médias semanais das cotas e dos níveis dos portos de Manaus e Itacoatiara (ver Gráfico 4) servem como parâmetro para a observação dos períodos em que as cotas permanecem entre 27 e 28,5 m por períodos entre 130 e 150 dias. Nota-se a ocorrência de Haff associada aos níveis de precipitação, sugerindo também que o índice de precipitação na bacia é fator preponderante para a manutenção das cotas observadas nos dois portos, especialmente no primeiro trimestre do ano, quando as chuvas com características de monções elevam os níveis das áreas úmidas.

As cotas de nível do porto de Manaus (Tabela 2), quando situadas entre 27 e 28,5 m e mantidas nesses patamares por um período entre 90 e 150 dias, nos anos de 2008, 2015, 2021, 2022 e 2023 – excetuando-se 2024, quando se observou seca extrema na Bacia Amazônica – corresponderam a períodos nos quais foram relatados casos de contaminação da Doença de Haff. O mesmo comportamento foi observado para cotas entre 13 e 14,5 m do Rio Amazonas no porto de Itacoatiara (Tabela 3).

As cotas do Rio Amazonas nos portos de Manaus e Itacoatiara apontam para uma convergência na permanência nesses patamares nos anos de 2008 a 2024 no estado do Amazonas, períodos nos quais foram catalogados os maiores índices de contaminação com a Doença de Haff.

A relação entre as cotas dos portos de Manaus e Itacoatiara e os índices de precipitação reflete a forte influência do regime de chuvas sobre o nível dos rios amazônicos. Nos períodos de maior precipitação ocorre aumento do volume de água

nos rios, elevando as cotas medidas nos portos, e o inverso ocorre em períodos de seca.

Devido à extensão da Bacia Amazônica, essa relação, embora direta, pode apresentar variações temporais relacionadas ao tempo de resposta hidrológica e à contribuição de afluentes locais, o que torna as cotas dos portos fatores importantes para a interpretação das condições pluviométricas regionais.

O Gráfico 7 evidencia a variabilidade temporal da precipitação e da radiação solar nos municípios de Manaus e Itacoatiara entre 2000 e 2024. A precipitação apresenta forte sazonalidade, com picos recorrentes associados ao período chuvoso, enquanto a radiação solar exhibe oscilações mais regulares e de menor amplitude. Observa-se uma relação inversa entre precipitação e radiação, com redução da incidência de radiação nos períodos de maior nebulosidade.

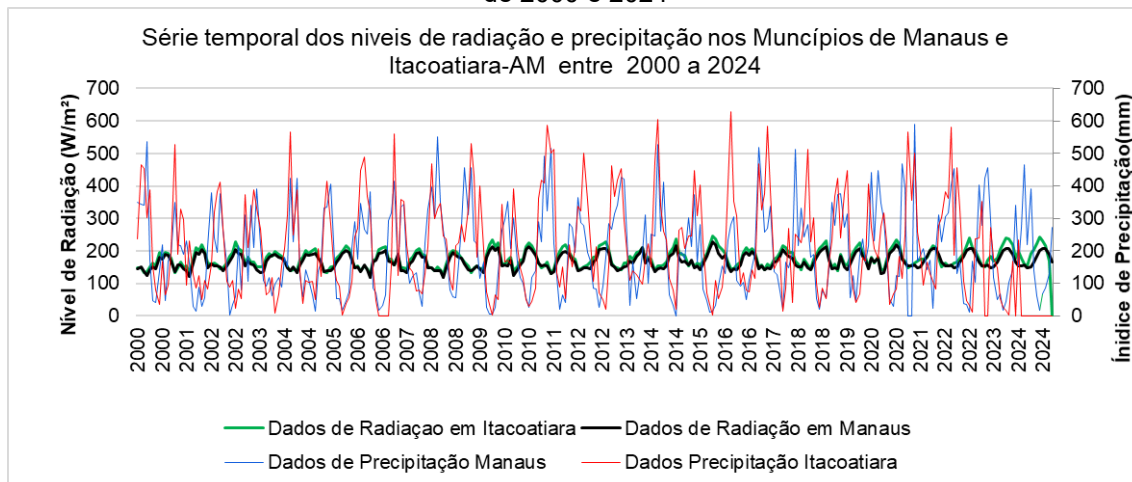
Os padrões semelhantes entre os dois municípios indicam controle climático regional predominante, embora a precipitação apresente maior variabilidade interanual. Esses resultados ressaltam a importância da interação entre variáveis atmosféricas para a compreensão da dinâmica ambiental na Amazônia Central e sua correlação com os casos de DH.

A precipitação, portanto, entra como variável externa que contribui para relacionar o componente hidrológico das cotas e inferir a parcela associada às condições climáticas e ambientais nas rápidas transições hidrológicas.

Essa análise permite avaliar se:

- a) chuvas acima ou abaixo do normal antecedem elevações nas cotas;
- b) níveis das cotas ou mudanças rápidas no nível d'água antecedem e/ou postergam aumentos na ocorrência de contaminação pela Doença de Haff;
- c) e a precipitação agrega poder explicativo além das cotas, indicando mecanismos meteorológico-hidrológicos complementares.

Gráfico 7: Séries históricas de precipitação (linha azul – estação Itacoatiara; linha vermelha – estação Manaus) e série histórica de radiação (linha preta – Manaus; linha verde – Itacoatiara) entre os anos de 2000 e 2024



Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados do ERA5/ECMWF e das estações meteorológicas do INMET, referentes ao período de 2000-2024

4.3 CLIMATOLOGIA DA AMAZÔNIA

A precipitação, em sua sazonalidade, sendo a principal fonte de recursos hídricos na Bacia Amazônica (ANA, 2023, p. 7), constitui uma das mais importantes, senão a mais importante, variáveis climatológicas de interesse neste estudo para relacionar os casos da Doença de Haff com o clima e o ambiente da área de estudo.

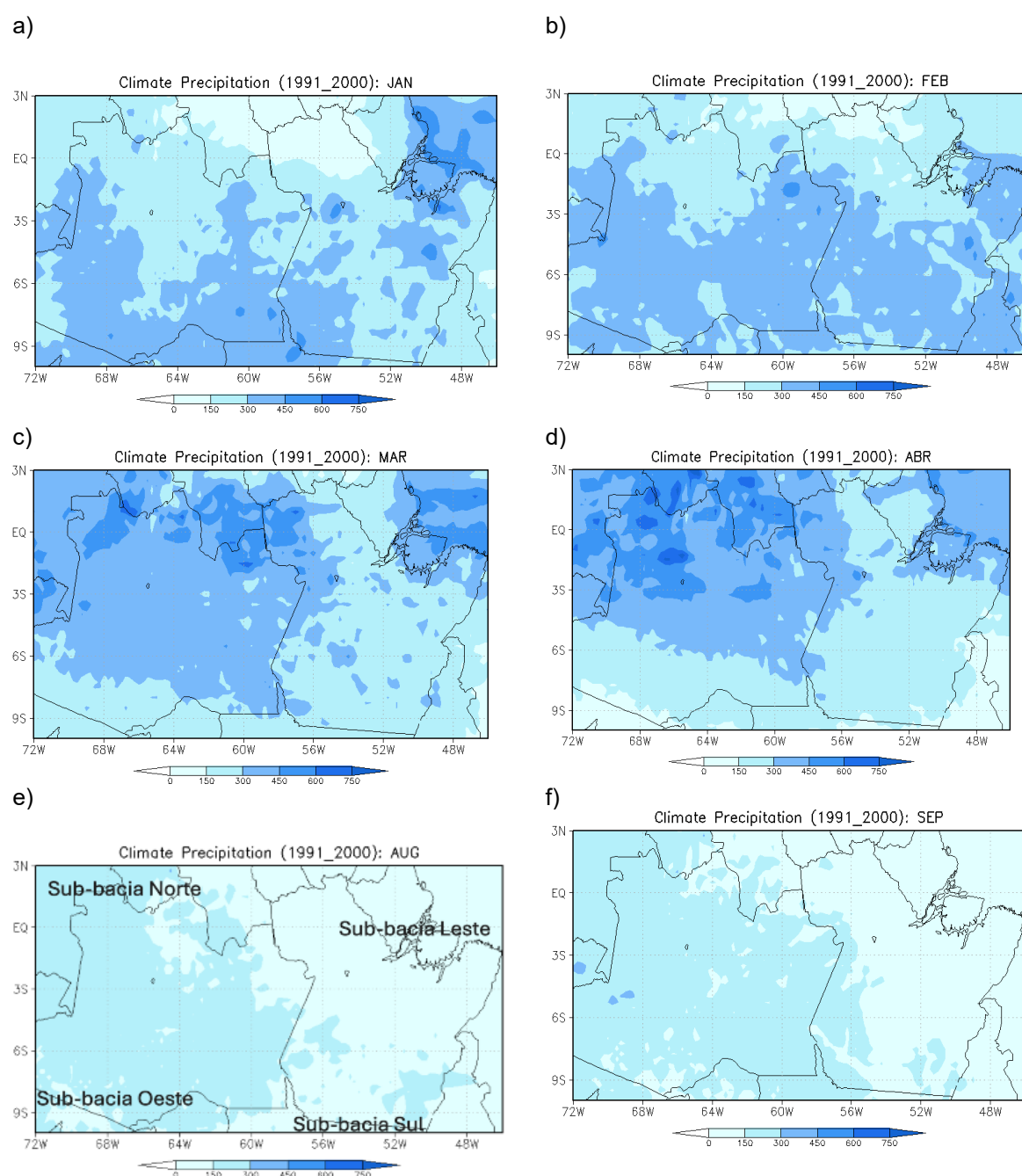
Os resultados evidenciam que, durante o inverno amazônico (dezembro a abril), observa-se uma distribuição pluviométrica assimétrica em todas as sub-bacias (Figura 6) exercendo influência direta sobre os rios que a compõem.

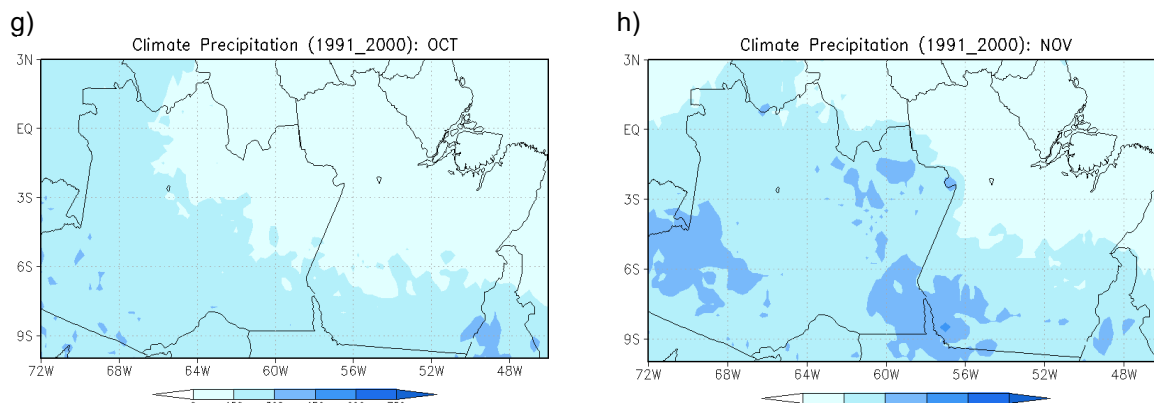
No período do verão amazônico (agosto, setembro, outubro e novembro), observa-se uma concentração pluviométrica de menor proporção em toda a bacia, ficando notória a distinção entre os dois períodos. No período chuvoso, entre janeiro e abril, os índices pluviométricos aumentam nas sub-bacias oeste e sul devido à atuação da ZCAS. Posteriormente, em março e abril, a área de maior precipitação migra para a sub-bacia norte em decorrência do deslocamento da ZCIT em direção ao Hemisfério Norte. A redução ocorre efetivamente no período do verão amazônico, permanecendo ligeiramente maior nas sub-bacias norte e oeste, até voltar a migrar para as sub-bacias oeste e sul novamente em novembro, em função do início da atuação da ZCAS, fechando e reiniciando o ciclo.

Observou-se ainda que, em anos de grandes cheias, como em 2021, bem como no período de vazante (agosto a novembro), ocorreram os maiores registros da Doença de Haff desde o início das notificações oficiais ao Ministério da Saúde.

A interação entre os regimes hidrológicos regionais e os fenômenos climáticos globais, como o ENOS, em especial durante episódios de La Niña, revela-se fundamental para a compreensão da variabilidade ambiental que propicia a ocorrência da doença.

Figura 6: Mapas de precipitação na BHA em períodos mensais climatológicos entre os anos de 1991 e 2000: a) janeiro; b) fevereiro; c) março; d) abril; e) agosto; f) setembro; g) outubro; h) novembro



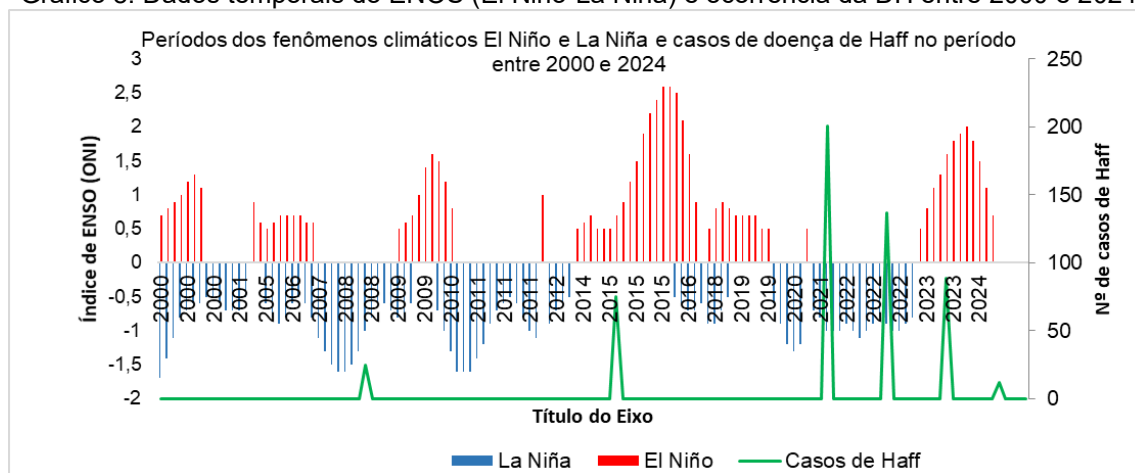


Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados de reanálise ERA5 (ECMWF) referentes ao período 1991-2000

Observou-se que os picos de casos da DH ocorreram após o início do episódio de La Niña no período de 2021-2023 (Gráfico 8) especialmente quando houve registros expressivos superiores a 200 casos.

Esses anos coincidem com eventos de La Niña moderados, caracterizados por resfriamento anômalo das águas do Pacífico Equatorial e consequente intensificação das chuvas na região amazônica.

Gráfico 8: Dados temporais do ENOS (El Niño-La Niña) e ocorrência da DH entre 2000 e 2024



a) ENOS, b) La Niña.

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), referentes ao período de 2000-2024

As figuras e os gráficos a seguir apresentam, respectivamente, os mapas de anomalias e as médias mensais de precipitação referentes ao período de 2007 a 2024, bem como as séries temporais de precipitação obtidas a partir das estações meteorológicas convencionais de Manaus e Itacoatiara.

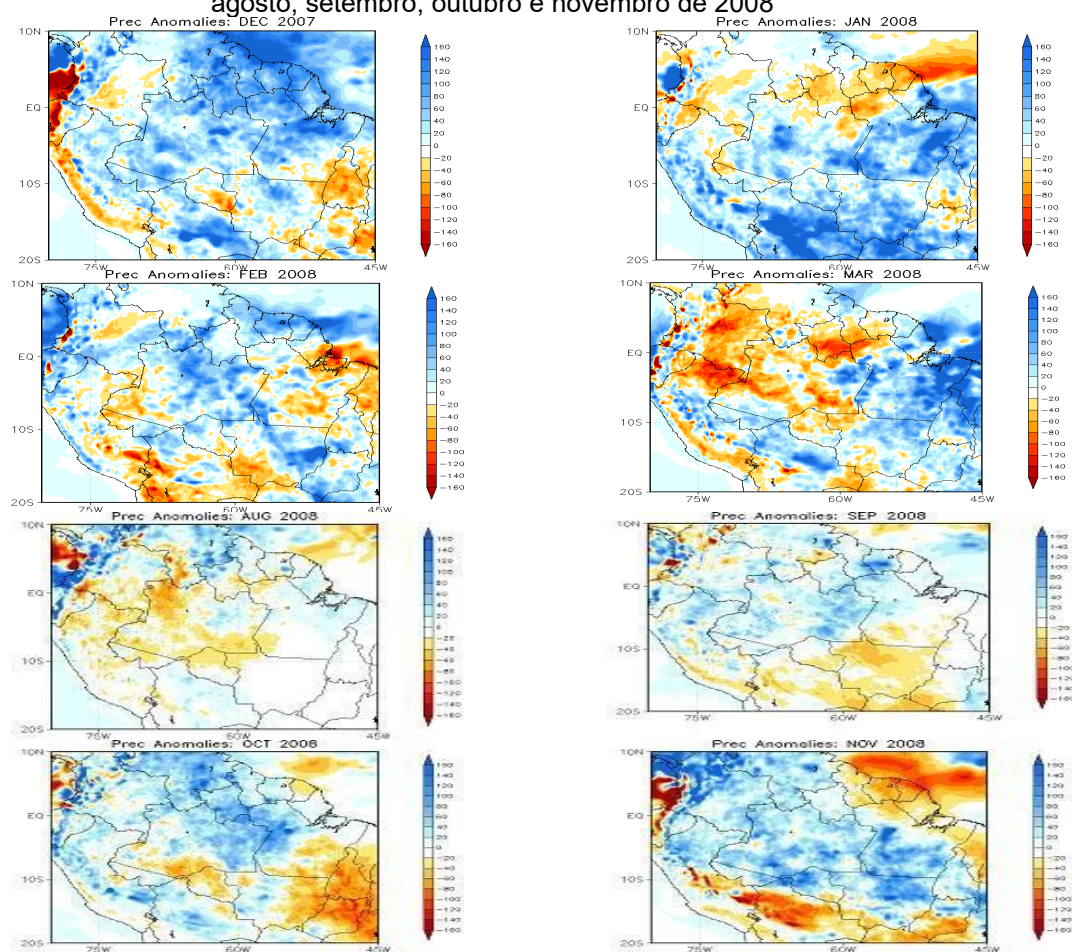
No biênio de 2007/2008, os mapas de precipitação referentes ao período de dezembro de 2007 a fevereiro de 2008 evidenciam a ocorrência de elevados acumulados pluviométricos em grande parte da Bacia Amazônica. Entre dezembro de 2007 e março de 2008, a precipitação na BA esteve acima da média (Figura 7). As

estações registraram valores de precipitação variando entre 458 e 553 mm, com média para o período de 2007/2008 de 231 mm para as duas estações (Gráfico 9).

Esses resultados podem refletir a atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a contribuição de sistemas convectivos de mesoescala, os quais contribuem significativamente para a origem das chuvas na Bacia Amazônica.

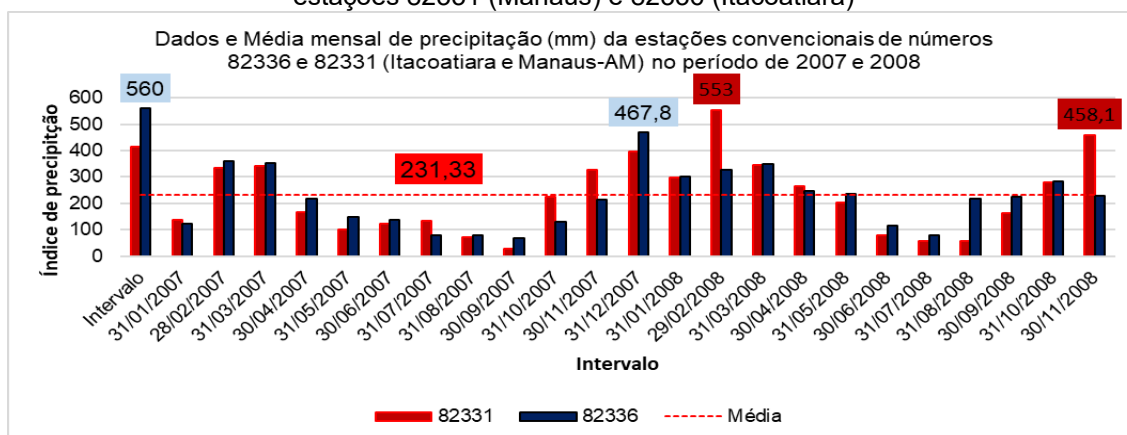
Observa-se que entre abril e junho ocorre a fase de transição entre os regimes hidrológicos de cheia e vazante na BA. Essa transição é de fundamental importância para toda a dinâmica de inundação das áreas úmidas da região de estudo, conforme descrito por Junk, Bayley e Sparks (1989). Dessa forma, os padrões de precipitação identificados no biênio em análise reforçam a estreita relação entre variabilidade climática, regime hidrológico e os impactos nos ecossistemas associados e, possivelmente, na ocorrência da DH.

Figura 7: Mapas de anomalias de precipitação dos meses de dezembro de 2007 a março de 2008 e agosto, setembro, outubro e novembro de 2008



Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados do ERA5/ECMWF e das estações meteorológicas do INMET, referentes ao período de dez. de 2007 a nov. 2008

Gráfico 9: Dados e média mensal (bianual) de precipitação entre os anos de 2007 e 2008 nas estações 82331 (Manaus) e 82336 (Itacoatiara)

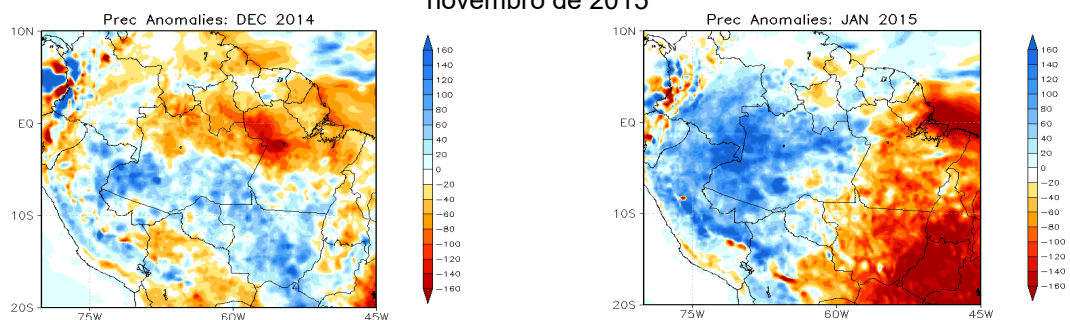


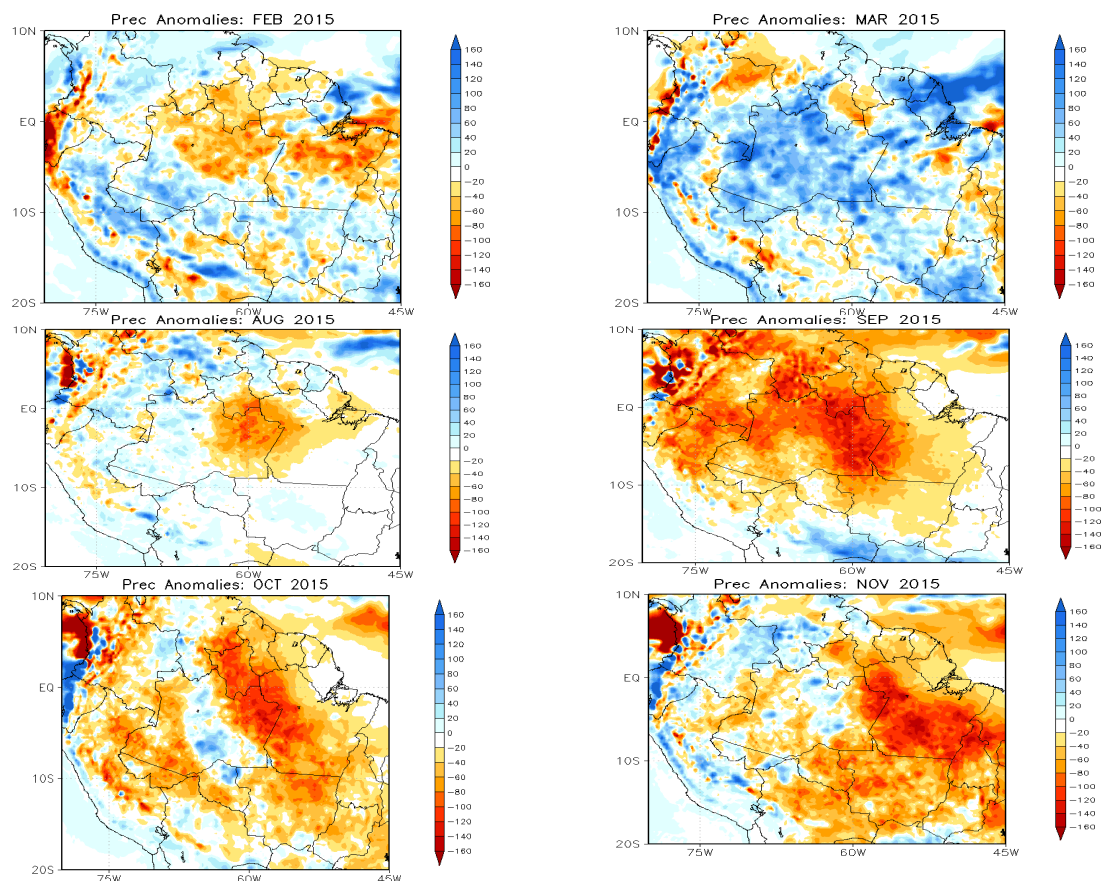
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referentes ao período de 2007 e 2008

Em dezembro de 2014, a distribuição da precipitação mostrou-se mais concentrada nas porções oeste e sul da BA (Figura 8) sugerindo uma variabilidade espacial acentuada nesse período. Nos meses subsequentes, entre janeiro e março de 2015, verificou-se expansão da área de maior precipitação, principalmente na sub-bacia norte e oeste. Nesse intervalo, foram registrados valores máximos variando entre 446 e 605 mm nas estações (Gráfico 10) com média para o período de 2014/2015 de cerca de 200 mm.

Em contraste, entre agosto e novembro de 2015, os índices pluviométricos apresentaram significativa redução, caracterizando um cenário de estiagem generalizada em toda a bacia. Esse padrão sazonal reforça a dinâmica típica do regime hidrometeorológico, possivelmente observado como um período de transição entre os eventos climáticos El Niño e La Niña, marcado por períodos distintos de intensificação e retração das chuvas, os quais exercem influência direta sobre a disponibilidade hídrica regional e processos ambientais associados, período no qual foram contabilizados 75 casos de contaminação por DH.

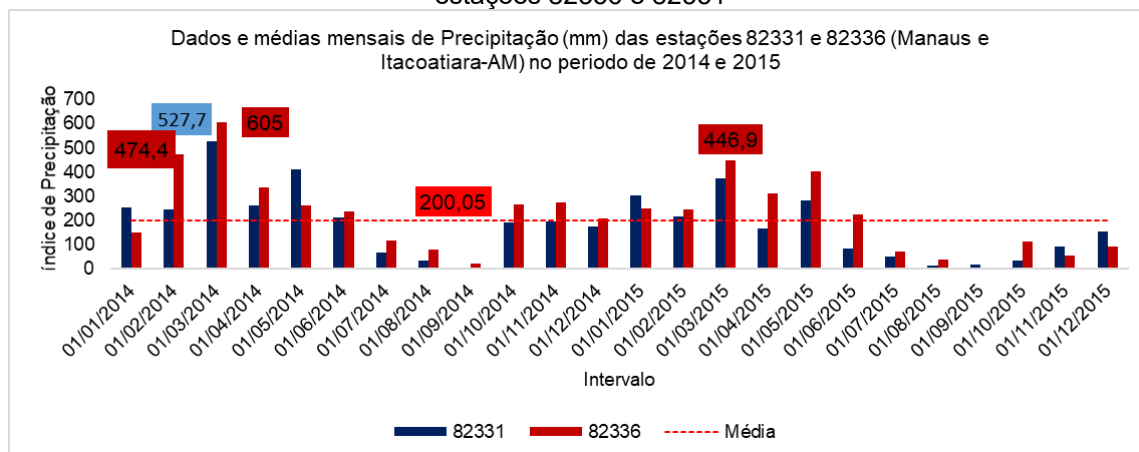
Figura 8: Mapas de anomalias de precipitação de dezembro de 2014 a março de 2015 e de agosto a novembro de 2015





Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados de reanálise ERA5 (ECMWF) referentes ao período analisado

Gráfico 10: Dados e média mensal (bianual) de precipitação entre os anos de 2014 e 2015 nas estações 82336 e 82331



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de reanálise ERA5 (ECMWF) referentes ao período analisado

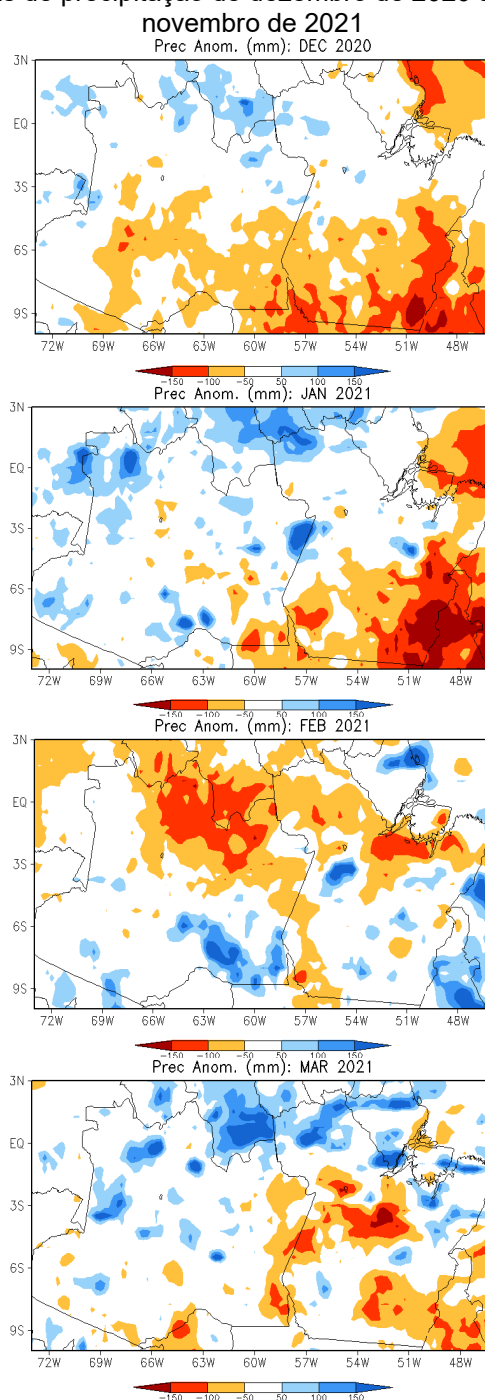
No período compreendido entre dezembro de 2020 e março de 2021, a precipitação manteve-se próxima à média histórica da região em toda a bacia (Figura 9), o mesmo sendo observado entre agosto e novembro de 2021.

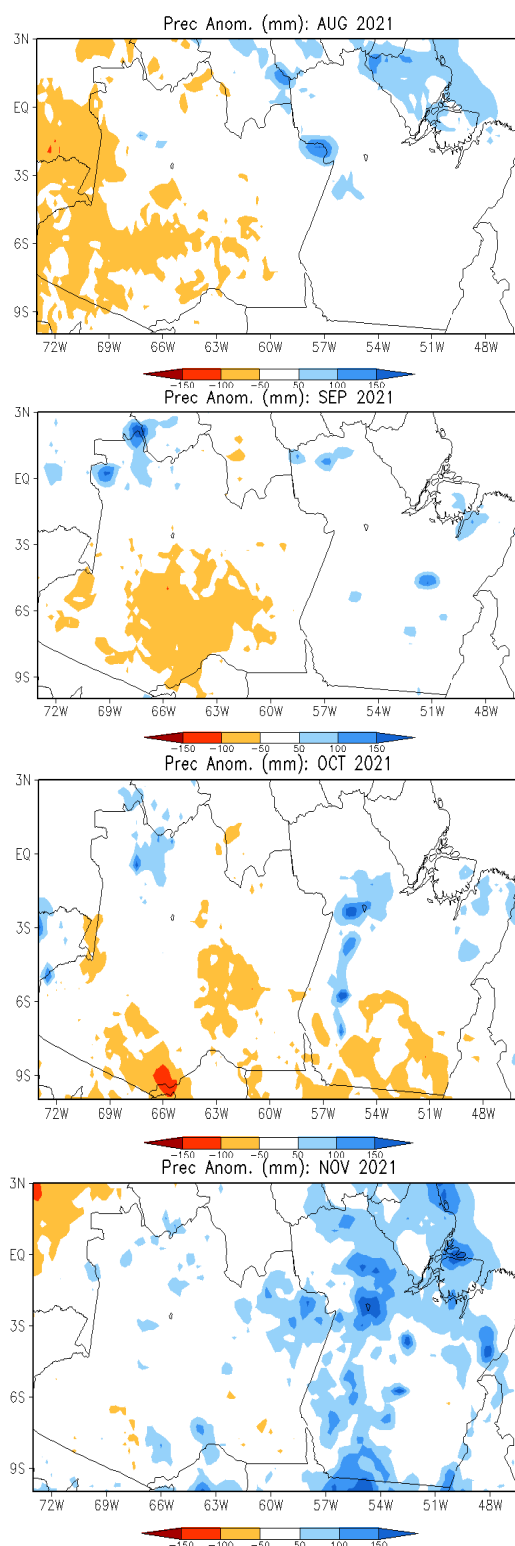
Esse comportamento sugere relativa estabilidade no regime pluviométrico para o biênio, diferentemente de anos anteriores, nos quais foram observadas anomalias

significativas possivelmente associadas a fenômenos climáticos como El Niño e La Niña.

A consistência da precipitação nesse período reforça a importância de monitoramentos contínuos para a compreensão da variabilidade sazonal da região e sua relação com impactos hidrológicos, ambientais e de saúde pública.

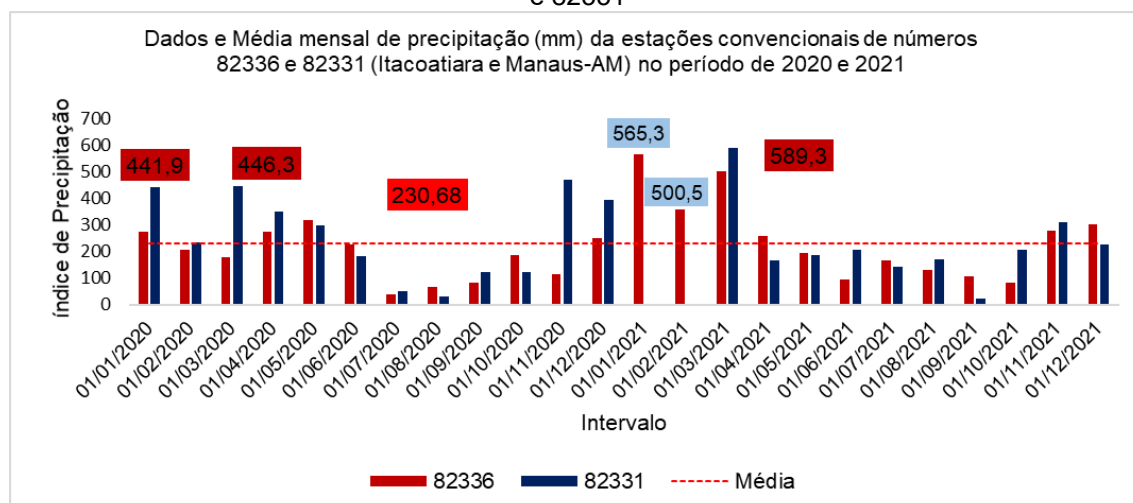
Figura 9: Mapas de anomalias de precipitação de dezembro de 2020 a março de 2021 e de agosto a





Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados de reanálise ERA5 (ECMWF) referentes ao período analisado

Gráfico 11: Dados e média mensal de precipitação entre os anos de 2020 e 2021 nas estações 82336 e 82331



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de reanálise ERA5 (ECMWF) referentes ao período analisado

A análise dos mapas de precipitação referentes ao período de dezembro de 2021 a março de 2022 (Figura 10) evidencia variações significativas na distribuição espacial e temporal das chuvas na BA.

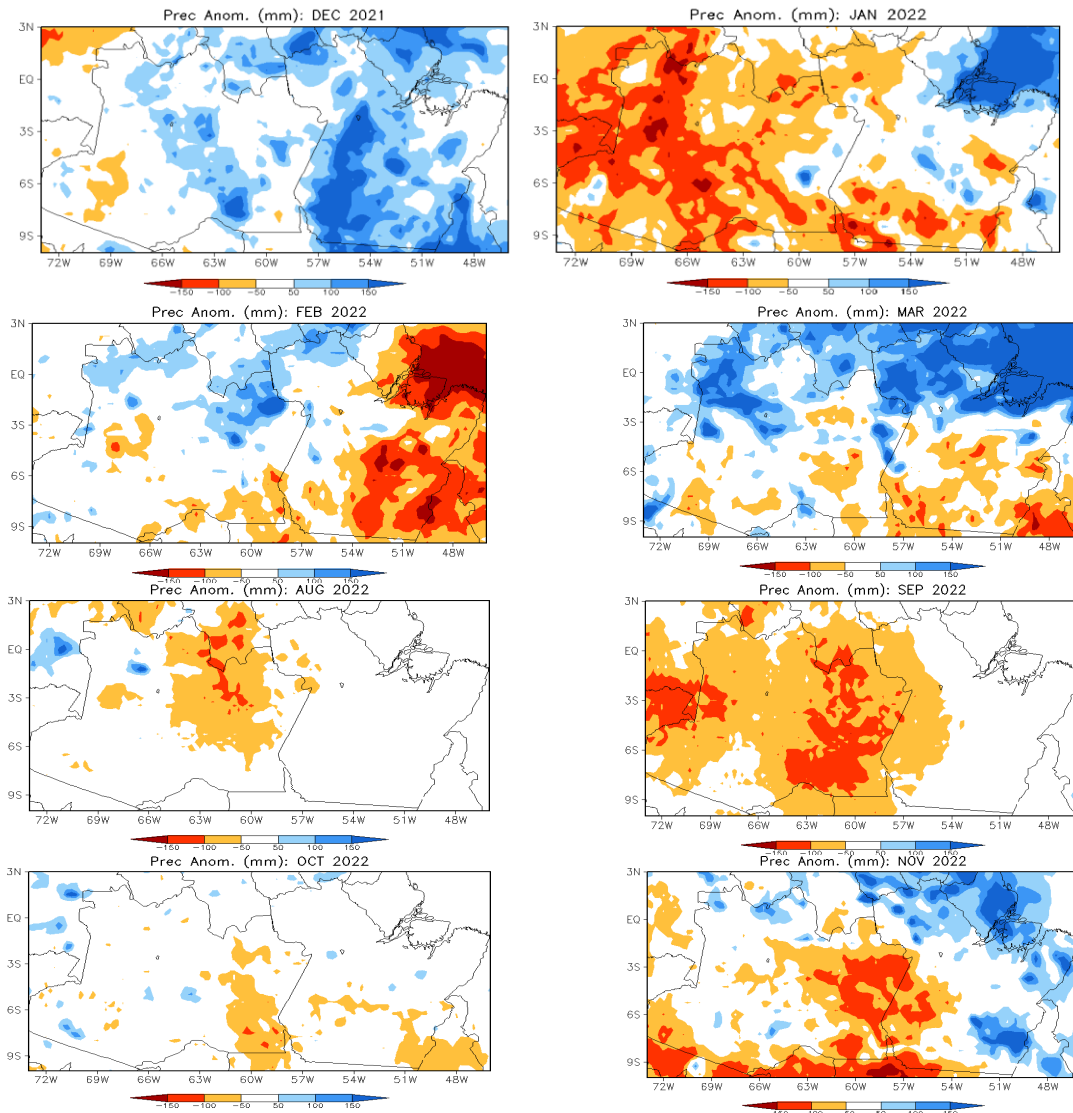
Em dezembro de 2021, os maiores índices pluviométricos concentraram-se nas porções central e sul da bacia. Em janeiro de 2022, observa-se um desvio atípico em comparação aos dados climatológicos históricos da região. Normalmente caracterizado por elevados volumes pluviométricos, esse mês apresentou níveis abaixo da média, indicando possível distorção associada a fatores climáticos que afetaram a dinâmica atmosférica local.

Nos meses de fevereiro e março de 2022, a precipitação apresentou maior intensidade nas porções central e leste da bacia, com picos entre 455 e 589 mm, com média para o período de 2021/2022 de cerca de 234 mm (Gráfico 12).

O deslocamento espacial da concentração de chuvas sugere variabilidade típica da região amazônica e reflete a influência de sistemas atmosféricos como a ZCIT, aliados à atuação de padrões de circulação oceânica e continental.

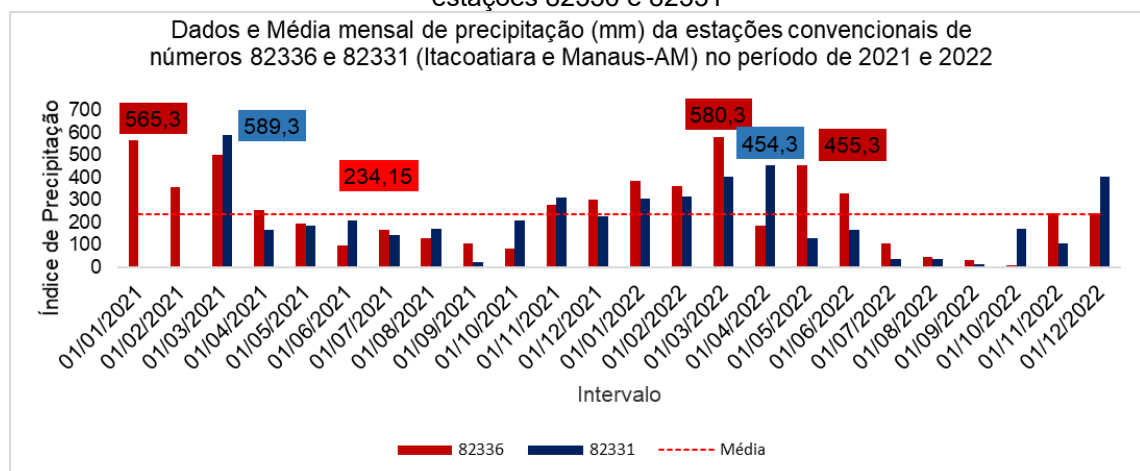
A interpretação dos mapas demonstra a fragmentação de elementos climatológicos e ambientais na distribuição pluviométrica em toda a BA, ressaltando a importância de análises detalhadas para compreender a relação entre precipitação, dinâmica hidrológica e possíveis impactos em eventos hidrológicos extremos.

Figura 10: Mapas de anomalias de precipitação de dezembro de 2021 a março de 2022 e de agosto a novembro de 2022



Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados de reanálise ERA5 (ECMWF) referentes ao período analisado

Gráfico 12: Dados e média mensal (bianual) de precipitação entre os anos de 2021 e 2022 nas estações 82336 e 82331



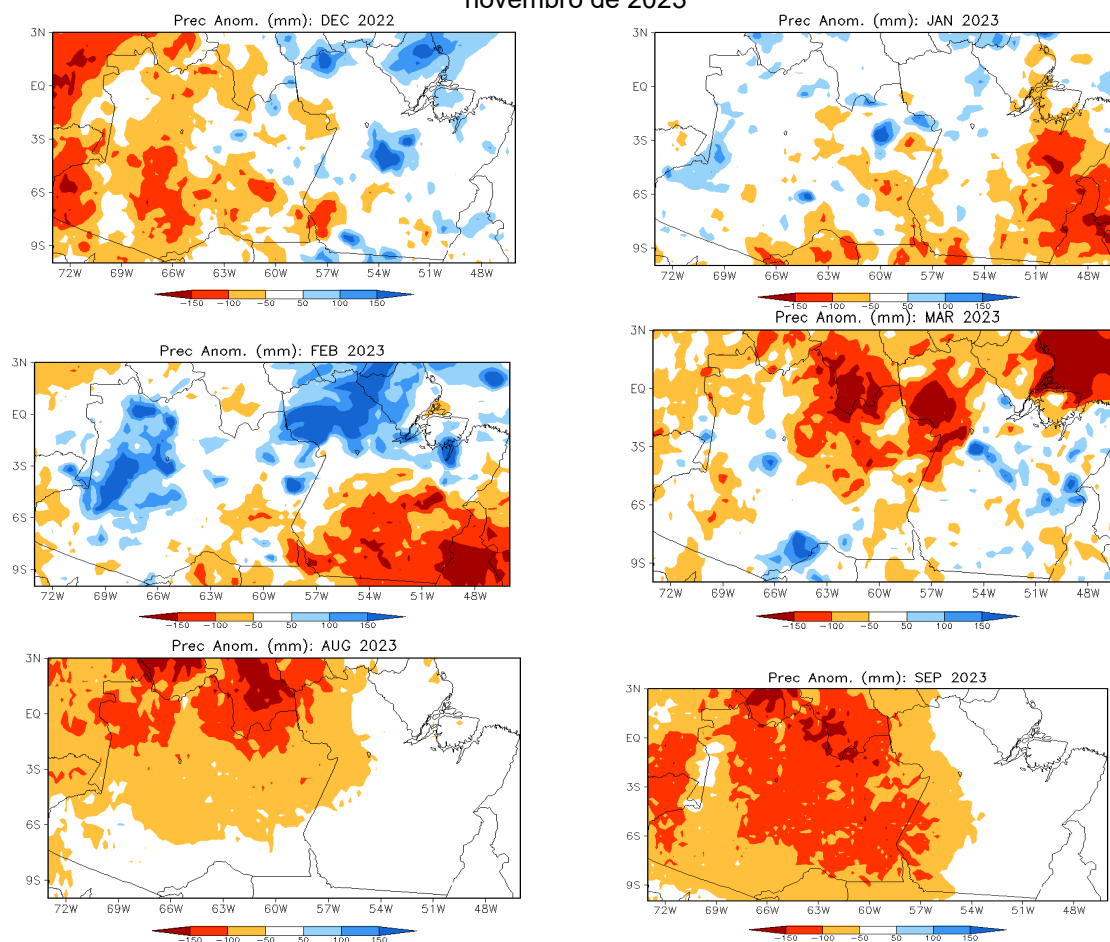
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de reanálise ERA5 (ECMWF) referentes ao período analisado

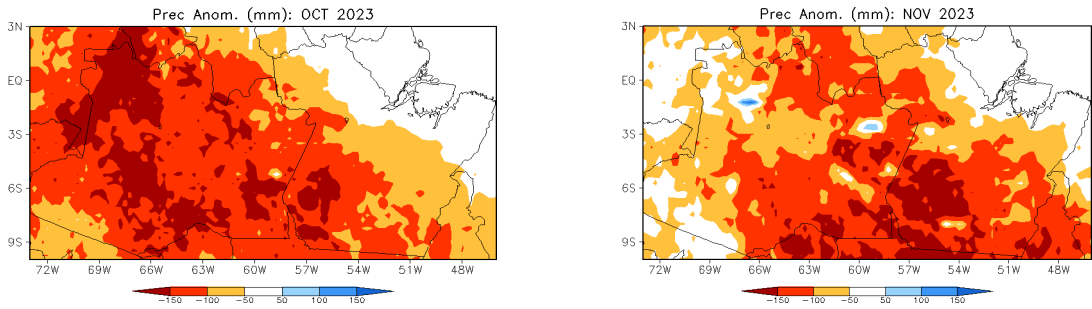
Os mapas de anomalias de precipitação para o período de dezembro de 2022 a novembro de 2023 (Figura 11) demonstram significativa variabilidade espacial e temporal nos índices pluviométricos.

Após os meses de dezembro de 2022 e de janeiro a março de 2023, observou-se uma redução gradual da precipitação, com áreas representadas nas cores branco e azul, com maior concentração na sub-bacia sul da BA, exceto no mês de janeiro de 2023, quando a concentração pluviométrica pode ser vista em praticamente toda a bacia, destacando-se a estação de Itacoatiara, com picos de precipitação entre 424 e 580 mm no primeiro trimestre do ano (Gráfico 13).

Nos meses posteriores, especialmente entre agosto e novembro de 2023, os mapas mostram predominância de tons marrons, refletindo uma diminuição acentuada na precipitação e evidenciando o início de um período de seca intensa, como apontam Silva e Fearnside (2023), em grande parte da bacia, principalmente nas porções central e sul.

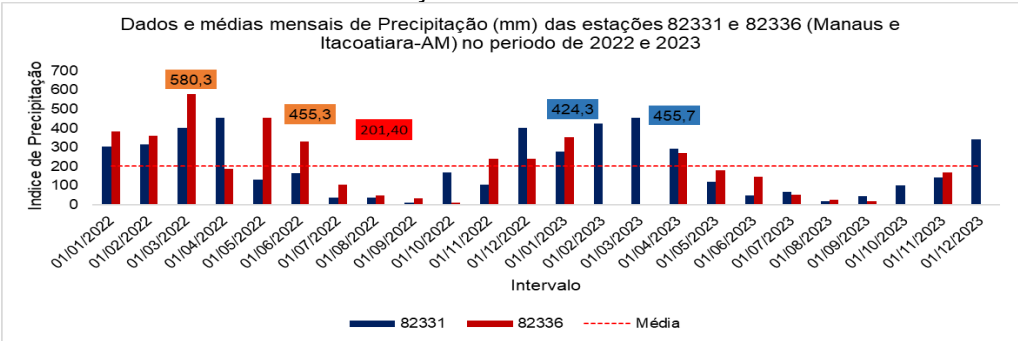
Figura 11: Mapas de anomalias de precipitação de dezembro de 2022 a março de 2023 e de agosto a novembro de 2023





Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados de reanálise ERA5 (ECMWF) referentes ao período analisado

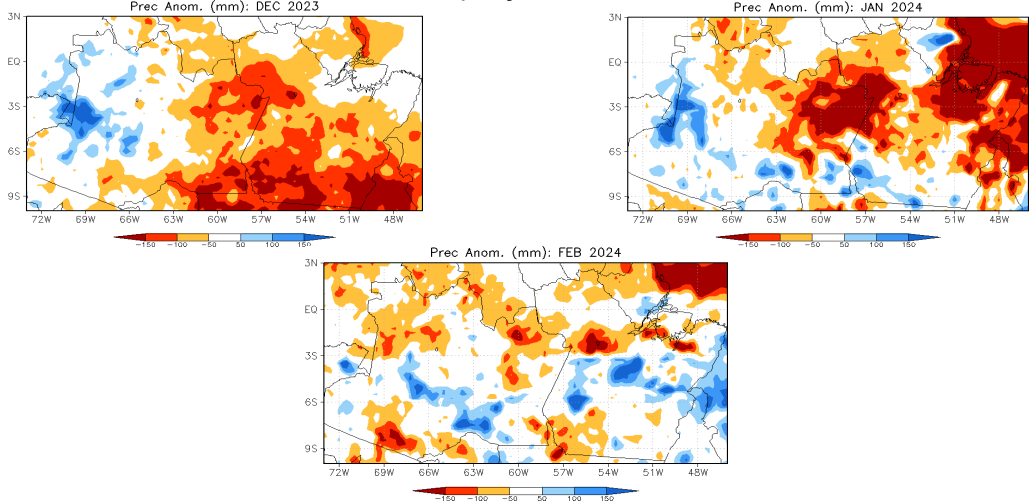
Gráfico 13: Dados e média mensal (bianual) de precipitação entre os anos de 2022 e 2023 nas estações 82336 e 82331



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de reanálise ERA5 (ECMWF) e de dados observacionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

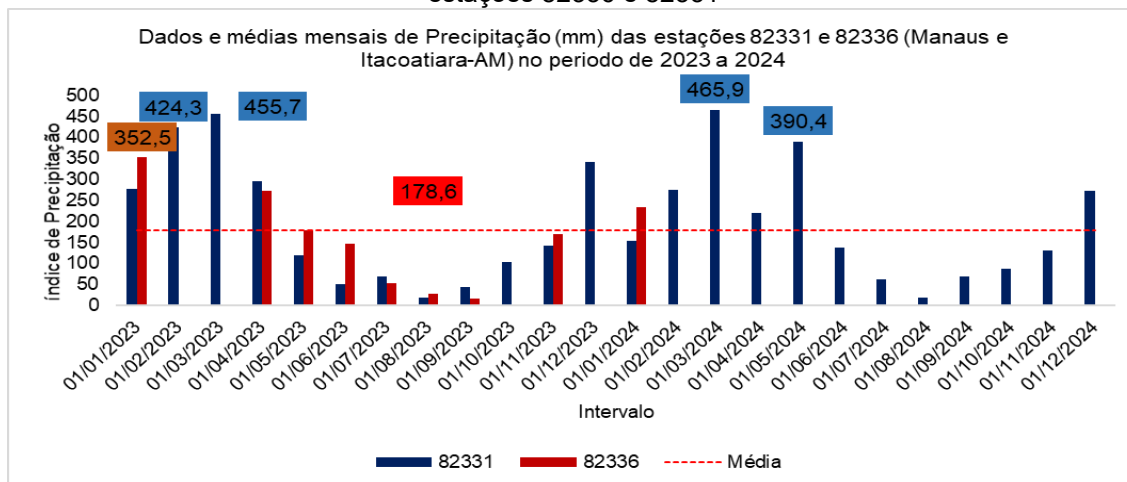
Para dezembro de 2023 e janeiro de 2024, os mapas de anomalias de precipitação (Figura 12) indicam maior concentração dos índices na sub-bacia norte da BA. Em fevereiro de 2024, esses índices passam a se concentrar na porção central da bacia, apresentando picos entre 424 e 465 mm na estação 82331. A estação 82336 (Itacoatiara), a partir de fevereiro de 2024, deixa de apresentar dados. A média de precipitação para o período de 2023/2024 foi de cerca de 178 mm (Figura 14).

Figura 12: Mapas de anomalias de precipitação de dezembro de 2023 a fevereiro de 2024



Fonte: Elaborada pelo autor a partir de dados de reanálise ERA5 (ECMWF)

Gráfico 14: Dados e média mensal (bianual) de precipitação entre os anos de 2023 e 2024 nas estações 82336 e 82331

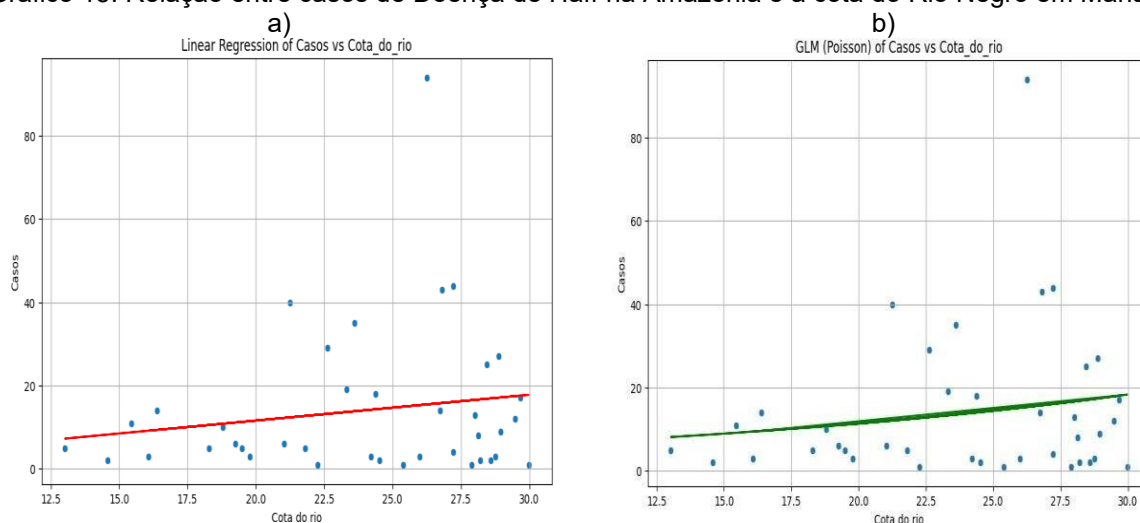


Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de reanálise ERA5 (ECMWF) e de dados observacionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)

4.4 DADOS ESTATÍSTICOS

Os gráficos de dispersão (Gráfico 15 a/b) apresentam a relação entre “Cota do Rio” e “Casos”. A linha de regressão linear (vermelha) e a linha de regressão de Poisson do GLM (verde) são plotadas para mostrar os modelos ajustados. O gráfico de dispersão apresenta os pontos de dados individuais que representam “Cota do Rio” e “Casos”. A linha vermelha representa o ajuste da regressão linear, e a linha verde representa o Modelo Linear Generalizado (GLM) com ajuste de distribuição de Poisson. Observando os resultados da regressão linear, o valor de R^2 é muito baixo (0,027), indicando que “Cota do Rio” explica apenas uma pequena porcentagem da variância em “Casos”. O valor p para “Cota do Rio” (0,315) é maior que o nível de significância típico de 0,05.

Gráfico 15: Relação entre casos de Doença de Haff na Amazônia e a cota do Rio Negro em Manaus



a) regressão linear (linha vermelha)

b) GLM (linha verde)

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados analisados e modelados com Python

Para o Modelo Linear Generalizado (GLM) com distribuição de Poisson, que geralmente é mais apropriado para dados de contagem como “Casos”, os resultados mostram uma relação estatisticamente significativa. O valor “p” para “Cota do Rio” é 0,000, o que é altamente significativo. O coeficiente para “Cota do Rio” é positivo (0,0480), sugerindo que, à medida que “Cota do Rio” aumenta, o número esperado de ‘Casos’ também aumenta.

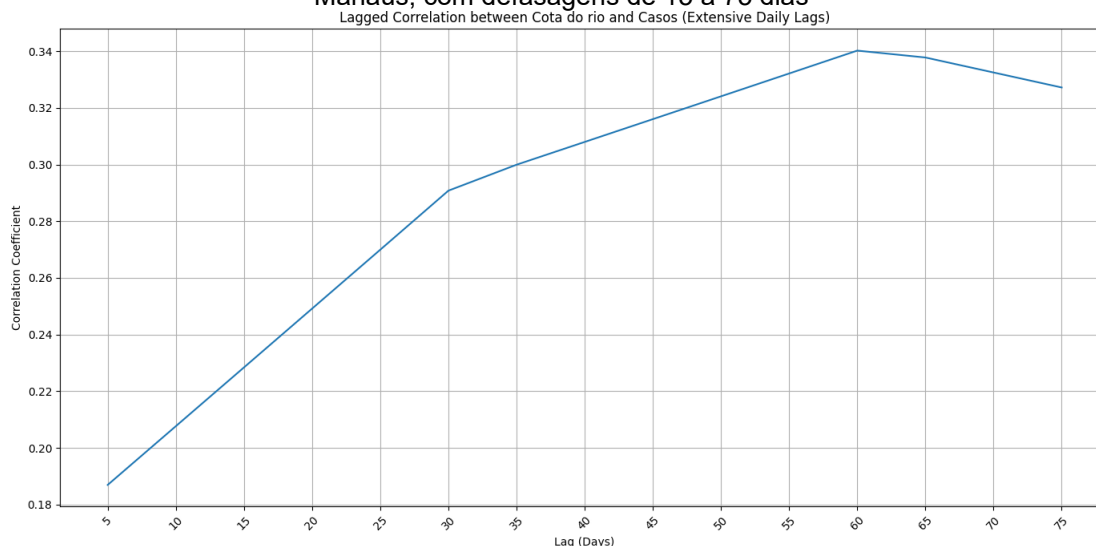
Esse modelo (Poisson) parece capturar uma relação que o modelo linear não captou, o que é esperado, visto que “Casos” são dados de contagem e provavelmente seguem uma distribuição não normal. Em resumo, embora uma relação linear simples não seja evidente, o GLM com distribuição de Poisson sugere que existe uma associação positiva estatisticamente significativa entre “Cota do Rio” e “Casos”, o que significa que níveis mais altos do rio estão associados a um aumento no número de casos.

Uma possível explicação para que os testes de correlação apresentassem esses resultados é o tempo de retardo, ou defasagem, entre as variáveis “Cota do Rio” e “casos de Haff”. Dessa forma, o Gráfico 16 mostra o coeficiente de correlação entre “Cota do Rio” (nível do rio) e “Casos” (casos da doença) para vários intervalos de tempo, com defasagem variando de 5 a 75 dias.

A correlação com defasagem indica ainda que a correlação entre “Cota do Rio” e “Casos” é relativamente baixa em intervalos de tempo curtos, mas aumenta à medida que o intervalo de tempo aumenta, atingindo o pico em torno de 60-65 dias. Isso sugere que há uma associação positiva mais forte entre níveis mais altos do rio

e um aumento nos casos da DH aproximadamente dois meses depois, em comparação com a associação em intervalos de tempo menores ou inexistentes. Essa análise de correlação com defasagem apoia a ideia de que as mudanças no nível do rio podem influenciar o número de casos da doença, mas com um atraso significativo.

Gráfico 16: Correlação entre casos de Doença de Haff na Amazônia e a cota do Rio Negro em Manaus, com defasagens de 15 a 75 dias



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados analisados e modelados com Python

A análise sugere que, embora não haja correlação imediata significativa entre “Cota do Rio” e “Casos”, parece haver uma relação defasada. Especificamente, níveis mais altos do rio parecem estar positivamente correlacionados com um aumento nos casos aproximadamente 60 a 65 dias depois. Isso indica que o nível do rio pode ser um potencial preditor para o número de casos, mas com uma defasagem temporal significativa. Análises adicionais, como a modelagem de séries temporais incorporando essa defasagem, poderiam ser realizadas para construir um modelo preditivo.

4.5 RADIAÇÃO SOLAR

Para a análise dos dados de radiação, foram adotados os mesmos parâmetros e períodos utilizados nos dados de precipitação, entre os anos de 2000 e 2024. Os processos de radiação na Bacia Hidrográfica Amazônica (BHA) apresentam características muito próprias, que podem ser observadas por meio de fenômenos climáticos e ambientais locais, tais como evaporação, evapotranspiração, fotossíntese e aquecimento do solo (Azevedo, 1997).

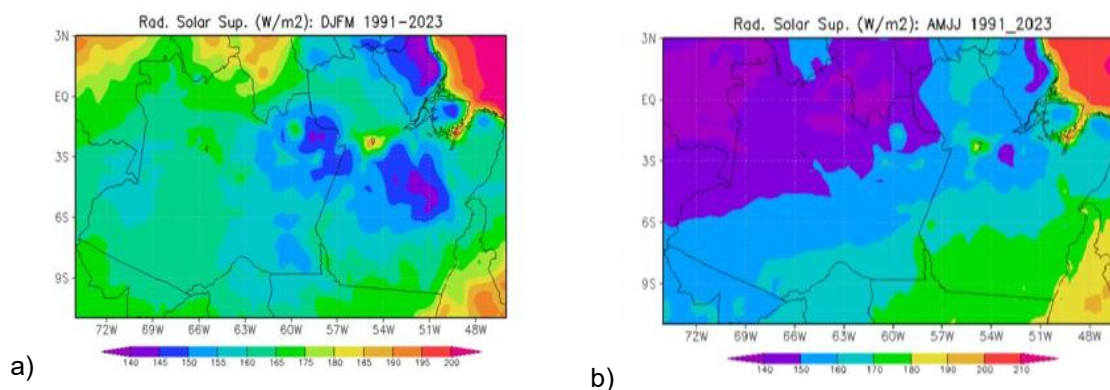
De acordo com Foley *et al.* (2003), a partição da radiação líquida em radiação latente exerce influência direta sobre a dinâmica do ciclo hidrológico, o desenvolvimento da camada limite atmosférica, a variabilidade climática e a formação das precipitações. Além disso, pode impactar os fluxos superficiais, promovendo modificações significativas no regime climático em diferentes regiões. A avaliação dos parâmetros de radiação na BHA, realizada em escalas quadrimestrais para o período de 1991 a 2023 (Figura 13), revela uma sazonalidade bem definida.

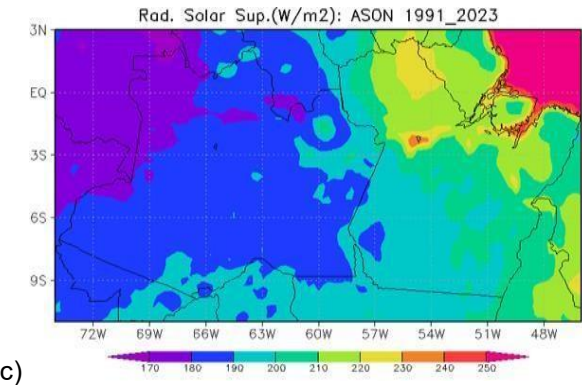
Durante os meses de dezembro a março, observa-se uma redução significativa nos índices de radiação global, com predominância desse padrão na sub-bacia oeste (Figura 13) o que está associado à maior cobertura de nuvens e à intensidade das precipitações nesse período.

Em contraponto, entre agosto e novembro, verifica-se um aumento da radiação global, sobretudo nas sub-bacias norte e central da BA, período em que a redução da nebulosidade e a intensificação da estação seca favorecem maior incidência de energia solar na superfície.

Os resultados sugerem que o regime de radiação solar atua como um modulador fundamental do balanço energético e hídrico na Amazônia, ao controlar a disponibilidade de energia à superfície e regular os fluxos de calor sensível e latente, influenciando diretamente a evapotranspiração, a convecção atmosférica e os padrões de precipitação. Variações na radiação solar, associadas à nebulosidade, aerossóis e mudanças na cobertura da terra, podem alterar o balanço hídrico regional e a dinâmica do ciclo hidrológico amazônico (Marengo, 2014).

Figura 13: Mapas quadrimestrais de radiação solar no período entre 1991 e 2023: a) meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março; b) abril, maio, junho e julho; c) agosto, setembro, outubro e novembro



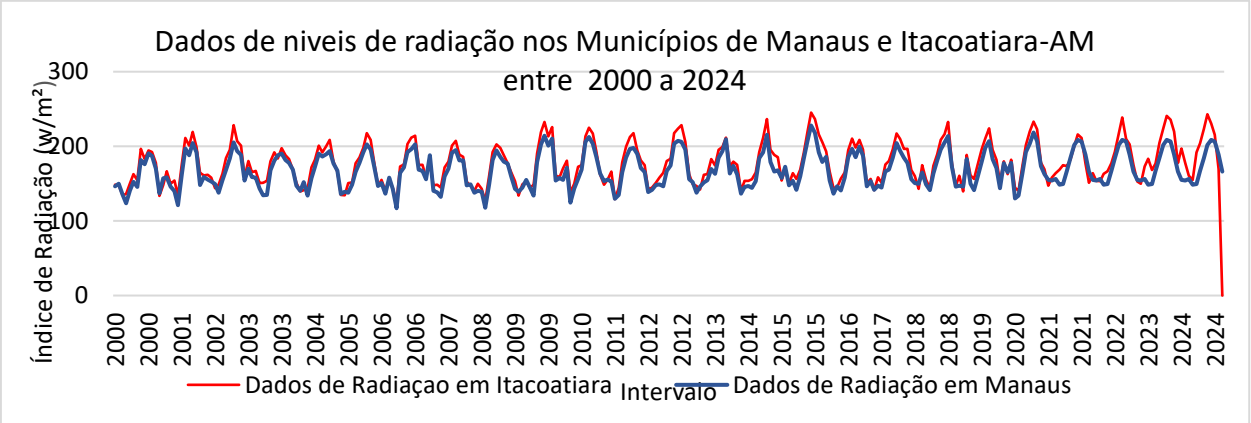


Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados do ERA5/ECMWF e das estações meteorológicas do INMET, referentes ao período de 1991-2023

A radiação solar nos municípios de Manaus e Itacoatiara, no período de 2000 a 2024 (Gráfico 17) apresenta marcada sazonalidade, com valores mais elevados nos meses de menor precipitação e redução durante a estação chuvosa, refletindo o controle climático regional. Esse padrão pode influenciar indiretamente os sistemas aquáticos amazônicos ao modular a temperatura da água, a evaporação e a produtividade primária, especialmente em contextos de baixos níveis fluviométricos.

Tais condições ambientais são frequentemente associadas a alterações físico-químicas da água que podem favorecer a proliferação de organismos produtores de toxinas, hipótese discutida na literatura sobre a Doença de Haff. A similaridade temporal da radiação solar entre os dois municípios sugere que seus efeitos potenciais sobre a ocorrência da doença estão associados à interação com outras variáveis ambientais, como precipitação e cotas dos rios, possivelmente com defasagem temporal.

Gráfico 17: Dados dos níveis de radiação no período entre 2000 e 2024

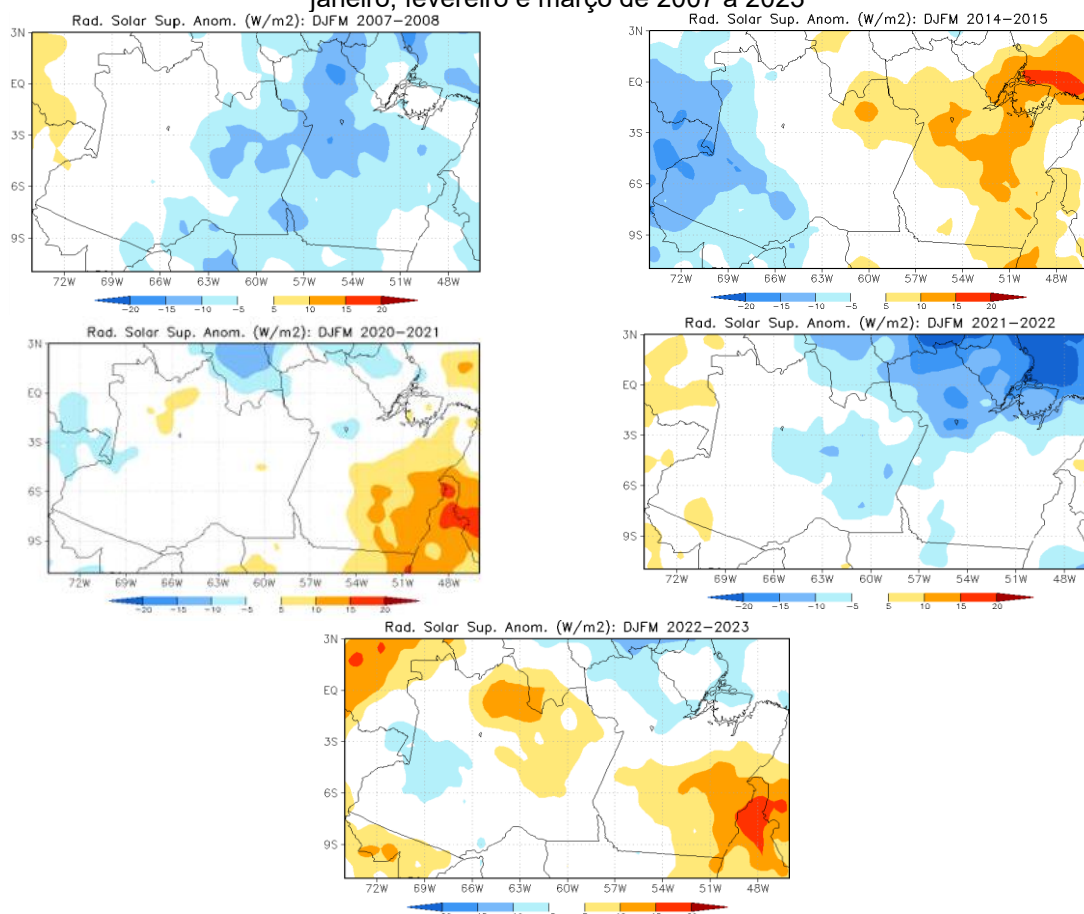


Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados do ERA5/ECMWF e das estações meteorológicas do INMET, referentes ao período de 2000-2024

Os dados e mapas de radiação global do modelo ERA5-Single Level, em períodos anuais e quadrimestrais compreendidos entre os anos de 2007 e 2024, tendo como unidade de medida J/m^{-2} , mostram que, na Figura 14, os mapas quadrimestrais

(dez./jan./fev./mar.) de radiação referentes aos primeiros quadrimestres dos anos de 2007-2008, 2014-2015, 2020-2021, 2021-2022 e 2022-2023 indicam que, ao longo da série temporal analisada, os valores permaneceram predominantemente próximos à média climatológica, especialmente nos períodos que antecederam as notificações da Doença de Haff.

Figura 14: Mapas quadrimestrais de anomalias de radiação referentes aos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março de 2007 a 2023



Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados do ERA5/ECMWF e das estações meteorológicas do INMET, referentes ao período de 2007-2023

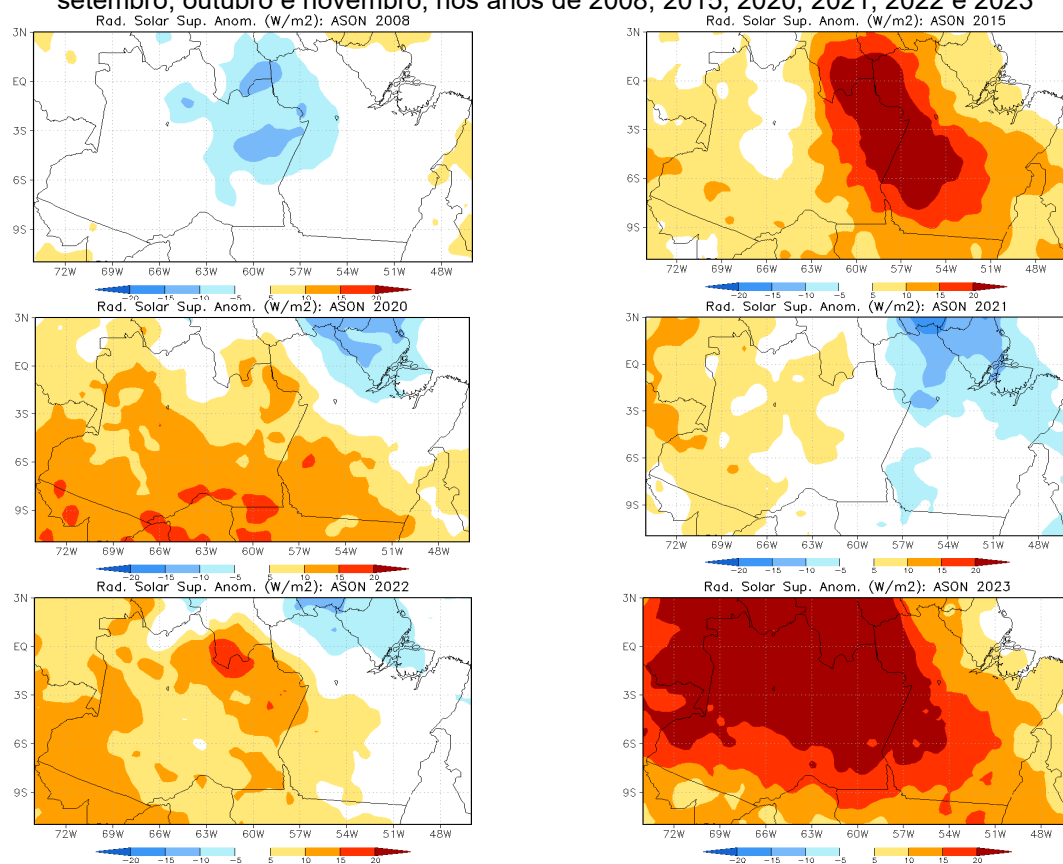
Os mapas climatológicos de radiação solar referentes ao terceiro quadrimestre do período de 2008 a 2023 indicam valores superiores à média climatológica, configurando um padrão que coincide com os intervalos de maior registro de casos de Doença de Haff. A Figura 15 ilustra a distribuição espacial da radiação nos meses de agosto, setembro, outubro e novembro, evidenciando variações significativas nesse período, com destaque para o quadrimestre final do ano de 2023, quando os níveis estavam muito elevados em toda a BA.

As áreas em tons avermelhados indicam valores acima da média climatológica, sugerindo intensificação da radiação nesse período, especialmente em regiões centrais e ocidentais da bacia. Já as áreas em branco correspondem a condições

próximas à normalidade, enquanto os tons em azul claro apontam para anomalias negativas, representando valores abaixo da média.

Essa correspondência espaço-temporal entre anomalias positivas e valores próximos da média de radiação e a concentração de notificações da doença nos municípios mais afetados da Bacia Amazônica sugere uma possível relação entre fatores climáticos como ENOS, ZCAS, ZCIT, precipitação e evapotranspiração; e fatores ambientais, como aumento de áreas úmidas, desflorestamento e a dinâmica da contaminação observada.

Figura 15: Mapas quadrimestrais de anomalias de radiação referentes aos meses de agosto, setembro, outubro e novembro, nos anos de 2008, 2015, 2020, 2021, 2022 e 2023



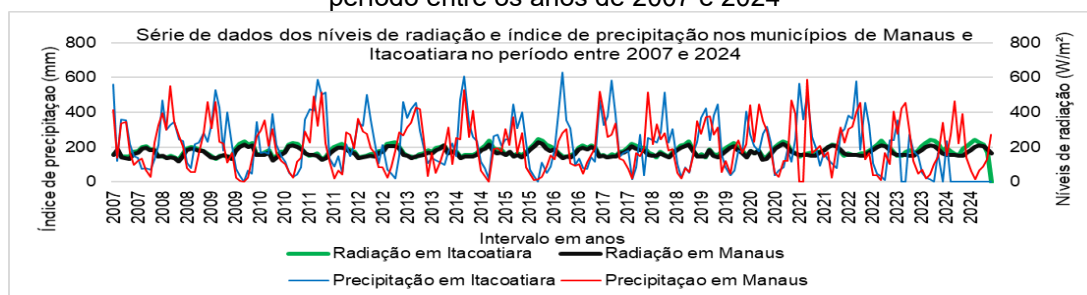
Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados do ERA5/ECMWF e das estações meteorológicas do INMET, referentes ao período de 2008-2023

A série histórica de radiação para a região Amazônica, no período de 2000 a 2024 (Gráfico 18) demonstra uma variação sazonal associada ao regime climático característico da BA. Observa-se que os valores de radiação acompanham o ciclo anual da precipitação, apresentando redução nos períodos chuvosos, devido ao aumento da nebulosidade, e intensificação nos períodos de estiagem, quando a cobertura de nuvens é menos expressiva e a incidência de radiação solar sobre a superfície se torna mais pronunciada.

A associação entre os níveis de radiação (cores azul-escuro para Manaus e azul-claro para Itacoatiara), apresentada no gráfico (Gráfico 18) com as anomalias de precipitação, representadas nas cores verde (Itacoatiara) e vermelha (Manaus), permite identificar relações inversamente proporcionais entre os dois parâmetros.

Essa interação sugere que a dinâmica da radiação e da precipitação nos municípios estudados está interligada, refletindo o balanço de energia e umidade da atmosfera amazônica. Além disso, tais variações possuem implicações diretas sobre processos locais, como a evapotranspiração, a formação de nuvens convectivas e a variabilidade interanual das cheias e secas na região.

Gráfico 18: Níveis de radiação e índices de precipitação nos municípios de Manaus e Itacoatiara no período entre os anos de 2007 e 2024



Fonte: Elaborado pelo autor com base em dados do ERA5/ECMWF e das estações meteorológicas do INMET, referentes ao período de 2007-2024

Análises preliminares indicam que, devido aos elevados índices de nebulosidade e precipitação na região estudada, a avaliação desse parâmetro pode ser parcialmente comprometida. No entanto, não se deve descartá-lo como um possível fator contribuinte para o aumento da incidência da doença.

5 PRODUTO(S) DESENVOLVIDO(S)

5.1 SISTEMAS CLIMÁTICOS/AMBIENTAIS INTEGRADOS

Para melhor compreensão das possíveis interações entre as condições atmosféricas, hidrológicas e ecológicas que influenciam a ocorrência da Doença de Haff na região amazônica, elaborou-se o Sistema de Indicadores Climáticos/Ambientais (SCAI).

O SCAI é uma integração entre as variáveis observadas em diferentes escalas de atuação, podendo ser interpretado como uma analogia da estrutura hierárquica de fatores climáticos e ambientais que realizam interação entre os diversos sistemas que podem contribuir para a ocorrência da DH na Amazônia, relacionando sistemas de macroescala (climáticos globais), mesoescala (hidrológicos regionais) e microescala (ecológicos e biológicos), conforme apresentado no Quadro 1.

O quadro sintetiza a abordagem integrada adotada no estudo, estruturando os fatores climáticos e ambientais associados à ocorrência da Doença de Haff em diferentes escalas espaciais. Em macroescala, destacam-se os principais sistemas climáticos atuantes na Amazônia, como o El Niño-Oscilação Sul (ENOS), a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Atlântico Tropical, a Alta da Bolívia (AB), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), os quais modulam a variabilidade da precipitação e da temperatura do ar.

A presença de anomalias positivas de pluviosidade, superiores a 2.200 mm, associadas a valores elevados de temperatura máxima do ar na superfície ($>33,7^{\circ}\text{C}$ no mês de janeiro, com média de $23,5^{\circ}\text{C}$), sugere um contexto climático favorável a alterações hidrológicas e ambientais relevantes.

Em mesoescala, o enquadramento da fase do ciclo hidrológico (enchente, cheia e vazante), da cota do rio em Manaus e do número de dias de inundação permite caracterizar a dinâmica fluvial e o grau de conectividade entre rios, lagos e áreas alagáveis, elementos fundamentais para a compreensão da dispersão espacial dos eventos.

Por fim, em microescala, a identificação do corpo hídrico de origem do pescado e das espécies mais frequentemente associadas aos casos (pacu, tambaqui e pirapitinga) possibilita integrar variáveis ambientais e biológicas, reforçando o caráter

multiescalar e sistêmico da análise e evidenciando a interação entre clima, hidrologia e práticas alimentares na ocorrência da doença.

Quadro 1: Sistemas Climáticos/Ambientais Integrados para avaliação da ocorrência da Doença de Haff na Amazônia

Sistemas Climáticos/Ambientais Integrados	A nível Climático	Macroescala	Sistemas climáticos atuantes: (ENOS / TSM Atlântico Tropical / AB / ZCAS / ZCIT)
			Anomalia Positiva de Pluviosidade (acima de 2.200 mm)
			Níveis/índices de Temperatura máxima da superfície do ar no contexto Amazônico (acima de 33,7 °C mês de janeiro, média de 23,5 °C) (Uliana, 2025)
	A nível Ambiental	Mesoescala	Fase do ciclo hidrológico (enchendo / cheio / vazando)
			Cota do rio em Manaus (< 27,5 m; de 27,5 m a 29,0 m; >29,0 m)
			Número de dias de inundação (<60; de 60 a 90; >90)
		Microescala	Rio ou lago de origem do pescado
			Espécie do Peixe (pacu / tambaqui / pirapitinga)

Fonte: Elaborado pelo autor

5.2 PRODUTOS TÉCNICOS TECNOLÓGICOS (PTT)

Com o objetivo de descrever as dinâmicas sazonais da Doença de Haff e analisar de que maneira as variáveis climáticas e ambientais podem atuar como fatores influenciadores nos processos de contaminação, os Produtos Técnico-Tecnológicos (PTT), resultantes da Dissertação de Mestrado Profissional em Clima e Ambiente do IFSC – Campus Florianópolis, consistirão na elaboração de um relatório técnico intitulado Relatório Técnico sobre as Relações entre Clima, Ambiente e a Doença de Haff na Amazônia, a ser encaminhado à Secretaria de Vigilância em Saúde e Ambiente do Ministério da Saúde (SVSA) e às Secretarias Estaduais de Saúde dos estados do Amazonas (AM), Amapá (AP) e Pará (PA).

Também fazem parte dos produtos:

- Mapas e representações cartográficas elaborados com o uso do software QGIS, utilizados ao longo deste trabalho.
- O quadro dos Sistemas Climáticos/Ambientais Integrados, que constitui um quadro analítico de integração entre as variáveis observadas em diferentes escalas de atuação, podendo ser interpretado como uma analogia da estrutura hierárquica de fatores climáticos e ambientais que realizam uma interação entre os diversos sistemas que podem contribuir para a ocorrência da DH na Amazônia.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da Doença de Haff é limitada pela escassez e descontinuidade dos dados epidemiológicos disponíveis, caracterizadas por subnotificação, inconsistências nos registros e ausência de séries temporais completas e padronizadas. Essas limitações restringem a aplicação de métodos estatísticos mais robustos e dificultam a identificação precisa de padrões espaço-temporais e de associações causais com variáveis ambientais.

Nesse contexto, os resultados apresentados devem ser interpretados com cautela, ressaltando-se a necessidade de fortalecimento dos sistemas de vigilância em saúde e da ampliação de bases de dados integradas que permitam avaliações mais consistentes da dinâmica da doença, especialmente em regiões amazônicas.

Para dar sentido às hipóteses formuladas e aos objetivos geral e específicos delineados neste estudo, conclui-se que os sistemas climáticos e ambientais exercem influência significativa sobre o aumento dos casos da Doença de Haff na região da Bacia Amazônica.

Verificou-se que a ocorrência da contaminação apresenta forte associação com as cotas dos rios e com o número de dias de inundação em áreas alagáveis, especialmente durante períodos de elevada pluviosidade. Observou-se que, nos anos em que os picos de precipitação ultrapassam 400 mm e as médias mensais superam 200 mm, há uma tendência de manutenção dos níveis das cotas dos portos de Manaus entre 27 e 30 metros por mais de 61 dias, e que esses períodos coincidem com o aumento da incidência da Doença de Haff, uma vez que os índices pluviométricos regulam diretamente os níveis hidrométricos dos portos da região.

Esse padrão está também condicionado aos índices de precipitação acumulados nos meses que antecedem o período de maior ocorrência da doença, geralmente compreendido entre julho e setembro. Os resultados indicam que a dinâmica hidrológica amazônica exerce papel determinante na distribuição espacial e temporal da Doença de Haff. A relação observada entre as cotas fluviais e os registros epidemiológicos sugere que períodos prolongados de cheia criam condições ambientais propícias à ocorrência da enfermidade.

O Gráfico 8 evidencia uma associação temporal significativa entre os episódios de La Niña e o aumento dos casos de Doença de Haff na Amazônia entre 2008 e 2024. Essa relação reforça a importância de considerar o ENOS como um modulador

climático capaz de influenciar as condições ambientais que favorecem a ocorrência da doença.

Assim como apresentado no Quadro 1, em que o SCAI evidencia esse fenômeno e outros que podem interagir com o clima e o ambiente na Bacia Amazônica, supõe-se que nessas condições se desenvolva a ficotoxina – ainda desconhecida – responsável pela contaminação humana associada à DH.

Em síntese, os dados sustentam a hipótese de que as anomalias climáticas e ambientais exercem influência na área de estudo e na dinâmica epidemiológica da DH, por meio da modificação de parâmetros hidrológicos e ecológicos locais.

Para pesquisas futuras, recomenda-se:

- a) realizar análises adicionais, como a modelagem de séries temporais incorporando a defasagem observada, com o objetivo de construir um modelo preditivo;
- b) ampliar a análise de eventos climáticos extremos e não extremos;
- c) incorporar um conjunto mais abrangente de dados ambientais e climatológicos, com ênfase nos hidrometeorológicos;
- d) adotar metodologias de investigação mais robustas, incluindo pesquisas de campo;
- e) aprimorar a qualidade e a sistematização das notificações da Doença de Haff disponibilizadas pelo Ministério da Saúde.

A adoção dessas e de outras medidas poderá contribuir para o fortalecimento do conhecimento científico sobre a Doença de Haff e para a formulação de estratégias de saúde pública voltadas à sua prevenção e controle na região amazônica.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Panorama das águas**: região hidrográfica amazônica. Brasília: ANA, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/panorama-das-aguas/regioes-hidrograficas>. Acesso em: 12 mar. 2026.
- ALCALA, A. C. *et al.* Morte humana devido à ingestão do caranguejo *Demania reynaudii*, que continha uma toxina semelhante à palitoxina. **Toxicon**, v. 26, n. 1, p. 105-107, 1988.
- AMBRIZZI, T. **El Niño**: Oscilação Sul e teleconexões atmosféricas no hemisfério austral. 2003. Tese (Livre-docência) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- ANDRADE, L. da S. **Variabilidade decadal da Zona de Convergência Intertropical e sua influência na pluviosidade da região Norte do Brasil**. 2007. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007. Disponível em: <https://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/855>. Acesso em: 11 mar. 2026.
- ARAÚJO, J. *et al.* Clinical Menagement of Haff Syndrome. **Health Science**, v. 2, n. 18, p. 1-6, 2022.
- AZEVEDO, R. G. de. **Influência do desmatamento no balanço de radiação e nos fluxos de calor sensível e calor latente em Ji-Paraná, Rondônia**. 1997. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.
- BALBINOT, R. *et al.* O papel da floresta no ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. **Revista Ambiência**, v. 4, n. 1, p. 131-149, 2008.
- BANDEIRA, A. C. *et al.* Evidências clínicas e laboratoriais da Doença de Haff – série de casos de um surto em Salvador, Brasil, de dezembro de 2016 a abril de 2017. **Euro Surveill**, v. 22, n. 24, 2017.
- BERLIM, R. Haff disease in Sweden. **Acta Medica Scandinavica**, v. 129, n. 6, p. 560-572, 1948.
- BITTENCOURT, M. M.; AMADIO, S. A. Proposta para identificação rápida dos períodos hidrológicos em áreas de várzea do rio Solimões-Amazonas nas proximidades de Manaus. **Acta Amazonica**, v. 37, p. 303-308, 2007.
- BOMVENTI, T. N.; WAINER, I. E. K. C.; TASCHETTO, A. S. Relação entre radiação de onda longa, precipitação e temperatura da superfície do mar no oceano Atlântico Tropical. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, p. 513-524, 2006.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Rede Hidrometeorológica Amazônia**. 2018. Disponível em: http://ana.goc.br/gestaorecursos_hidricos/hidrologicas/hidrometeorologia/rhmazonica/rede_hidrometeorologiaamazonica.asp. Acesso em: 10 mai. 2024.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Nota Técnica nº 52/2021-CGZV/DEIDT/SVS/MS**: orienta a notificação e investigação integrada de caso compatível com a Doença de Haff. Brasília, 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde e Ambiente. **Situação epidemiológica da Doença de Haff no Brasil**. Boletim Epidemiológico, Brasília, 2023.

Brasil. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde e Ambiente. **Boletins Epidemiológicos**: edições 2024. Brasília: Ministério da Saúde, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins/epidemiologicos/edicoes/2024>. Acesso em: 12 mar. 2026.

CALLÈDE, J. *et al.* L'Amazone à Obidos (Brésil): étude statistique des débits et bilan hydrologique. **Hydrological Sciences Journal**, v. 47, n. 2, p. 321-333, 2002.

CAMARGO, S. *et al.* Tropical cyclone genesis potential index in climate models. **Tellus A**, v. 59, n. 4, p. 428-443, 2007.

CARDOSO, C. W. *et al.* Haff disease in Salvador, Brazil, 2016-2021. **The Lancet Regional Health – Americas**, v. 5, 2021.

CASTRO, E. C. *et al.* Balanço Hídrico na Bacia Amazônica Brasileira (Water Balance in the Brazilian Amazon Basin). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 6, p. 1926-1940, 2018.

CHAN, T. Y. K. The emergence and epidemiology of Haff disease in China. **Toxins**, v. 8, n. 12, p. 359, 2016.

COMINGS, D. E.; ROSENFELD, H. Idiopathic paroxysmal myoglobinuria. **Annals of Internal Medicine**, v. 55, p. 647-661, 1961.

COMITÊ NACIONAL DE ZONAS ÚMIDAS. **Recomendação CNZU nº 7, de 11 de junho de 2015**: definição de áreas úmidas. Brasília: MMA, 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biomas-e-ecossistemas/areas-umidas>. Acesso em: 12 mar. 2026.

CORREIA, F. W. S. *et al.* Balanço de umidade na Amazônia e sua sensibilidade às mudanças na cobertura vegetal. **Ciência e Cultura**, v. 59, n. 3, p. 39-43, 2007.

CUNHA, C. N. da; PIEDADE, M. T. F.; JUNK, W. J. (org.). **Classificação e delineamento das áreas úmidas brasileiras e de seus macrohabitats**. Cuiabá: EdUFMT, 2013.

DA SILVA LESS, D. F.; DA CUNHA, A. C. Relação entre a precipitação, temperatura e a pCO₂ na foz do Rio Amazonas. In: **Meio Ambiente, Sustentabilidade e Tecnologia: recursos hídricos**, v. 5. Ponta Grossa: Atena Editora, 2021. p. 29-40.

ECMWF. **ERA5 Reanalysis Data**. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Disponível em: <https://www.ecmwf.int>. Acesso em: 12 mar. 2026.

ELLWANGER, J. H. *et al.* Beyond diversity loss and climate change: impacts of Amazon deforestation on infectious diseases and public health. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 92, n. 1, e20191375, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aabc/a/fRVhxyPq4NLCsKTZPJmzV8J/>. Acesso em: 11 mar. 2026.

FASSONI-ANDRADE, A. *et al.* **Hidrologia da Amazônia vista do espaço**: avanços científicos e desafios futuros. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRHidro), 2023. 224 p. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=13087>. Acesso em: 11 mar. 2026.

FENG, G. *et al.* Doença de Haff complicada por falência de múltiplos órgãos após ingestão de lagostim: estudo de caso. **Revista brasileira de terapia intensiva**, v. 26, n. 4, p. 407-409, 2014.

FERREIRA, N. S. Zona de convergência intertropical. **Climanálise**, edição especial – comemoração dos 10 anos, Cachoeira Paulista: CPTEC/INPE, 1996. Disponível em: http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/zcit_1.html. Acesso em: 11 mar. 2026.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Clima da Amazônia. **Climanálise**, v. 10, 1996.

FLEISCHMANN, A. S. *et al.* De inundações extremas a terras caídas: mapeando desastres no Rio Amazonas através de satélites e modelagem hidrológica. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE DESASTRES, 3., 2023, Niterói. **Eventos extremos e sociedade sob a perspectiva das mudanças climáticas**. Porto Alegre: **ABRHidro**, 2023., 2023.

FOLEY, J. A. *et al.* Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect Earth's climate. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 1, n. 1, p. 38-44, 2003.

FONSECA, F. R. **Impacto da variabilidade hidro-climática e ambiental sobre a incidência da malária no Estado do Amazonas, com foco na diferença de cor das águas fluviais**. 2022. 149 f. (Tese Doutorado, Clima e Ambiente) – Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia/Universidade do Estado do Amazonas.

GOMES, M. S. Análise dos padrões atmosféricos associados a eventos secos na bacia Amazônia. **CEP**, v. 12, p. 010, 2018.

GONÇALVES, W. A.; SILVA DIAS, M. A. F.; MACHADO, L. A. T. Influence of the South American Monsoon System on the Amazon Basin Hydrology. **Atmospheric Research**, v. 220, p. 200-210, 2019.

GOUVEIA, N. A. *et al.* The salinity structure of the Amazon River plume drives spatiotemporal variation of oceanic primary productivity. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences**, v. 124, n. 1, p. 147-165, 2019.

GUSMÃO, A. M. Alta da Bolívia. **Revista climanálise**, Cachoeira paulista, ed. Especial, p. 143-146, 1996.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Portal de Mapas do IBGE**. Rio de Janeiro: IBGE, 2020. Disponível em: <https://portaldemapas.ibge.gov.br>. Acesso em: 12 mar. 2026.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)**. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br>. Acesso em: 12 mar. 2026.

JUNK, W. J. *et al.* A classification of major naturally occurring Amazonian lowland wetlands. **Wetlands**, v. 31, n. 4, p. 623-640, 2011.

JUNK, W.; BAYLEY, P. B.; SPARKS, R. E. The flood pulse concept in river-floodplain systems. **Canadian special publication of fisheries and aquatic sciences**, v. 106, n. 1, p. 110-127, 1989.

KHAN, F. Y. Rhabdomyolysis: a review of the literature. **Netherlands Journal of Medicine**, v. 67, p. 272-283, 2009.

KOVATS, R. S. El Niño and human health. **Bulletin of the World Health Organization**, v. 78, p. 1127-1135, 2000.

LEAL, P. R.; GUIMARÃES, R. J. de P. S. e; KAMPEL, M. Associations between environmental and sociodemographic data and hepatitis- A transmission in Pará state (Brazil). **GeoHealth**, v. 5, n. 5, p. e2020GH000327, 2021.

LEITE-FILHO, A. T. *et al.* Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 2591, 2021.

LIMBERGER, L.; SILVA, M. E. S. Precipitação e vazão mensal na Amazônia. **Revista Geonorte**, Manaus, v. 1, pág. 1-15, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufam.edu.br/index.php/revista-geonorte/article/download/2407/2226/0>. Acesso em: 12 mar. 2026.

LUCENA, D. B. **Impacto dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima do Nordeste do Brasil**. 2008. 229 f. (Tese Doutorado, Meteorologia) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

LUDUPOVA, E. Y. *et al.* A case of haff disease (alimentary toxic paroxysmal myoglobinuria) in Buryat Republic in villages of Baikal Region near the Kotokel. Byull. **VSNC SO RAMN = Acta Biomedica Scientifica (East Siberian Biomedical Journal)**, v. 3, n. 67, p. 92-94, 2009.

MARENGO, J. A. Interações entre a floresta Amazônica e o clima regional e global. **Estudos Avançados**, v. 30, n. 86, p. 71-86, 2016.

MARENGO, J. A. The characteristics and variability of the atmospheric water balance in the Amazon Basin: spatial and temporal variability. **Climate Dynamics**, v. 24, n. 1-2, p. 11-22, 2005.

MARENGO, J. A.; ESPINZA, L. C. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 3, p. 1033-1050, 2016.

MARENGO, J. A. *et al.* The role of the Amazon Basin moisture in the atmospheric branch of the hydrological cycle: a Lagrangian analysis. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 18, p. 2577-2598, 2014.

MARENGO, J. A. *et al.* Variabilidade e mudanças climáticas na Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 2, p. 163-172, 2018.

MARTINELLI, L. A.; FILOSO, S. Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: environmental and social challenges. **Ecological Applications**, v. 18, n. 4, p. 885-898, 2008.

MARTINS, A. da C. **Fatores climáticos e sistemas meteorológicos que atuam sobre o Brasil-uma revisão bibliográfica**. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Meteorologia, Departamento de Ciências Atmosféricas e Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.

MATOS, A. J. S. *et al.* **Sistema de Alerta Hidrológico do Amazonas**: relatório técnico de operação do ano de 2021: relatório de atividades, Departamento de Hidrologia. Manaus: CPRM, 2021. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22533>. Acesso em: 12 mar. 2026.

MELACK, J. M. *et al.* Floodplain ecosystem processes. *In*: KELLER, M. *et al.* (org.). **Amazonia and global change**. Washington: American Geophysical Union, 2009.

MELLO, J. A. N. de; BARROS, W. G. Enchentes e vazantes do Rio Negro medidas no porto de Manaus, Amazonas. **Acta Amazonica**, v. 31, n. 2, p. 331-331, 2001.

MEYER, L. **Die deutsche Landwirtschaft während der Inflation und zu Beginn der Deflation**. Tübingen: Mohr, 1924.

MOLION, L. C. B. A Amazônia e o clima do Brasil. **Revista USP**, n. 67, p. 26-35, 2005.

MONTE, B. E. O. *et al.* Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 152-167, 2015.

MUZA, M. N.; CARVALHO, L. M. V. **Variabilidade intrasazonal e interanual dos eventos extremos de precipitação e seca no sul e sudeste do Brasil durante o verão austral (2005)**. 2006. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001502764>. Acesso em: 12 mar. 2026.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Climate Prediction Center**. ENSO: El Niño/Southern Oscillation. Disponível em: <https://www.noaa.gov>. Acesso em: 12 mar. 2026.

OKANO, H. *et al.* Rhabdomyolysis and myocardial damage induced by palytoxin, a toxin of blue humphead parrotfish. **Internal medicine**, v. 37, n. 3, p. 330-333, 1998.

OLIVEIRA, S. M. **Estudo das características da Zona de Convergência Intertropical sobre o Atlântico Equatorial e sua influência nas chuvas da região Norte do Brasil**. 2019. 116 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

OMETTO, J. C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981.

ONUMA, Y. *et al.* Identification of putative palytoxin as the cause of clupeotoxism. **Toxicon**, v. 37, n. 1, p. 55-65, 1999.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001076541>. Acesso em: 11 mar. 2026.

PEREIRA, J. C. M. **Importância e Significado das Cidades Médias na Amazônia: uma abordagem a partir de Santarém-PA**. 2004. 139 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado, Planejamento do Desenvolvimento) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém.

PIEDEDE, M. T. F.; SCHÖNGART, J.; JUNK, W. J. O manejo sustentável das áreas alagáveis da Amazônia Central. **Uakari**, v. 1, n. 1, p. 29-38, 2005.

PORTO DE MANAUS. **Nível do Rio Negro**. [s.d.]. Disponível em: <https://portodemanaus.com.br/nivel-do-rio-negro>. Acesso em: 19 abr. 2024.

PROA MANAUS. **Nível dos rios**. [s.d.]. Disponível em: <https://proamana.com.br/servicos-proa/nivel-dos-rios>. Acesso em: 19 abr. 2024.

QUADRO, M. F. L. de. **Estudo de vórtices ciclônicos de mesoescala associados à Zona de Convergência do Atlântico Sul**. 2012. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em:

https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/14/14133/tde-06062012-115400/publico/Tese_Mario_Quadro_2012_correcoes-versao_pdf.pdf. Acesso em: 11 mar. 2026.

RAMOS, V.; VASCONCELOS, V. Palytoxin and analogs: biological and ecological effects. **Marine Drugs**, v. 8, p. 2021-2037, 2010

RIZZOTTO, M. L. F. *et al.* Saúde única: um conceito ambíguo sob debate. **Saúde em Debate**, v. 48, 2025.

ROCHA, V. M. *et al.* Reciclagem de precipitação na bacia amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 3, p. 387-398, 2017.

ROSSO, F. V. **Variabilidades decadais a multidecadais do sistema de Monção da América do Sul**: um estudo observacional e estatístico. 2021. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/26762/TES_PPGMETERELOGISTA_2021_ROSSO_FLAVIA.pdf. Acesso em: 11 mar. 2026.

SAMPAIO, G. *et al.* Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. **Geophysical Research Letters**, v. 34, 2007.

SANTOS, M. C. dos *et al.* Outbreak of Haff disease in the Brazilian Amazon. **Revista Panamericana de Salud Pública**, v. 26, p. 469-470, 2009.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). **1º Boletim Hidrológico da Bacia do Amazonas**. Manaus: SGB, 7 jan. 2025. Disponível em: https://realtime1.com.br/wp-content/uploads/2025/01/20250107_15-20250107-151222.pdf. Acesso em: 12 mar. 2026.

SHUKLA, J.; NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J. Amazon deforestation and climate change. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 7, 2009.

SILVA, M. V. **Associação da variabilidade climática dos oceanos com os níveis dos rios da Amazônia**: uma análise a partir de dados altimétricos. 2017. Dissertação (Mestrado em Clima e Ambiente) – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia; Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2017. Disponível em: https://lreferencia.info/vufind/Record/BR_fa8b1e8d9f5945e146ce49ce844911ac/Description. Acesso em: 11 mar. 2026.

SILVA, R. A. **Padrões de variabilidade multiescalar na temperatura da superfície do mar no Atlântico tropical e norte e seus efeitos nas chuvas da América do Sul**. 2015. Tese (Doutorado) – INPA/UEA, Manaus, 2015.

SILVA, R. A.; FEARNside, P. M. A seca de 2023 na Amazônia terá muito estrago pela frente. **Amazônia Real**, Manaus, 26 out. 2023. Disponível em: https://philip.inpa.gov.br/publ_livres/2023/Silva_%26_Fearnside-2023-A_seca_de_2023-Amazonia_Real-26-10-23.pdf. Acesso em: 11 mar. 2026.

SILVEIRA, L. G. T. da *et al.* Reciclagem de precipitação e desflorestamento na Amazônia: um estudo de modelagem numérica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 3, p. 417-432, 2017.

SISTEMA DE REFERÊNCIA GEODÉSICO PARA AS AMÉRICAS. **SIRGAS 2000**. 2000. Disponível em: <http://www.sirgas.org>. Acesso em: 12 mar. 2026.

SORRIBAS, M. V. **Modelo de rastreamento hidrológico**: um estudo das águas da Bacia Amazônica. 2016. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/157585>. Acesso em: 11 mar. 2026.

SOUZA, M. F. **Análise das relações entre elementos climatológicos, focos de Aedes sp. e casos de dengue no estado de Santa Catarina**. 2025. Dissertação (Mestrado em Clima e Ambiente) – Instituto Federal de Santa Catarina.

TANIYAMA, S. *et al.* Occurrence of a food poisoning incident by palytoxin from a serranid *Epinephelus* sp. in Japan. **Journal of Natural Toxins**, v. 11, n. 4, p. 277-282, 2002.

TEIXEIRA, C. V.; SANO, E. E. Delimitação de áreas de várzea amazônica através do método de segmentação de imagens. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2009. p. 7205-7210. Disponível em: <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.14.16.11/doc/7205-7210.pdf>. Acesso em: 11 mar. 2026.

TOLESANI JÚNIOR, O. *et al.* Haff disease associated with the ingestion of freshwater fish. **Revista Brasileira de Terapia Intensiva**, v. 25, p. 348-351, 2013.

ULIANA, E. M. Melhoria da acurácia dos dados de temperatura do ar da reanálise ERA5 utilizando redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 18, n. 3, p. 2262-2277, 2025.

WU, Y. *et al.* Surveillance for rhabdomyolysis after the consumption of crayfish in Wuhan, China, 2016-2022. **Frontiers in Nutrition**, v. 11, 2024.

YOSHIMINE, K. *et al.* Food poisoning caused by parrotfish. **Journal of the Japanese Society of Internal Medicine**, 2001.

ZU JEDDELOH, B. Haffkrankheit. *In*: **Ergebnisse der Inneren Medizin und Kinderheilkunde**. Berlin: Springer, 1939. v. 57, p. 138-182. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-90686-2_2. Acesso em: 11 mar. 2026.